

# MÁQUINAS ELÉCTRICAS MODERNAS

POR MARCOS DAMIÁN PÉREZ

## Índice de Contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>1 GENERADOR DE INDUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
1.1 GENERADOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.....	2
1.1.1 Aspectos históricos.....	2
1.1.2 Principio de funcionamiento.....	3
1.1.3 Ventajas.....	3
1.2 GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO.....	3
1.2.1 Operación.....	4
<b>2 MOTORES LINEALES</b> .....	<b>5</b>
2.1 MOTOR LINEAL DE INDUCCIÓN (LIM).....	5
2.1.1 Transformación topológica de un motor rotativo en uno lineal.....	5
2.1.2 Principio de funcionamiento del motor lineal.....	6
2.1.3 Aplicaciones.....	8
2.2 MOTOR LINEAL SINCRÓNICO (LSM).....	9
<b>3 MOTORES DE CC SIN ESCOBILLAS (BLDC)</b> .....	<b>10</b>
3.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN.....	10
3.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.....	12
3.3 VENTAJAS DE LOS BLDC SOBRE LOS MOTORES CON ESCOBILLAS.....	13
<b>4 MOTORES DE RELUCTANCIA CONMUTADA (SRM)</b> .....	<b>14</b>
4.1 FORMA BÁSICA DE OPERACIÓN.....	14
4.2 MODELADO DE LA PRODUCCIÓN DE TORQUE.....	15
<b>5 MOTORES ESPECIALES</b> .....	<b>18</b>
5.1 SERVOMOTORES.....	18
5.1.1 Servomotores de CC.....	19
5.1.2 Servomotores de ac.....	19
5.1.3 Servomotores de ca trifásicos.....	20
5.2 MOTORES PASO A PASO (STEPPER MOTORS).....	20
<b>6 REFERENCIAS</b> .....	<b>22</b>

## **RESUMEN**

Además de las máquinas eléctricas convencionales, como son los generadores sincrónicos, motores sincrónicos y de inducción, los modernos y crecientes desarrollos en la electrónica de potencia, junto con el desarrollo de ordenadores y de técnicas de control, han permitido el desarrollo de una gran variedad de modernas máquinas eléctricas.

Los principios de funcionamiento de las mismas son esencialmente los mismos que en las máquinas convencionales, basadas en las mismas leyes electromagnéticas. Sin embargo, estas máquinas modernas adoptan geometrías, dimensiones y características de diseño muy variadas según el papel que deban desempeñar.

El objetivo de esta monografía es dar una introducción a algunos tipos de máquinas eléctricas especiales. Se describen los generadores asincrónicos, y su implementación más importante en los generadores eólicos que alimentan la red eléctrica nacional, tarea posible gracias a la electrónica moderna de control, que da lugar a los generadores asincrónicos doblemente alimentados. Luego se introducen los motores lineales sincrónicos y asincrónicos en analogía con los rotativos. A continuación se analizan los modernos motores *sin escobillas*, implementados constructivamente mediante el uso de sensores, lógicas de control, inversores y alimentación PWM, y finalmente se analiza el motor de reluctancia conmutada, también alimentado mediante un lazo de realimentación.

Por último se hace una breve mención de los servomotores aplicados en el campo de la robótica, cuyo funcionamiento es esencialmente similar, pero su constitución varía debido a su forma de empleo para sistemas de control.

## **1 GENERADOR DE INDUCCIÓN**

### **1.1 GENERADOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO**

Un generador de inducción trifásico es una clase de generador eléctrico que es mecánicamente y eléctricamente similar al motor de inducción trifásico. El generador de inducción produce potencia eléctrica cuando el rotor es movido a velocidad mayor a la frecuencia de sincronismo del motor de inducción equivalente.

Fundamentalmente, existen dos tipos de generadores asíncronos que se han utilizado para la integración de aerogeneradores: el tipo jaula de ardilla y el tipo rotor devanado. Los del tipo jaula de ardilla son los más utilizados debido a que su costo es bajo, requieren poco mantenimiento, son robustos y se pueden conectar directamente (A través de protecciones y medios de desconexión adecuados) a la línea eléctrica a la que entregarán energía.

Los generadores de inducción se utilizan mayoritariamente en turbinas eólicas y en algunas instalaciones hidráulicas debido a su especial capacidad de producir potencia eléctrica útil a velocidades variables de rotación.

#### **1.1.1 Aspectos históricos**

Un accidente marcó el descubrimiento del generador de inducción. Hace muchos años en una fábrica, se encontraba un gran motor moviendo una máquina cuando se cortó la energía eléctrica. Este por inercia siguió girando y un operario tocó sus cables y recibió una descarga eléctrica. Los técnicos se preguntaron cómo, si estaba desconectado, podía dar corriente y se dieron cuenta de que estaba generando energía eléctrica.

A partir de ese momento comenzó a estudiarse el fenómeno y descubrieron que un motor de inducción común al cual se conecta capacitores en paralelo para corregir el factor de potencia, puede convertirse en un generador eléctrico.

### **1.1.2 Principio de funcionamiento**

Por su parte, los generadores de inducción no son auto-excitados, sino que requieren de un suministro externo de corriente trifásica para producir un flujo magnético rotante. Este suministro externo puede provenir de la red eléctrica, o del mismo generador, una vez que comenzó a producir. El flujo magnético rotante del estator induce corrientes en el rotor, lo cual produce a su vez un campo magnético. La velocidad de rotación del campo magnético del estator está regida por la frecuencia de la línea. Si el rotor gira más lento que el campo del estator (frecuencia de sincronismo), entonces la máquina opera como un *motor de inducción*. Si por el contrario, el rotor gira a una velocidad mayor que la frecuencia de sincronismo, la máquina opera como un *generador de inducción, produciendo potencia eléctrica a la frecuencia de sincronismo*.

En los generadores de inducción, el flujo magnetizante es establecido por un banco de capacitores conectado a la máquina para la regulación del factor de potencia.

La potencia que desarrolla un generador asíncrono es proporcional a la diferencia entre su velocidad de sincronismo  $W_s$  y la velocidad angular en su rotor  $W$ .

### **1.1.3 Ventajas**

La máquina de inducción es utilizada desde el siglo pasado- es muy robusta, constructivamente más sencilla, de bajo costo y requiere muy poco mantenimiento-, motivo por el cual se la considera apropiada para operar en regiones aisladas donde es difícil o muy costoso realizar un mantenimiento periódico. Este es el caso de muchas microcentrales eléctricas, especialmente las eólicas.

Además de las ventajas ya mencionadas, se suma que su relación par-velocidad, en las cercanías de la velocidad nominal, permite un amortiguamiento de la variación constante del par motriz en la flecha principal del aerogenerador. No obstante, entre más favorable es esta característica (+S), la eficiencia del generador disminuye [45].

Una desventaja de estos generadores es que requieren tomar potencia reactiva de la línea eléctrica a la cual están conectados; lo cual origina un factor de potencia bajo que debe ser mejorado mediante capacitores.

Por su parte, los generadores síncronos no son muy apropiados para integrar aerogeneradores de velocidad constante ya que cuando se conectan directamente a la línea eléctrica entregan una potencia que es proporcional con el ángulo de fase. Esto resulta en una velocidad rotacional constante para cualquier potencia menor o igual a la nominal. En consecuencia, resulta un sistema demasiado rígido en cuanto a su relación par-velocidad [40].

## **1.2 GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO**

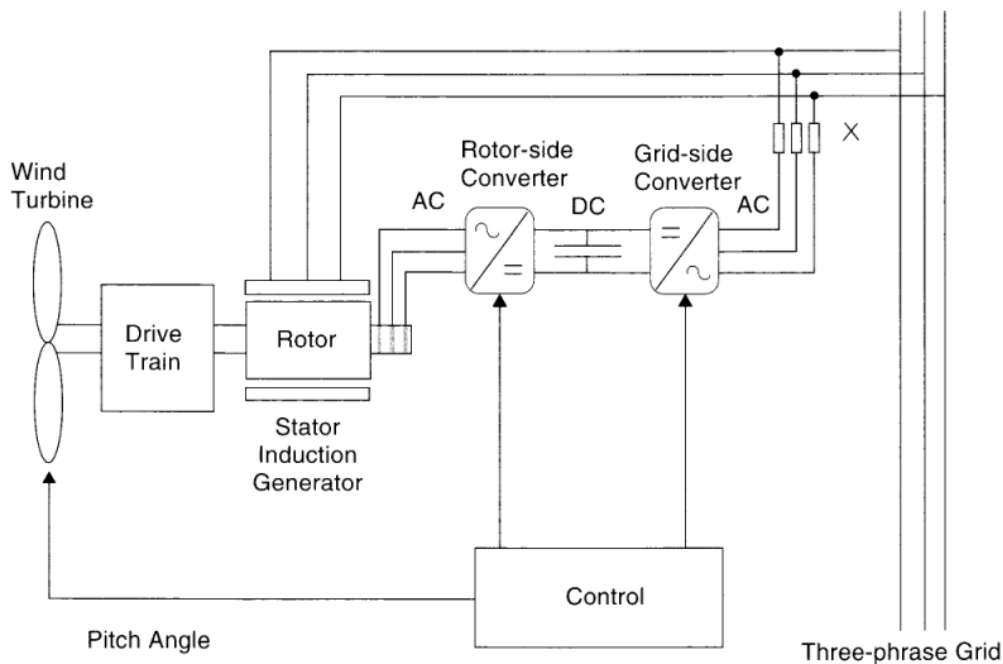
Los generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) utilizados en turbinas eólicas están siendo utilizados a una tasa cada vez mayor en granjas eólicas. La principal razón de la popularidad de los DFIGs eólicos conectados al sistema interconectado nacional es su capacidad de suministrar potencia a tensión y frecuencia constante a medida que la velocidad del rotor varía. La configuración del DFIG también provee la posibilidad de controlar el factor de potencia del sistema como un todo.

### 1.2.1 Operación

El funcionamiento del DFIG se basa en el generador de inducción trifásico con rotor devanado en el cual el rotor es alimentado mediante algún *convertidor de frecuencia* (AC/DC/AC converter) para proveer operación estable nominal aún a velocidad variable.

Un sistema DFIG típico se muestra en la [Figura 1](#). El convertor AC/DC/AC consiste en dos componentes: un convertor del lado del rotor ( $R_{con}$ ) y un convertor del lado de la red ( $G_{con}$ ). Ambos son convertidores alimentados con tensión directa que utilizan dispositivos de electrónica de potencia para sintetizar (cambiar la frecuencia) una tensión alterna a partir de una fuente de tensión continua. Los anillos rozantes del rotor se conectan al convertor del lado correspondiente, el cual está acoplado al otro convertidor mediante un vínculo de CC. El convertor del lado de la red se conecta a la misma mediante un sistema de inductancias trifásicas en serie, mientras que el devanado del estator se conecta en forma directa a la red.

Con esta configuración, la potencia capturada por la turbina de viento es transformada en energía eléctrica por el generador de inducción y es transmitida a la red por los devanados del estator y el rotor. El sistema de control genera las señales que comandan el ángulo de inclinación del rotor y las tensiones de  $R_{con}$  y  $G_{con}$  para controlar la potencia de la turbina eólica, el voltaje en directa y la potencia reactiva o tensiones de las terminales que van a la red.



**Figura 1: Esquema típico del generador asincrónico doblemente alimentado**

El principio de operación es como muestra la figura: la salida del generador se conecta directamente a la red eléctrica, y a su vez se establece un lazo de realimentación por medio de algún convertidor de frecuencia con el objeto de controlar el sistema de excitación del rotor. Este lazo de realimentación presenta dos ventajas muy importantes:

1. Como el voltaje del rotor es controlado por un convertidor electrónico de potencia, el generador de inducción es capaz de importar y exportar a su vez potencia reactiva. Esto tiene importantes consecuencias para la estabilidad del

sistema eléctrico y le permite, por lo tanto a la máquina permanecer conectada al sistema aún en presencia de perturbaciones severas.

- Además, como la frecuencia del rotor es controlado, esto habilita a la máquina de inducción a mantenerse sincronizada con la red eléctrica aún cuando la turbina de viento varíe su velocidad.

De esta manera se logra desacoplar las frecuencias mecánica y eléctrica, y resulta posible mantener la frecuencia de salida en un nivel estable independientemente de la velocidad de rotación del generador.

El ángulo de ataque del rotor se controla para limitar la potencia de salida del generador a su valor nominal en presencia de fuertes vientos. Un generador eólico con control de dirección puede siempre aprovechar de la manera más eficiente la dirección de los vientos.

## 2 MOTORES LINEALES

### 2.1 MOTOR LINEAL DE INDUCCIÓN (LIM)

#### 2.1.1 Transformación topológica de un motor rotativo en uno lineal

Se considera el caso de un motor rotativo asíncrono de jaula de ardilla, al que cortamos por un semiplano axial las coronas magnéticas del estator y del rotor, y desenrollamos por un plano. En el motor desenrollado los paquetes magnéticos del estator y el rotor se transforman en paralelepípedos rectangulares separados por un entrehierro plano con sus ranuras enfrentadas.

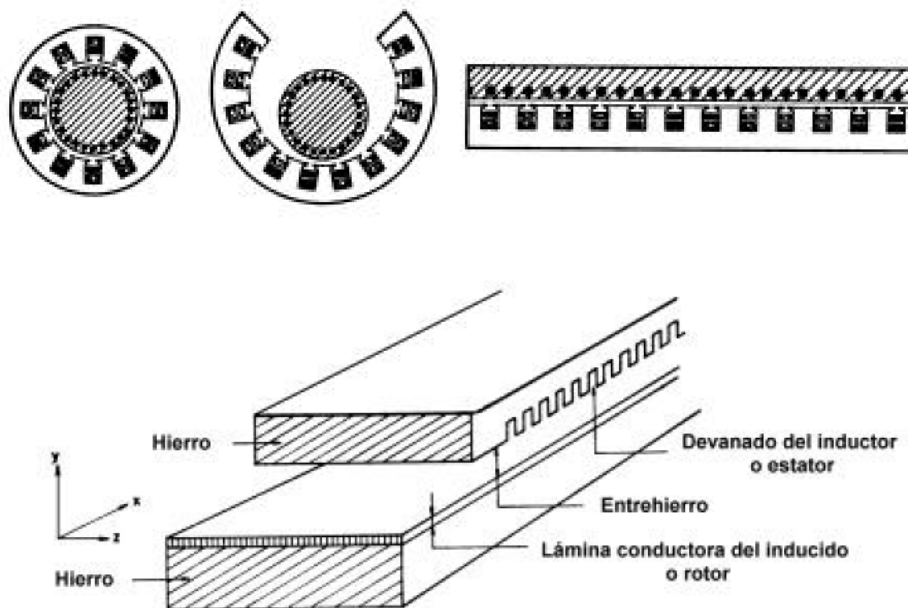
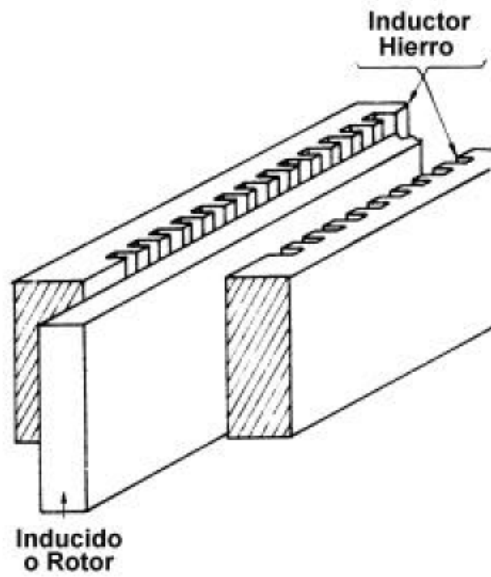


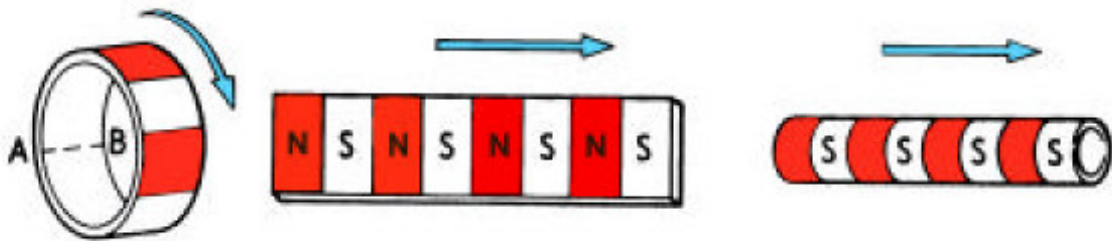
Figura 2: Transformación topológica de rotativo a lineal

Para duplicar la f.m.m. (fuerza magnetomotriz) se puede disponer un segundo inductor del otro lado del inducido. Si el inducido tiene material ferromagnético, es necesaria menos f.m.m. para obtener fuerzas importantes, pero aparecen unos esfuerzos significativos de reluctancia en el sentido transversal al avance del inducido, lo cual complica el guiado mecánico de éste.



*Figura 3: Disposición de un segundo inductor al otro lado del inducido*

Otra ejecución del motor lineal consiste en arrollar de nuevo la versión plana anterior alrededor del eje paralelo a la dirección del movimiento rectilíneo como se muestra en la siguiente [Figura 4](#).

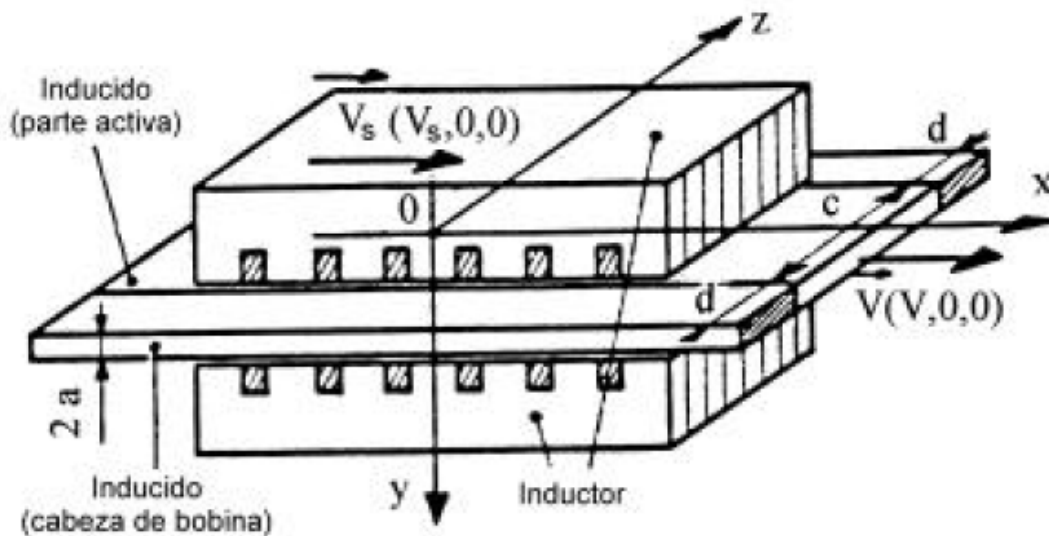


*Figura 4: Motor lineal tubular*

Donde la flecha indica el sentido del campo magnético.

### **2.1.2 Principio de funcionamiento del motor lineal**

El esquema de la [Figura 5](#) representa un motor lineal, en el que el desplazamiento del inducido se produce según el eje longitudinal OX a la velocidad mecánica  $V$ .



**Figura 5: Parámetros principales del motor lineal**

Algunos de los parámetros fundamentales son:

- $V_s$ : velocidad del campo magnético
- $V$ : velocidad mecánica del inducido.
- $2a$ : grosor del inducido.
- $c$ : ancho de la parte activa del inducido
- $d$ : ancho de la cabeza de la bobina.

La corriente de excitación del devanado inductor circula en la dirección **OZ**, creando un campo principal de inducción magnético, en la dirección del eje transversal **OY**. Si estos devanados están correctamente repartidos y son alimentados por una fuente trifásica a una frecuencia  $f$ , el campo magnético principal y la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) se propaga según el eje **OX** con una forma de onda deslizante a una velocidad lineal  $V_s$ .

El campo magnético correspondiente al inductor atraviesa en entrehierro generando dentro del inducido las fuerzas electromotrices (f.e.m.) y a la vez unas corrientes. El flujo magnético derivado de estas corrientes, deslizante respecto del inductor y al inducido resta inmóvil respecto al flujo principal. La interacción entre las corrientes inducidas y el flujo magnético en el entrehierro determina una fuerza motriz lineal sobre el inducido, cuyo sentido, será el mismo que tiene el campo magnético deslizante y que lleva al inducido a una velocidad  $V$ , que es inferior a la velocidad del campo  $V_s$ .

El *resbalamiento* del motor de inducción lineal se define como:

$$s = \frac{V_s - V}{V_s}$$

El principio elemental de funcionamiento es, entonces, similar al de la máquina rotativa, que tiene acoplamiento magnético asíncrono.

El inducido puede ser asimilado como una lámina conductora de ancho  $c + 2d$  y de grosor  $2a$ . La anchura  $c$  se encuentra por completo dentro del campo magnético principal, que es donde se generan las corrientes inducidas. Se puede comparar esta parte  $c$  con los conductores de las ranuras del rotor de la máquina rotativa. Las dos

bandas laterales **d** del motor lineal situadas cada una a cada lado de la parte **c**, y fuera del campo magnético principal, forman el circuito de cierre de las corrientes inducidas haciendo la misma función que las cabezas de bobinas de los devanados típicos de las máquinas rotativas (Figura 6)

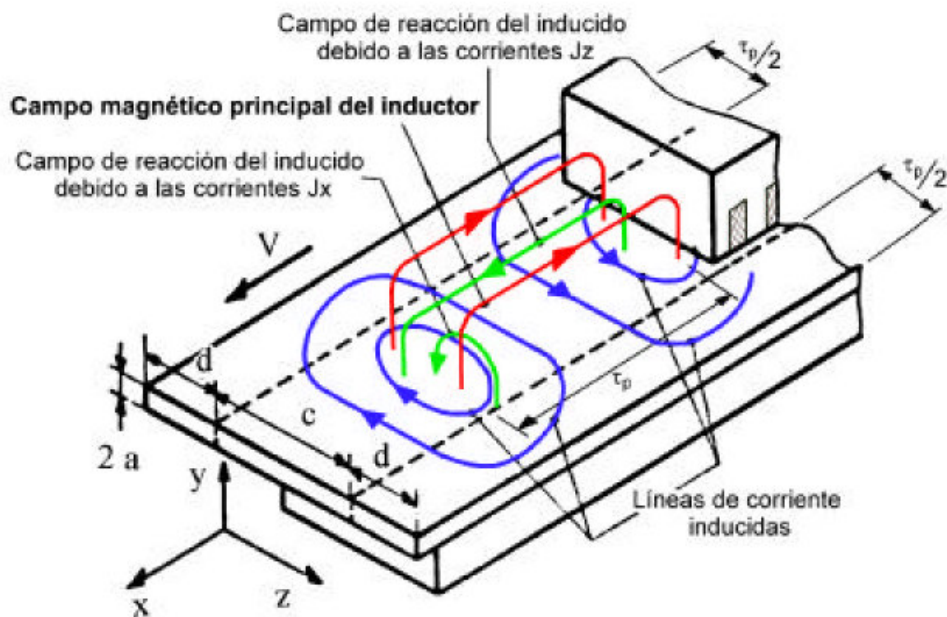


Figura 6: Distribución de flujos en el inducido

En el caso de un motor lineal trifásico tubular, el devanado está formado por bobinas toroidales alojadas en ranuras radiales, una por ranura, practicadas en el interior de un tubo de material magnético. Conectando las bobinas a un sistema trifásico de forma que sean recorridas en forma sucesiva por corrientes de sentido inverso, tal como muestra la Figura 7, en el interior del tubo se tendrá un campo alternativo deslizante a lo largo del eje del tubo. Si en el interior del tubo colocamos un anillo conductor, las corrientes inducidas bajo la acción del campo magnético darán origen a fuerzas electromagnéticas que tenderán a desplazarlo axialmente.

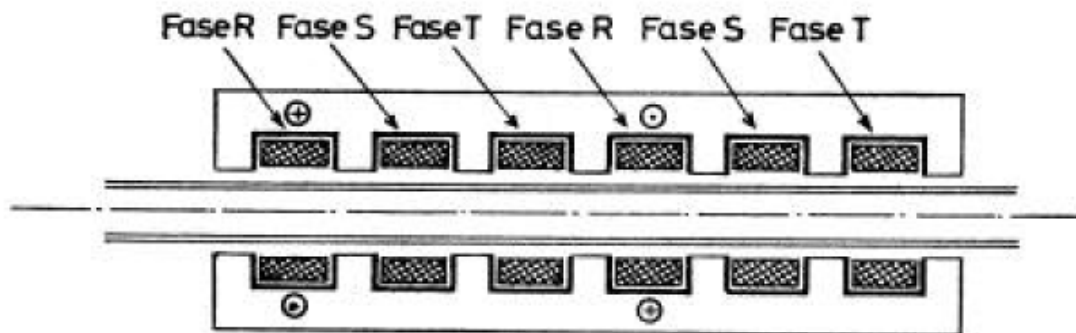


Figura 7: Devanado trifásico en un motor lineal tubular

### 2.1.3 Aplicaciones

Muchos diseños han sido aplicados para los motores lineales, resultando finalmente en dos grandes categorías: motores lineales de *baja aceleración* y de *alta aceleración*.



### ***A) Motores lineales de baja aceleración***

- Trenes de propulsión magnética, como el tren de levitación magnética japonés Linimo.
- Subtes modernos japoneses, incluyendo la Línea Toei Oedo en Tokyo.
- Aplicaciones sin levitación magnética, como sistemas de tránsito rápido para bombarderos.
- Montañas rusas (usos con modificaciones)
- Uso en sistemas de control de movimientos (robótica), en sistemas de deslizamiento (como cortadores láser de precisión), puertas deslizantes



*Figura 8: Tren de levitación magnética japonés propulsado por un motor de inducción línea.*

### ***B) Motores lineales de alta aceleración***

- Uso en aceleración de montañas rusas.
- Uso en diseño de armas.
- Uso en sistemas de despegue electromagnético de aviones de guerra.
- Sugeridas para uso en propulsión de naves espaciales.

La fabricación de los motores de alta aceleración conlleva, sin embargo, de grandes dificultades constructivas, y demanda gran cantidad de energía.

## **2.2 MOTOR LINEAL SINCRÓNICO (LSM)**

Del mismo modo que con los motores rotativos, en los motores lineales existen las dos versiones: motor lineal asincrónico (o de inducción) y motor lineal sincrónico.

En el motor lineal sincrónico, el primario está conformado por un devanado trifásico y el secundario está compuesto de electroimanes, imanes permanentes, o imanes superconductores. Si el devanado trifásico se alimenta de corriente trifásica, produce también una onda electromagnética viajera, y en este caso, los imanes del secundario se acoplan *sincrónicamente* a esta onda y viajan a la *misma velocidad*, dada por:

$$V_s = 2T_p f$$

Donde  $T_p$  es el paso de polo, y  $f$  es la frecuencia de la alimentación. Si se utilizan imanes poderosos, tales como los superconductores, el LSM puede operar con gap de aire más grande.

El circuito equivalente para analizar este tipo de motor es similar al del motor sincrónico. Además, si se utilizan imanes poderosos, los efectos reactivos de la armadura son despreciables y la reactancia sincrónica que existe es debida únicamente a la reactancia de pérdida.

En el presente, el motor lineal sincrónico no se utiliza tan ampliamente como el lineal de inducción. Sin embargo, el LSM tiene un gran potencial en el campo de transporte de alta velocidad, donde un gran gap de aire es necesario.

### 3 MOTORES DE CC SIN ESCOBILLAS (BLDC)

Se trata de un motor sincrónico cuyo rotor es un imán permanente, y que es operado de modo *autocontrolado* mediante un lazo de realimentación y una lógica de control. El estator consiste generalmente en 3 bobinados conectados en estrella y dispuestos a  $120^\circ$  entre sí. El torque de rotación se produce por la interacción entre el campo magnético producido por las bobinas del estator, y el del rotor (ver [Figura 9](#)).

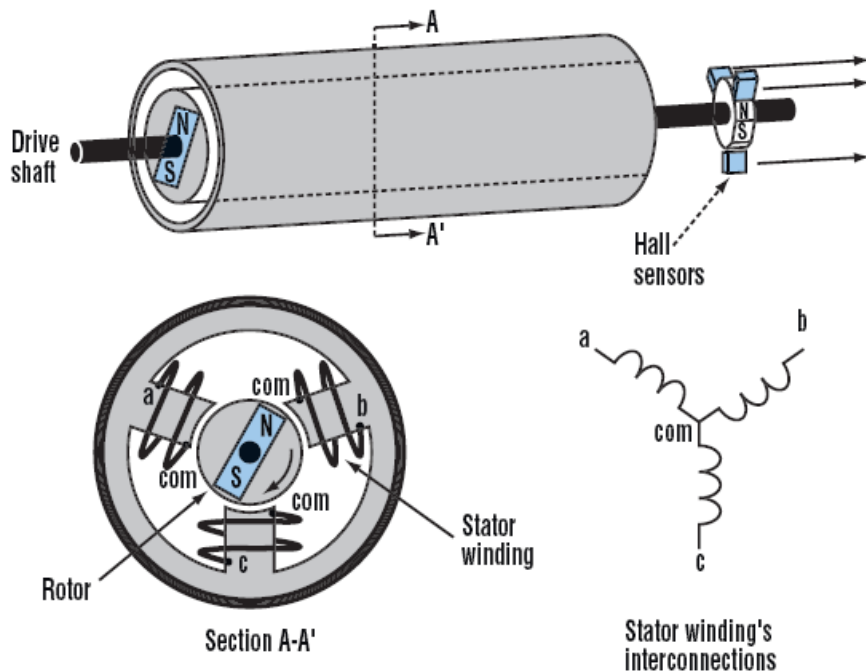


Figura 9: Esquema sencillo del motor sin escobillas mostrando el devanado trifásico con conexión en estrella y los sensores hall

#### 3.1 Principio de operación

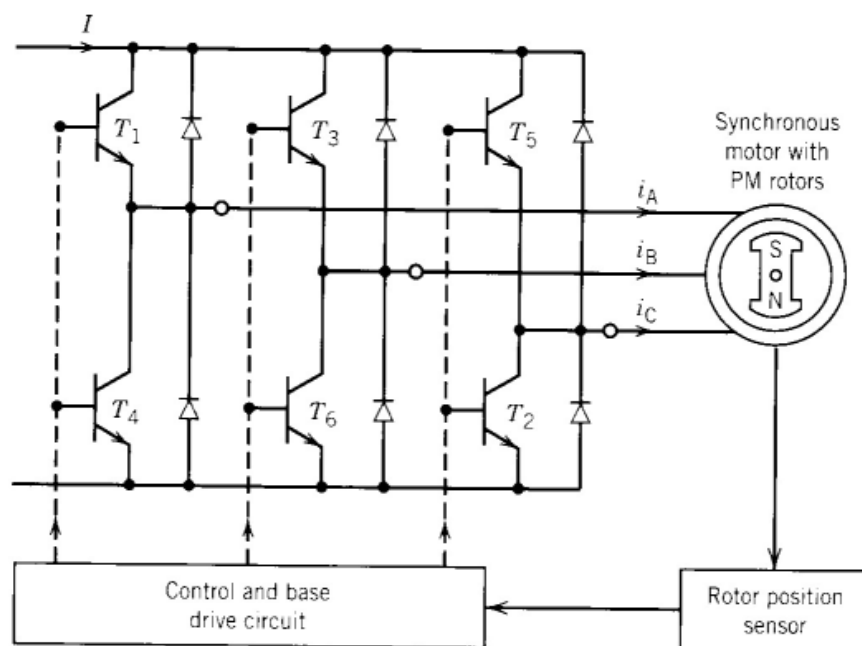
El campo magnético rotante del estator se produce energizando las bobinas en forma conmutada, de modo que el torque sea siempre máximo. Para energizar las bobinas adecuadas de manera que se produzca el máximo par posible en la posición actual del rotor, es necesario conocer cuál es esa posición, para lo cual se requiere un *sensor* de posición angular que nos informe instante a instante la configuración del rotor.

La interacción entre la posición sensada, y la lógica de energización de las bobinas se lleva al cabo mediante una *lógica de control*, y juntos conforman un lazo realimentado de control.

La conmutación de las bobinas en los BLDC se efectúa en forma electrónica mediante un circuito *inversor* conformado por semiconductores. Generalmente se utiliza un inversor que opere con dispositivos autoconmutantes, tales como BJTss, IGBTs, MOSFETs, y GTOs. El estado On-Off de estos dispositivos puede controlarse a partir de las señales de sus *gates*, las cuales son comandadas por el sensor. También existen diseños de con tiristores, pero tienen problemas cuando el rotor funciona a bajas velocidades.

El sensor de posición del rotor controlará las acciones de encendido o apagado para los interruptores de modo tal que el ángulo promedio entre el campo magnético del rotor y del estator sea de  $90^\circ$  y el torque sea el máximo posible.

Los interruptores del estator se conmutan cada  $60^\circ$  eléctricos y los switches son numerados en la secuencia en que son encendidos. Si el inversor es alimentado desde una fuente de voltaje continuo la regulación de corriente puede llevarse a cabo con PWM.

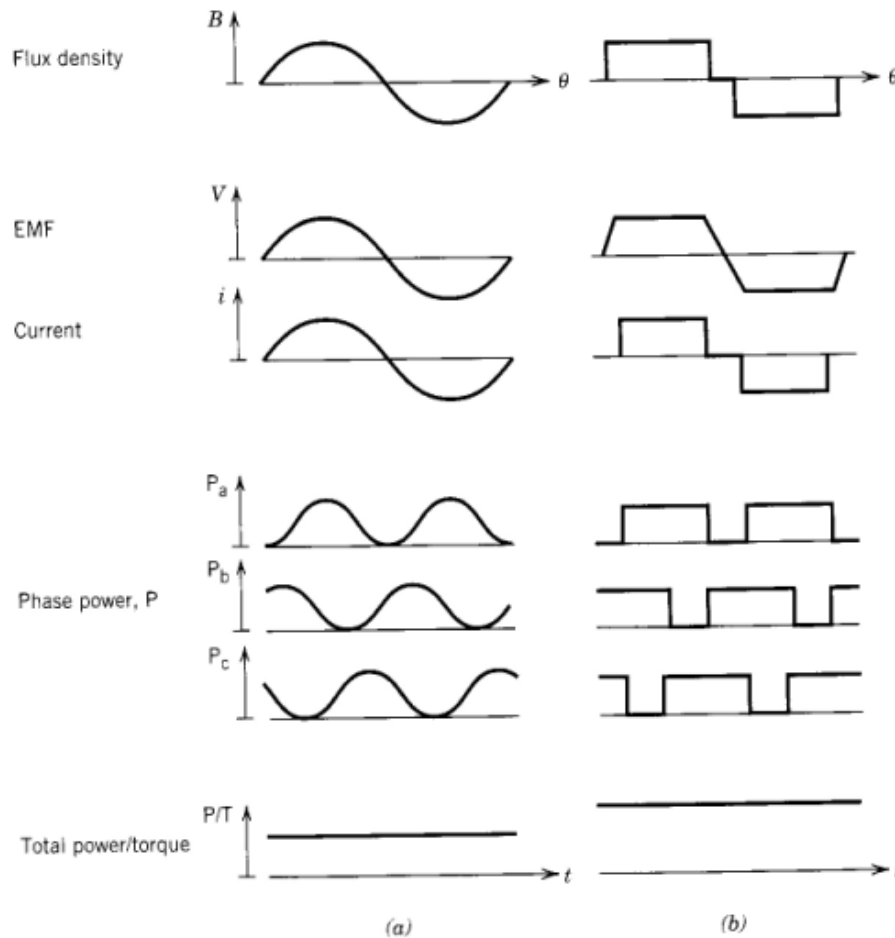


Hay dos tipos de BLDC: (a) trapezoidales y (b) sinusoidales. En el del tipo trapezoidal la fem tiene forma trapezoidal y la corriente de fase requerida es una onda quasi-cuadrada de  $120^\circ$ . En los de tipo sinusoidal, la fem es sinusoidal y la corriente de fase requerida es sinusoidal.

La fem trapezoidal es generada por imanes permanentes del rotor con una distribución de flujo cuadrada y una bobina concentrada en el estator. Los  $120^\circ$  de la corriente de fase requiere un sensor de baja resolución, tal como un sensor Hall o un sensor electro óptico, para conmutar los dispositivos cada  $60^\circ$  eléctricos de corriente.

Una fem sinusoidal se genera a partir de imanes permanentes en el rotor con una distribución de flujo magnético esencialmente sinusoidal y un devanado distribuido en el estator. La corriente de fase sinusoidal requiere de un sensor de posición absoluto o un resolver para poder sensar la posición en forma continua y lograr una adecuada síntesis de una corriente de forma de onda sinusoidal. La corriente en la fase es una función sinusoidal de la posición del rotor.

Las formas ideales de todas estas cantidades en función de la posición del rotor se muestran en la [Figura 10](#).



**Figura 10**

El motor tipo trapezoidal requiere de un sensor de posición económico. Su esquema de conmutación es simple, y dado que solamente 2 switches se encuentran encendidos en todo momento, la eficiencia del inversor es alta. El costo total siempre será menor. Sin embargo, el ripple del torque será elevado si la forma de las ondas es no ideal.

El motor tipo sinusoidal requiere de un sensor de posición caro. Se necesita más software y hardware para procesamiento de señales. La eficiencia del inversor será menor debido a que 3 interruptores se hallan encendidos todo el tiempo. Sin embargo el ripple del torque será bajo inclusive cuando la forma de las ondas sea no ideal.

### 3.2 Aspectos constructivos

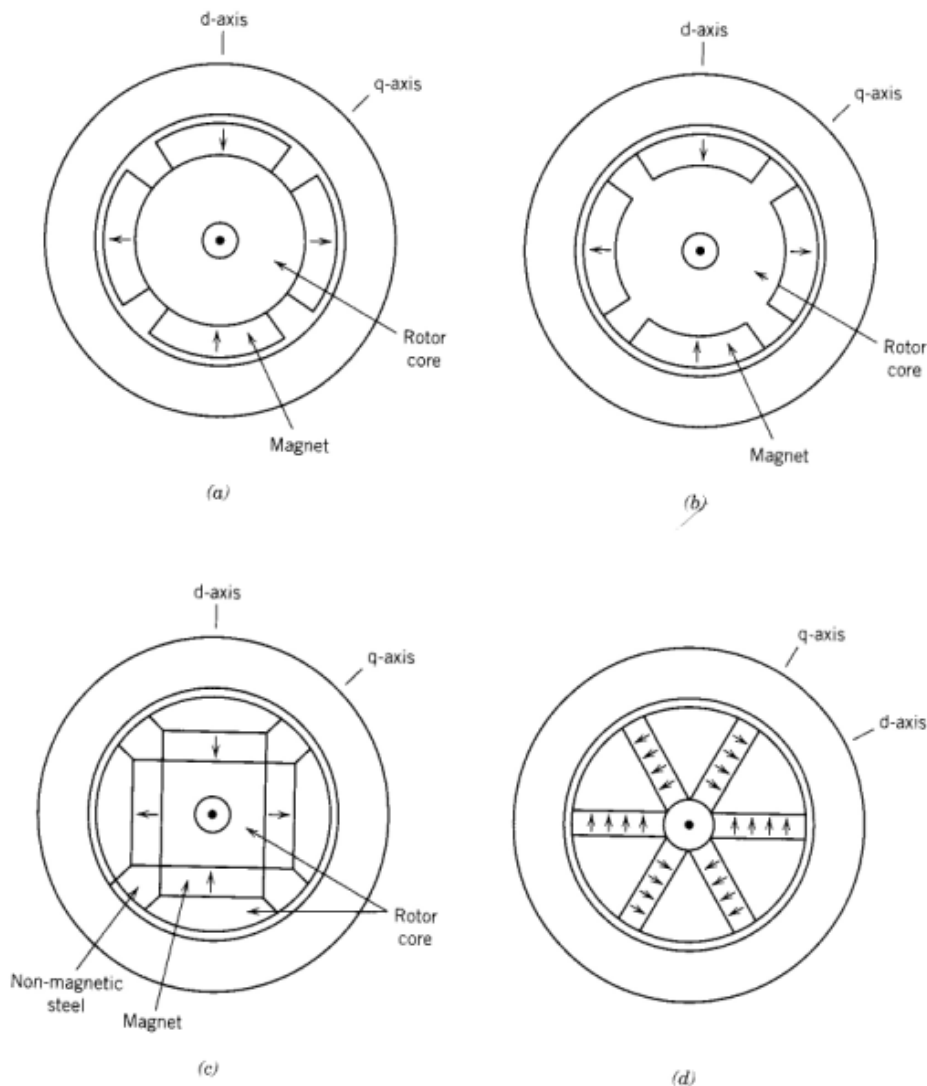
El rotor de imán permanente puede tener desde 2 hasta 8 polos de pares con polos alternados N y S. Las ferritas magnéticas han sido utilizadas desde hace tiempo para la fabricación de imanes permanentes. En la actualidad han ganado popularidad los imanes fabricados con aleaciones de tierras raras que presentan mayor densidad de campo magnético.

Comúnmente se utilizan 4 tipos de configuraciones del rotor de imán permanente, las cuales se muestran en la [Figura 11](#), y se describen a continuación:

- (a) **Imanes montados en la superficie.** Los imanes permanentes radialmente magnetizados se montan en una estructura con alma de acero como muestra la Figura (a). Como la permeabilidad relativa del material magnético es cercano a la unidad, éste actúa como un gap de aire. El gap de aire efectivo es, por lo tanto,

grande, haciendo  $L_d$  pequeño. La estructura es magnéticamente no-saliente y por lo tanto  $L_d = L_q$ .

- (b) **Imanes insertos.** En este arreglo, los imanes se encuentran insertos en la estructura como muestra la Figura (b). Con esta configuración el torque máximo desarrollado es mayor que en el caso anterior.
- (c) **Imán permanente interno con magnetización radial.** Los imanes se hallan insertos en el material del rotor con magnetización radial, como muestra la Figura (c). La inductancia en el eje  $q$  es mayor que la inductancia en el eje  $d$ , y ambas son mayores que en los casos anteriores.
- (d) **Imán permanente interno con magnetización circunferencial.**



*Figura 11: Distintas formas constructivas del rotor*

### 3.3 Ventajas de los BLDC sobre los motores con escobillas.

Los motores BLDC tienen las siguientes ventajas en relación con los motores convencionales que utilizan escobillas:

- a) Tamaño de rotor pequeño y alta densidad de potencia, debido a la ausencia de conmutadores mecánicos y escobillas.

- b) Menor inercia y respuesta dinámica más veloz.
- c) Mayor velocidad y capacidad de torque, debido a la ausencia de escobillas y chispas.
- d) Menor costo de mantenimiento.
- e) Mayor radio torque/inercia.
- f) Mejor disipación térmica.

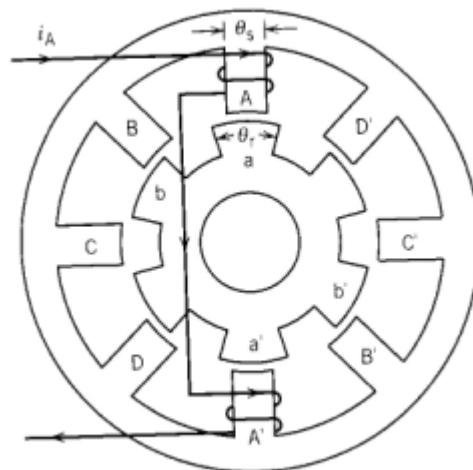
Como desventajas, estos motores requieren de: sensores de posición, electrónica de potencia compleja (inversores), y controladores complejos, resultando en un mayor costo. Las mejoras en materiales para imanes permanentes y la reducción de costos en circuitos integrados e interruptores electrónicos de potencia ha hecho que los motores BLDC – en particular los de tipo trapezoidal – buenos competidores en el campo de dispositivos de alta performance.

Entre sus aplicaciones, se utilizan ampliamente en: computer disk drives, servo drives, robótica, vehículos electrónicos, y otras aplicaciones alimentadas con baterías.

## 4 MOTORES DE RELUCTANCIA CONMUTADA (SRM)

### 4.1 Forma básica de operación

La figura muestra un corte transversal del motor de switched reluctance con 8 polos en el estator y 6 polos en el rotor. Ambos de materiales ferromagnéticos. Estos motores tienen un rotor con un par de polos menos que el estator. Polos del estator diametralmente opuestos son excitados simultáneamente como muestra la [Figura 12](#). El torque se produce por la tendencia de los polos del rotor a alinearse con los polos (excitados) del estator para *maximizar el flujo magnético* cuando el arrollamiento del estator es excitado por una corriente.



*Figura 12: Esquema del motor de reluctancia conmutada*

Si la fase A se excita, los polos a y a' del rotor se alinearán con los polos A y A' del estator. Si luego se excita la fase B, se alinearán los polos b y b' con los B y B' del estator, y por lo tanto, el rotor girará un pequeño ángulo en sentido de las agujas del reloj. Por lo tanto, si las fases se excitan en la secuencia A, B, C, D, A. . . el rotor girará en sentido de las manecillas del reloj. **El rotor se mueve con algún sincronismo respecto del campo del estator, pero ambos giran en sentido contrario.**

El *timing* más apropiado para la excitación de las fases del estator depende de la posición del rotor. Por lo tanto, un sensor de posición es necesario. La excitación debe irse conmutando secuencialmente de fase en fase a medida que el rotor se mueve, y de allí el nombre de motor de reluctancia conmutada.

#### 4.2 Modelado de la producción de torque

Para el modelado del torque se asumen dos hipótesis:

- Se excita *una sola fase por vez*.
- El material ferromagnético es *lineal*.

Con estas consideraciones, el ensamble magnético entre las bobinas excitadas puede representarse por una inductancia. Cuando el rotor varía su posición, la inductancia correspondiente a esa fase también varía. El torque está dado por:

$$T_k = \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{2} L_k(\theta) i_k^2 \right) \Bigg|_{i_k} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial}{\partial \theta} (L_k(\theta))$$

El torque es proporcional al cuadrado de la corriente, y por lo tanto, independiente de su dirección. La [Figura 13](#) muestra varias posiciones del rotor respecto del estator.

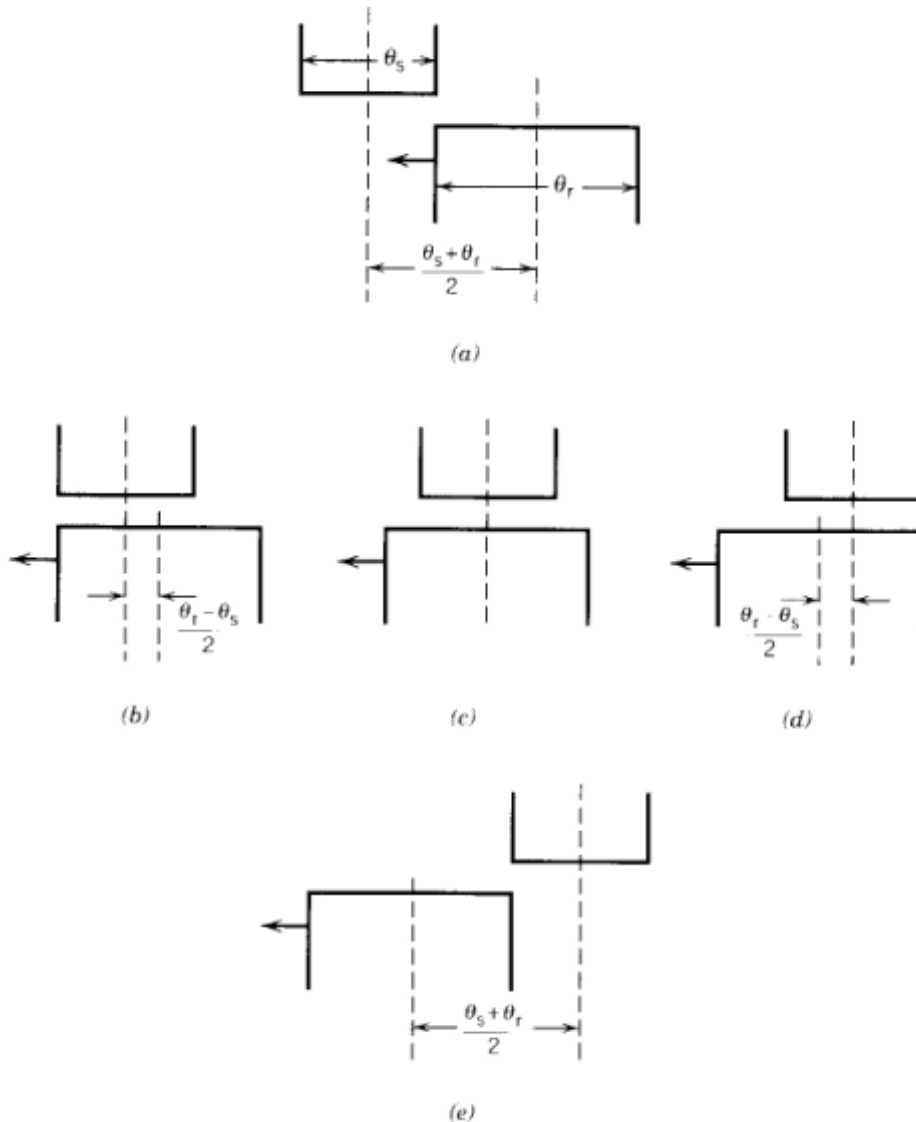
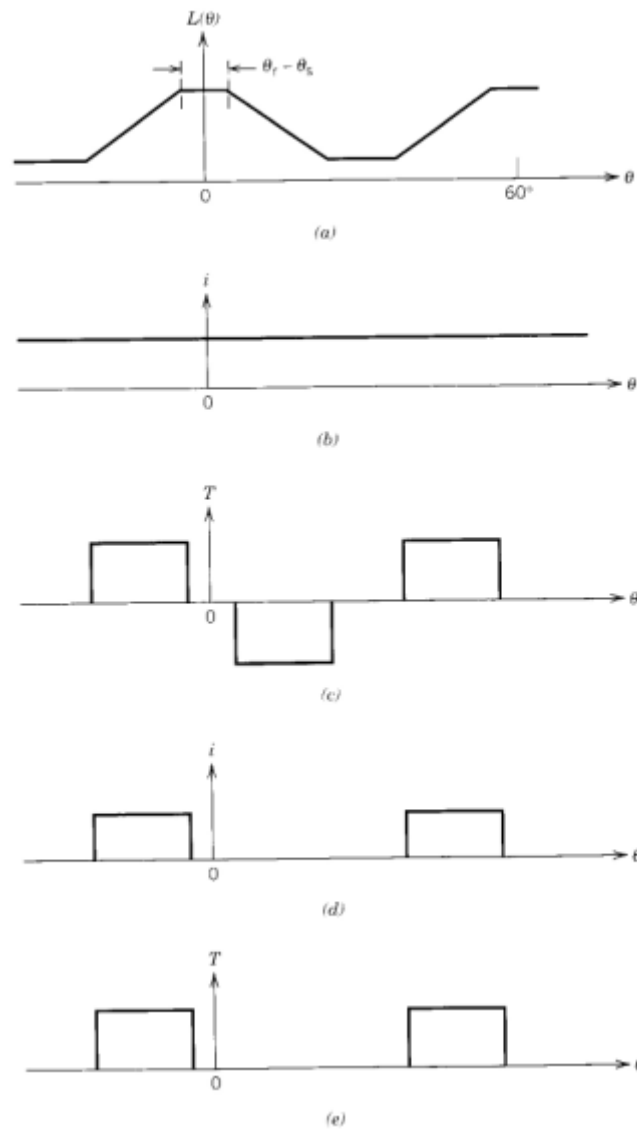


Figura 13: Posiciones del estator respecto del roto.

Desde (a) la inductancia aumenta linealmente. Las posiciones (b) a (d) representan las posiciones de máxima inductancia. A partir de (d) la inductancia decae linealmente.

La [Figura 14](#) muestra la variación temporal de los parámetros del sistema en función de la posición del rotor durante una pasada del polo del rotor por el frente del polo del estator. Como puede observarse, si se alimenta con una corriente constante, el torque promedio producido es neto. Si, en cambio, la corriente se aplica únicamente en la etapa en la que la inductancia crece, se logra un valor positivo del torque neto. Es importante entonces tener la capacidad de aplicar la corriente de excitación cuando el rotor está en una posición particular, y luego conmutarla en otra posición predeterminada.

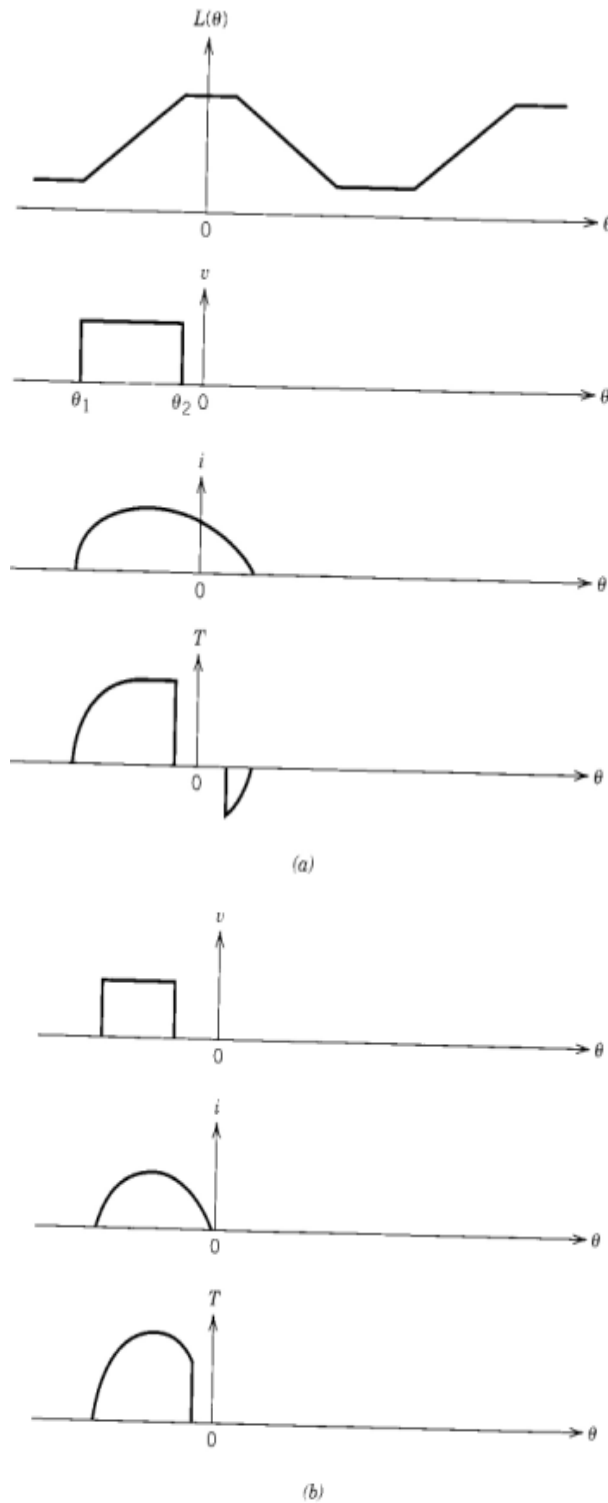


**Figura 14**

En los sistemas reales, sin embargo, no se logra una forma rectangular en la onda de corriente, debido a la inercia de la bobina cuando se le aplica la tensión de excitación. La performance real del sistema se muestra en la [Figura 15](#) a continuación. Cuando se alimenta la tensión  $v$  en la posición  $\theta_1$ , la corriente crece rápidamente porque la inductancia es pequeña. Cuando se quita la tensión en la posición  $\theta_2$ , la corriente decae lentamente porque la inductancia ahora es máxima, dejando lugar para la aparición de un pequeño torque negativo, como muestra la [Figura 15a](#).



Para evitar esta componente negativa de torque, debe removerse la tensión con alguna anticipación, como muestra la [Figura 15b](#).



**Figura 15**

La [Figura 16](#) muestra el funcionamiento general (ideal) con la alimentación conmutada de las cuatro fases, para el motor en estudio.

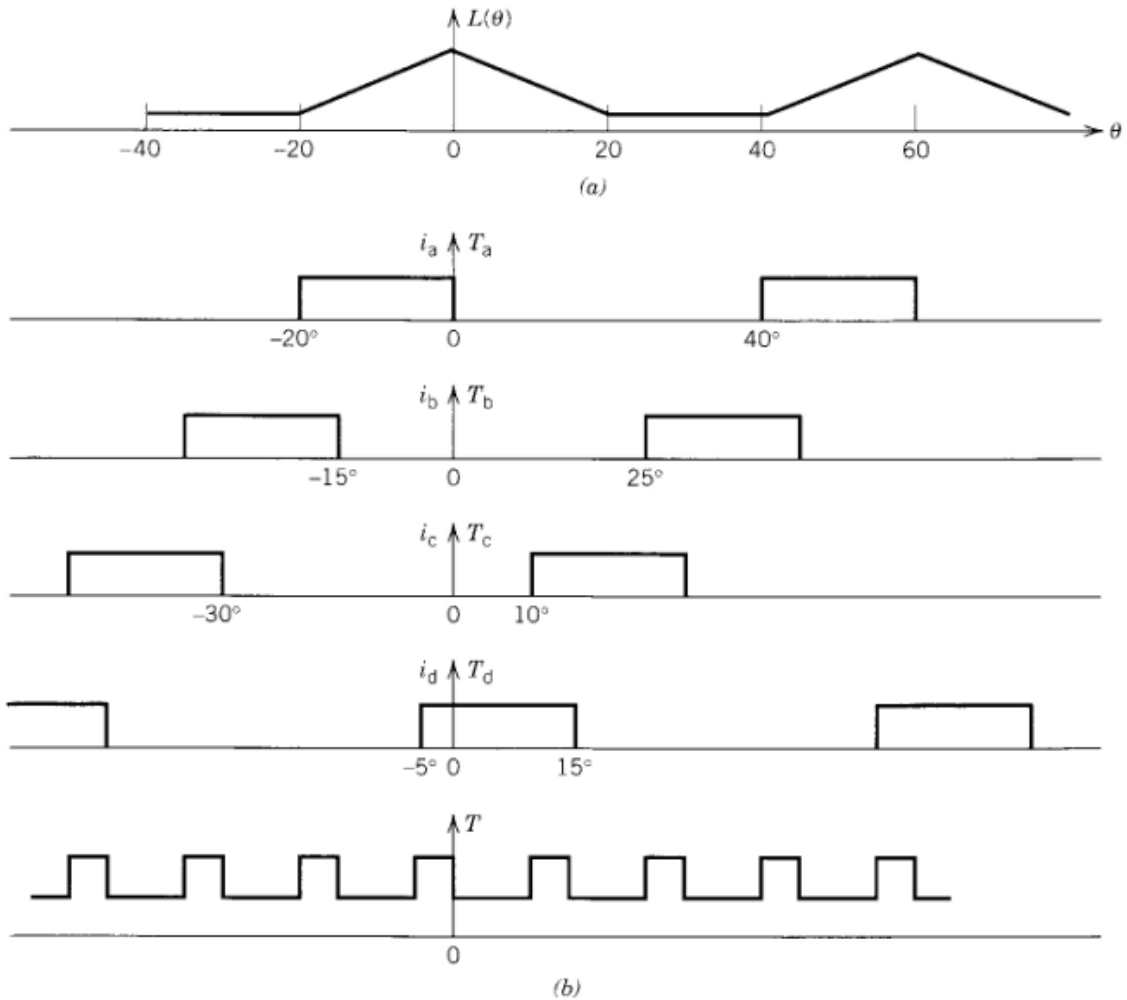


Figura 16

## 5 MOTORES ESPECIALES

Grandes máquinas eléctricas se utilizan normalmente para lograr una conversión continua de energía. Sin embargo, existen aplicaciones en que la conversión continua de energía no es necesaria. Por ejemplo: los robots requieren control de posición para mover el brazo de una posición inicial a otra predeterminada. Tales aplicaciones requieren de motores especiales de baja potencia. El principio de operación de estos motores es similar al de los otros electromagnéticos. Sin embargo, su construcción, diseño y modo de operación es diferente.

A continuación se hace mención de motores que operan bajo los mismos principios físicos que los motores electromagnéticos convencionales, pero que están diseñados para condiciones de operación completamente distintas.

### 5.1 SERVOMOTORES

Los *servomotores*, comúnmente denominados *motores de control*, son motores eléctricos especialmente diseñados y construidos para su utilización en sistemas realimentados, como actuadores. Su potencia de trabajo varía entre una fracción de watt y algunos cientos de watts. Se caracterizan por una alta respuesta dinámica, lo cual requiere baja inercia. Estos motores son, por lo tanto, más pequeños en diámetro y más largos en longitud.

Se utilizan para aplicaciones en: robótica, radares, computadoras, dispositivos de máquinas y sistemas guías.

### 5.1.1 Servomotores de CC.

Son motores con excitación en cc independiente o motores de cc de imanes permanentes. La Figura 17 muestra un diagrama esquemático del mismo. Estos servomotores se controlan normalmente con la tensión de armadura. La misma se diseña para tener una gran resistencia de modo que la característica *torque – velocidad* sea lineal y tenga una pronunciada pendiente.

En estos motores el flujo magnético de excitación y el torque se encuentran *desacoplados*, lo cual les aporta una respuesta dinámica muy rápida. Y saltos de voltaje de excitación producen cambios bruscos en la velocidad y el torque.

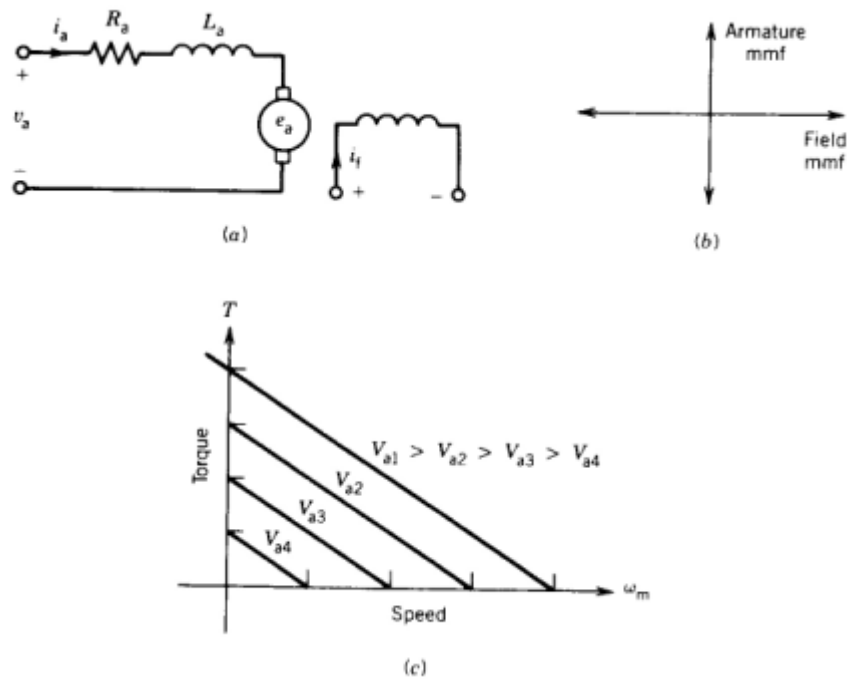


Figura 17

### 5.1.2 Servomotores de ac

Los servomotores de ac se utilizan para aplicaciones de muy baja potencia. Son de construcción robusta y tienen menor inercia. Sin embargo, en general, son máquinas no-lineales y altamente acopladas, y sus características de torque-velocidad no son tan ideales.

La mayoría de los motores de ac utilizados en control son de tipo *jaula de ardilla* y de dos fases. Su frecuencia normalmente está entre 60 y 400 Hz.

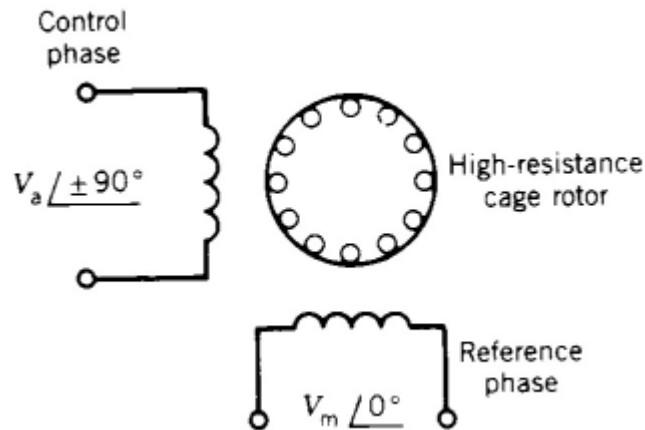
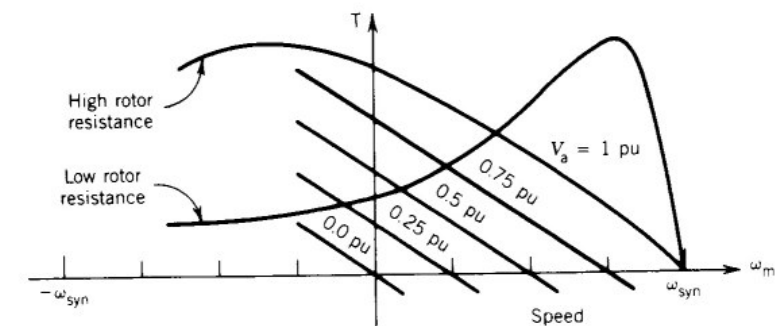


Figura 18

La Figura 18 muestra un diagrama esquemático de este motor. El estator tiene dos arrollamientos distribuidos desplazados en  $90^\circ$  eléctricos entre ellos. Uno de los arrollamientos, llamado *fase fija o de referencia*, se conecta a una fuente de tensión constante  $V_m \angle 0^\circ$ . El otro arrollamiento, llamado *fase de control*, es alimentado con una fuente de tensión variable de la misma frecuencia que la fase de referencia, pero desplazada en  $90^\circ$  eléctricos. Esta última fase generalmente se alimenta desde un servo amplificador. La dirección de rotación del servomotor depende de la relación de fases, en adelante o en atraso, de la fase de control con respecto a la fase de referencia.

Las características de torque – velocidad dependen fuertemente de la resistencia del rotor. Para sistemas de control, es esencial que la relación sea lo más lineal posible.



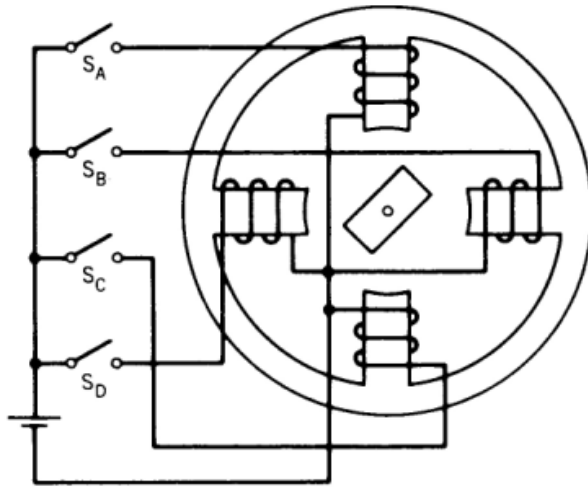
### 5.1.3 Servomotores de ca trifásicos

Los servomotores de cc han dominado el área de los servo sistemas de alta potencia. Sin embargo, el campo de investigaciones más modernas ha llevado al uso de servomotores alimentados con ca trifásica para aplicaciones como servo sistemas de alta potencia. Estos motores son altamente no lineales y acoplados, sin embargo, muchos investigadores han logrado operarla como un sistema desacoplado y lineal mediante el uso de técnicas de control llamadas *de control vectorial* o *control de campo orientado*.

## 5.2 MOTORES PASO A PASO (stepper motors)

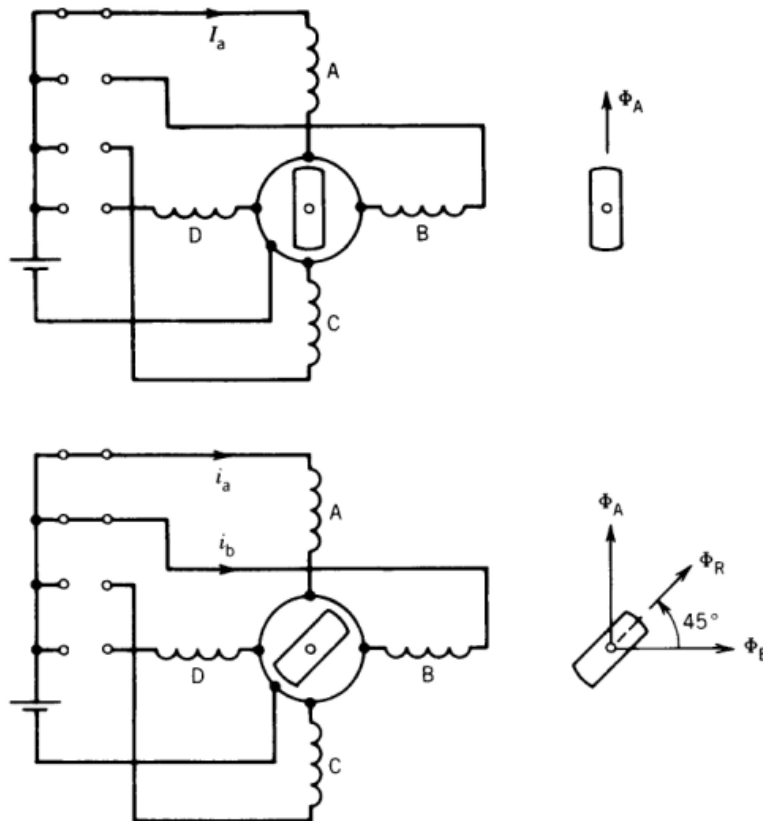
Un motor paso a paso rota un determinado número de grados en respuesta a un pulso eléctrico de entrada. Pasos típicos son  $2^\circ$ ,  $2.5^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7.5^\circ$  y  $15^\circ$  por cada pulso eléctrico. El motor stepper es un actuador incremental electromecánico capaz de convertir pulsos digitales de entrada en una salida analógica de movimiento de eje. Es, por lo tanto, utilizado en sistemas de control digitales. Un tren de pulsos se utiliza para mover el eje

del motor por pasos. Normalmente en los motores paso a paso no se requieren ni de un sensor de posición ni ningún lazo de realimentación para hacer que la salida siga el comando de entrada. El esquema básico de funcionamiento se muestra en la [Figura 19](#).



*Figura 19*

La secuencia de energización de las bobinas produce un campo rotante que es seguido por el imán (rotor), que siempre tiende a alinearse con el mismo. La secuencia se continúa hasta que el rotor ha dado un determinado número de revoluciones preestablecidas. Un esquema de funcionamiento típico se muestra en la [Figura 20](#).



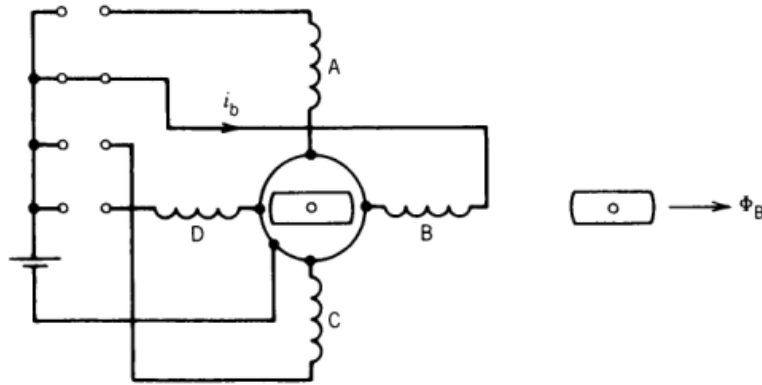


Figura 20: Esquema de funcionamiento de un motor paso a paso con un paso de 45°

## 6 REFERENCIAS

### Bibliografía:

- Máquinas Eléctricas, Stephen J. Chapman, 4ta edición.
- Distributed Generation – Induction and Permanent Magnet Generators, Loi Lei Lai & Tze Fun Chan, Wiley-IEEE, 2007
- Principles of Electric Machines and Power Electronic, Paresh C. Sen, 2nd Edition 1999, Wiley

### Internet:

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Induction\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_generator)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Doubly-fed\\_electric\\_machine](http://en.wikipedia.org/wiki/Doubly-fed_electric_machine)
- <http://www.directindustry.es/prod/oswald-elektromotoren/motor-lineal-sincrono-17385-213934.html>
- [http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/drairan/documents/papers/mil\\_tecnura\\_14.pdf](http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/drairan/documents/papers/mil_tecnura_14.pdf)
- <http://www.metalunivers.com/arees/altavelo/tutorial/ideko/motoreslineales.htm>
- [http://torque-drives.com/Pdf\\_english/2005\\_LSM-24.pdf](http://torque-drives.com/Pdf_english/2005_LSM-24.pdf)
- <http://www.dee.upc.edu/ca/docencia/etsecpcb/assignat/op/Articles>
- [http://www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-1008101-190345//04ML\\_1.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1008101-190345//04ML_1.pdf)
- [http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_2/chpt\\_13/5.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/5.html)