

**TÉCNICO en  
ELECTRÓNICA**

CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y PRÁCTICA PROFESIONAL

**3****MÁQUINAS  
ELÉCTRICAS**

PRINCIPIOS ELECTROMAGNÉTICOS QUE GOBIERNAN  
LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS, DETALLE DE SUS PARTES  
Y CONSTRUCCIÓN. EJEMPLOS REALES,  
USOS Y APLICACIONES

**Autor:** Federico Salguero

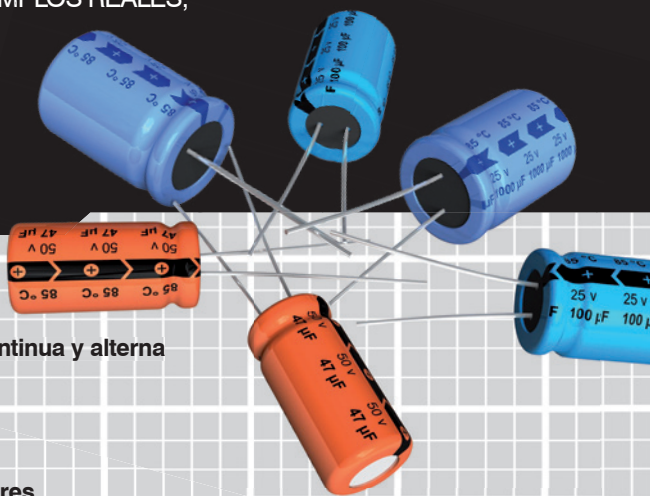
Circuitos magnéticos

Máquinas de corriente continua y alterna

Motores paso a paso

Circuitos de aplicación

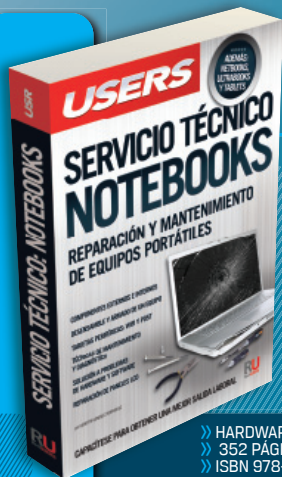
Introducción a servomotores



# CONÉCTESE CON LOS MEJORES LIBROS DE COMPUTACIÓN

LLEGAMOS A TODO EL MUNDO  
VÍA **>>OCA\*** Y **RHL\*\***  
[usershop.redusers.com](http://usershop.redusers.com)  
[usershop@redusers.com](mailto:usershop@redusers.com)  
**+54 (011) 4110-8700**

SÓLO VÁLIDO EN LA REPÚBLICA ARGENTINA // \*\* VÁLIDO EN TODO EL MUNDO EXCEPTO ARGENTINA



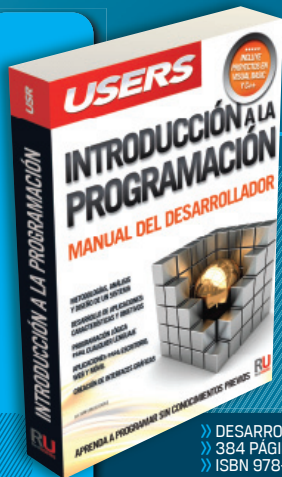
CAPACÍTESE  
PARA OBTENER  
UNA MEJOR  
SALIDA LABORAL

» HARDWARE / MOBILE  
 » 352 PÁGINAS  
 » ISBN 978-987-1857-68-5



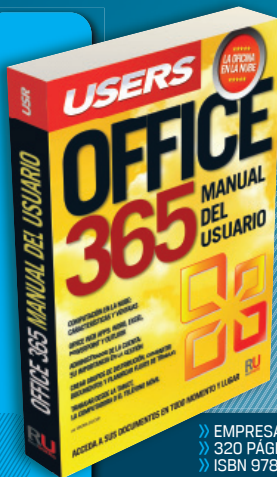
ALCANZAR  
RENDIMIENTOS  
INCREÍBLES  
EN SU PC

» HARDWARE  
 » 320 PÁGINAS  
 » ISBN 978-987-1857-30-2



APRENDA A  
PROGRAMAR SIN  
CONOCIMIENTOS  
PREVIOS

» DESARROLLO  
 » 384 PÁGINAS  
 » ISBN 978-987-1857-69-2



ACCEDA A SUS  
DOCUMENTOS EN  
TODO MOMENTO  
Y LUGAR.

» EMPRESAS / INTERNET  
 » 320 PÁGINAS  
 » ISBN 978-987-1857-65-4

**USERS**

# TÉCNICO en ELECTRÓNICA

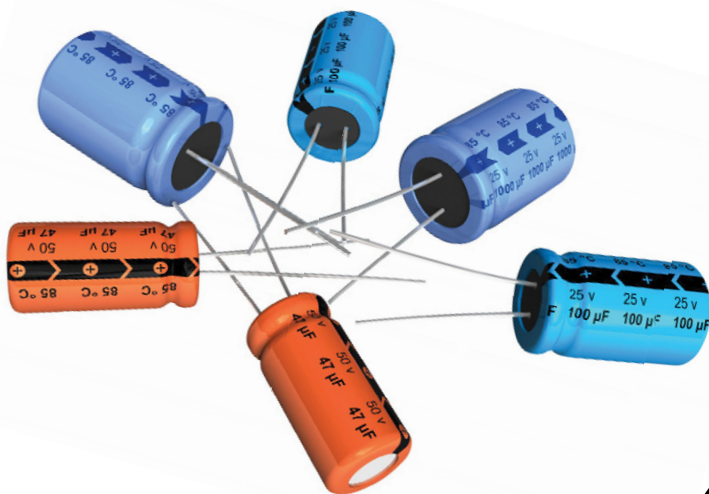
CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y PRÁCTICA PROFESIONAL

eBook

3

# MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRINCIPIOS ELECTROMAGNÉTICOS QUE GOBIERNAN  
LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS, DETALLE DE SUS PARTES  
Y CONSTRUCCIÓN. EJEMPLOS REALES,  
USOS Y APLICACIONES.





TÍTULO: Máquinas eléctricas  
AUTOR: Salguero, Federico  
COLECCIÓN: Pocket Users  
PÁGINAS: 114

MMXIII Copyright © Fox Andina en coedición con Dálaga S.A.

Hecho el depósito que marca la ley 11723. Reservados todos los derechos de autor.

Prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación por cualquier medio o procedimiento y con cualquier destino.

Primera edición realizada en agosto de MMXIII.

Todas las marcas mencionadas en este libro son propiedad exclusiva de sus respectivos dueños.

**ISBN 978-987-1949-24-3**

Salguero, Federico

Máquinas eléctricas. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fox Andina; Buenos Aires: Dalaga, 2013.

E-Book. - (Pocket users)

ISBN 978-987-1949-24-3

1. Informática. I. Título

CDD 005.3



# VISITE NUESTRA WEB

EN NUESTRO SITIO PUEDE OBTENER, DE FORMA GRATUITA, UN CAPÍTULO DE CADA UNO DE LOS LIBROS EN VERSIÓN PDF Y PREVIEW DIGITAL. ADEMÁS, PODRÁ ACCEDER AL SUMARIO COMPLETO, LIBRO DE UN VISTAZO, IMÁGENES AMPLIADAS DE TAPA Y CONTRATAPA Y MATERIAL ADICIONAL.

**RedUSERS**  
COMUNIDAD DE TECNOLOGÍA



**redusers.com**

Nuestros libros incluyen guías visuales, explicaciones paso a paso, recursos complementarios, ejercicios, glosarios, atajos de teclado y todos los elementos necesarios para asegurar un aprendizaje exitoso y estar conectado con el mundo de la tecnología.

LLEGAMOS A TODO EL MUNDO VÍA  OCA\* Y  DHL\*\*

\* SÓLO VÁLIDO EN LA REPÚBLICA ARGENTINA // \*\* VÁLIDO EN TODO EL MUNDO EXCEPTO ARGENTINA

 [usershop.redusers.com](http://usershop.redusers.com)  [usershop@redusers.com](mailto:usershop@redusers.com)  + 54 (011) 4110-8700



# El autor

## **Federico Salguero**



Nació el 31 de diciembre de 1978, en La Plata, Buenos Aires. Tempranamente se inició en el estudio y desarrollo de actividades relacionadas con la tecnología. Hacia 1990 comenzó el camino de la programación de aplicaciones en lenguajes de alto nivel, aun cuando no había iniciado la escuela secundaria. Luego de obtener su Bachillerato, en el año 1997 inició la carrera de Ingeniería en Electrónica en la UNLP.

Desde al año 2001 en adelante se desempeñó laboralmente en distintas empresas tecnológicas, las cuales le brindaron un gran nivel de experiencia práctica en lo relacionado con el diseño de sistemas y equipos electrónicos. Formó parte de las empresas Alstom Argentina SA, ID Interactive Technologies, Laboratorio LIFIA UNLP, Multiled SA y también RMI Electrónica SRL.

A través de los años trabajó en distintos rubros, como la programación e instalación de sistemas industriales y de comunicaciones, diseño de software embebido para distintas plataformas tecnológicas, diseño de sistemas digitales con FPGA, diseño y fabricación de impresos, control de producción y también gerencia de desarrollo.

En su último paso por RMI Electrónica SRL, se desempeñó como Gerente de Proyectos de Supervisión, donde se llevó a cabo el diseño e instalación de sistemas de supervisión de riego para áreas extensas con interfaz GPRS, hacia un servidor remoto. En la actualidad lleva adelante su propia empresa: Ryotech SH, un emprendimiento cuyas actividades principales son la fabricación de equipos de supervisión para la industria y el campo, fabricación de luminarias LED de potencia industriales comerciales y consultoría en general para proyectos de electrónica.

# Contenido del libro

El autor ..... 4

## \* 01

### Principios de electromagnetismo

Conceptos básicos

de electromagnetismo ..... 8

Teoría del electromagnetismo ..... 17

Circuitos magnéticos

y transformadores ..... 28

El transformador ideal ..... 29

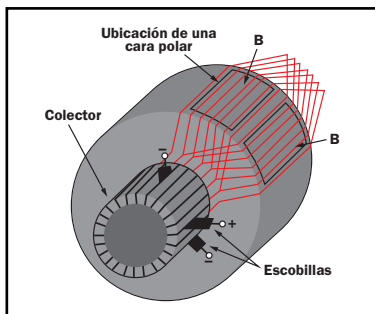
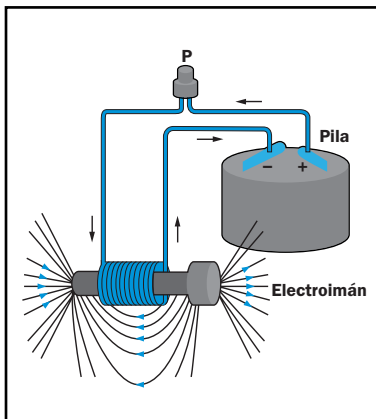
Conversión de la Energía ..... 32

Generador eléctrico de una espira ..... 33

Motor eléctrico de una espira ..... 34

Conservación de la energía ..... 35

Resumen ..... 36



## \* 02

### Máquinas de corriente continua

Configuración básica ..... 38

Funcionamiento como generador de una MCC ..... 41

Funcionamiento como motor de una MCC ..... 42

Tensión inducida en una MCC ..... 43

Cálculo del flujo por polo  $\Phi$  en el entrehierro debido al estator .... 44

Cálculo de la tensión inducida  $E_i$  sobre el rotor ..... 46

Par electromagnético o interno ..... 48

Cálculo de la fuerza magnetomotriz del rotor ..... 50

Cálculo de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro del estator ..... 51

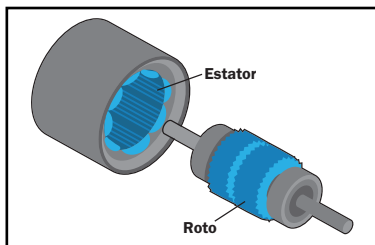
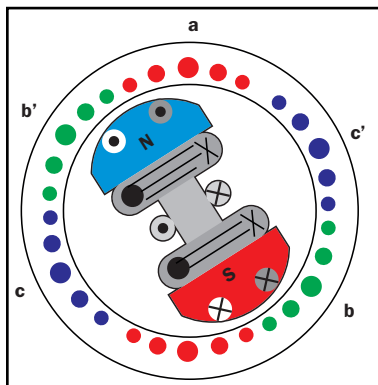
Deducción de la cupla interna  $T_i$  ..... 52

<b>Problemas de conmutación</b>	
<b>en MCC reales.....</b>	<b>53</b>
Reacción de inducido.....	53
Golpe inductivo: voltajes $L \cdot di/dt$ .....	56
Soluciones para los problemas	
de conmutación .....	57
<b>Circuitos equivalentes de las MCC .....</b>	<b>60</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>66</b>

## \* 03

### Máquinas de corriente alterna

<b>Configuración de la máquina</b>	
<b>sincrónica.....</b>	<b>68</b>
Funcionamiento como generador	
de una MCA sincrónica.....	70
Funcionamiento como motor	
de una MCA sincrónica.....	71
<b>Tensión inducida en una MCA.....</b>	<b>71</b>



Cálculo del flujo total .....	72
Cálculo de la FEM inducida .....	73
<b>Par electromagnético o interno.....</b>	<b>75</b>
Distribución de la FMM .....	76
<b>Circuitos equivalentes</b>	
<b>de las máquinas sincrónicas.....</b>	<b>82</b>
Impedancia síncrona por fase .....	82
Circuitos equivalentes.....	86
<b>Arranque del motor</b>	
<b>sincrónico .....</b>	<b>91</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>92</b>

## \* 04

### Motores paso a paso

<b>Motores paso a paso.....</b>	<b>94</b>
Motores de reluctancia variable .....	94
Motores de imán permanente .....	97
Motores mixtos o híbridos .....	98
Características estáticas .....	100
Características dinámicas .....	102
Resonancia mecánica .....	106
Secuencia de excitación .....	108
Aplicaciones .....	111
<b>Resumen .....</b>	<b>112</b>





# Principios de electromagnetismo

En el desarrollo del presente capítulo, se presentarán las leyes físicas y los conceptos principales de la teoría electromagnética. Posteriormente, haciendo hincapié en las definiciones básicas, profundizaremos sobre los principios fundamentales de la conversión de la energía y su aplicación en las máquinas eléctricas.

▼ Conceptos básicos de electromagnetismo .....8	▼ Conversión de la energía ..... 32
▼ Circuitos magnéticos y transformadores ..... 28	▼ Resumen ..... 36





# Conceptos básicos de electromagnetismo

Las máquinas eléctricas están constituidas por circuitos eléctricos acoplados magnéticamente. Fueron los descubrimientos de Ampère y Faraday los que dieron origen al planteo de los primeros principios de conversión de la energía.

Principalmente a partir de los aportes del británico Michael Faraday a los estudios del electromagnetismo, las máquinas eléctricas han venido desempeñando un rol fundamental en el desarrollo de la humanidad y en la mejora de la calidad de vida.

Iniciaremos nuestro camino con el estudio de los fenómenos magnéticos. Posiblemente todos los lectores, en alguna oportunidad, habrán experimentado con un imán permanente. Como sabemos, los imanes naturales presentan dos puntos de máxima fuerza: el polo norte y el polo sur.

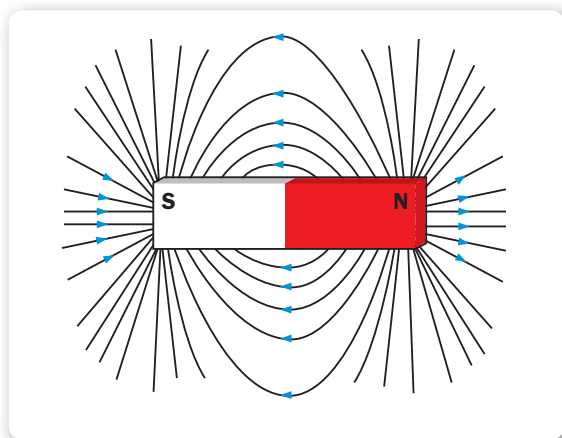
Cuando observamos las líneas del campo magnético creado por la influencia de un imán nos damos cuenta de que, al acercarse dos polos iguales, se rechazan. Mientras que si se acercan dos polos opuestos, la fuerza del campo magnético tiende a unirlos. Es importante notar que en el centro de los polos se presenta una fuerza nula.



## DOMINIOS



Se denomina **dominios** de un material ferromagnético a las pequeñas áreas dentro del material que poseen cierta orientación de acuerdo con el último campo magnético aplicado. Cuando dichas áreas quedan orientadas, en forma permanente, en una determinada dirección, se convierten en diminutos imanes permanentes.



**Figura 1.** Líneas de fuerza de campo magnético producidas por la influencia de un imán permanente.

Las líneas de fuerza del campo magnético no son más que la representación gráfica de la **influencia magnética** de dicho campo. Dichas líneas de fuerza, o líneas de flujo, tienen dirección y sentido: su origen es el polo norte y su fin es el polo sur. A mayor densidad de líneas, mayor es la fuerza magnética que experimentará un material ferroso en su cercanía, y viceversa.

## Permeabilidad magnética

Ciertos materiales, como el hierro, el cobalto, el níquel o el wolframio, permiten establecer fácilmente las líneas de flujo magnético. Por este motivo, decimos que dichos materiales, o bien las aleaciones entre ellos, poseen alta permeabilidad magnética. Llamamos a esta constante característica del material **permeabilidad**, y la expresamos de la siguiente manera:

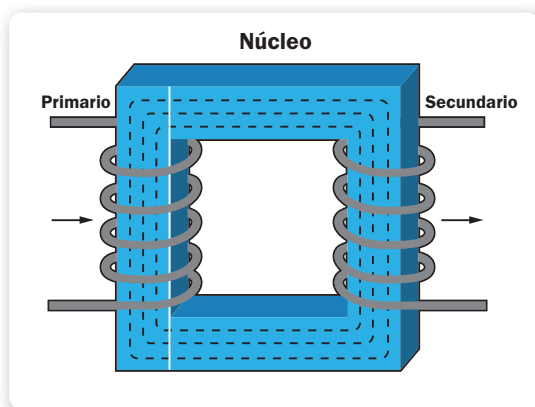
$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

$\mu_r$  : es el valor de la permeabilidad relativa.

$\mu_0$  : se la denomina permeabilidad del aire.

Podemos clasificar los distintos materiales de la naturaleza de acuerdo a su valor de permeabilidad. Los materiales ferromagnéticos son aquellos cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es mucho mayor a 1. Los paramagnéticos o no magnéticos poseen una permeabilidad relativa de aproximadamente 1, la misma que la del vacío. Finalmente, los materiales diamagnéticos poseen un valor de permeabilidad magnética relativa inferior a 1.

Los materiales ferromagnéticos son utilizados en los núcleos de transformadores y máquinas eléctricas. Su uso se explica debido a su fácil imantación y alta permeabilidad.



**Figura 2.** Podemos apreciar en la figura cómo las líneas de flujo quedan confinadas a la geometría del núcleo ferromagnético.

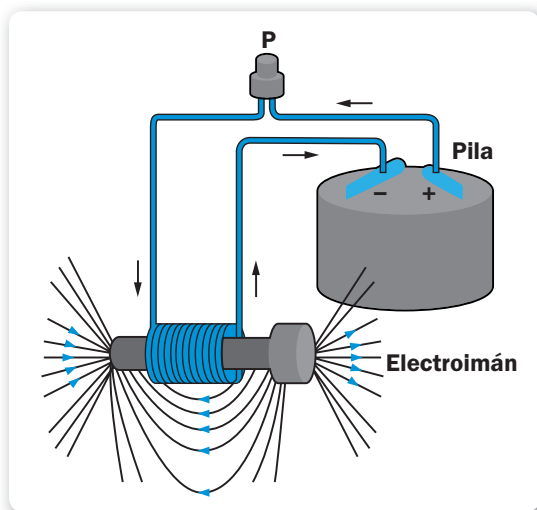
Existen distintos tipos de núcleos magnéticos. Los más comunes, utilizados en transformadores, se encuentran conformados

por chapas de hierro apiladas. De otro tipo son aquellos denominados núcleos de ferrite. Éstos son estructuras cristalinas del hierro en aleaciones con otros materiales, como cobalto y bario. Cada fabricante provee las características magnéticas de su composición lograda. Son materiales especialmente diseñados para lograr propiedades superiores al hierro puro.

## Análisis de circuitos magnéticos

Un electroimán es un imán artificial que se fabrica haciendo circular una corriente eléctrica a través de una bobina de alambre, arrollada alrededor de un núcleo ferromagnético.

La particularidad de dicho imán con respecto a uno natural se halla en que permite controlar la intensidad del campo magnético a través de dos variables: la intensidad de corriente de circulación y el número de vueltas de la bobina circundante.

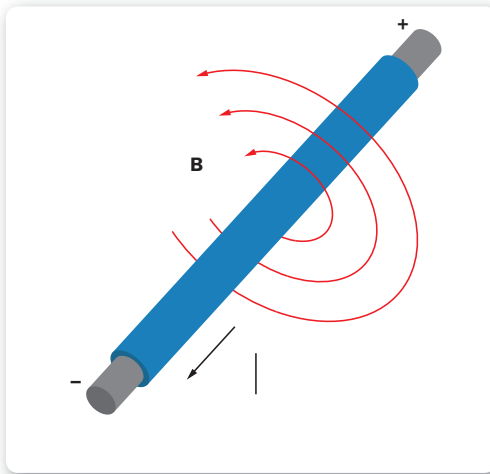


**Figura 3.** Un sencillo electroimán fabricado a partir de una pila y un tornillo.

El establecimiento de un campo magnético es el mecanismo fundamental por medio del cual la energía se convierte, de una forma a otra, en motores, generadores y transformadores.

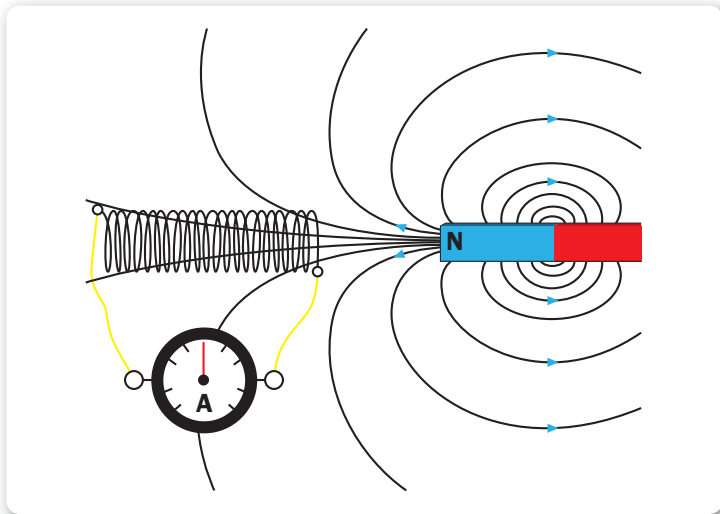
Enumeraremos, ahora, cuatro principios básicos utilizados en la construcción de toda máquina eléctrica, basados en leyes físicas como la Ley de Ampère y la Ley de Faraday. En esta primera aproximación al comportamiento de los circuitos magnéticos es importante incorporar conceptualmente los principios de conversión de la energía:

- a) Una corriente que circula por un conductor genera un campo magnético a su alrededor (**Ley de Ampère**).



**Figura 4.** Conductor portador de corriente que genera un campo magnético a su alrededor.

- b) Un campo magnético que varía en el tiempo se encarga de inducir un voltaje en una bobina de alambre si atraviesa el área de la bobina (**Ley de Faraday**).



**Figura 5.** Voltaje inducido por un flujo magnético, variable en el tiempo, sobre una bobina de cobre.

- c) Una fuerza se establece sobre un conductor de corriente en presencia de un campo magnético. La **Ley de Fuerza Magnética** establece la ecuación matemática que relaciona el vector fuerza con los vectores de campo magnético y corriente:

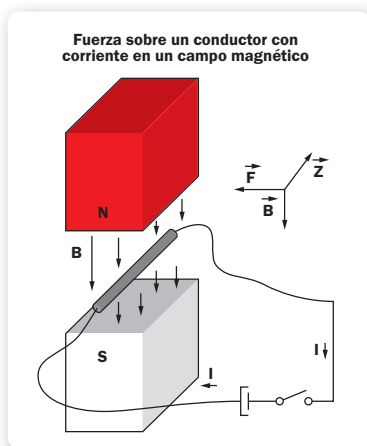
$$F = I \cdot L \otimes B$$



## ENERGÍA ELÉCTRICA INTERNA

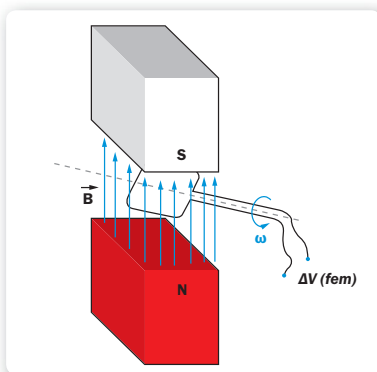


Debemos tener en cuenta que se define como **energía eléctrica interna de un motor** a la energía eléctrica de entrada del motor, menos las pérdidas de origen eléctrico. Es decir, se trata de la energía eléctrica que se encuentra disponible para conversión.



**Figura 6.** Aquí podemos ver la forma en que la dirección del vector fuerza, resultado del producto vectorial.

- d) Sobre una espira en movimiento, en presencia de un campo magnético estático, se induce un voltaje. Este es el principio de funcionamiento del generador.



**Figura 7.** La diferencia de voltaje generada en la espira en movimiento dentro de un campo magnético.



En nuestra vida cotidiana utilizamos numerosos artefactos en cuyo funcionamiento podemos apreciar el aprovechamiento de las leyes de los circuitos magnéticos, como transformadores flyback, fuentes switching, interruptores magnetotérmicos, aspiradoras, batidoras, televisores, etc.

Se puede trazar una analogía entre los circuitos magnéticos y los circuitos eléctricos, regidos por las conocidas Leyes de Ohm y de Kirchoff. Un circuito magnético es una región del espacio dominada por el establecimiento de un flujo magnético.

Para avanzar en la comprensión y el cálculo en circuitos magnéticos, debemos definir las magnitudes que intervienen en su estudio. Podemos observarlas en la siguiente tabla:

MAGNITUDES		
▼ SÍMBOLO	▼ MAGNITUD	▼ UNIDAD
<b>B</b>	Inducción magnética	T (Tesla)
<b>H</b>	Intensidad magnética	A/m (Ampere / metro)
<b>J</b>	Densidad de corriente	A/m <sup>2</sup> (Ampere/metro <sup>2</sup> )
<b>Irms</b>	Corriente eficaz	A (Ampere)
	Corriente instantánea	A (Ampere)
$\Phi$	Flujo magnético	Wb (Weber)
<b>FMM</b>	Fuerza magnetomotriz	A.v (Ampere x vuelta)
$\mu_r$	Permeabilidad relativa	(Adimensional)
<b>L</b>	Inductancia	H (Henry)

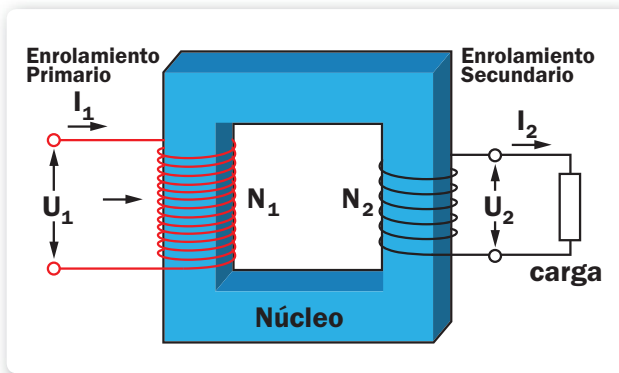
**Tabla 1.** Magnitudes para el cálculo de circuitos magnéticos.

Un ejemplo típico de circuito magnético es el del establecimiento de un flujo magnético en el interior de un toroide de material ferromagnético, generado por la circulación de corriente sobre el bobinado que envuelve el núcleo toroidal. En dicho caso, el flujo magnético se encuentra confinado en el interior del material, o sea, determinado por la geometría del núcleo.

Consideremos que si el núcleo de la bobina fuera de aire sería más difícil definir una región del espacio específica para su establecimiento, debido a que las líneas del campo magnético se encontrarían dispersas en el aire.

Como primera conclusión, podemos destacar el hecho de que el uso de materiales ferromagnéticos como núcleo de un circuito, permite la restricción geométrica de las líneas de flujo. Esto nos lleva a cálculos matemáticos integrales más simples a la hora de resolver analíticamente problemas de índole magnética.

También, y como vimos anteriormente, los núcleos ferromagnéticos aseguran un valor de flujo mucho mayor debido a su permeabilidad relativa alta. Así, la interacción entre los circuitos eléctricos (bobinados) acoplados magnéticamente es muy efectiva, como en el caso de los transformadores.



**Figura 8.** Construcción de un circuito transformador de voltaje.

En otros casos, un circuito magnético puede estar conformado por un núcleo ferromagnético y otro de aire (denominado entrehierro o ranura), como abordaremos en detalle más adelante, en este mismo capítulo.

## Teoría del electromagnetismo

A continuación vamos a profundizar en las leyes y ecuaciones fundamentales del electromagnetismo y fortaleceremos ciertos conceptos basados en la aplicación de dichas leyes.

Las leyes fundamentales del electromagnetismo pueden enunciarse en forma diferencial (ecuaciones de Maxwell) o integral. Si bien la comprensión implica conocimientos matemáticos avanzados, las desarrollaremos de manera conceptual.

### Ley circuital de Ampère

La Ley circuital de Ampère rige la producción de un campo magnético debido al establecimiento de una corriente sobre un conductor. Es interesante que su forma integral es la más utilizada en circuitos magnéticos:

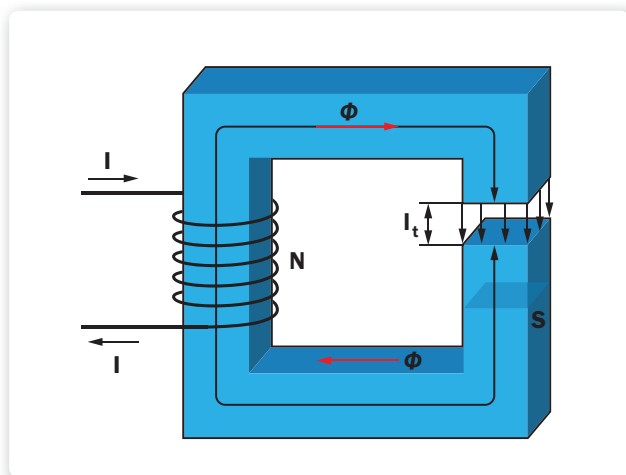
$$\int H \cdot \partial l = \int J \cdot d s = \sum I_{ef}$$

En esta ecuación, **H** es la intensidad de campo magnético, producida por la corriente **I**. La interpretación de dicha ecuación arroja que la integral del vector **H** sobre una curva cerrada de longitud **l<sub>c</sub>** es igual a la integral de la densidad de corriente que atraviesa, precisamente, la curva mencionada como **c**.

Para reducir matemáticamente la ecuación a una fórmula de comprensión más sencilla, realizaremos algunos supuestos.

En principio, por la bobina conductora, se hace circular una

corriente instantánea de valor  $i$ . Sabemos que todo el flujo magnético se encontrará concatenado dentro de la región geométrica del núcleo, de manera que todo el recorrido de integración en la Ley de Ampère es la longitud media de recorrido del núcleo  $l_c$ , como se observa en la imagen siguiente.



**Figura 9.** Trayectoria de integración dada por la curva cerrada  $c$  de longitud media  $l_c$ , que encierra una superficie atravesada perpendicularmente por la corriente  $I$ .

Por ello mismo, consideraremos constante el vector  $H$  para todos los puntos del circuito magnético de longitud media  $l_c$ .

La corriente  $I_{ef}$ , que atraviesa toda la superficie delimitada por la trayectoria de integración de la curva, es entonces  $N \cdot i$ , debido a que la bobina envuelve  $N$  veces el recorrido de integración.

Tomando dichas simplificaciones, la Ley de Ampère puede escribirse como sigue:

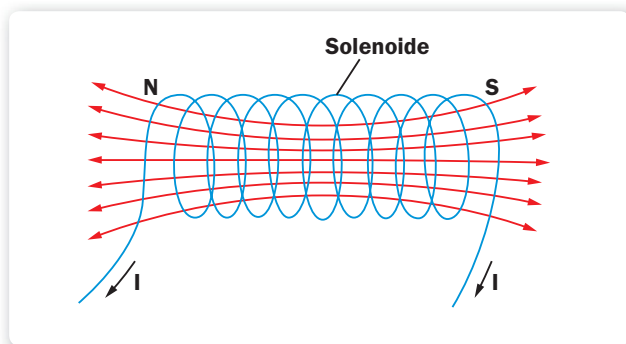
$$H \cdot l_c = N \cdot i = F_{mm}$$

Se denomina **fuerza magnetomotriz** al producto  $\mathbf{N}\cdot\mathbf{i}$ . Dicha magnitud se utilizará en el cálculo de circuitos magnéticos y se puede trazar una analogía con una fuente de tensión en un circuito eléctrico. De esta manera, la intensidad de campo magnético en el núcleo debido a la corriente aplicada será:

$$H = \frac{N \cdot i}{l}$$

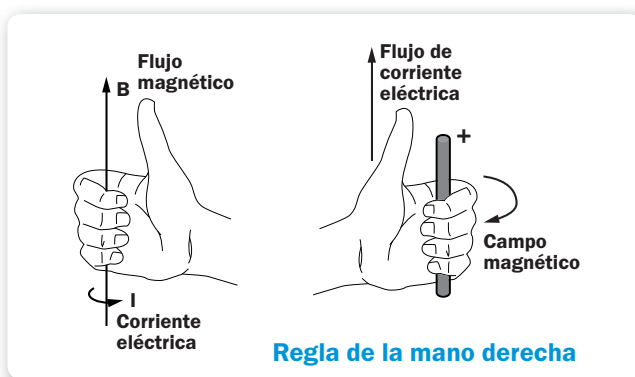
Es muy importante destacar que la intensidad  $\mathbf{B}$  del flujo magnético establecido en el núcleo depende también del material de éste. Luego, la relación entre la intensidad  $\mathbf{H}$  del campo magnético y la densidad  $\mathbf{B}$  del flujo magnético resultante, producido dentro del material, viene dada por:

$$B = \mu \cdot H$$



**Figura 10.** Bobina o solenoide recorrido por corriente. Se muestra el sentido norte-sur del campo magnético.

¿Cómo es posible determinar el sentido del flujo magnético establecido en la bobina para aplicar la Ley de Ampère? La respuesta a esta pregunta es la **Regla de la mano derecha**.



**Figura 11.** Dos aplicaciones de la Regla de la mano derecha.

## Flujo magnético y Ley de Faraday

El flujo magnético se puede calcular mediante la integral de la densidad de flujo **B** por unidad de superficie. La densidad de flujo **B** puede estimarse a partir de la cantidad de líneas que atraviesan la superficie bajo análisis. En forma matemática:

$$\Phi = \int_s B \cdot d s$$



### REGLA DE LA MANO DERECHA



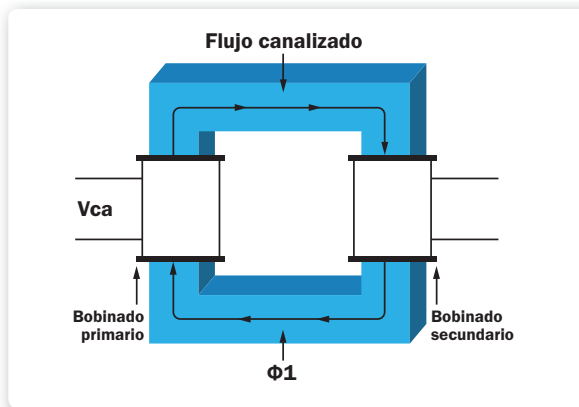
Para determinar el sentido del flujo magnético  $\Phi$  en una bobina, los cuatro dedos de la mano derecha deberán imitar el sentido de la corriente que envuelve al núcleo. El dedo pulgar indicará el sentido del flujo magnético establecido. De la misma manera, para determinar el sentido de la corriente inducida sobre un conductor, basta con imitar el sentido del flujo magnético que envuelve al conductor para, con el dedo pulgar, indicar el sentido de la corriente siempre de la mano derecha.

En la ecuación,  $dS$  es la unidad diferencial de área o superficie.

Considerando que el flujo sea constante en magnitud y de dirección perpendicular a cualquier punto de la superficie de una sección del núcleo, la ecuación anterior puede reducirse a:

$$\Phi = B \cdot S$$

$$B = \frac{\Phi}{S}$$



**Figura 12.** Flujo magnético constante en magnitud y confinado al núcleo.

La densidad de flujo  $B$ , puede obtenerse a partir del conocimiento de la magnitud del flujo  $\Phi$  establecido. La densidad  $B$  se expresa entonces en **Weber/m<sup>2</sup>** o, lo que es equivalente, en **Teslas (T)**.

Con estos conceptos del flujo magnético vayamos ahora a la explicación de la Ley de Faraday.

La Ley de Faraday, cuya formulación podemos apreciar debajo, nos

dice que una variación en el tiempo de un flujo magnético, establecido dentro del área de una espira, induce un voltaje en dicha espira.

$$fem = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} = -N \cdot \frac{\partial\phi}{\partial t}$$

Si una bobina tiene  $N$  vueltas y el flujo atraviesa todas ellas, la ecuación puede expresarse como se muestra en el último término de la anterior. El signo menos (-) es una expresión de otra ley, conocida como **Ley de Lenz**.

La Ley de Lenz establece que el voltaje inducido en la bobina tendrá una polaridad tal que, si se produce un cortocircuito en los extremos de la bobina por donde está circulando un flujo, la corriente generada tendría la dirección necesaria para generar un flujo opuesto al original.

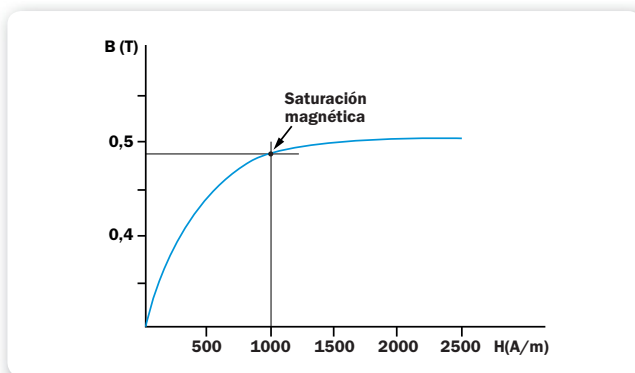
La Ley de Faraday es la propiedad fundamental utilizada en el análisis del comportamiento de los transformadores. El efecto de la Ley de Lenz indicará la polaridad de los voltajes inducidos en los arrollamientos.

## Curva de magnetización de los materiales

Como vimos anteriormente, la densidad de campo magnético  $\mathbf{B}$  y la intensidad de campo  $\mathbf{H}$  están relacionadas a través de la permeabilidad magnética del material del núcleo del circuito magnético.

Es posible obtener, experimentalmente, la representación gráfica de la curva  $\mathbf{B}$  versus  $\mathbf{H}$ , tal como se observa en la figura 18 para distintos materiales ferromagnéticos. La característica de los materiales ferromagnéticos es no lineal. Esto es así ya que puede observarse claramente una zona de máximo crecimiento para valores de intensidad  $\mathbf{H}$  bajos-intermedios, para luego ingresar en una zona de saturación hacia valores de campo  $\mathbf{H}$  intensos.





**Figura 13.** Curva de magnetización de un núcleo ferromagnético: B versus H. Se observa la no linealidad de la característica y se demarca el inicio de la zona de saturación magnética.

Recordemos que el valor de intensidad de campo **H** tiene unidades de **vuelta.A/m**. Esto quiere decir que el valor **N.i**, que representa la FMM (fuerza magnetomotriz) del circuito magnético, es una de las variables que pueden llevar a la saturación del núcleo ferromagnético.

Podemos resumir entonces, en una lista, las variables a tener en cuenta para evaluar la saturación de un núcleo:

1. A mayor número de vueltas **N**, mayor será la FMM = **N.i**. Por lo tanto, a incrementos del número de vueltas **N**, mayor será la exigencia del material ferromagnético del núcleo.
2. A mayor intensidad de corriente **i** por espira, también será mayor la FMM del circuito magnético. Por lo tanto, concluimos de la misma manera que en el punto anterior.
3. A mayor tamaño del núcleo magnético (mayor longitud media **lc** del circuito), menor será el campo de intensidad **H**. Por lo tanto, menor será la exigencia del material del núcleo.

Como conclusión, podemos decir que a mayor tamaño del núcleo, menor posibilidad de saturación y viceversa.

El límite de densidad de campo magnético **B**, está dado por **B<sub>max</sub>**. Dicho valor, denominado **inducción máxima B**, representa el valor de saturación de la característica del material.

Por todo lo dicho, es interesante remarcar que la permeabilidad no es una constante para el material ferromagnético. Por el contrario, es variable y está relacionada con la FMM aplicada al circuito.

La pendiente inicial de la característica determina la permeabilidad inicial del material. Esto significa la permeabilidad antes de que se establezca flujo magnético alguno en el núcleo.

La pendiente de la recta que une el origen del gráfico con el codo de saturación se conoce como el valor de permeabilidad máxima del material. O, mejor dicho, un valor de permeabilidad teórica del material si éste no presentara saturación.

Además, el nivel de saturación de un núcleo ferromagnético está directamente relacionado con sus pérdidas por histéresis.

## Ciclo de histéresis de los materiales

Una característica relevante de los materiales ferromagnéticos se encuentra en que presentan un comportamiento particular durante un ciclo de trabajo bajo la excitación de corriente alterna. Llamamos ciclo de trabajo a la variación en magnitud de la FMM

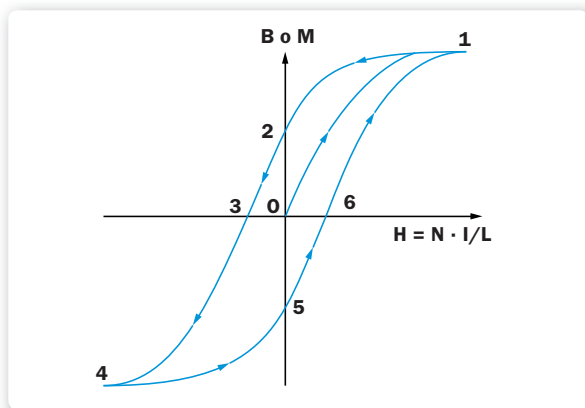


### NÚCLEOS FERROMAGNÉTICOS



La ventaja de utilizar núcleos ferromagnéticos en la construcción de transformadores y máquinas eléctricas está en que se logran mayores valores de flujo magnético para una fuerza magnetomotriz dada, en comparación que con un núcleo de aire. Pero si el flujo resultante debe ser aproximadamente proporcional a la FMM aplicada, el núcleo debe hacerse funcionar en la región lineal de su curva de magnetización.

(directamente relacionada a la variación de la corriente  $i$  por el bobinado), a la que es sometido el material del núcleo durante un período de tiempo determinado.



**Figura 14.** Ciclo de histéresis de un material ferromagnético.

Si, en el momento inicial del ciclo de trabajo, el núcleo no presenta magnetismo residual, y la corriente que circula por la bobina o devanado es cero, entonces nos encontramos en la posición **0** de la figura.

A medida que la corriente comienza a incrementarse, la intensidad  $H$  aumenta en forma proporcional al incremento de  $I$ . Un aumento de la intensidad de campo  $H$ , conlleva un aumento de la densidad de flujo magnético  $B$ , lo que nos va aproximando hacia los niveles de saturación del núcleo en el punto **1** de la figura.

A partir de dicho punto, aunque la corriente  $I$  siga aumentando, cualquier incremento de  $H$  no tendrá influencia sobre  $B$ , que se mantendrá, para todo nivel práctico, constante.

Ahora bien, luego del pico máximo de alterna, la corriente comenzará a disminuir hasta el valor  $I=0$ , y de la misma forma, la intensidad de campo  $H$  será también cero.

En este punto **2**, observamos que existe un **magnetismo remanente** o **flujo residual Br**. Desde dicho punto, la corriente alterna comenzará a invertir su signo hasta que **B=0** en el punto **3**. Ahora, el núcleo necesita mantener una intensidad **Hc** determinada, llamada fuerza coercitiva para que la densidad **B** resultante sea nula.

Si la corriente sigue aumentando con signo inverso al inicial, el núcleo llegará a su zona de saturación inversa en el punto **4**. A partir de allí, cualquier incremento de corriente en el mismo sentido no tendrá influencia en la densidad **B**.

En el último tramo la corriente alterna vuelve a invertir su signo o sentido hasta llegar al punto **5**, que se corresponde, nuevamente, con una intensidad de campo **H=0**. Este sería el nuevo punto de arranque en el ciclo de trabajo de alterna. No obstante, como es de esperar, el punto **5** no se encuentra en un nivel de densidad de flujo **B=0**, sino que presenta un magnetismo remanente que la FMM deberá vencer.

**Flujo Remanente Br**: es el valor de densidad de flujo magnético **B** resultante en el núcleo, luego de que el material retorna de su punto de saturación hacia un nivel de campo **H** nulo.

**Fuerza Coercitiva Hc**: es el nivel de campo **H** que precisa mantenerse en el material, para que su densidad de flujo **B** sea nula.

## Pérdidas por histéresis

La pérdida por histéresis en un núcleo de hierro o de material ferromagnético es la energía necesaria para lograr una reorientación de dominios durante el ciclo de la corriente alterna aplicada a los devanados. Esta energía es disipada en calor dentro del núcleo. Es posible demostrar que el área bajo la curva de un ciclo de histéresis es directamente proporcional a las pérdidas de energía ocasionadas por un ciclo de corriente alterna. Luego, cuanto más pequeño sea el recorrido por la gráfica de la FMM aplicada al núcleo, menor será el área bajo la curva de histéresis y menores serán las pérdidas asociadas a este fenómeno.

Y he aquí un concepto muy importante. Estas pérdidas se incrementan con el aumento de la frecuencia de operación de las corrientes de conmutación generadoras del flujo magnético. Es muy importante considerar este detalle, por ejemplo, en el diseño de transformadores tipo flyback en fuentes conmutadas aisladas. De hecho, la frecuencia de conmutación es un parámetro de diseño para dichas fuentes.

La evaluación de pérdidas por histéresis y la selección de materiales ferromagnéticos adecuados para la fabricación del transformador, constituyen dos variables importantísimas de diseño. Sin embargo, no son las únicas. En el próximo apartado analizaremos otros tipos de pérdidas de origen magnético, como las llamadas **pérdidas de Foucault** o **pérdidas por efectos parásitos**. También se deben tener en cuenta pérdidas de origen intrínsecamente eléctrico, como las **pérdidas Joule** por circulación de corriente en los devanados.

## Pérdidas por corrientes parásitas

Las corrientes parásitas tienen también su explicación a partir de la interpretación de la Ley de Faraday. Un flujo variable en el tiempo que se establece sobre un núcleo ferromagnético induce voltajes dentro del mismo material. Estos voltajes causan **remolinos de corrientes** que fluyen dentro del núcleo en forma de torbellinos.

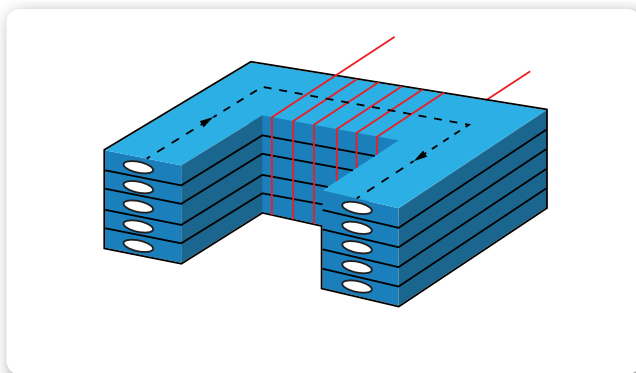
Estas corrientes parásitas fluyen a través del material, que les genera resistencia, produciendo disipación de energía. En consecuencia, se genera un recalentamiento del núcleo.



### PROFESOR EN LÍNEA



Si tiene alguna consulta técnica relacionada con el contenido, puede contactarse con nuestros expertos: [profesor@redusers.com](mailto:profesor@redusers.com)



**Figura 15.** Transformador de núcleo laminado para limitar el recorrido de las corrientes parásitas de Foucault.

Esta pérdida de energía es proporcional al recorrido que tienen dentro del núcleo y, si hubiera algún modo de reducir la capacidad de formación de dichos remolinos de corriente, sería posible disminuir las pérdidas por dicho efecto. De hecho, la hay: se utilizan núcleos **laminados** de hierro, apilándolos para lograr volumen. Dichas láminas se encuentran separadas por una capa de resina aislante extremadamente delgada, por lo que las corrientes parásitas se limitan a áreas bien pequeñas, ya que el asilamiento limita su recorrido.



## Circuitos magnéticos y transformadores

Llegados a este punto, la mejor forma de iniciarse en el cálculo de circuitos magnéticos y transformadores es a través de la realización de ejercicios prácticos. Veremos cómo, a través de matemática sencilla, podemos aplicar los conocimientos adquiridos de la Teoría del electromagnetismo a la resolución de problemas de ingeniería.

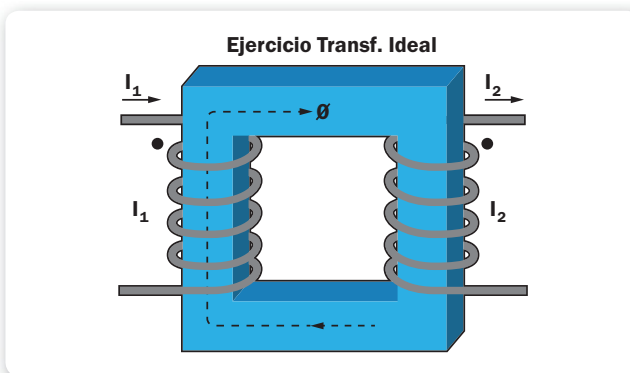
## El transformador ideal

Muchos de los conceptos que aquí ilustraremos tendrán aplicación en el análisis del funcionamiento de máquinas complejas, como motores y generadores de continua y de alterna. Pero antes debemos definir qué es un **transformador ideal**. Consideraremos tal a aquel que cuenta con las siguientes características:

- No posee pérdidas eléctricas relacionadas a la resistencia de los bobinados.
- No posee pérdidas magnéticas, ni por histéresis ni por Foucault.
- Su potencia eléctrica de entrada es igual a la potencia de salida o, lo que es igual, su rendimiento es del 100%.

### Ejercicio: Transformador ideal

En la figura se esquematiza un transformador ideal compuesto por sus bobinados primario y secundario. Los sentidos de las corrientes han sido elegidos de manera que los puntos homólogos de las bobinas se encuentren en la misma dirección.



**Figura 16.** Circuito magnético correspondiente al ejercicio del transformador ideal.

Se precisa determinar cuál es la **relación de transformación**. También, calcular la tensión de salida del transformador en vacío (sin carga), si la tensión de entrada es de 10V, sabiendo que se han bobinado 15 vueltas en el primario y 35 vueltas en el secundario. ¿Es un transformador de alta o de baja?

### PAP: TRANSFORMADOR IDEAL

**01** Utilizando la Ley de Faraday, plante los dos juegos de ecuaciones diferenciales para el circuito. Como se sabe,  $e$  representa la FEM inducida por la variación en el tiempo del flujo magnético concatenado de cada bobina. El flujo magnético concatenado es el producto del valor de flujo magnético que circula por el núcleo, multiplicado por el número de espiras de la bobina.

$$e_1 = \frac{-\delta\phi_1}{\delta t} = -N_1 \cdot \frac{\delta\phi}{\delta t} \quad \%$$

$$e_2 = \frac{-\delta\phi_2}{\delta t} = -N_2 \cdot \frac{\delta\phi}{\delta t}$$



### ENERGÍA ELÉCTRICA INTERNA



Se define como **energía eléctrica interna de un generador** a la energía eléctrica de salida disponible, más las pérdidas de tipo eléctrico.



02

Proceda a dividir ambos juegos de ecuaciones. En la división puede simplificar la variación de flujo magnético, ya que es el mismo flujo que atraviesa ambas bobinas. Al cociente  $N_1/N_2$  se lo denomina **relación de transformación**, ya que es equivalente al cociente entre  $e_1$  y  $e_2$ . La relación de transformación es 0,428 y la tensión de salida  $e_2$  será de 23,33V, por lo que se trata de un **transformador elevador de tensión**.

$$2 \quad \frac{c_1}{c_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{\delta\theta/\delta t}{\delta\theta/\delta t} \Rightarrow c_2 = c_1/a = 23,33 \text{ [V]}$$

$$c_1/c_2 = N_1/N_2 = a \text{ (relación de transf.)} = 0,428$$

03

Dando una vuelta de tuerca más, multiplicando ambos miembros por  $i_1/i_2$  (corrientes de cada bobina) y dividiendo ambas ecuaciones, observará que el término derecho se vuelve 1. Esto se debe a que la potencia de entrada  $i_1 \cdot e_1$  es igual a  $i_2 \cdot e_2$ , ya que se trabaja bajo el supuesto de un transformador ideal con rendimiento 100%. Esto implica que la relación de corrientes es inversa a la relación de transformación.

$$\frac{P_e}{P_s} = \frac{i_1 \cdot e_1}{i_2 \cdot e_2} = \frac{i_1 \cdot N_1}{i_2 \cdot N_2} = 1!!$$

$$c_1/c_2 = N_1/N_2 = 1/a$$



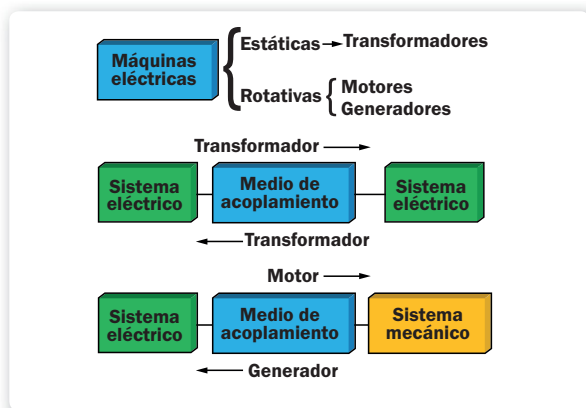
## Conversión de la energía

Llamamos **energía** a la propiedad de un sistema para producir trabajo físico. Puede ser almacenada, distribuida o transformada, y existen distintos tipos aprovechables por el ser humano.

La energía puede transformarse mediante mecanismos naturales, pero son los dispositivos creados por el ser humano los que permiten aprovecharla para sus necesidades.

En el desarrollo de este libro nos incumben los procesos de transformación de la energía eléctrica a mecánica y viceversa. Ciertos dispositivos, como motores y generadores, poseen la característica fundamental de utilizar las propiedades del campo magnético como acoplador y acumulador de energía.

Un sistema acoplador electromagnético actúa a través del flujo magnético proporcionado por el sistema eléctrico para transferir energía y producir movimiento mecánico. Por otro lado, el sistema de estas máquinas también actúa como acumulador de energía, pudiendo transmitir energía hacia uno u otro lado, según lo requiera el balance energético logrado.



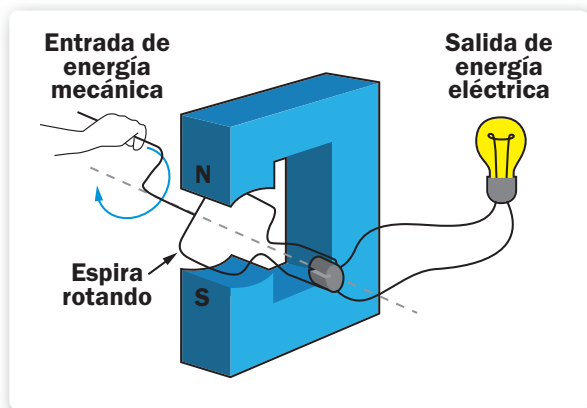
**Figura 17.** Esquema de conversión de la energía en máquinas eléctricas.

El funcionamiento de dichas máquinas acopladoras electromecánicas se efectúa sobre la base de dos leyes del electromagnetismo: la Ley de inducción de Faraday y la Ley de fuerza magnética de Laplace. Así, en toda máquina eléctrica, existirán tensiones inducidas y se ejercerán fuerzas sobre sus bobinados.

A continuación haremos una introducción a los conceptos más básicos que gobiernan el funcionamiento de las máquinas eléctricas, relacionados a la conversión de la energía.

## Generador eléctrico de una espira

Un generador simple puede construirse mediante una espira en movimiento dentro de un campo magnético. Por ejemplo, si tal movimiento es giratorio, el flujo magnético que atraviesa su área será variable en el tiempo.



**Figura 18.** Principio de funcionamiento de un generador.

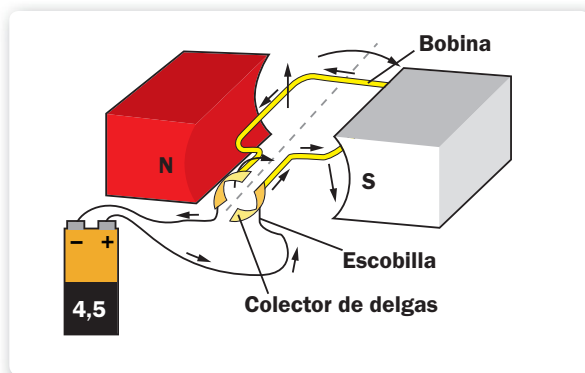
Así, aplicando la Ley de Faraday, una tensión inducida aparecerá sobre la espira. Si existe una carga conectada a sus bornes, se establecerá una corriente eléctrica sobre la espira. Este es el principio

de conversión de energía mecánica en eléctrica. Por supuesto, las máquinas reales poseen una complejidad mucho mayor, como veremos más adelante; sin embargo, los principios de la Teoría electromagnética utilizados siguen siendo los mismos. En el ejemplo puede apreciarse cómo el campo magnético actúa como acoplador, convirtiendo la variación del flujo magnético generada por el movimiento mecánico en una tensión eléctrica inducida.

El campo magnético producirá una cupla en sentido contrario al del movimiento de la espira, ya que ésta se encuentra recorrida por corriente, por lo que se requerirá un **trabajo mecánico** para mover la espira bajo la influencia de un campo magnético.

## Motor eléctrico de una espira

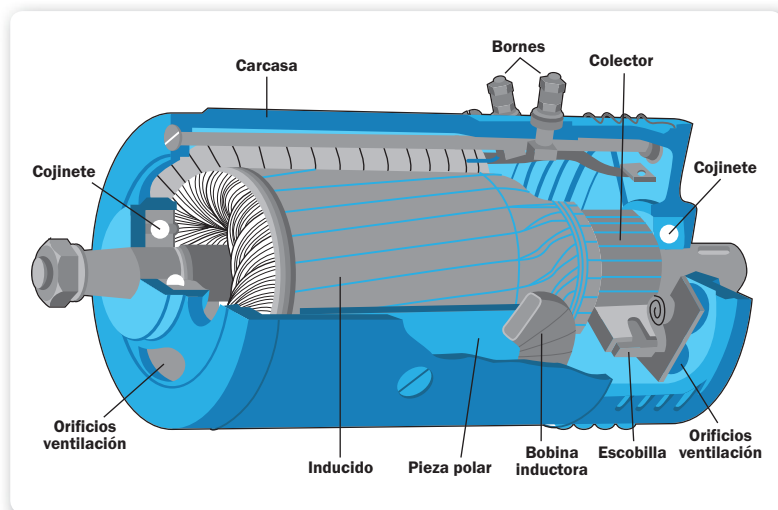
Para el caso de un motor simple, podemos pensar en una fuente de energía eléctrica (batería) conectada a los bornes de una espira. Por consiguiente, y utilizando los mismos principios, si se expone dicha espira de corriente a un campo magnético constante, se inducirá una cupla sobre ella (Ley de Laplace). Esta cupla hará girar la espira y la carga mecánica conectada a ella.



**Figura 19.** Principio de funcionamiento del motor de continua.

Debido al movimiento de la espira en un campo magnético aparecerá una tensión inducida sobre la espira que se opondrá a la fuente eléctrica. Por lo tanto, dicha fuente deberá poseer la potencia necesaria para alimentar el movimiento de la espira y contrarrestar al mismo tiempo la FEM inducida.

Como en el caso anterior, la construcción de los motores reales es muchísimo más compleja. Existen distintos tipos de motores que funcionan bajo principios muy diferentes de los enunciados. No obstante, alcanza con el análisis de esta máquina sencilla para comprender el concepto de conversión de la energía.



**Figura 20.** Corte de motor de continua a escobillas.

## Conservación de la energía

Las ecuaciones que rigen el proceso de conversión son, por un lado, las del electromagnetismo y, por otro, las de conservación de la energía.

La energía de entrada de un sistema motor es una energía eléctrica consumida por el sistema. Las pérdidas de origen eléctrico impedirán que toda la energía eléctrica de entrada sea convertida en energía mecánica utilizable, ya que ésta generalmente se disipa en calor. También es importante considerar la posible aparición de una acumulación energética en el sistema. Para el caso del generador, se realizan consideraciones similares. La energía de entrada es de origen mecánico y las pérdidas son por roce.

En general podemos destacar tres tipos de pérdidas en los sistemas generador y motor:

- 1) **Pérdidas Eléctricas:** producidas por efecto Joule de calentamiento de los alambres conductores de los bobinados al ser recorridos por una corriente eléctrica.
- 2) **Pérdidas Magnéticas:** originadas por efecto de la histéresis de los materiales ferromagnéticos y por corrientes parásitas o Foucault.
- 3) **Pérdidas Mecánicas:** ocasionadas por rozamiento de las partes móviles de las máquinas.

Para finalizar, podemos agregar que en régimen permanente de funcionamiento no existe acumulación de energía. La energía acumulada en las máquinas sólo tiene injerencia en procesos transitorios como arranque, parada o desconexión de cargas.



## RESUMEN




Todos los conceptos abarcados en este capítulo conforman la base en la comprensión del comportamiento de los circuitos magnéticos. Las leyes fundamentales de la Teoría electromagnética son tres: la **Ley de Ampère**, la **Ley de Faraday** y la **Ley de fuerza magnética**. Por otra parte, también analizamos la relación entre la **inducción magnética  $B$**  y la **intensidad de campo magnético  $H$** , la cual es no lineal, entre otros conceptos.



# Máquinas de corriente continua

Luego de los conceptos estudiados en el primer capítulo, estamos en condiciones de analizar las partes y la construcción de las máquinas eléctricas. Comenzaremos nuestro estudio con la máquina de corriente continua, que, tal como indica su nombre, posee como excitación fuentes de corriente directa o continua.

▼ Configuración básica ..... 38	▼ Problemas de conmutación en MCC reales ..... 53
▼ Tensión inducida en una MCC ..... 43	▼ Circuitos equivalentes de las MCC ..... 60
▼ Par electromagnético o interno ..... 48	▼ Resumen ..... 66





## Configuración básica

Como todas las máquinas eléctricas rotatorias, la MCC (máquina de corriente continua) posee dos partes bien diferenciadas: una fija, denominada **estator**, y otra móvil con respecto a la anterior, denominada **rotor**, dispuestas ambas sobre el mismo eje de rotación.

El material, tanto del rotor como del estator, es ferromagnético. Sobre su volumen se disponen ranuras longitudinales, donde se devanarán los arrollamientos conductores tanto del rotor como del estator. Los bobinados de estator y rotor se encuentran acoplados magnéticamente a través del espacio de aire que existe entre ellos, llamado **entrehierro**.

Como adelantamos en el capítulo previo, la Ley de Faraday y la Ley de fuerza magnética de Laplace jugarán un rol preponderante en el comportamiento de las máquinas eléctricas.

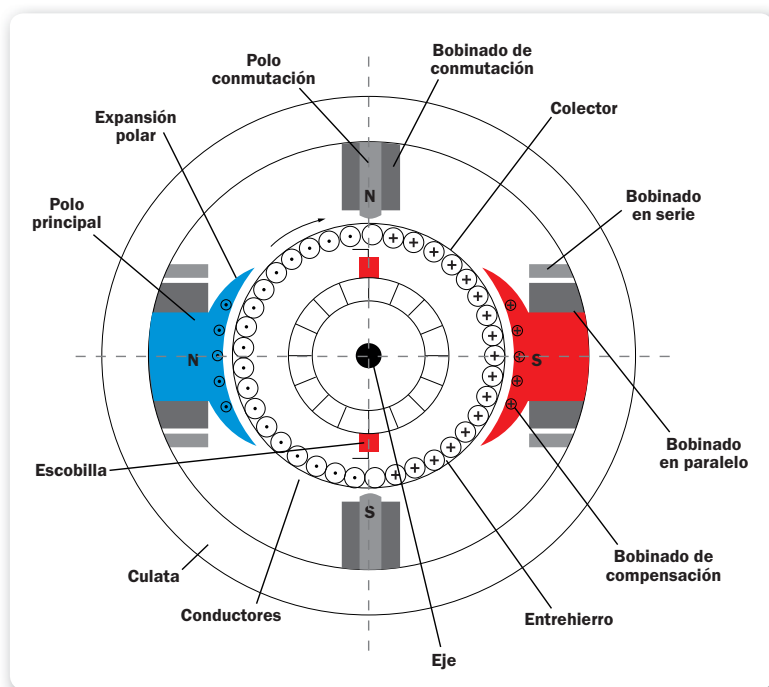
El **devanado de campo**, o devanado **inductor**, es el bobinado que da origen al campo magnético básico para inducir las tensiones correspondientes en el devanado inducido. En el caso de la MCC, es el bobinado del estator.

Por otro lado, el **devanado de armadura o inducido**, es el bobinado sobre el que aparece una tensión inducida fruto del funcionamiento esperado de la máquina. Para el caso de la MCC en estudio, es el bobinado del rotor.

Las máquinas de corriente continua se denominan así debido a que sus devanados de campo se encuentran recorridos por corrientes directas, que producen un campo magnético fijo en el entrehierro de la máquina. Las máquinas, además, poseen geometría de polos salientes en el estator.

Si observamos una máquina en la que los polos magnéticos son dos y se encuentran intercalados exactamente a 180° mecánicos cada uno en el estator, veremos que, por los bobinados de los polos del estator, circularán las corrientes directas generadoras del campo magnético fijo en el entrehierro de la máquina.



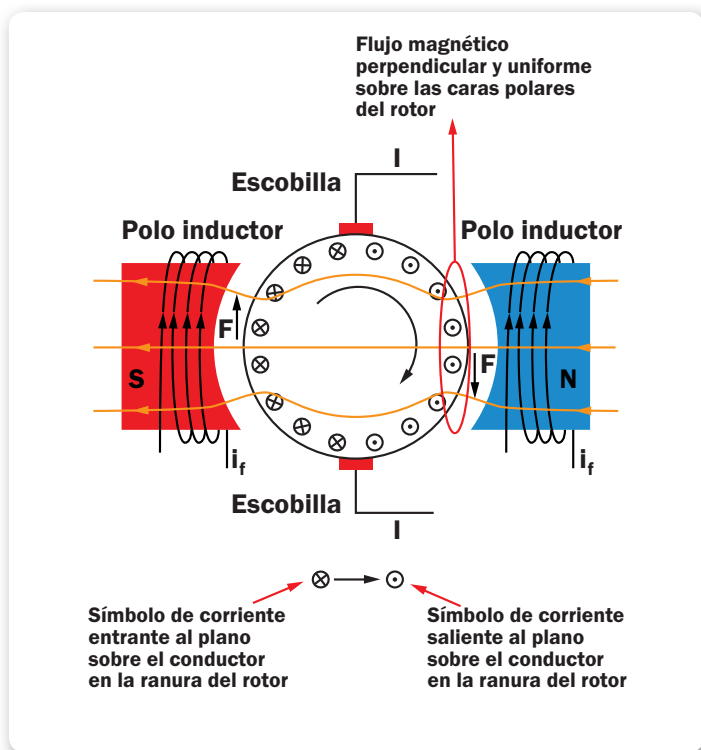


**Figura 1.** Corte transversal de una máquina de corriente continua de dos polos.

Es preciso destacar que el entrehierro presenta un ancho constante entre el rotor y el estator, y otro ítem importante es que el campo magnético fijo producido en el entrehierro es siempre perpendicular a la cara circular del rotor.

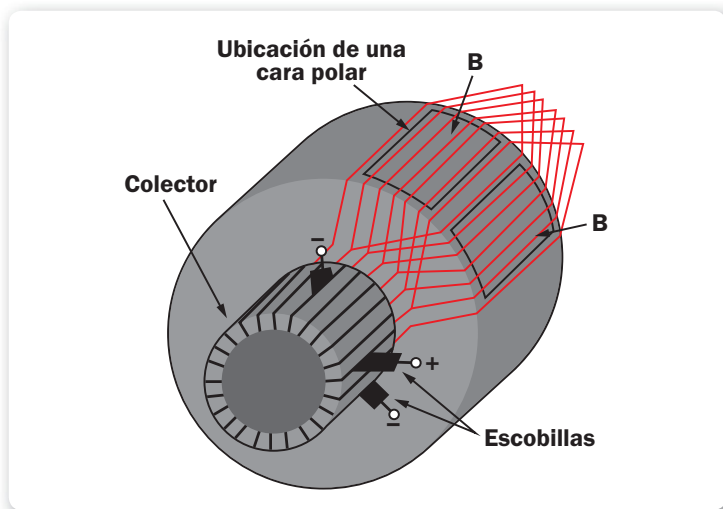
Recordemos que la reluctancia de los materiales ferromagnéticos es mucho menor que la reluctancia del aire, por lo que el flujo magnético debe tomar el camino más corto a través del entrehierro para hacer mínima la reluctancia entre la cara de los polos del estator y la superficie del rotor. Como resultado, el flujo magnético es perpendicular a la superficie del rotor bajo cualquier punto de las

curvas polares. Adicionalmente, podemos decir que la reluctancia es uniforme bajo las caras polares, debido a que la anchura del entrehierro es constante y a que el flujo magnético es perpendicular al rotor en todos los puntos.



**Figura 2.** Flujo magnético uniforme y perpendicular a la superficie del rotor en una máquina de corriente continua.

Pasemos ahora a la descripción del rotor de una MCC. Como dijimos, es la parte móvil de la máquina, donde se encuentran alojados los bobinados de armadura o inducidos.



**Figura 3.** Esquema tridimensional del rotor de una MCC.

En el esquema podemos apreciar la construcción de un rotor cilíndrico. Sobre el cuerpo del rotor se encuentran las ranuras por donde se devana el bobinado de armadura o inducido. Acoplado al eje y al cuerpo del rotor, se encuentra el **colector**, compuesto por un cilindro de delgas que conectarán a las escobillas la tensión inducida sobre cada espira del bobinado del rotor.

Al girar el rotor y desplazar los contactos del colector por las escobillas, éstas recogerán la tensión inducida sobre los bobinados. El colector actúa como una especie de rectificador mecánico de tensión, como veremos enseguida.

## Funcionamiento como generador de una MCC

Cuando se alimenten los devanados de campo de una MCC por medio de una fuente directa de tensión, circulará una corriente  $I_e$

(**corriente de excitación**), que establecerá un campo magnético fijo en el entrehierro de la máquina. Si se hace girar el rotor, realizando un trabajo mecánico, las espiras cortarían el flujo magnético. Así, sobre el devanado de armadura se inducirá una tensión alterna, que se rectificará mecánicamente por acción del colector de delgas y las escobillas, para convertirse en tensión continua.

## Funcionamiento como motor de una MCC

Ahora sí analizaremos la máquina como motor. Debemos excitar el devanado de armadura por medio de una fuente de corriente directa y, al mismo tiempo, alimentar el devanado de campo. Dicho devanado podrá ser alimentado por la misma fuente que alimenta el rotor, o bien por una fuente externa.

Debido a la organización de los devanados del rotor, sus corrientes circulan en un mismo sentido por los conductores que se encuentran bajo la influencia de un mismo polo del estator. Esto hace que la fuerza sobre todas las espiras sea tangencial, debido a la dirección radial del campo magnético del estator y la dirección



### DEVANADOS



En las máquinas de corriente continua existen dos devanados. Por un lado se encuentra el **devanado de campo** o **inductor**, que corresponde al campo principal del estator que es el inductor de la máquina. Por otro lado, tenemos el **devanado de armadura** o **inducido**, que corresponde al bobinado del rotor de la máquina. Ambos se alimentan a través de corriente directa o continua. De allí el nombre de estas máquinas. El flujo principal se establece en el entrehierro y es perpendicular y constante a la superficie del rotor bajo cualquier punto de las curvas polares.

de la corriente sobre los conductores del rotor. Recordemos la Ley de fuerza del campo magnético:

$$F = I \cdot L \otimes B$$

De esta manera se genera el par mecánico de fuerza, que hace girar el rotor consiguiéndose el efecto deseado.



## Tensión inducida en una MCC

Como vimos, las escobillas de una MCC se encuentran situadas diametralmente opuestas sobre el colector. La tensión inducida sobre cada alambre del rotor será en un sentido al pasar frente al polo norte del estator, y en otro al pasar frente al polo sur. Sobre el colector de una MCC, la disposición geométrica de las espiras hace que en las escobillas aparezca una tensión siempre en el mismo sentido. Así, se realiza una rectificación mecánica de la tensión alterna inducida, al producirse la conmutación de las conexiones de las escobillas.

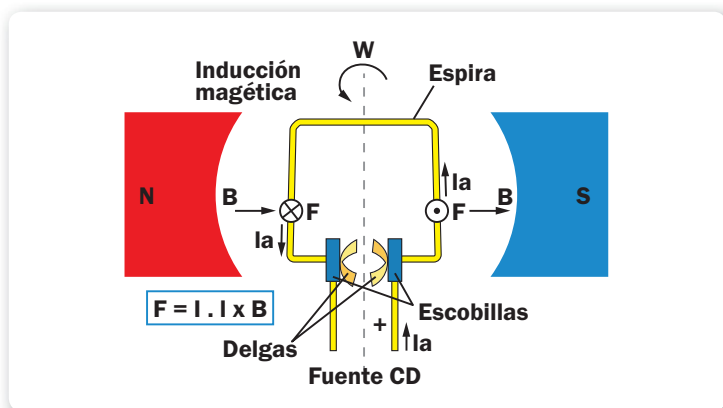
Teniendo en cuenta la **regla de la mano derecha** y aplicando la Ley de fuerza de Laplace, queda determinado el sentido de giro del motor hacia la izquierda del lector. Vemos cómo la disposición geométrica de las escobillas provoca que, al momento de la conmutación, recolecten siempre la corriente en el mismo sentido.



### ORGANIZACIÓN DE BOBINADOS



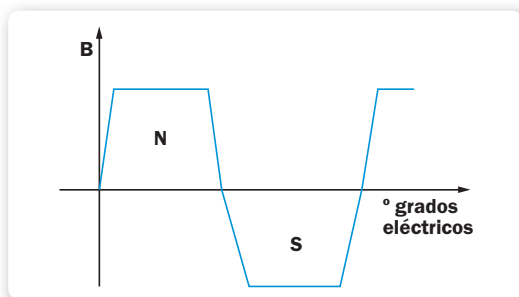
En la práctica, los bobinados se organizan de manera que se sumen las contribuciones de FEM inducida en numerosos hilos conductores y que las intensidades de corrientes puedan ser repartidas entre varios caminos o vías paralelas. Así, es posible recoger más corriente de salida por las escobillas.



**Figura 4.** Esquema de MCC simple de una espira y sentido de los vectores de **inducción magnética** y **fuerza**.

## Cálculo del flujo por polo $\Phi_p$ en el entrehierro debido al estator

Retomemos la hipótesis de que la distribución de campo magnético es constante y radial bajo cada polo.



**Figura 5.** Distribución del campo de inducción magnética  $B$  sobre el entrehierro de una MCC.

De acuerdo con la Ley de inducción de Faraday, podemos encontrar una expresión escalar para la tensión inducida sobre un conductor alojado en el rotor bajo la influencia del polo norte del estator:

$$e_i = B \cdot l \cdot v$$

Debemos tener en cuenta que en donde **B** es la **inducción** constante bajo la cara del polo, **l** es la **longitud** del conductor y **v** es la **velocidad** tangencial del rotor.

Una expresión para **v** en función de la **velocidad angular**  $\omega_m$  y el **diámetro D** del rotor sería la siguiente:

$$v = \omega_m \cdot \frac{D}{2}$$

Es importante considerar que, posteriormente, el flujo magnético representado por  $\Phi_p$ , producido por cada uno de los polos correspondientes al estator será el siguiente:

$$\Phi_p = B \cdot A = B \cdot \frac{(2\pi r \cdot l)}{2} = B \cdot \frac{\pi D l}{2}$$

En la ecuación, **A** corresponde al área lateral del rotor que da a la cara del polo estator.

Es decir, el producto de la circunferencia del rotor por el largo de los conductores expuestos.

Se divide por dos debido a que se calcula el flujo por polo, que corresponde a la mitad del área lateral del rotor expuesta a la influencia de un polo.

## Cálculo de la tensión inducida $E_i$ sobre el rotor

Para el cálculo de la tensión inducida, debemos recordar primero la expresión que relaciona la velocidad angular  $\omega_m$  con el valor  $n$  en **rpm** (revoluciones por minuto):

$$\omega_m = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

Reemplazando las expresiones obtenidas, resulta lo siguiente:

$$e_i = 2 \cdot \Phi_p \cdot \frac{n}{60}$$

En este ejemplo estamos considerando una máquina de solo dos polos. Si fuera de **P** número de polos, entonces tendríamos lo que se expresa a continuación:

$$e_i = P \cdot \Phi_p \cdot \frac{n}{60}$$

Habiendo calculado el flujo por polo en el entrehierro debido al estator, y teniendo en cuenta que en la práctica existen varios hilos conductores alojados en las ranuras del rotor, se puede deducir que la FEM inducida total sobre el rotor tiene la expresión de la ecuación que vemos a continuación:

$$e_i = \frac{Z}{a} \cdot P \cdot \Phi_p \cdot \frac{n}{60}$$



Donde definimos lo siguiente:

**Z**: se trata del número de conductores que están activos sobre los que se induce tensión

**a**: número de caminos o vías paralelas

**P**: cantidad de polos de la máquina

**n**: rpm de giro de la máquina

**$\Phi_p$** : flujo por polo (directamente relacionado a la **lexcitación**)

Llegados a este punto, es importante destacar que será el material ferromagnético del circuito magnético de la máquina quien imponga, por sus características de saturación, el límite de crecimiento del flujo por polo.

Si agrupamos las constantes en una única, denominada **K**, arribamos a la ecuación característica para la tensión inducida de una MCC en función del flujo por polo, dada por la ecuación siguiente:

$$e_i = K_1 \cdot \Phi_p \cdot n$$

$$K_1 = \frac{P \cdot Z}{60 \cdot a}$$

Denominamos **K**, entonces, a la constante de construcción de la máquina, ya que agrupa varias características de la misma. Más adelante, cuando analicemos el circuito equivalente de la máquina, la tensión en bornes utilizada seguirá dicha ecuación.

Si queremos expresar la ecuación anterior en función de  **$\omega_m$**  (**frecuencia angular de giro mecánica**) la convertimos en:

$$e_i = K_2 \cdot \Phi_p \cdot \omega_m$$

$$K_2 = \frac{P \cdot Z}{2\pi \cdot a}$$



## Par electromagnético o interno

En general, y para cualquier máquina real, el par o momento de torsión dependerá de tres factores:

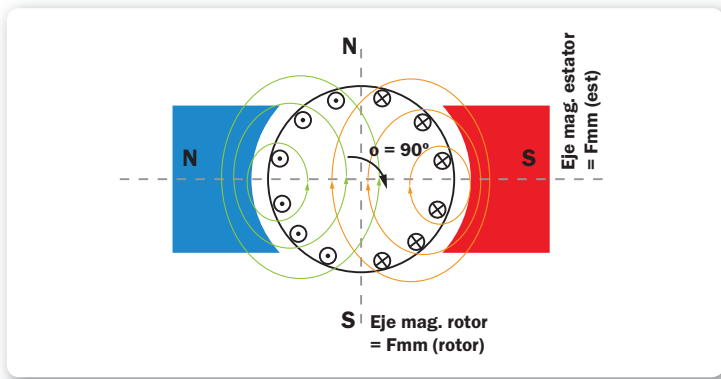
- Flujo magnético en el entrehierro de la máquina
- Corriente en los bobinados de la máquina (consideremos que es tanto inductor como inducido)
- Constante que representa la construcción de la máquina

Veremos que el par o momento de torsión de una máquina es proporcional al flujo por polo  $\Phi_p$  en el entrehierro, y estará limitado por efecto de la saturación del material ferromagnético.

Al ser también el par proporcional a la corriente por el inducido  $I_i$ , ésta deberá limitarse para evitar un calentamiento excesivo en los arrollados de la máquina.

El valor del par de giro tangencial en un motor puede calcularse con la hipótesis de suponer despreciables todas las pérdidas posibles, recibiendo entonces el nombre **par electromagnético interno**.

El cálculo del par interno se realiza bajo la suposición de que en la máquina existen dos campos magnéticos: uno debido a la FMM del estator (en adelante **Fe**), y otro debido a la FMM del rotor (en adelante **Fr**).



**Figura 6.** Líneas de campo magnético debido a corrientes de los devanados del rotor de una MCC.

Una expresión válida para el cálculo de la cupla interna  $T_i$  es la correspondiente a la siguiente ecuación:

$$T_i = \pm \frac{\mu_0 \cdot D \cdot l \cdot \pi \cdot P}{4 \cdot g} \cdot \mathfrak{F}_E \cdot \mathfrak{F}_R \cdot \text{sen}(\sigma)$$

Donde:

**g:** longitud del entrehierro

**D:** diámetro del rotor

**l:** longitud del rotor

**P:** número de polos de la máquina

**Fe:** fuerza magnetomotriz máxima del estator

**Fr:** fuerza magnetomotriz máxima del rotor

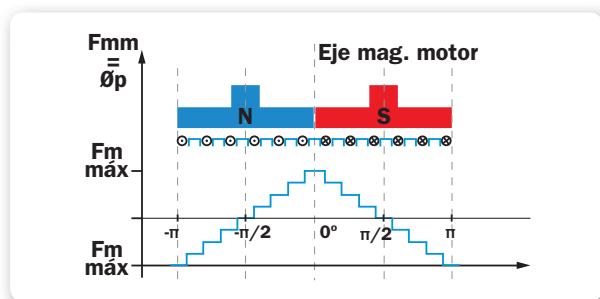
**Sen  $\theta$ :** en una MCC,  $\theta=90^\circ$ , por lo cual  $\text{sen } \theta=1$ , para este caso.

Esta expresión nos indica, por un lado, que la cupla depende del tamaño de la máquina, dado por el producto  $D \cdot l$ . Cuanto mayor sea este producto, mayor será la cupla y, también, la cupla será mayor

cuanto menor sea el espesor del entrehierro  $g$ . Por otro lado, es lógico suponer que la cupla será proporcional a las intensidades de corriente por el estator y el rotor debido a  $F_e$  y  $F_r$ .

## Cálculo de la fuerza magnetomotriz del rotor

Realizaremos ahora el cálculo de  $F_r$  o **FMM** del inducido (rotor). Aplicando la Ley de Ampère y haciendo el desarrollo del rotor en forma lineal, obtenemos la distribución de la **Figura 7**. En dicha distribución, el número de escalones aumenta al aumentar el número de ranuras y, en el límite, la distribución llegaría a ser triangular.



**Figura 7.** Desarrollo lineal y distribución de FMM en el entrehierro.

Cuántos más conductores encierran las líneas de campo, mayor la FMM del inducido (rotor en una MCC).

Aproximando la distribución triangular de la figura por el término principal de la serie de Fourier, podemos calcular el máximo correspondiente a una versión senoidal de la distribución:

$$\mathfrak{F}_R(\max) = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{Z}{P} \cdot \frac{I_i}{a}$$

Donde  $I$  es la **intensidad de corriente total** por los conductores del rotor y  $a$  el número de conductores.

## Cálculo de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro del estator

Ahora que poseemos el valor de **FMM del rotor**, solo resta encontrar una expresión para la **Fe** o **FMM del estator**, que puede escribirse como vemos a continuación:

$$\mathfrak{F}_E (\text{max}) = \oint H \cdot \partial l = H_{\text{max}} \cdot g_{\text{entrehierro}} = \frac{B_{\text{max}}}{\mu_0} \cdot g$$

Observando la distribución trapezoidal de **B** debemos aproximar dicho valor para una distribución senoidal, de manera que la ecuación sea válida. Luego, podemos escribir en función del flujo por polo  $\Phi_P$ , del siguiente modo:

$$B_{\text{max}} = \frac{\pi}{2} \cdot B = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2 \cdot \phi_P}{\pi \cdot D \cdot l} = \frac{\phi_P}{D \cdot l}$$

Si hay **P** polos en la máquina, la ecuación anterior puede expresarse de la siguiente forma:

$$B_{\text{max}} = \frac{P}{2} \cdot \frac{\phi_P}{D \cdot l}$$

Ahora solo resta reemplazar lo que corresponde para obtener una expresión para la **Fe** o **FMM del estator**:

$$\mathfrak{T}_E(\text{max}) = P \cdot \frac{\phi_P}{D \cdot l} \cdot \frac{g}{2 \cdot \mu_0}$$

## Deducción de la cupla interna $T_i$

Habiendo calculado  $F_r$  y  $F_e$  para una MCC y teniendo en cuenta que el ángulo  $\theta$  entre las fuerzas magnetomotrices es  $90^\circ$  para una MCC, podemos deducir una expresión para el cálculo de la cupla interna  $T_i$ :

$$T_i = \pm \frac{\mu_0 \cdot D \cdot l \cdot \pi \cdot P}{4 \cdot g} \cdot \mathfrak{T}_E \cdot \mathfrak{T}_R \cdot \text{sen}(\sigma)$$

$$T_i = \pm \frac{\mu_0 \cdot D \cdot l \cdot \pi \cdot P}{4 \cdot g} \cdot \left( P \cdot \frac{\phi_P}{D \cdot l} \cdot \frac{g}{2 \cdot \mu_0} \right) \cdot \left( \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{Z}{P} \cdot \frac{I_i}{a} \right) \cdot 1$$

$$T_i = \pm P \cdot \left( \frac{\phi_P}{2} \right) \cdot \left( \frac{Z}{\pi} \cdot \frac{I_i}{a} \right) \cdot 1 = \frac{P \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \phi_P \cdot I_i$$

Podemos dar una vuelta de tuerca más y simplificar la ecuación utilizando el valor de la FEM inducida  $E_i$ , calculada anteriormente:

$$T_i = \frac{P \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \phi_P \cdot I_i = \frac{E_i \cdot I_i}{w_m}$$

Con lo cual la **potencia interna** (sin pérdidas) de una MCC resulta en lo que vemos a continuación:

$$P_i = T_i \cdot w_m = E_i \cdot I_i$$



# Problemas de conmutación en MCC reales

La conmutación ideal en el colector de una MCC que se desarrolló en el apartado anterior se ve, en la realidad, afectada por dos problemas en una máquina real:

1. Reacción del inducido
2. Voltajes  $L \frac{di}{dt}$

Existen soluciones para dichos problemas que producen desgastes y deterioros mecánicos en las máquinas reales, que llevan también a la pérdida de potencia.

En este apartado describiremos estos efectos negativos y las soluciones que se utilizan en la construcción de las máquinas reales.

## Reacción de inducido

La **reacción de inducido** es la distorsión que se genera en el campo magnético original en el entrehierro, debido a la circulación de intensidad de corriente sobre los bobinados del rotor.

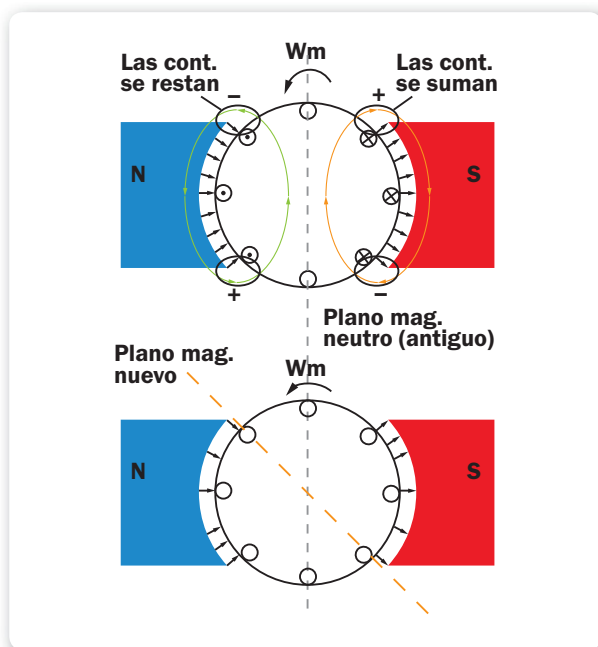
Para entender este fenómeno primero explicaremos qué se entiende por **plano neutro**. Denominaremos así al plano dentro de la MCC, donde la dirección de la velocidad tangencial de los conductores del rotor es exactamente paralela a las líneas de fuerza del campo magnético del estator. Es decir, dado el producto vectorial:

$$E_i = (v \otimes B) \cdot l \therefore E_i = 0$$

Aquí, la distorsión que introducen en el campo magnético original las corrientes que recorren los bobinados del rotor produce el

desplazamiento del plano neutro (en el sentido del movimiento de la máquina, en un generador, y en sentido contrario para un motor). La magnitud del desplazamiento depende de la **corriente de armadura o inducido  $I_i$**  de la máquina y, por lo tanto, de la carga que tenga la máquina.

Para continuar, graficamos el desplazamiento del plano neutro en la siguiente imagen:



**Figura 8.** Efecto de la reacción de inducido en un generador de CC y desplazamiento del plano neutro.

Vemos cómo en algunos puntos el CM (campo magnético) se suma, y en otros se resta, produciendo la distorsión del campo resultante en el entrehierro.



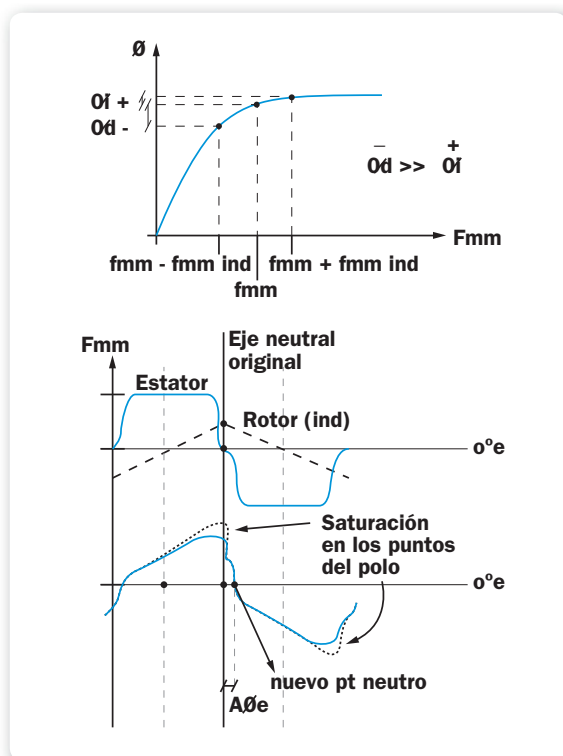
Siendo que el colector idealmente pone en “cortocircuito” los segmentos, precisamente en el instante en que el voltaje sobre ellos es nulo, vemos que, teniendo en cuenta la reacción de inducido, esto no se cumple. Aparecen, entonces, dos problemas con el desplazamiento del plano neutro:

1. Arcos y chispas en el colector al conmutar segmentos
2. Disminución de **B**

El primer problema se produce debido a que, como dijimos, el plano neutro se desplaza y las escobillas ya no se encuentran sobre el eje neutral. Esto ocasiona diferencias de tensión sobre los segmentos que se ponen en cortocircuito al momento exacto de la conmutación. Luego, se disminuye la vida útil de las escobillas y puede fundirse la superficie del colector debido a las tensiones de arco.

El segundo ítem se refiere a la disminución del promedio total del flujo frente a los polos. Ocurre porque las máquinas operan en un punto muy cercano a la saturación del núcleo ferromagnético y, en los puntos donde el flujo se suma, se produce solo un muy leve incremento de **B**, debido precisamente a la característica no lineal del material. Donde se resta, en cambio, el flujo promedio se debilita considerablemente.

El debilitamiento del flujo produce efectos distintos de acuerdo a si la máquina es un generador o un motor. Si la máquina en cuestión es un generador, reduce el voltaje entregado por el generador, equivalente a una pérdida de potencia entregada. Si es un motor, al debilitarse el flujo, aumenta la velocidad **n** en rpm de la máquina. Pero al aumentar la velocidad de un motor, se puede aumentar su carga, lo que lleva a un debilitamiento mayor del flujo y un nuevo aumento de velocidad. En definitiva, el debilitamiento del flujo como consecuencia de la reacción de inducido en un motor de CC puede ser grave.



**Figura 9.** Efecto de la disminución del promedio total del flujo frente a las caras de los polos.

## Golpe inductivo: voltajes $L \cdot di/dt$

El segundo problema en la conmutación de las máquinas de CC se encuentra en el llamado **golpe inductivo** o problema de los voltajes  $L \cdot di/dt$ , que tiene que ver con la inversión de sentido de la corriente en los segmentos colectores al momento de la conmutación. Dado que la duración de la conmutación es muy pequeña (en el orden de los milisegundos), aun cuando la

inductancia en el circuito sea pequeña, esto es debido a que la tasa de variación  $di/dt$ , el golpe de voltaje es suficiente para producir los mismos arcos (**ruptura dieléctrica**) y problemas que la reacción de inducido.

## Soluciones para los problemas de conmutación

Vamos a analizar tres soluciones mecánicas a este problema:

1. Desplazamiento de escobillas
2. Polos de conmutación
3. Bobinados de compensación

El desplazamiento de escobillas solo se utiliza actualmente para motores muy pequeños. Este método consiste simplemente en compensar el desplazamiento del plano neutro desplazando físicamente las escobillas recolectoras de corriente. Existen problemas en esta solución, cuando la máquina actúa como generador, las escobillas debieran desplazarse en una dirección. Pero si posteriormente la máquina debiera funcionar como motor, el desplazamiento del plano neutro sería en el otro sentido, por lo que mecánicamente habría que desplazar las escobillas en la dirección opuesta. La solución elimina el chisporroteo de las escobillas pero agrava el debilitamiento del flujo.



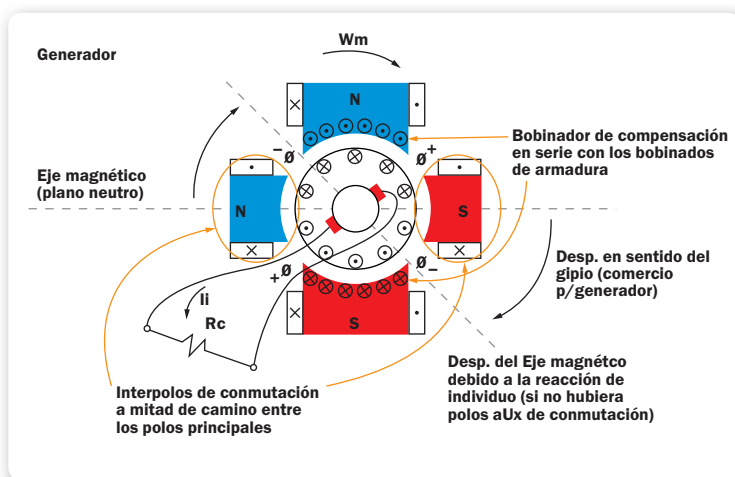
### PROFESOR EN LÍNEA



Si tiene alguna consulta técnica relacionada con el contenido, puede contactarse con nuestros expertos: [profesor@redusers.com](mailto:profesor@redusers.com)

Otra solución ampliamente utilizada viene dada por la construcción de polos de conmutación, que se ubican física y directamente sobre los conductores que van a conmutar, a medio camino entre los polos principales. Son pequeños, por lo que afectan solamente a los conductores en conmutación pero, por ello mismo, no solucionan el problema de debilitamiento del flujo principal, ya que no los afecta. Estos arrollamientos de conmutación se conectan en serie con los bobinados del rotor. Luego, al elevarse el voltaje de los conductores sujetos a conmutación, también se incrementa el flujo del polo auxiliar compensando el desplazamiento del plano neutro. Esta solución es factible tanto para generadores como para motores.

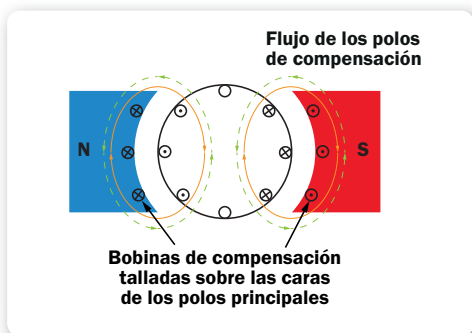
En definitiva, su construcción debe ser tal que los polos de conmutación deben inducir un voltaje contrario al causado por el desplazamiento del plano neutro y por los efectos  $L \cdot di/dt$ .



**Figura 10.** Disposición física de los polos de conmutación en una MCC.

Para solucionar el problema del debilitamiento del flujo se utilizan las llamadas **bobinas de compensación**, que van ubicadas en

ranuras talladas sobre las caras de los polos de estator, paralelas a los conductores del rotor.



**Figura 11.** Bobinas de compensación talladas sobre las caras de los polos principales.

Se conectan eléctricamente en serie con los bobinados del rotor, al igual que los polos de conmutación. La fuerza magnetomotriz debida a estas bobinas es igual en magnitud, y contraria en dirección, a la FMM del rotor en todas partes, frente a las caras polares. Soluciona el problema del desplazamiento del plano neutro y también el debilitamiento del flujo principal; no obstante, al no solucionar el problema del **golpe inductivo** o voltajes  $L \cdot di/dt$ , las bobinas de compensación deben usarse en conjunto con los polos de conmutación.

En general, esta solución es utilizada en máquinas con rendimientos muy exigentes, debido al elevado costo de construcción.



## RESISTENCIA CRÍTICA



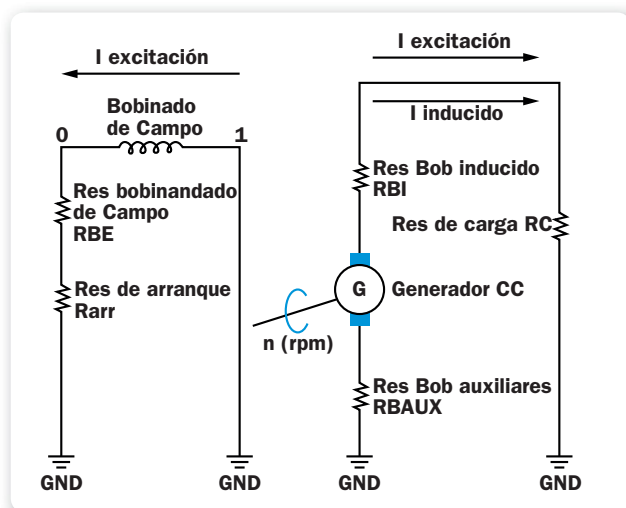
Es una resistencia de campo característica para la velocidad, es la pendiente de la línea de campo tangente a la curva de magnetización.

## Circuitos equivalentes de las MCC

Tanto para motores como para generadores de continua, existen cuatro tipos de configuraciones posibles para la conexión de los devanados:

1. Conexión independiente
2. Conexión serie
3. Conexión en paralelo
4. Conexión compuesta

En la **conexión independiente**, el **bobinado de campo** o **inductor** está aislado con respecto al circuito de los bobinados del rotor.

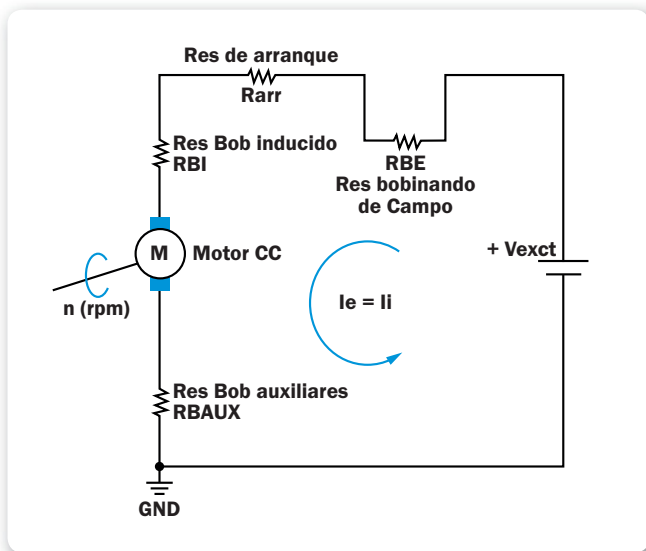


**Figura 12.** Circuito equivalente a un dínamo en **conexión independiente**.

Una máquina de corriente continua se encuentra en **conexión serie** si su bobina de campo (inductor) está conectada en serie con la bobina de armadura (inducido). Para motores como para generadores serie, las bobinas de campo son construidas con un número reducido de espiras. Esto es así de manera de reducir la resistencia del devanado, por la que circulará la corriente nominal.

En el caso de motores serie, poseen un par elevado de arranque ya que, como vimos, el momento de torsión es directamente proporcional al valor de la corriente de armadura.

La elevada corriente de arranque, en esta configuración, recorre los bobinados de campo y armadura que se encuentran en serie, lo que explica el elevado par de arranque. Sin embargo, presenta también el peligro de embalarse en velocidad si se encuentra en vacío en condiciones nominales. La velocidad de esta máquina depende totalmente de la corriente de excitación.



**Figura 13.** Circuito equivalente de un motor en **conexión serie**.

La **conexión en paralelo** o **shunt** presenta una situación distinta. Aquí, el devanado de campo se encuentra conectado en derivación o paralelo al devanado de armadura. La construcción del devanado de armadura es distinta de la máquina serie. El alambre del bobinado es delgado y tiene numerosas vueltas (para así generar un campo lo suficientemente fuerte como para mantener la velocidad de un motor prácticamente constante) y posee un par de arranque menor que el motor serie, si bien es más estable con respecto a su velocidad de funcionamiento.

Los generadores en conexión en paralelo presentan una gran ventaja con respecto a los serie, ya que no requieren fuente externa alguna para el circuito de campo. El voltaje inicial en las terminales depende de la presencia de magnetismo remanente en el estator de la máquina, por lo que se dice que el generador se encuentra en **condición de autoexcitación**.

Se necesitan ciertas condiciones para lograr este cometido:

1. Que exista magnetismo remanente en el estator de la máquina
2. Que el sentido de giro de la máquina y la polaridad del devanado de campo produzcan una FEM del mismo signo que el que corresponde al magnetismo remanente.
3. Que la resistencia del bobinado de campo sea menor que la denominada **resistencia crítica**

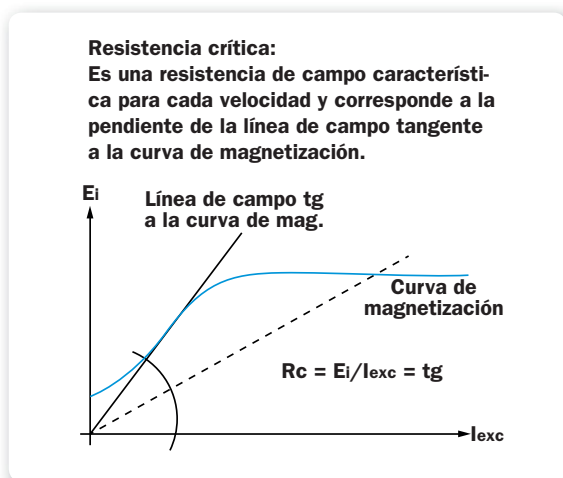


## VALORES NOMINALES



Los **valores nominales** son los **valores de especificación** de las máquinas eléctricas que indican los máximos para su funcionamiento normal o esperado, para los cuales todas las funcionalidades de la máquina se encuentra garantizada. Es común encontrarlos, en las chapas de especificación de los dispositivos, como **valores de especificación de corriente nominal, tensión nominal, potencia nominal**, etcétera.





**Figura 14.** Concepto de **resistencia crítica**.

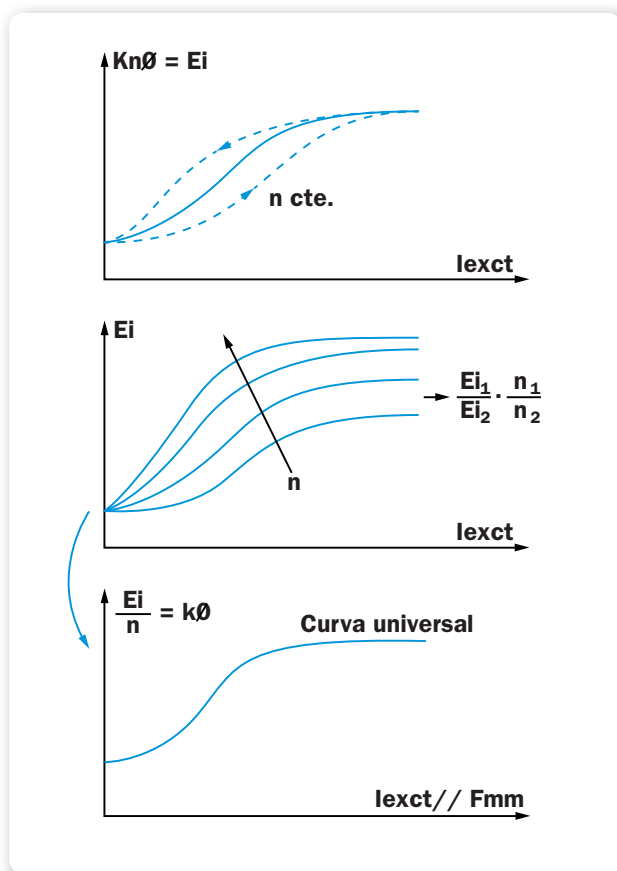
Podemos observar la interpretación que debe darse a las curvas de magnetización de las máquinas. Vemos cómo, en efecto, se grafica un valor medio de la curva, que en realidad es un ciclo de histéresis como los estudiados en el primer capítulo. Por otro lado, dicho valor medio depende también de la velocidad de la máquina en estudio, por lo que se utilizan **curvas universales**, donde nos independizamos de la velocidad y nos quedamos solamente en el eje de abscisas con el valor del flujo.



## CURVA DE MAGNETIZACIÓN



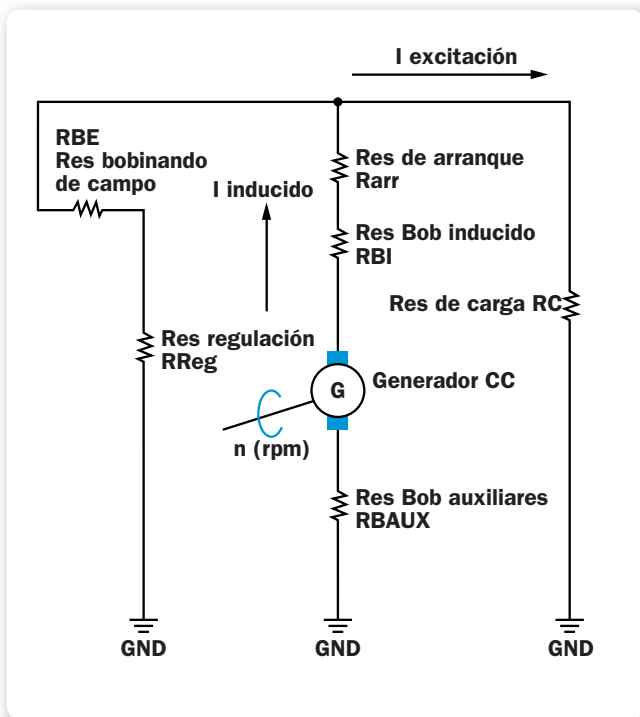
Es una gráfica del acoplamiento magnético entre el estator y el rotor medido en vacío. Se denomina también **característica interna** y es un reflejo de la curva **B-H** del material ferromagnético, de la relación en el número de espiras de estator a rotor.



**Figura 15.** Interpretación gráfica de la curva de magnetización de una máquina de corriente continua.

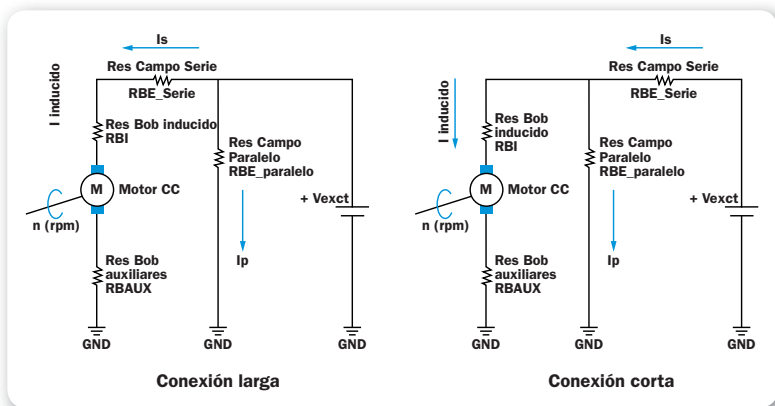
Una máquina que utiliza una **conexión compuesta** posee dos bobinados de campo: uno se utiliza en conexión serie con el de armadura, y el otro se conecta en paralelo con la armadura o inducido. Si el bobinado de campo serie se conecta directamente con el de armadura, se denomina a la configuración resultante

**conexión compuesta larga.** En cambio, si nos encontramos con que el bobinado de campo serie se conecta en derivación con respecto al paralelo del bobinado de armadura y el bobinado paralelo de campo, debemos tener en cuenta que se la denomina **conexión compuesta corta.**



**Figura 16.** Circuito equivalente para una **conexión derivación** o **shunt** de un generador de CC.

Ambos tipos de configuraciones pueden ser **aditivas** o **sustractivas**, dependiendo esto de la polaridad de conexión de los bobinados de campo serie y paralelo.



**Figura 17.** Circuito equivalente del motor compuesto **largo** y **corto**.



## RESUMEN



En este capítulo hemos conocido y analizado las características y el comportamiento de las máquinas de corriente continua. Hemos observado la cupla interna  $T_i$ , que puede ser calculada a partir de las magnitudes de las FMM de estator y rotor, y vimos que la magnitud de la cupla interna es directamente proporcional al aumento de la tensión inducida  $E_i$  y de la intensidad de corriente por los conductores del rotor  $I_i$ . También aprendimos que las máquinas reales precisan de bobinados auxiliares de conmutación y compensación, y que el uso conjunto de éstos posibilita la solución de los problemas derivados de la **reacción de inducido** y los voltajes de **golpe inductivo**.



# Máquinas de corriente alterna

En este capítulo conoceremos los detalles y características de las máquinas de corriente alterna, analizaremos la configuración de una máquina sincrónica y los circuitos equivalentes, entre otros conceptos importantes.

▼ Configuración de la máquina sincrónica ..... 68

▼ Tensión inducida en una MCA ..... 71

▼ Par electromagnético o interno ..... 75

▼ Circuitos equivalentes de las máquinas sincrónicas . 82

▼ Arranque del motor sincrónico ..... 91

▼ Resumen ..... 92





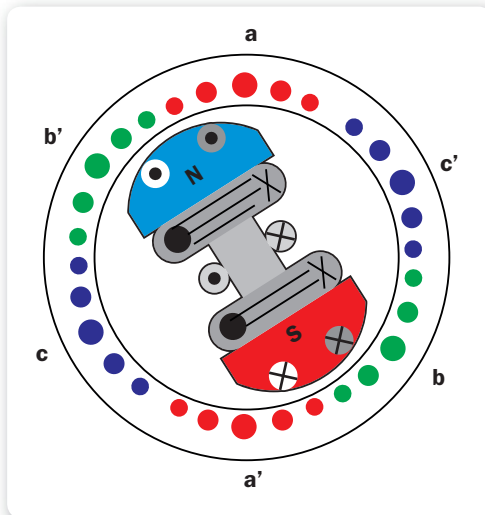
## Configuración de la máquina sincrónica

En el caso de un motor sincrónico, si la frecuencia de la tensión de alimentación es constante, también lo será su velocidad de giro. Por ello, se lo utiliza en aquellos casos en los que se requiera una velocidad de trabajo constante. La aplicación más frecuente de los motores síncronos, está en la corrección de factor de potencia en instalaciones industriales. Análogamente, un generador sincrónico, girando a velocidad constante, producirá tensiones inducidas de frecuencia constante. Su aplicación se encuentra, por ejemplo, en represas hidroeléctricas y en la fabricación de grupos electrógenos con motores de arrastre a diésel.

En las máquinas sincrónicas el **inductor** es el **rotor** –un electroimán giratorio alimentado por corriente continua a través de anillos–, mientras que el **inducido** es el bobinado del **estator**, al revés que en la máquina de corriente continua.

Sobre el estator se encuentra una serie de ranuras uniformemente distribuidas donde se alojan los conductores del bobinado. La distribución del campo magnético en el entrehierro es, prácticamente, sinusoidal.

Podemos clasificar a estas máquinas como **monofásicas** o **trifásicas**, dependiendo del tipo de organización de los bobinados del estator. Por ejemplo, una máquina sincrónica trifásica tendrá 3 bobinas desplazadas  $120^\circ$  mecánicas a lo largo del entrehierro, si el rotor tuviera dos polos. En efecto, vemos que una vuelta del rotor inducirá, sobre el bobinado **a** del estator, una tensión senoidal, cuya frecuencia será la correspondiente a la velocidad del rotor. Sobre el bobinado **b** se inducirá una tensión de la misma forma, pero con  $120^\circ$  de atraso mientras que, sobre el bobinado **c**, la misma tensión senoidal pero con  $240^\circ$  de atraso. Este grupo de tensiones conforma un **sistema trifásico**.



**Figura 1.** Construcción de una máquina síncrona trifásica de rotor bipolar.

Consideremos que cuando estamos en presencia de máquinas de más de dos polos, se utiliza el concepto de **ángulo eléctrico** junto con el de **ángulo mecánico**.

Decimos que, cuando la tensión inducida completa un ciclo, el rotor ha recorrido  $360^\circ$  eléctricos. Pero los que realmente recorre son los grados mecánicos. Para una máquina alterna síncrona bipolar, ambos grados –eléctricos y mecánicos– coinciden. Pero si vamos al caso de una máquina tetrapolar, cuando el rotor completa una vuelta o  $360^\circ$  mecánicos, las tensiones inducidas han completado dos ciclos eléctricos. Podemos decir que, en general, para una máquina de  $P$  polos, la relación entre grados eléctricos y mecánicos es la siguiente:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \cdot \theta_m$$

Por último, en la construcción de los rotores de estas máquinas podemos encontrar modelos de lisos (alta velocidad) y de polos salientes (baja velocidad).

## Funcionamiento como generador de una MCA sincrónica

Si la máquina funciona como generador, al hacer girar el rotor a una velocidad  $n$ , se induce una tensión en cada bobina del estator, conformando un sistema trifásico, como detallamos anteriormente.

La frecuencia  $f$  de red del sistema trifásico será:

$$f = \frac{P \cdot n}{120}$$

Y el valor eficaz  $E$  del sistema trifásico será:

$$E = 4.4 \cdot k_w \cdot f \cdot N \cdot \phi_p$$



### CONCEPTO DE CAMPO ROTANTE



Pensemos en un generador. Llamaremos campo rotante, al campo magnético giratorio en el espacio, obtenido por medio de un sistema trifásico de corrientes desfasados en el tiempo  $120^\circ$  cuyos bobinados se encuentran dispuestos equidistantes en el entrehierro de un convertidor. La F.M.M resultante en el entrehierro tiene la siguiente expresión:  $F_{mm}(\text{tot}) = (3/2) \cdot F_{mm1} \cdot \cos(\omega t - d)$ . Que es una onda viajera con  $F_{mm1}$  siendo la amplitud del término fundamental de la serie de Fourier.



No obstante, el paso de la corriente eléctrica por el estator creará un campo magnético que ejercerá un par sobre el rotor, que se opondrá al giro de la máquina. De esta forma, vemos cómo es necesaria la aplicación del par mecánico para vencer este efecto y mantener funcionando la máquina como generador, transformando la energía mecánica en eléctrica.

## Funcionamiento como motor de una MCA sincrónica

Si se trata de un motor, será necesario alimentar el estator a través de un sistema trifásico de corriente alterna de frecuencia  $f$ .

El motor girará a una velocidad de sincronismo  $n$  dada por:

$$n = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Es necesario considerar que esta velocidad coincide con la que corresponde al campo rotante que es generado por los bobinados de estator. De esta forma, a la tensión que es aplicada al estator se le opone la denominada **fuerza contra electromotriz E**, que a su vez debe ser contrarrestada por la fuerza electromotriz de la fuente trifásica de alimentación, consiguiéndose la transformación deseada de energía.



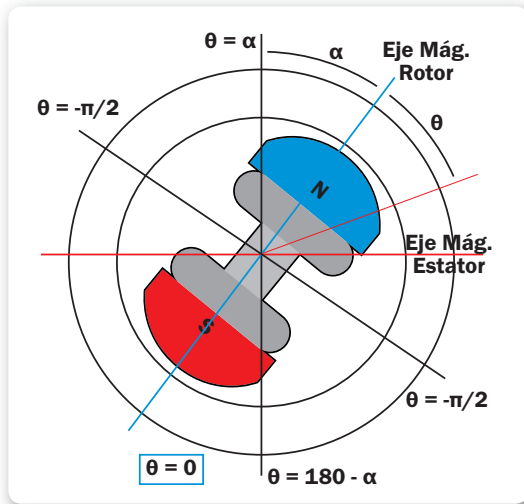
## Tensión inducida en una MCA

Para el cálculo de la tensión inducida sobre los devanados del estator en una máquina sincrónica procederemos, en primer lugar, a calcular el flujo por polo del rotor. Como en el caso del cálculo realizado para las máquinas de corriente directa, utilizaremos la

Ley de Faraday ya estudiada como principio fundamental. Para los cálculos consideraremos que el campo magnético en el entrehierro, en todos los puntos, se encuentra en dirección radial.

## Cálculo del flujo total

Para realizar el cálculo del flujo total al que se ve sometido una espira del estator primero debemos calcular el flujo por polo  $\varphi_p$  del rotor o inductor.



**Figura 2.** Esquema geométrico para el cálculo del flujo sobre los devanados del estator.

El flujo magnético se puede calcular mediante la integral de la densidad de flujo  $\mathbf{B}$  por unidad de superficie.

De esta forma llamaremos  $\sigma$  al ángulo de recorrido del polo norte del rotor con respecto a su eje magnético, y así integramos la ecuación en función de la variable  $\varphi$ :

$$\phi_p = \int B \cdot \partial A = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} [B m \cdot \cos(\theta)] \cdot \left[ \frac{D \cdot L}{2} \right] \cdot \partial \theta$$

Teniendo en cuenta que pueden existir **P** polos, la integral es:

$$\phi_p = \frac{B m \cdot L \cdot D}{(P/2)}$$

Si el rotor gira a una velocidad constante, el ángulo **a** puede tomarse como igual a **w<sub>m</sub>\*t**, siempre que el origen de los tiempos sea la posición vertical del rotor.

Así, podemos ahora pasar a calcular el flujo  $\phi$  que se observa en los devanados del estator al girar el rotor, utilizando el mismo principio de cálculo:

$$\phi = \int B \cdot \partial A = \int_{\pi-a}^{-a} [B m \cdot \cos(\theta)] \cdot \left[ \frac{D \cdot L}{2} \right] \cdot \partial \theta = B m \cdot L \cdot D \cdot \text{sen}(a)$$

$$\phi = \phi_p \cdot \text{Sen}(a)$$

$$\phi = \phi_p \cdot \text{Sen}\left(\frac{P}{2} \cdot a\right) = \phi_p \cdot \text{Sen}\left(\frac{P}{2} \cdot w_m \cdot t\right)$$

Teniendo en cuenta que pueden existir **P** polos:

Entonces, cuando el ángulo **a** sea igual a **90°** el flujo será **máximo**.  
Y cuando sea igual a **0°**, el flujo será **mínimo**.

## Cálculo de la FEM inducida

Ahora estamos en condiciones de aplicar nuestra conocida Ley de Faraday para el cálculo de la FEM inducida en los bobina-

dos del estator. Para ello, aplicamos la regla de derivación del producto (considerando una máquina de dos polos):

$$e = N \cdot \frac{\partial \phi_T}{\partial t} = N \cdot \frac{\partial \phi_P}{\partial t} \cdot \text{sen}(w_m \cdot t) + N \cdot \phi_P \cdot [\text{cos}(w_m \cdot t)] \cdot w_m$$

De la ecuación anterior podemos extraer varias conclusiones. El primer término corresponde a la denominada **tensión inducida por efecto transformador**.

Es necesario tener en cuenta que, generalmente este término es nulo, ya que aparece solo si la corriente de excitación del bobinado del rotor es variable a través del tiempo. Como vimos, no lo es, sino que es tensión continua.

El segundo término corresponde a la **tensión inducida por movimiento**, y calcular su valor eficaz es sencillo:

$$E_{\xi} = \frac{N \cdot \phi_P \cdot w_m}{\sqrt{2}}$$

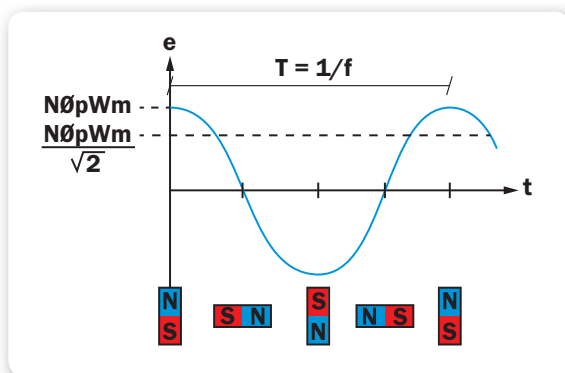
Reescribiendo la anterior ecuación en función de la frecuencia **f**, podemos observar también la aparición de una constante denominada **k<sub>w</sub>** que tiene en cuenta desviaciones de nuestras hipótesis de idealidad:

$$E_{\xi} = 4,4 \cdot k_w \cdot f \cdot N \cdot \phi_P$$

Dicha constante, adimensional, posee un valor generalmente de entre 0,85 y 0,9 **k<sub>w</sub>**. Entre las no idealidades tenidas en cuenta en **k<sub>w</sub>** podemos citar:

- Más de dos polos en el rotor
- Devanados con ranuras próximas en el espacio
- La distribución de **B** no es perfectamente senoidal

Podemos apreciar una gráfica de la FEM inducida en el estator de una máquina síncrona. La distribución es senoidal.



**Figura 3.** Gráfica de la FEM inducida sobre los devanados del estator de una máquina síncrona.



## Par electromagnético o interno

Para el cálculo del par electromagnético o interno de una máquina síncrona se realizará un análisis similar al efectuado para la



### FEM Y FRECUENCIAS INDUCIDAS



Al ser el flujo por polo  $\phi_p$  directamente proporcional a las corrientes de excitación rotóricas, un aumento de estas corrientes conllevará un aumento del flujo por polo y, en consecuencia, un aumento de la FEM inducida en los bobinados del estator. Al mismo tiempo, si aumenta la velocidad de giro del rotor, aumentan tanto las frecuencias como la FEM inducida.

máquina continua Recordemos que partíamos de ciertas hipótesis que consideraban que el cálculo del par interno se realiza bajo la suposición de que en la máquina existen dos campos magnéticos: uno debido a la FMM del estator (en adelante  $F_e$ ), y otro debido a la FMM del rotor (en adelante  $F_r$ ).

$$T_i = \pm \frac{\mu_0 \cdot D \cdot l \cdot \pi \cdot P}{4 \cdot g} \cdot \mathfrak{F}_E \cdot \mathfrak{F}_R \cdot \text{sen}(\sigma)$$

Donde:

**g**: longitud del entrehierro

**D**: diámetro del rotor

**l**: longitud del rotor

**P**: número de polos de la máquina

**$F_e$** : fuerza magnetomotriz máxima del estator

**$F_r$** : fuerza magnetomotriz máxima del rotor

**Sen  $\theta$** : ángulo de potencia

Siendo **B<sub>m</sub>** la inducción máxima, la fuerza magnetomotriz del rotor  **$F_r$**  (inductor) será:

$$\mathfrak{F}_R(\text{max}) = P \cdot \frac{\phi_p}{D \cdot l} \cdot \frac{g}{2 \cdot \mu_0}$$

Luego, y antes de pasar al estudio del cálculo de la FMM del estator para estimar una expresión de la cupla interna, realizaremos un análisis de la distribución de dicha FMM en las máquinas sincrónicas.

## Distribución de la FMM

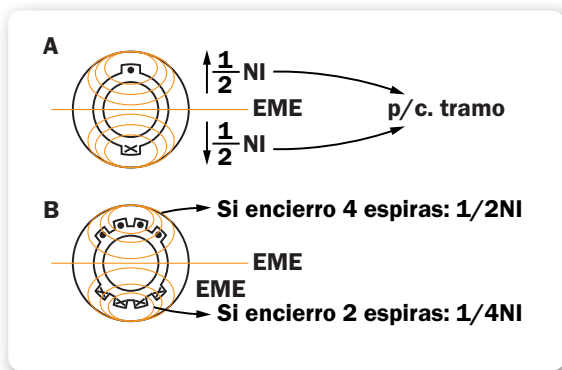
En este apartado estudiaremos el campo magnético creado por las corrientes que recorren el inducido (estator en las máquinas

sincrónicas); éste creará un campo magnético en el entrehierro, que denominaremos **B<sub>o</sub>**, y en las partes metálicas de estator y rotor, que denominaremos **B<sub>h</sub>**. Al ser la reluctancia del hierro mucho menor que la del aire, podemos decir que:

$$N \cdot I e = \phi_T \cdot (R_h + R_0) \approx \phi_T \cdot R_0$$

La FMM causante del campo se aplica casi exclusivamente para establecer un flujo en el entrehierro de la máquina síncrona. Luego, se crea un campo magnético debido al inducido en el mismo entrehierro.

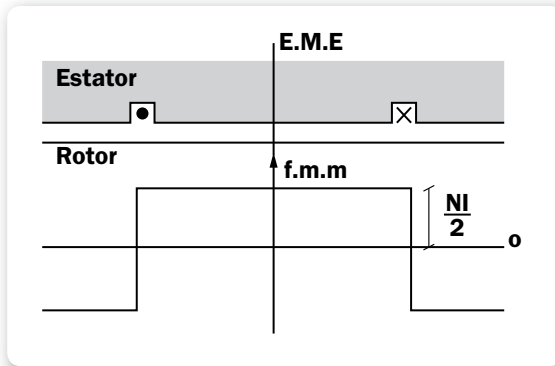
Al aplicar la Ley de Ampère a cualquier línea de campo cerrada se obtiene **N\*I**, siendo, como sabemos, **N** el número de conductores que pasan por la ranura e **I** la intensidad de corriente en el instante de medición. La FMM que provoca el flujo será, por lo tanto, **N\*I**.



**Figura 4.** A) Gráfico de las líneas de campo magnético debidas a una espira en el estator de una máquina síncrona. B) Líneas de campo magnético debidas a varias espiras en el estator de una máquina síncrona.

Retomando el concepto referido a que la reluctancia del aire es mucho mayor que la del hierro, vemos que casi la totalidad del

flujo magnético se establece en el entrehierro. Bajo dicha hipótesis, y por simetría, a cada uno de los tramos perpendiculares al eje magnético del estator le corresponde la mitad de FMM, es decir,  $\frac{1}{2} \cdot N \cdot I$  (aunque de signo contrario).



**Figura 5.** Desarrollo lineal de la máquina con la correspondiente distribución de su FMM.

Podemos ver que la FMM es constante para todos los puntos entre las ranuras del estator, siendo de signos contrarios para cada una de las partes en que queda dividido el entrehierro. El eje magnético del estator divide la zona central pero, como sabemos, en la práctica las máquinas son trifásicas y hay varias ranuras por cada



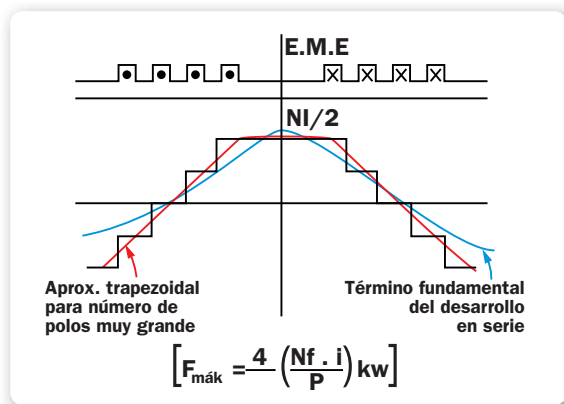
## DISTRIBUCIÓN DE LA FMM



La distribución de la FMM en el entrehierro es independiente de la forma del rotor, pero depende de la organización de corrientes en el estator. No obstante, para los cálculos se utilizará una hipótesis de rotor cilíndrico, para simplificar el análisis.



fase. Aplicando de igual modo la Ley de Ampère –pero ahora sobre la máquina– se obtiene una distribución trapezoidal con escalones, que serán cada vez más numerosos, cuanto mayor sea el número de ranuras asignadas a cada fase.



**Figura 6.** Desarrollo lineal de la máquina con la correspondiente distribución de su FMM escalonada.

Se toma como válido el término fundamental del desarrollo en serie de Fourier de dicha distribución. Luego se cuenta para el cálculo con una distribución aproximada senoidal de la FMM. El máximo de la FMM se encuentra, obviamente, sobre el eje magnético del estator (o sea, en el polo magnético). El valor máximo de la onda fundamental senoidal será:

$$F e = \frac{4}{\pi} \cdot \left( \frac{N_f \cdot i}{P} \right) \cdot k_w$$

Para el cálculo se ha tenido en cuenta el número de polos **P** total del rotor y la constante **kw** (utilizada para el cálculo de la FEM indu-

cida en el apartado anterior). Esta constante tiene en cuenta que no todas las ranuras se encuentran diametralmente opuestas y que las FMM, al igual que las tensiones, están ligeramente desfasadas. La **FMM resultante instantánea** de una máquina, teniendo en cuenta las tres fases de una trifásica, es:

$$F_{\dot{e}} = \frac{3}{2} F_e \cdot \cos(\omega_e t - \theta)$$

$\omega_e$  es la frecuencia angular de las corrientes del estator y  $\Theta$  el ángulo mecánico entre las fases de los bobinados. Esto indica, de acuerdo al concepto de **campo rotante**, que la FMM en el entrehierro de la máquina varía senoidalmente en tiempo y espacio, dando lugar al campo magnético giratorio.

Es decir que las fuerzas magnetomotrices, producidas por tres bobinas equidistantes y recorridas por corrientes alternas de frecuencia  $f$  sobre un entrehierro uniforme, son giratorias al igual que el campo magnético.

Finalmente, podemos afirmar que el máximo de la FMM en el entrehierro de una máquina de alterna debido a las corrientes eficaces sobre el estator viene dado por:

$$F_E = \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_f \cdot i}{P} \cdot k_w \right) = 3 \cdot \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{N_f \cdot I}{P} \cdot k_w \right)$$

Una vez calculados los valores máximos de las FMM debidas a estator y rotor podemos reemplazarlas en la ecuación, de la misma manera en que lo hicimos para las máquinas de continua:

$$T_i = \frac{3\sqrt{2}}{4} \cdot P \cdot k_w \cdot N_f \cdot \phi_p \cdot I_e \cdot \text{sen}(\delta)$$

Recordamos aquí que el par, entonces, será directamente proporcional al flujo por polo y a la corriente por el inducido (en este caso, las corrientes eficaces de estator).

El ángulo  $\delta$  representa el ángulo instantáneo entre las FMM de estator y rotor. Ahora, si tomamos el resultado de la ecuación para expresar la cupla en función de la tensión inducida, obtenemos:

$$T_i = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{P}{f} \cdot E \cdot I_e \cdot \text{sen}(\delta)$$

Al tratarse de una máquina sincrónica, la frecuencia  $f$  de las corrientes del estator está directamente relacionada a la velocidad  $n$  en rpm de giro de la máquina. Luego:

$$T_i = \frac{60}{2\pi n} \cdot 3 \cdot E \cdot I_e \cdot \text{sen}(\delta)$$

Expresando la velocidad de giro de la máquina en **rad/s** en vez de en rpm, podemos calcular la **potencia interna total** de la máquina:

$$P_i = T_i \cdot \omega = 3 \cdot E \cdot I_e \cdot \text{sen}(\delta)$$



## CUPLA INTERNA



La **cupla interna** de la máquina sincrónica puede ser calculada a partir de las expresiones para las fuerzas magnetomotrices de estator y rotor. En particular, la **Fe** corresponde casi exclusivamente al establecimiento de flujo en el entrehierro de la máquina. Esta FMM es independiente de la forma del rotor, y solo depende de la organización de los devanados del estator. Su distribución temporal puede considerarse senoidal.

Esta potencia interna también se denomina **potencia de entrehierro**, ya que se entiende que es a través del espacio entre estator y rotor donde tiene lugar la transformación de energía eléctrica en mecánica y viceversa.



## Circuitos equivalentes de las máquinas sincrónicas

Como analizamos en esta introducción, el funcionamiento de las máquinas sincrónicas es relativamente similar al de las máquinas de corriente continua. No obstante, en las sincrónicas es precisamente un juego de tensiones alternas –ya no continuas– el que se induce a partir de un campo magnético generado desde una fuente de continua.

Los circuitos equivalentes de ambas máquinas son similares. En las de continua encontrábamos un generador de tensión constante, inducido en serie con una resistencia. Ahora tendremos un generador de tensión alterna senoidal en serie con una impedancia. De acuerdo a este concepto, entrará en juego no solamente la resistencia eléctrica asociada al bobinado sino también un flujo disperso y un flujo principal de excitación. A esta impedancia característica se la denomina **impedancia síncrona por fase**.

### Impedancia síncrona por fase

Debemos comprender el significado de esta impedancia, característica de las máquinas sincrónicas. Para comenzar el análisis haremos algunas suposiciones para el cálculo:

- 1) Tanto para el estator como para el rotor, las fuerzas magnetomotrices tienen distribución senoidal.
- 2) No existen efectos de saturación magnética.

- 3) No existe flujo disperso en el aire.
- 4) La resistencia de los devanados es nula.
- 5) El entrehierro es uniforme siendo la construcción de la máquina de rotor lisa.

La FMM resultante en el entrehierro se podrá expresar como una suma de fasores:

$$F_T = F_e + F_r$$

En este punto,  **$F_e$**  y  **$F_r$**  son fasores o vectores giratorios a la misma velocidad, respectivamente, del estator y del rotor, y forman entre sí un ángulo  $\delta$ .

Podemos extender esta expresión a los flujos debido a la suposición de rotor liso y entrehierro uniforme:

$$\phi_T = \phi_e + \phi_r$$

Estos flujos magnéticos varían con el tiempo. En el caso del estator esto es lógico, debido a la naturaleza alterna del sistema trifásico de tensiones. No obstante, para el rotor, aunque la FMM sea provocada por una fuente de continua, al estar el rotor en movimiento la FMM varía con el tiempo.

El flujo total  $\Phi_t$  induce sobre cada bobina del estator una tensión  **$E_t$** , que puede interpretarse como la suma de dos tensiones ( **$E_e$**  y  **$E_r$** ) obtenidas por medio de la aplicación de la Ley de Faraday, tomando la derivada del flujo y multiplicando por el número de espiras del devanado.

$$E_T = E_e + E_r$$

Denominaremos a  **$E_r$  tensión de excitación** o **tensión de inducido en vacío**. Es la inducida en la fase de un estator debida al

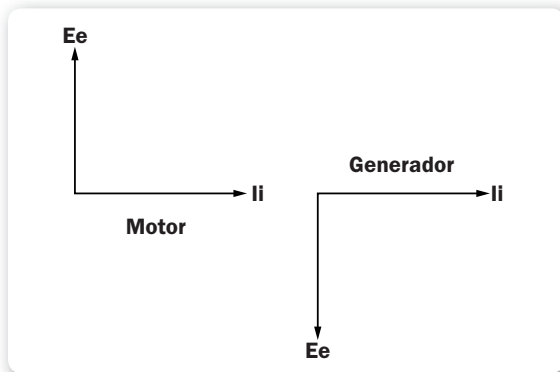
flujo del rotor al girar a velocidad constante. Podemos interpretarla como la tensión inducida que aparece en bornes de un devanado del estator al encontrarse éste en circuito abierto.

La tensión **E<sub>e</sub>** es la inducida sobre una bobina del estator, por su propio flujo. Puede interpretarse como una tensión de reacción de inducido que sólo aparecerá si circula corriente por el devanado estator. El flujo **Φ<sub>e</sub>** será, por lo tanto, proporcional a inducido (estator).

Ahora bien, teniendo en cuenta que estamos en presencia de un sistema trifásico, y que **I<sub>i</sub>** y **E<sub>e</sub>** son vectores, el ángulo entre ellos será distinto según estemos analizando el comportamiento de un motor o de un generador síncrono. Para el caso de un motor, suponiendo el estator a todos efectos como una reactancia pura, la relación entre la **I<sub>i</sub>** de inducido y la **E<sub>e</sub>** será en forma compleja:

$$E_e = j \cdot x_0 \cdot I_i$$

La corriente, para el caso del motor, se encuentra retrasada  $\pi/2$  respecto de la tensión inducida, debido a que será impuesta por la fuente, cuya tensión será la misma que la de la **E<sub>e</sub>** inducida.



**Figura 7.** Diagrama fasorial de la corriente y la tensión inducida para motor (a) y generador (b) síncronos.

Ahora, si analizamos el caso de un generador, la corriente  $I_i$  se establece siempre y cuando exista un circuito cerrado a través de una carga eléctrica. Suponiendo un cortocircuito, la tensión  $E_e$  se encontrará retrasada en  $\pi/2$  respecto de la corriente  $I_i$ . En términos complejos:

$$E_e = -j \cdot x_0 \cdot I_i$$

Podemos plantear las ecuaciones para la tensión inducida total reemplazando lo anteriormente obtenido:

$$E_T^{motor} = E_r + j \cdot x_0 \cdot I_i$$

$$E_T^{generador} = E_r - j \cdot x_0 \cdot I_i$$

Si consideráramos la existencia de flujo disperso, habría que sumárselo al valor de reactancia principal  $X_0$ :

$$x_s = x_0 + x_d$$

$$E_T^{motor} = E_r + j \cdot (x_0 + x_d) \cdot I_i$$

$$E_T^{generador} = E_r - j \cdot (x_0 + x_d) \cdot I_i$$

Llamaremos al término  $X_s$  **reactancia síncrona por fase**.

Para el caso contemplado (de rotor liso y sin efectos de saturación), en régimen permanente puede ser considerada constante, y con una buena aproximación eliminar la influencia del flujo disperso  $X_d$ , de la siguiente forma:

$$E_T^{motor} = E_r + j \cdot X_s \cdot I_i$$

$$E_T^{generador} = E_r - j \cdot X_s \cdot I_i$$

Si se consideran efectos de saturación, el valor de  $X_s$  disminuye respecto al valor sin saturación a medida que aumenta, precisamente, la saturación.

Si ahora agregamos los efectos de una resistencia ohmica en los devanados del estator, desembocamos en el concepto de **impedancia síncrona**, dada por:

$$z_s = r + j x_s$$

Esta impedancia es el valor de impedancia interna del inducido, similar a la resistencia de inducido  $R_i$  de la máquina de continua.

## Circuitos equivalentes

Los circuitos equivalentes representados no tienen en cuenta las pérdidas magnéticas ni las mecánicas (o sea, las llamadas **pérdidas rotatorias**). Tampoco tienen en cuenta las pérdidas eléctricas en el devanado del rotor.

Por lo tanto, una vez que se encuentre resuelto el circuito, estas pérdidas deben contabilizarse, y pueden ser calculadas mediante la realización de ensayos o pruebas de laboratorio sobre la máquina síncrona.

Debemos considerar que los circuitos equivalentes serán válidos bajo la suposición de rotor cilíndrico y sin que existan pérdidas por saturación ferromagnética. Por otro lado, el análisis sirve para régimen estacionario.

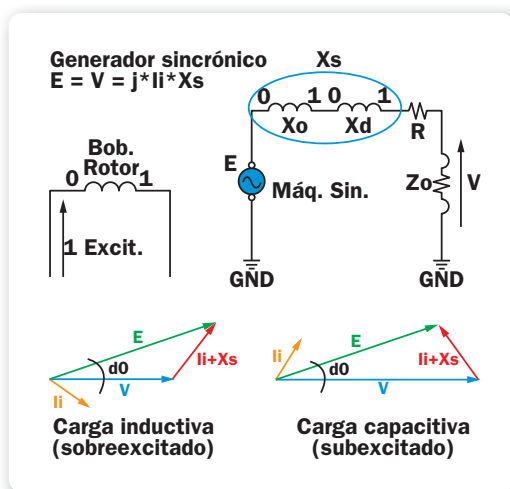


### PROFESOR EN LÍNEA



Si tiene alguna consulta técnica relacionada con el contenido, puede contactarse con nuestros expertos: [profesor@redusers.com](mailto:profesor@redusers.com)



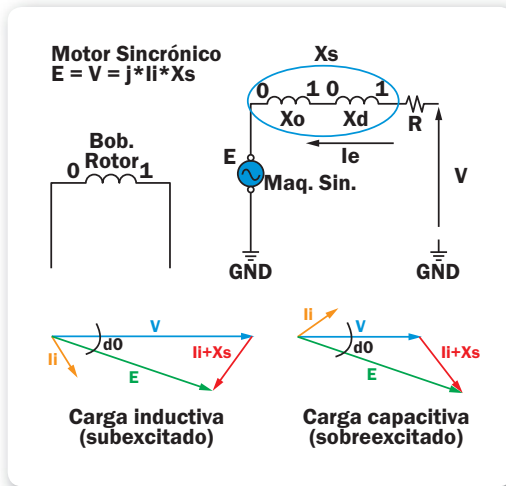


**Figura 8.** Circuito Equivalente y diagramas fasoriales para un generador sincrónico.

Retomando el concepto de potencia interna, debemos destacar que la tensión inducida  $E$  puede modificarse a través de la intensidad de excitación, la cual permite que en la máquina sincrónica la tensión  $V$  y la intensidad inducida puedan estar desfasadas (en adelante o en retraso) para una misma potencia.

Es importante que recordemos que el ángulo  $d_o$  es el que forman la tensión inducida  $E$  y la tensión aplicada  $V$ . Una observación válida es que, para un generador, el ángulo  $d_o$  siempre será positivo, por lo que la tensión interna será positiva. Esto implica que se está entregando energía eléctrica al sistema a partir de la aplicación de energía mecánica.

El hecho de que la corriente se encuentre en adelante o en retraso para la misma potencia activa significa que lo que cambia es la potencia reactiva, que se encuentra directamente relacionada con el flujo magnético en la máquina, controlado a través de la intensidad de excitación en el rotor.



**Figura 9.** Circuito equivalente y diagramas fasoriales para un motor síncrono.

Un **generador sobreexcitado** implica que la intensidad de excitación rotórica es alta, por lo que estaremos en presencia de un calentamiento que puede terminar en la saturación magnética del núcleo. Entonces, cuando se conectan a un generador síncrono cargas muy inductivas, se debe compensar el factor de potencia colocando cargas capacitivas. Esto se ve en los adicionales de facturación que las empresas de distribución de energía aplican a aquellos que no cumplan con la regulación de mantener el  $\cos \phi$  (factor de potencia) de su consumo mayor a **0,85**.

Para un motor, el ángulo  $\mathbf{d\theta}$  será siempre negativo. En consecuencia la potencia interna será negativa, lo que indica un consumo de la red para transformación en energía mecánica. Para un motor, entonces, la tensión inducida **E** siempre se encuentra retrasada respecto de la tensión aplicada **V**. Esto se entiende por la resistencia de los devanados estatoriales, representada por **r**, que siempre es mucho menor que la reactancia síncrona **Xs**.

Anteriormente hemos observado una gráfica de la potencia interna en función del ángulo  $\delta$ . Para estimar el máximo se puede demostrar la equivalencia mostrada a partir de un análisis:

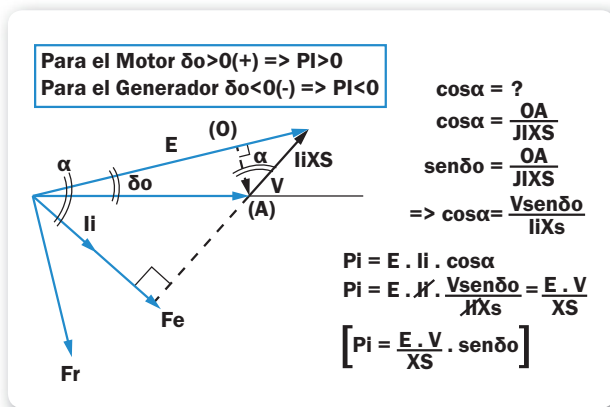
$$P_i = E_i \cdot I_i \cdot \cos(\angle E_i, I_i)$$

$$\cos(\angle E_i, I_i) = \frac{V \cdot \text{sen}(\delta)}{X_s \cdot I_i}$$

$$\therefore P_i = \frac{E \cdot V}{X_s} \cdot \text{sen}(\delta)$$

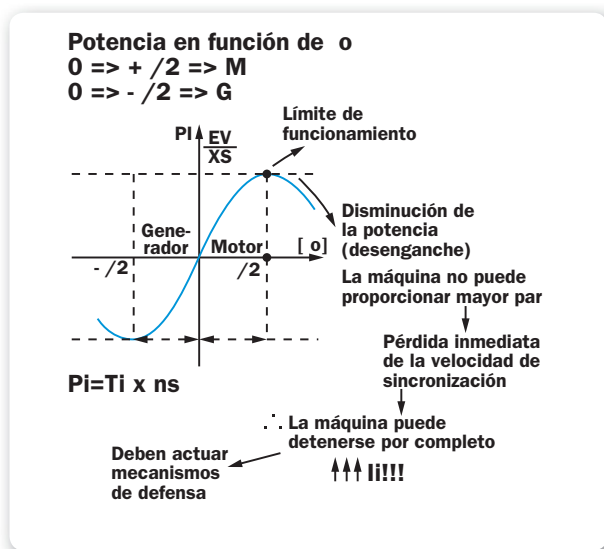
Esta ecuación parte de la definición formal de **potencia interna x fase**, es decir, la potencia transferida de mecánica a eléctrica o viceversa, en una máquina ideal sin pérdidas. Las hipótesis para esta deducción son los siguientes:

1. Resistencia de estator, mucho menor que  $X_s$
2.  $E$  y  $V$  constantes (implica la excitación cte. y para motor  $V$  cte o para generador carga cte.)



**Figura 10.** Análisis fasorial de la equivalencia de la ecuación.

Realizaremos una interpretación de la gráfica para el caso de un motor síncronico. Como la cupla interna  $T_i$  es directamente proporcional a la potencia interna  $P_i$ , si se quisiera mayor cupla debería aumentar la tensión inducida, lo que implica un aumento de la intensidad de excitación rotórica. En la gráfica observamos que nos acercamos al límite de funcionamiento para motor, por lo que podríamos entrar en zona de saturación, presentándose el máximo de la cupla antes de  $\pi/2$ .



**Figura 11.** Potencia interna en función del ángulo  $\alpha$ .

Si se forzara esta situación, se produciría una disminución de la potencia, que podría llevar al “desenganche” de la máquina, que no puede proporcionar mayor par. Esto se traduciría en la pérdida automática de la velocidad de sincronismo y llevaría a la detención completa de la máquina. La corriente por el estator inducida aumentará exponencialmente, por lo que se deben proporcionar

mecanismos de protección contra la sobre intensidad, con el objetivo de proteger los devanados. Una interpretación similar puede realizarse para el caso de un generador.


## Arranque del motor sincrónico

Para finalizar, brindaremos en este apartado algunos conceptos de arranque para motores sincrónicos.

Sabemos que el campo rotante ejerce un par variable sobre el rotor que gira a velocidad de sincronismo. Pero debido a la inercia del motor y a la veloz variación del par, no es capaz de arrastrar al rotor, produciéndose únicamente una vibración alrededor de su posición de equilibrio.

Se dice, entonces, que el motor sincrónico no tiene par de arranque intrínseco. Por lo tanto, es necesario proveer algún medio que consiga poner el motor en rotación, ya que una vez que esté girando a velocidad próxima a la de sincronismo, podrá acoplarse a dicha velocidad y mantenerla para cualquier carga hasta otorgar su par máximo. Es así que se dispone de un devanado en “jaula de ardilla” sobre el rotor, igual al de las máquinas de inducción que veremos en un apartado posterior.

Es importante tener en cuenta que sobre este devanado existe un par de arranque que impulsa al motor a velocidad de sincro-



**¿TE RESULTA ÚTIL?**

Lo que estás leyendo es el fruto del trabajo de cientos de personas que ponen todo de sí para lograr un mejor producto. Utilizar versiones "pirata" desalienta la inversión y da lugar a publicaciones de menor calidad.

**NO ATENTES CONTRA LA LECTURA. NO ATENTES CONTRA TI. COMPRA SÓLO PRODUCTOS ORIGINALES.**

Nuestras publicaciones se comercializan en kioscos o puestos de vendedores; librerías; locales cerrados; supermercados e internet (usershop.redusers.com). Si tienes alguna duda, comentario o quieres saber más, puedes contactarnos por medio de usershop@redusers.com

nismo, momento en que se conecta el devanado de corriente continua del rotor que continúa con el par.

Una vez que se engancha el motor, las corrientes por el devanado en jaula son nulas, pero, durante el arranque, los devanados de continua del rotor deben cortocircuitarse a través de resistencias, para limitar la elevada tensión inducida que puede aparecer durante el proceso.

Una ventaja adicional es que este devanado produce un efecto amortiguador frente a variaciones bruscas de carga que alteran transitoriamente la velocidad de sincronismo.



## RESUMEN



En este capítulo vimos que las máquinas sincrónicas de alterna se caracterizan por poseer un electroimán giratorio de dos o más polos como rotor, que actúa como inductor de la máquina. Por otra parte, los bobinados inducidos, en este caso, son los devanados del estator. También vimos que el estator está compuesto por devanados uniformemente distribuidos a lo largo del entrehierro, donde se cumplen las hipótesis para el establecimiento de un campo rotante.



# Motores paso a paso

El motor paso a paso se puede definir como un transductor electromagnético incremental que, al recibir un pulso a la entrada, produce un desplazamiento angular sobre un eje. Esto permite controlar de manera eficiente y precisa el movimiento en el eje del motor, logrando un paso constante y repetible.

<b>▼ Motores paso a paso .....</b>	<b>94</b>
Motores de reluctancia variable.....	94
Motores de imán permanente .....	97
Motores mixtos o híbridos.....	98
Características estáticas .....	100

Características dinámicas .....	102
Resonancia mecánica.....	106
Secuencia de excitación...	108
Aplicaciones.....	111
<b>▼ Resumen .....</b>	<b>112</b>





## Motores paso a paso

Se podría decir que este sistema es óptimo para aplicaciones que requieren un control exacto de velocidad, distancia y dirección de movimiento.

Este tipo de motores se alimenta por medio de una fuente de corriente continua y mediante un driver permite transformar los pulsos recibidos en la entrada en movimientos angulares sobre el eje de salida. Es importante aclarar que no solo se puede definir el movimiento angular del eje, sino también la dirección de giro. Los motores paso a paso se pueden clasificar en los siguientes tres tipos:

- Motor de reluctancia variable
- Motor de imán permanente
- Motor mixto

A continuación se realiza una descripción detallada de las tres implementaciones posibles de un motor paso a paso.

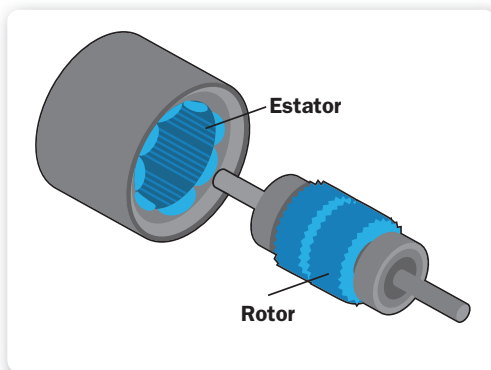
### Motores de reluctancia variable

Este tipo de motor consta de un estator, compuesto por los devanados de excitación, y un rotor de láminas ferromagnéticas (no imantadas). Dichas láminas se encuentran ranuradas longitudinalmente.

El funcionamiento es muy simple: el rotor tiende a alinearse con el **flujo magnético** producido por el estator. Cuando ambos se encuentren alineados se obtendrá el flujo máximo que se corresponde con la mínima reluctancia. Si el rotor se mueve fuera de la posición de equilibrio, como consecuencia de un par externo aplicado al rotor, éste responde con un par en sentido contrario, que se opone al movimiento. Esto se debe a que las líneas de flujo magnético tienden a estar paralelas entre sí y a circular por el elemento más permeable que encuentren. Cuando son deformadas, generan



una fuerza de atracción sobre los elementos a través de los cuales fluyen, intentando mantener el equilibrio.

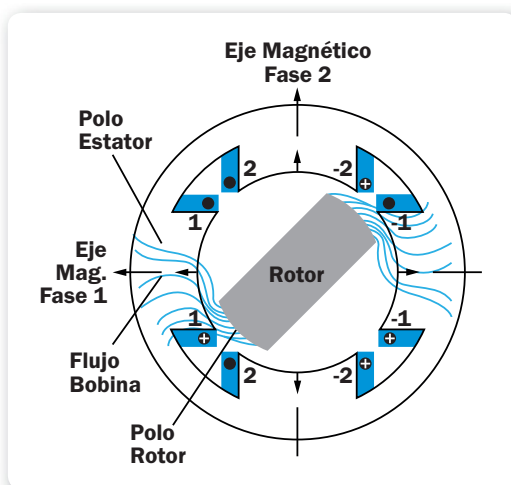


**Figura 1.** Motor de reluctancia variable.

Este sistema, con bobinados en el estator, hace que todas las pérdidas resistivas del devanado se produzcan en el estator favoreciendo en gran medida la disipación de temperatura por estar en contacto con el medio exterior, y permitiendo implementar un motor de menor tamaño con iguales prestaciones.

Los motores de reluctancia variable se pueden clasificar en **motores de saliente simple** y **de saliente doble**. En cuanto a características de funcionamiento son similares por lo que, a continuación, se desarrolla la descripción de los motores de saliente doble, que es el diseño predominante.

La **variación de la inductancia** de fase va desde un máximo que se produce cuando el eje del rotor está alineado con el de esa fase, hasta un mínimo que se produce cuando el eje del rotor está a  $90^\circ$  de dicha fase. Entonces, la gran ventaja del motor de saliente doble es que su configuración aumenta las diferencias entre la inductancia mínima y máxima, mejorando notablemente el par del motor respecto a la configuración de saliente simple.



**Figura 2.** Corte transversal de un motor de saliente doble.

De acuerdo con las características expuestas, cuando se excita con corriente continua una de las bobinas, el rotor se alinea con ésta en la posición de reluctancia mínima; luego, para apartarlo de esa posición, se requiere una cupla de retención proporcional al cuadrado de las corrientes de fase. Por lo tanto, teniendo en cuenta que este motor tiene cuatro bobinas, para lograr el giro en un sentido se debe energizar la primera bobina, alineándola con el eje, luego “desenergizar” dicha bobina y energizar la siguiente, para lograr la alineación con ésta, y así sucesivamente. Para invertir el sentido de giro, simplemente se debe energizar cada una de las bobinas de la misma manera, pero en orden inverso.

Para calcular el número de pasos de estos motores se usa la siguiente expresión:

$$n = n f \cdot n p$$

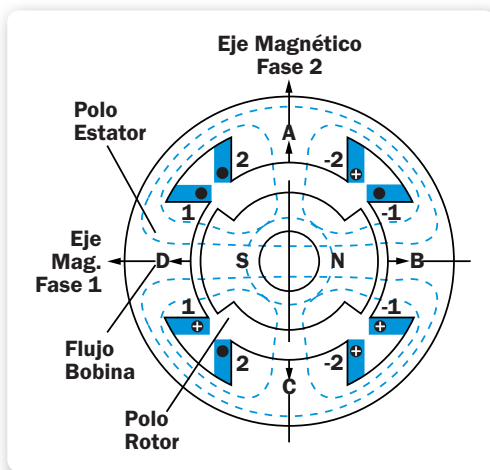
Donde:

$nf$  = número de fases

$np$  = número de polos

## Motores de imán permanente

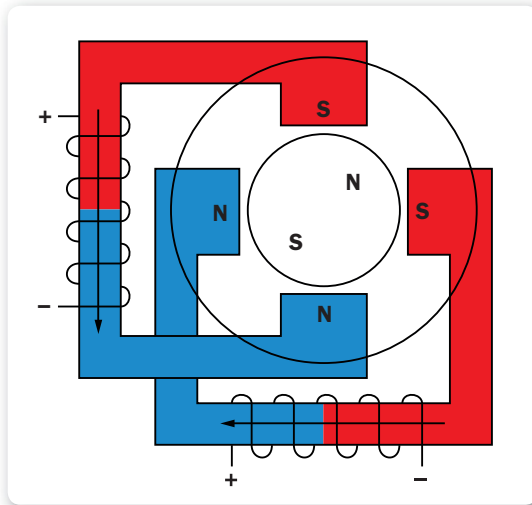
Estos motores tienen un **rotor de imán permanente**, por lo que su funcionamiento está basado en el en los principios básicos del magnetismo: cuando se juntan polos de igual signo se repelen y, cuando son de distinto signo, se atraen.



**Figura 3.** Corte de un motor de imán permanente.

Teniendo en cuenta las características del **rotor** y excitando las caras A y B para que se magneticen como polo sur y las C y D para que se magneticen como polo norte, se logrará que el extremo norte del rotor se ubique entre las caras A y B. Luego, invirtiendo las corrientes en los bobinados A y C el lado norte del rotor se ubicará entre las caras B y C; de esta manera, se pueden lograr pasos de  $90^\circ$ . Luego, mediante cuatro pasos, se logrará un giro completo del

rotor. Si se desea invertir el sentido de giro solo se deberá invertir la secuencia de excitación.

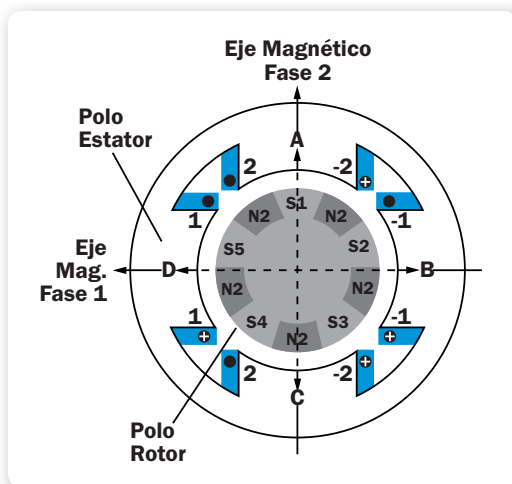


**Figura 4.** Excitación de un MPAP de imán permanente.

Este tipo de motor tiene una dependencia directa con el número de polos del estator y rotor, con el ángulo de paso. El número de polos es limitado, debido a las características del material magnético utilizado en la construcción del rotor, por lo que se consiguen ángulos grandes.

## Motores mixtos o híbridos

Este tipo es una combinación de los anteriores, que permite obtener ángulos de paso pequeños y un alto par en equipos de pequeño tamaño. En estos motores, el rotor está constituido por un conjunto de anillos de acero montados sobre un imán permanente dispuesto axialmente.



**Figura 5.** Corte de un motor híbrido.

La imagen muestra un motor híbrido en donde el rotor es un imán permanente con dos anillos de acero de cinco dientes, y el estator es de cuatro dientes y dos fases. El funcionamiento consiste en excitar las bobinas opuestas con corrientes opuestas, de manera que, cuando a un diente del rotor le corresponde el polo norte, al diente opuesto le corresponde el polo sur. Luego, para lograr que el motor gire en sentido horario, se deberá seguir una secuencia de excitación de modo que al energizar las bobinas B y D con corrientes opuestas el diente S2 se alinee con la bobina B (norte). El siguiente paso consiste en desenergizar B-D y energizar A-C con el sentido de corriente inverso al paso anterior. De esta manera, el diente S3 se alinearé con la bobina C.

Esta secuencia se debe repetir dos veces más, manteniendo el sentido de corriente del paso anterior. Así, se logra un giro en el rotor de  $72^\circ$ , lo que quiere decir que este motor híbrido tiene un paso de  $18^\circ$ . El paso del rotor se obtiene de la siguiente relación, donde  $n$  es el número de dientes:

$$\Phi_{2 \text{ fases}} = \frac{\text{espacio} - \text{de} - \text{diente}}{4} = \frac{\frac{360}{n}}{4} = \frac{\frac{360}{5}}{4} = 18^\circ$$

Si se compara el motor híbrido con el analizado previamente, de reluctancia variable, se deduce que la cupla es mayor porque la acción magnética es ejercida sobre ambas caras y el lazo magnético es mucho más fuerte.

## Características estáticas

Las características relativas al motor en estado estacionario se denominan **características estáticas**. Principalmente se analiza el par de mantenimiento y el error estático.

### Par de mantenimiento (holding torque)

El **par de mantenimiento** es el par necesario para producir un movimiento del rotor en un paso, estando el motor previamente estable, y es específico para cada motor. Normalmente es proporcionado por el fabricante en las características técnicas. Cuando se aplica un par que excede el de mantenimiento, el rotor gira continuamente. El par de mantenimiento suele ser más alto que el de trabajo y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable.

El par estático desarrollado por un motor se define en función de la posición del rotor, de las dimensiones del estator y los dientes del rotor, y del valor de la intensidad que circula por los bobinados.

En la posición del paso, los dientes del rotor y el estator están perfectamente alineados y no se produce ningún par. Si el rotor es desplazado fuera de la posición de equilibrio se desarrolla una fuerza entre los dientes del rotor y los del estator, formando un

par que intenta mover el rotor a la posición del paso. Cuando la dirección de desplazamiento es negativa produce un par positivo y, cuando es positiva, produce un par negativo.

## Par de detención

Es un **par de freno** que, siendo propio de los motores de imán permanente, se debe a la acción del rotor cuando los devanados del estator están desactivados.

## Error estático de posición

En muchas aplicaciones puede surgir un error de posición debido a la carga mecánica; es decir, el eje del motor se puede ver sometido a un par externo producido por la mecánica que mueve. Una fricción puede vencer el par producido por el motor y provocar un pequeño ángulo de desplazamiento con respecto a la posición de paso en estado de equilibrio.

Por ejemplo, teniendo en cuenta las características de un motor con ocho dientes en el rotor y con un par de pico máximo de 1,2Nm (**newton metro**) con la corriente nominal. Cuando el par de carga es de 0,75Nm el motor se mueve aproximadamente ocho grados de la posición de paso (equilibrio), hasta que el par desarrollado se iguala al de la carga. Una estimación del error de posición estático se puede obtener si la característica (par estático/posición del rotor) se aproxima a una senoide.

Para un motor con  $d$  dientes en el rotor y un par de pico máximo  $T_p$  a un desplazamiento  $\Theta$  de la posición del paso (equilibrio), el par desarrollado por el motor será aproximadamente:

$$0 = -T_p * \sin(d * \Theta)$$

Cuando el par de carga  $T_c$  es aplicado al rotor, éste se desplaza a

una nueva posición con un ángulo  $\Theta_m$ , en la que el par del motor y el de la carga son iguales:

$$T_c = T = -T_p * \sin(d * \theta_e)$$

El error de posicionamiento estático estará dado por:

$$\theta_e = \frac{\sin^{-1}\left(-\frac{T_c}{T_p}\right)}{d}$$

El error que se comete en la aproximación crece conforme el rotor se aleja de la posición del paso, hasta llegar al par máximo, a partir del cual comienza a disminuir.

## Características dinámicas

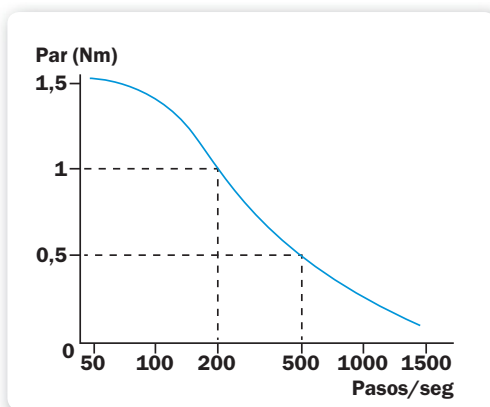
A continuación mencionaremos las características dinámicas de los motores.

### Par dinámico o de trabajo (working torque)

Depende de sus propias características dinámicas y es la cupla máxima que el motor es capaz de desarrollar sin perder el paso (es decir, sin dejar de responder a algún impulso de excitación del estator, y dependiendo de la carga). Generalmente se ofrecen, por parte del fabricante, **curvas de arranque sin error (pull-in)** que relacionan el par en función del número de pasos por segundo. En la forma de onda típica de la corriente para un motor de reluctancia variable operando a baja velocidad, la corriente es aproximadamente rectangular, y se puede obtener una relación directa entre el par estático y el dinámico.



En muchas aplicaciones el sistema ha de responder con rapidez, por lo que se debe hacer trabajar el motor a alta velocidad (**pull-out**). Sin embargo, los motores paso a paso pierden par conforme se aumenta la razón de pasos. Por otro lado, para cargas con un par de 1Nm, la máxima velocidad se encuentra limitada a 200 pasos/segundo y el tiempo de posicionamiento será de  $1500/200 = 7,5$  segundos.



**Figura 6.** Curva cupla y velocidad de un motor paso a paso.

Cuando la tasa de pasos es elevada, los pulsos de excitación son cada vez más pequeños. El efecto típico se traduce en una deformación del pulso de corriente, haciendo que su pendiente sea cada vez menor y abarque una porción significativa del intervalo de excitación.

Cuando el motor trabaja a alta velocidad la corriente por fase nunca llega al valor nominal, pues el intervalo de excitación finaliza y la fase se desenergiza antes de que la corriente alcance el valor máximo. En este momento, la corriente por la fase decae y continúa fluyendo a través de los diodos de inversa, provocando que el intervalo de excitación sea superior al deseado, extendiéndolo.

se más allá del tiempo de bloqueo. Como resultado, el par de trabajo decae con el incremento de la frecuencia.

El cálculo del par de trabajo (pull-out) a altas velocidades es complicado por las variaciones en la corriente durante el tiempo de excitación de cada fase; en estas condiciones se tiene una relación directa entre el par estático y el par dinámico del motor. Para relaciones de paso en las que la fase es excitada con un tiempo similar a la constante de tiempo del bobinado, la forma de onda estará considerablemente distorsionada con una pendiente de subida y bajada de forma exponencial.

Operando a muy alta frecuencia de pasos, la tensión inducida en los bobinados de cada fase por el movimiento del rotor es también considerable. La forma de onda no se puede definir en términos de una simple exponencial y, para un análisis completo de las características dinámicas de par/velocidad (pull-out), se tienen que incluir los efectos del voltaje inducido en el bobinado por el movimiento del rotor.

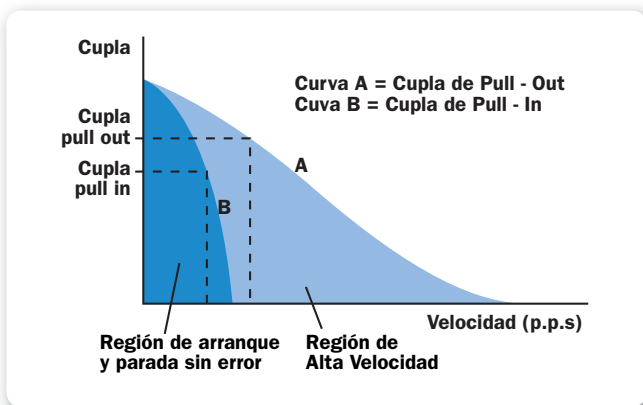
## Características cupla/velocidad

Un parámetro influyente en la elección de un motor paso a paso es, de acuerdo a lo anteriormente expuesto, la relación **cupla/velocidad**, que usualmente se mide en **pasos/segundo**.

Como se mencionara, la cupla va disminuyendo a medida que aumenta la velocidad. Esto se puede demostrar fácilmente ya que, mediante una alimentación a tensión constante, se verifica que el crecimiento de la corriente a través de los devanados depende de la constante de tiempo **L/R**; de esta manera, a medida que aumenta la frecuencia de los pulsos, la corriente efectiva disminuye y por ende disminuye la cupla.

La curva característica de la relación cupla/velocidad está definida por regiones de trabajo, en donde las curvas representan los límites de dichas regiones, que a su vez representan la zona de

correcto funcionamiento del motor para determinadas condiciones de excitación y control.



**Figura 7.** Regiones de trabajo de la característica cupla/velocidad de un motor paso a paso.

Entre la curva B y los ejes cartesianos se encuentra la región de arranque y parada sin error; dentro de esta zona, el motor será capaz de arrancar desde reposo a una velocidad dada sin perder pasos y permanecer en sincronismo arrastrando cualquier valor de la cupla que esté por debajo de la curva límite.



## DEFINICIONES

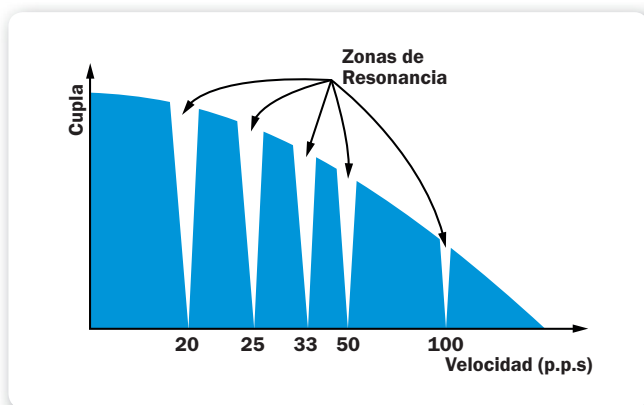


Las **cupla de pull-out** o **cupla de salida de sincronismo** corresponde a la máxima cupla aplicada a un motor paso a paso que le permite seguir girando sin salir de sincronismo. La cupla de entrada en sincronismo o **pull-in** es la cupla máxima que le permite al motor paso a paso arrancar y permanecer en sincronismo a una determinada velocidad.

Por otro lado, entre la curva A y la B se encuentra la región de alta velocidad, en donde, para alcanzar esta zona de funcionamiento, el motor debe ser acelerado. Dentro de esta zona el motor puede permanecer en sincronismo si no se sobrepasa la curva límite de salida de sincronismo, pero no puede arrancar ni detenerse sin perder pasos.

## Resonancia mecánica

Un motor paso a paso responde con desplazamientos angulares entre la posición de equilibrio de los pasos, de acuerdo con los cambios de la excitación. La respuesta del sistema para un cambio en la excitación generalmente es muy oscilante y, en aplicaciones donde se requiere posicionamiento con exactitud, genera incertidumbre.



**Figura 8.** Regiones de resonancia con pérdida de cupla.

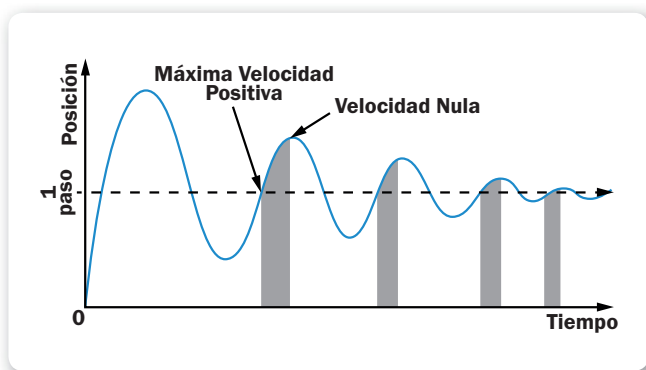
Sobre esta base se puede decir que el motor paso a paso posee frecuencias naturales de oscilación, cuyo valor dependerá de la inductancia de los devanados, el momento de inercia del rotor, el rozamiento de los cojinetes y el amortiguamiento propio. Cuando los devanados se excitan con una frecuencia tal que el sistema

campo magnético-rotor entra en resonancia, el rotor pierde sincronismo con los pulsos de alimentación y, en consecuencia, la cupla entregada por el motor se reduce a cero.

Esta resonancia ocurre a la frecuencia de oscilación natural para la respuesta a un impulso único. También puede ocurrir si el intervalo de excitación coincide con que el rotor avance hacia la posición de equilibrio con velocidad positiva.

$$\text{secuencia\_de\_paso\_resonante} = \frac{f_n}{K} = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Si la frecuencia de oscilación natural para un motor está situada en torno a los 100Hz, tendríamos estas regiones en la curva de características cupla/velocidad a 100/50/33/25/20 pasos por segundo.



**Figura 9.** Respuesta al impulso y resonancia.

Las posibles soluciones a este problema se basan en amortiguamiento viscoso, fricción y corrientes parásitas. Todas agregan elementos al motor que lo hacen más costoso y reducen su desempeño, por lo que se debe hacer un estudio minucioso de las características del motor necesario dependiendo de la aplicación.

## Secuencia de excitación

El control de un motor paso a paso se consigue haciendo circular corriente por las diferentes fases. Las respuestas se pueden obtener variando el nivel de intensidad y polaridad, y el orden de excitación secuencial. Estos factores o variantes se denominan **secuencias de alimentación o de excitación** y para cada tipo de motor existen diferentes tipos de circuitos de excitación; en este apartado se hará referencia, principalmente, a la excitación en motores de reluctancia variable (el control de estos motores difiere del control de los motores híbridos y de los de imán permanente, que tienen un solo sentido de la corriente para excitar el bobinado).

### Secuencia de excitación de un motor de reluctancia variable

En los motores de reluctancia variable el sentido de la corriente no afecta al desplazamiento del rotor, por lo que las secuencias de excitación son más sencillas, ya que sólo se contempla si una fase está activa o no lo está.

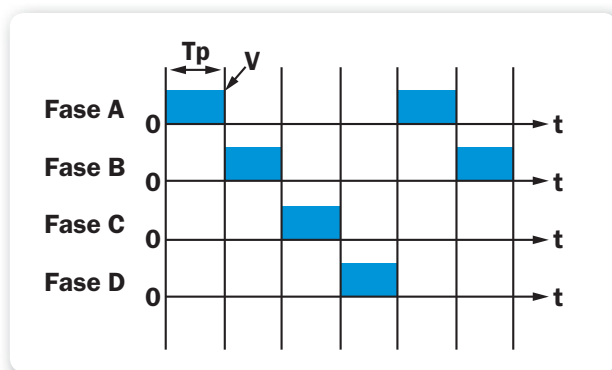


Figura 10. Excitación de un motor de reluctancia variable.

En la **Tabla 1** se muestran las secuencias de excitación de una fase activa para el motor de reluctancia variable de cuatro fases. La secuencia de avance para una excitación de fase activa se consigue conmutando la excitación de fase en fase (**fase A -> fase B -> fase C -> fase A**, y así sucesivamente).

Para invertir el sentido de giro se debe de invertir la secuencia de excitación (**fase A -> fase C -> fase B -> fase D -> fase A**, etcétera).

EXCITACIÓN DE UNA FASE					
▼ CLOCK	▼ PASOS	▼ FASE A	▼ FASE B	▼ FASE C	▼ FASE D
inicio	inicio	1			
1	1		1		
2	2			1	
3	3				1
4	4	1			
5	5		1		

**Tabla 1.** Secuencia de excitación de una fase activa para un motor de reluctancia variable de cuatro fases.

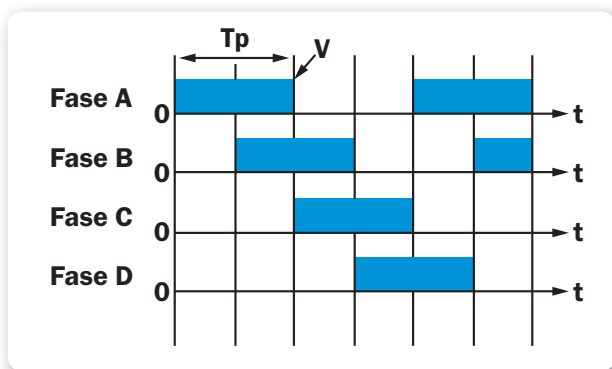


## PROFESOR EN LÍNEA



Si tiene alguna consulta técnica relacionada con el contenido, puede contactarse con nuestros expertos: [profesor@redusers.com](mailto:profesor@redusers.com)

Cuando la frecuencia de los pulsos aumenta de modo que el ancho del pulso **tp** se hace igual a la **constante de tiempo** del circuito, la corriente alcanza su valor máximo al final del pulso y, en consecuencia, se llega al estado donde la cupla decae produciendo la salida de sincronismo.



**Figura 11.** Secuencia de pulsos de excitación de bobina simple.

La **Tabla 2** muestra la secuencia de excitación de dos fases activas, para un motor de reluctancia variable de cuatro fases. Esta secuencia se consigue activando dos fases simultáneamente y combinándolas de forma secuencial para obtener el avance o el retroceso. Al realizar la **excitación de bobina doble** se logra un modo eficiente de aumentar la cupla para una frecuencia dada. En este modo de excitación, el ancho del pulso es el doble que en la **excitación de bobina simple** y el valor alcanzado por la corriente al final del pulso es aproximadamente un 36% mayor.

Dado que en los motores de reluctancia variable la cupla es proporcional al cuadrado de la corriente, el incremento de cupla es de un 85% al hacerlo funcionar con excitación de bobina doble, con respecto al de bobina simple.



EXCITACIÓN DE DOS FASES					
▼ CLOCK	▼ PASOS	▼ FASE A	▼ FASE B	▼ FASE C	▼ FASE D
inicio	inicio	1			1
1	1	1	1		
2	2		1	1	
3	3			1	1
4	4	1			1
5	5	1	1		

**Tabla 2.** Secuencia de excitación de dos fases activas para un motor de reluctancia variable de cuatro fases.

Otra manera de aumentar la corriente, y en consecuencia la cupla, consiste en disminuir el valor de la **constante de tiempo** del circuito, intercalando una resistencia externa **Rs** de alto valor (y aumentando, acordemente, el valor de la tensión aplicada al circuito).

## Aplicaciones

Los motores paso a paso tienen infinidad de aplicaciones posibles, por lo cual, al momento de definir una aplicación, deben ser considerados ciertos factores que pueden influir en la eficiencia de funcionamiento.

Por un lado, el error en cuanto a la **precisión de posicionamiento** de estos motores ronda el 5% funcionando en vacío (teniendo en cuenta el mejor caso). Esto exige definir la carga previamente y estimar la inercia de manera aproximada para tener un control óptimo de la velocidad de giro.

Otro factor es la **alimentación de sistema**, ya que, si se requiere mejorar las constantes de tiempo, se debe proveer la máxima corriente y la tensión requerida por el motor.

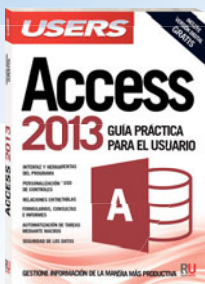
Por último, se recomienda elegir **incrementos de movimientos del sistema** múltiplos exactos del paso del motor, permitiendo la máxima precisión de posicionado y simplificando el problema de control.



## RESUMEN

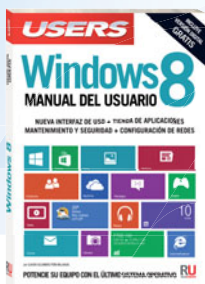


En este capítulo revisamos las características y el funcionamiento de los motores paso a paso. Conocimos los diferentes tipos de motores paso a paso que existen y profundizamos en conceptos tales como **par de mantenimiento**, **par de detención** y **error estático de posición**, entre otros. Además, conocimos la resonancia mecánica y la secuencia de excitación y, para finalizar, vimos algunas de las aplicaciones de este tipo de motores.



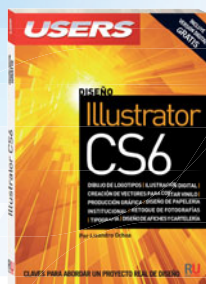
Simplifique tareas cotidianas de la manera más productiva y obtenga información clave para la toma de decisiones.

→ 320 páginas / ISBN 978-987-1949-17-5



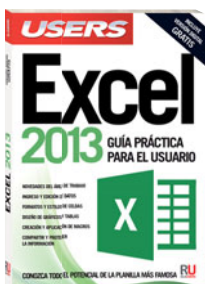
Acceda a consejos indispensables y aproveche al máximo el potencial de la última versión del sistema operativo más utilizado.

→ 320 páginas / ISBN 978-987-1949-09-0



La mejor guía a la hora de generar piezas de comunicación gráfica, ya sean para web, dispositivos electrónicos o impresión.

→ 320 páginas / ISBN 978-987-1949-04-5



Aprenda a simplificar su trabajo, convirtiendo sus datos en información necesaria para solucionar diversos problemas cotidianos.

→ 320 páginas / ISBN 978-987-1949-08-3



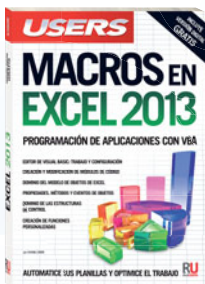
Un libro ideal para ampliar la funcionalidad de las planillas de Microsoft Excel, desarrollando macros y aplicaciones VBA.

→ 320 páginas / ISBN 978-987-1949-02-1



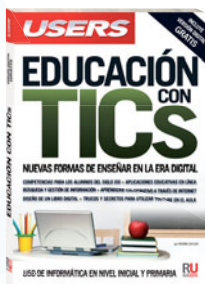
El libro indicado para enfrentar los desafíos del mundo laboral actual de la mano de un gran sistema administrativo-contable.

→ 352 páginas / ISBN 978-987-1949-01-4



Un libro ideal para ampliar la funcionalidad de las planillas de Microsoft Excel, desarrollando macros y aplicaciones VBA.

→ 320 páginas / ISBN 978-987-1857-99-9



Un libro para maestros que busquen dinamizar su tarea educativa integrando los diferentes recursos que ofrecen las TICs.

→ 320 páginas / ISBN 978-987-1857-95-1



Libro ideal para introducirse en el mundo de la maquetación, aprendiendo técnicas para crear verdaderos diseños profesionales.

→ 352 páginas / ISBN 978-987-1857-74-6





# CURSOS INTENSIVOS CON SALIDA LABORAL

Los temas más importantes del universo de la tecnología, desarrollados con la mayor profundidad y con un despliegue visual de alto impacto: explicaciones teóricas, procedimientos paso a paso, videotutoriales, infografías y muchos recursos más.



- 25 Fascículos
- 600 Páginas
- 2 DVDs / 2 Libros

Curso para dominar las principales herramientas del paquete Adobe CS3 y conocer los mejores secretos para diseñar de manera profesional. Ideal para quienes se desempeñan en diseño, publicidad, productos gráficos o sitios web.

Obra teórica y práctica que brinda las habilidades necesarias para convertirse en un profesional en composición, animación y VFX (efectos especiales).

- 25 Fascículos
- 600 Páginas
- 2 CDs / 1 DVD / 1 Libro



- 25 Fascículos
- 600 Páginas
- 4 CDs

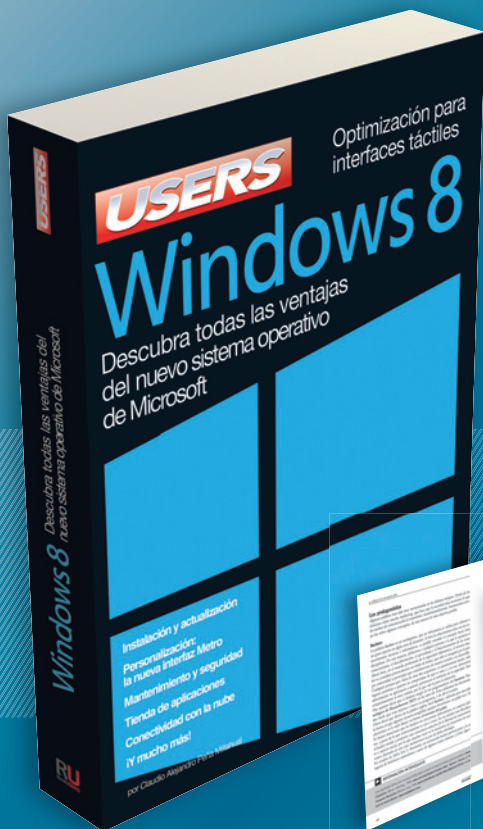
Obra ideal para ingresar en el apasionante universo del diseño web y utilizar Internet para una profesión rentable. Elaborada por los máximos referentes en el área, con infografías y explicaciones muy didácticas.

Brinda las habilidades necesarias para planificar, instalar y administrar redes de computadoras de forma profesional. Basada principalmente en tecnologías Cisco, busca cubrir la creciente necesidad de profesionales.

- 25 Fascículos
- 600 Páginas
- 3 CDs / 1 Libro



# DESCUBRA TODAS LAS VENTAJAS DEL NUEVO SISTEMA OPERATIVO DE MICROSOFT



Luego del lanzamiento de un sistema operativo sólido y veloz como Windows 7, Microsoft ha desarrollado un nuevo sistema que presenta una interfaz renovada, disponible tanto para equipos de escritorio y portátiles, como para tablets. Esta obra nos permitirá descubrir esta novedad, junto a otros aspectos en términos de seguridad y rendimiento, para aprovechar el potencial de Windows 8 al máximo.


- » MICROSOFT / WINDOWS
- » 192 PÁGINAS
- » ISBN 978-987-1857-67-8



LLEGAMOS A TODO EL MUNDO VÍA  Y 

\* SÓLO VÁLIDO EN LA REPÚBLICA ARGENTINA // \*\* VÁLIDO EN TODO EL MUNDO EXCEPTO ARGENTINA

 [usershop.redusers.com](http://usershop.redusers.com) //  [usershop@redusers.com](mailto:usershop@redusers.com)

 +54 (011) 4110-8700

**USERS**

TÉCNICO en  
**ELECTRÓNICA**

