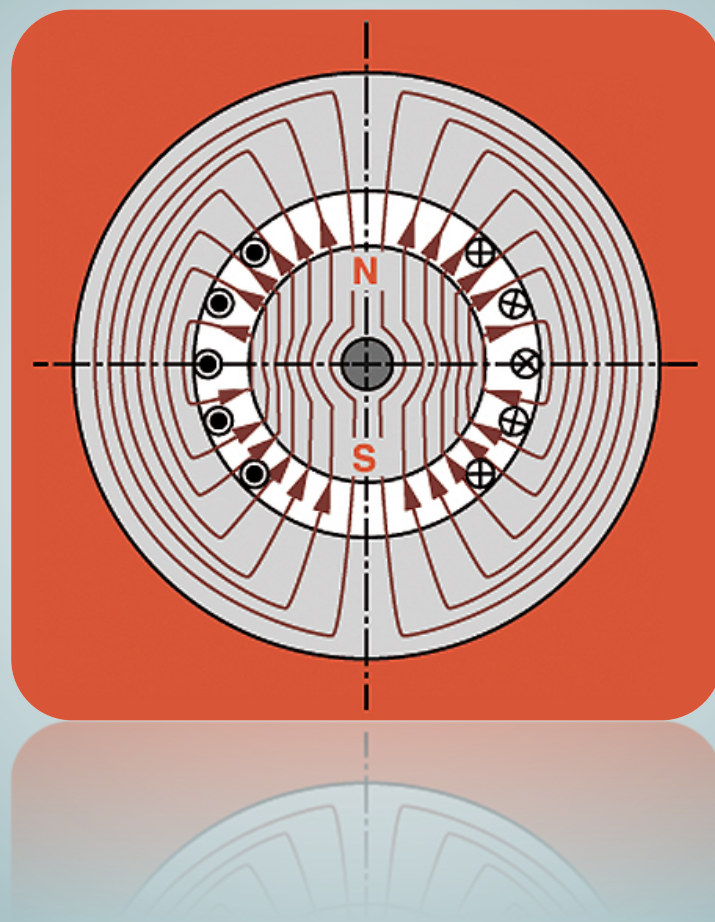


# Máquinas Eléctricas I - G862

## Tema 5. Máquinas de Corriente Continua



**Miguel Ángel Rodríguez Pozueta**

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

*This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.*



*Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.*

*Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>*

**ÍNDICE**

**MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA**

Constitución.....	1
Constitución básica.....	2
Esquema básico de funcionamiento.....	2
Descripción.....	3
Colector de delgas.....	4
Devanados.....	5
Principio de funcionamiento.....	9
Magnitudes básicas.....	11
Fuerza electromotriz inducida (f.e.m.).....	11
Ecuación eléctrica del inducido.....	12
Par electromagnético .....	13
Campo magnético inductor.....	13
Reacción de inducido.....	15
Descripción.....	15
Desfase de la línea neutra .....	16
Efecto desmagnetizante .....	17
Deformación del campo magnético.....	17
Dirección de la reacción de inducido.....	18
Corrección. Devanados auxiliares .....	18
Conmutación.....	20
Conmutación ideal. Hipótesis.....	20
Tipos de conmutación.....	21
Polos auxiliares o de conmutación.....	21
Resumen de la conmutación.....	22

## ÍNDICE

Sistemas de excitación. Tipos de máquinas de c.c.....	23
Sistemas de excitación.....	23
Tipos de generadores de c.c.....	24
Tipos de motores de c.c.....	24
Designación de bornes normalizada .....	25
Bibliografía.....	26

Los números de página del índice actúan como hipervínculos a la página correspondiente.

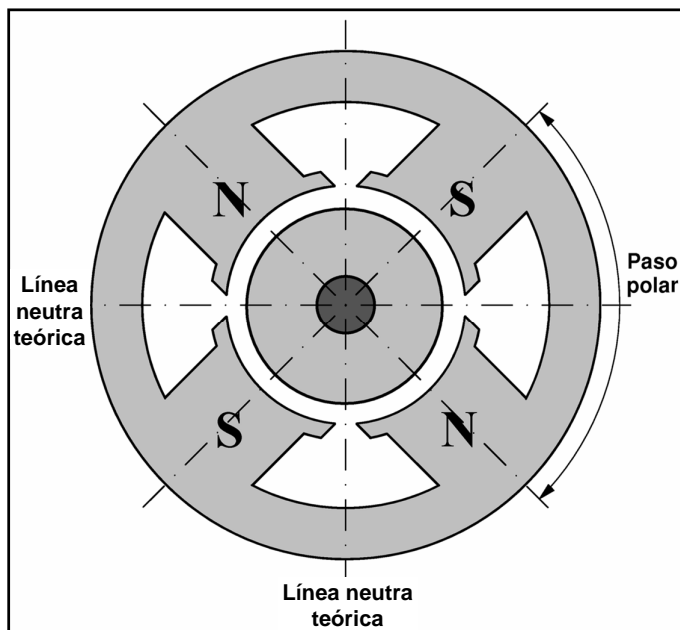
# MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

## Máquinas de c.c. Constitución

- En las máquinas de c.c. el **inductor** está en el estator, que es de polos salientes, y el **inducido** está en el rotor.
- Ambos devanados se conectan a tensiones continuas, pero el devanado inducido recibe su tensión a través de un **colector de delgas**, por lo que la corriente que circula por él es alterna (aunque no sinusoidal).
- En estas máquinas el núcleo magnético del rotor se construye apilando chapas magnéticas; pues al girar se ve sometido a un campo magnético variable y, en consecuencia, tiene pérdidas magnéticas. El circuito magnético del estator puede ser de hierro macizo, pues está sometido a un campo magnético constante por lo que carece de pérdidas magnéticas. Aún así, a veces los polos se construyen apilando chapas magnéticas.
- Cuando actúa como generador, en el inducido se generan corrientes alternas que son rectificadas por el colector de delgas, por lo que se suministra tensión continua al exterior.
- Cuando actúa como motor la interacción del campo magnético inductor con las corrientes alternas que circulan por el devanado del rotor produce el giro de éste.

## Constitución básica de una máquina de c.c.



El **inductor** es de polos salientes y está en el estator.

El **inducido** está en el rotor y su devanado se aloja en ranuras.

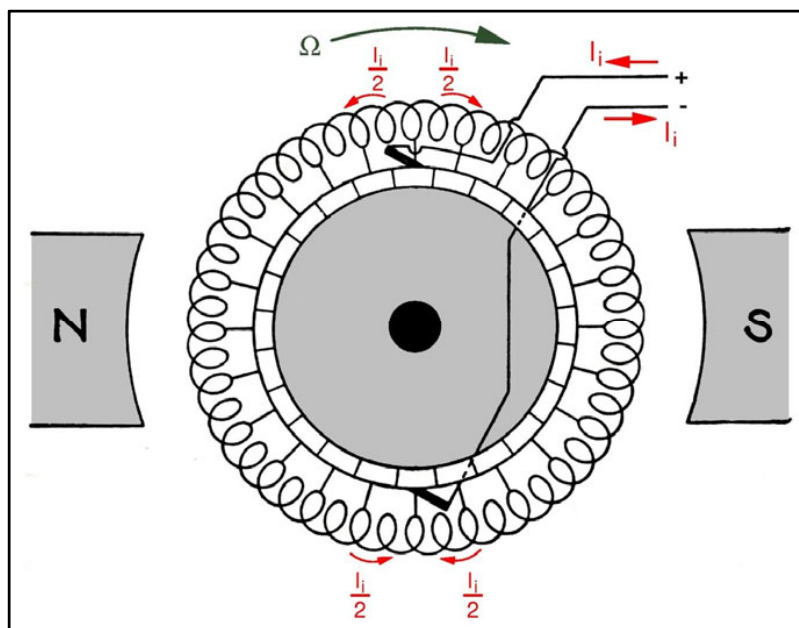
El inducido se alimenta a través de un **colector de delgas** que no aparece en la figura adjunta.

Una **línea neutra** (L.N.) es una recta que une los puntos donde el campo magnético se anula.

Hay tantas líneas neutras como pares de polos.

Una **línea neutra teórica** es una L.N. cuando solo existe el campo magnético inductor y pasa justo por el centro de los espacios interpolares.

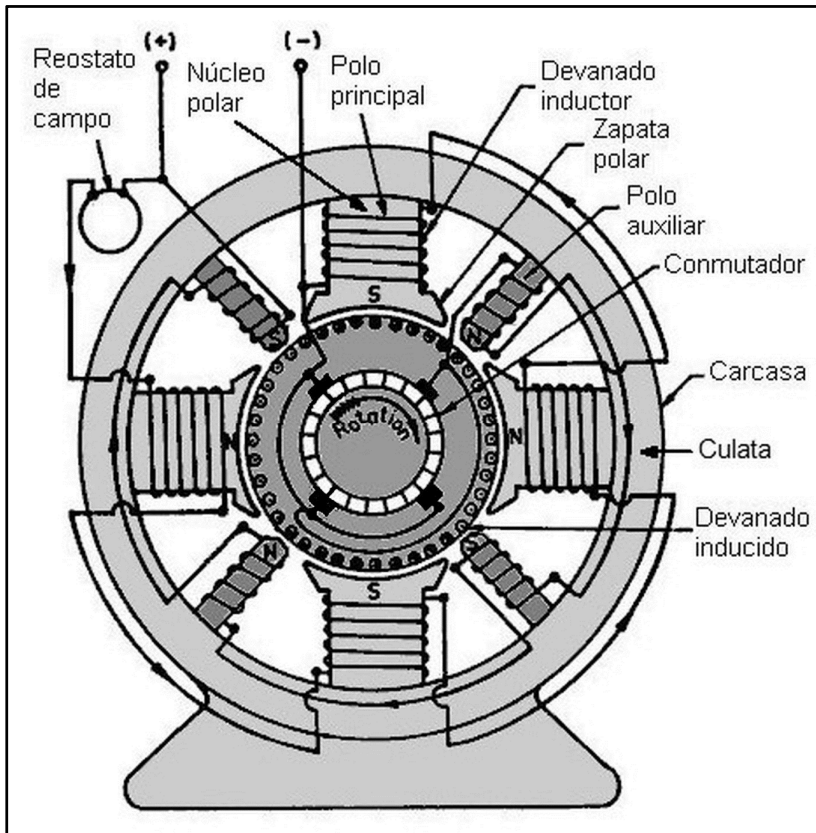
## Máquinas de c.c. Esquema básico de funcionamiento



- El inducido es un devanado cerrado (en la figura se trata de un devanado en anillo).
- Las escobillas y el colector de delgas hacen que el inducido se divida en un número par de **ramas en paralelo** idénticas.
- En la figura las dos escobillas dividen el inducido en dos ramas en paralelo.

Figura modificada de la obtenida en Wikimedia Commons. Origen: Hawkins Electrical Guide, Volume 5. Copyright 1917 by Theo. Audel & Co.

## Esquema de un generador de c.c. de 4 polos



Generador de corriente continua de 4 polos con los devanados inductor e inducido conectados en paralelo (Generador shunt)

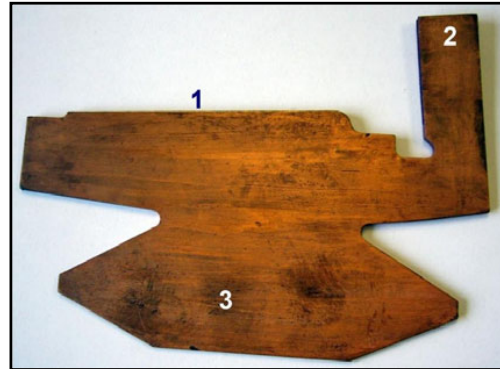
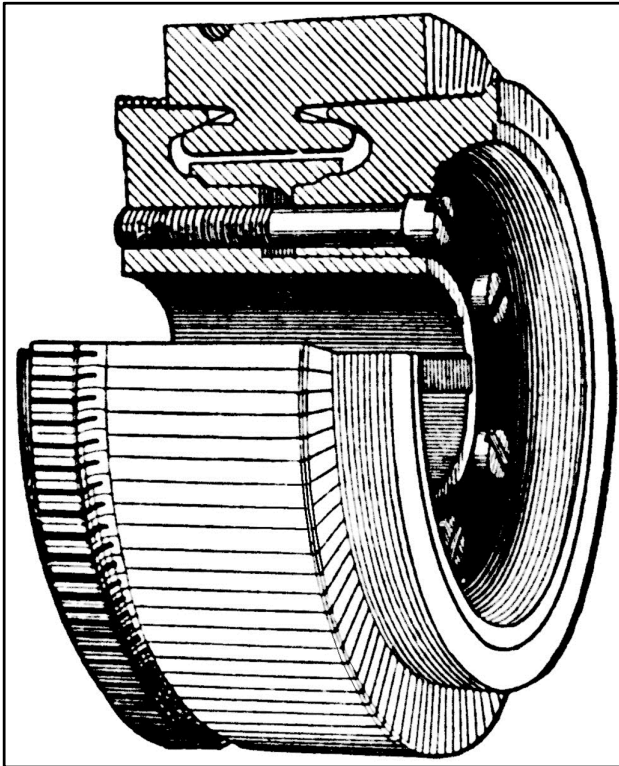
Fuente: Wikimedia Commons

Autor: Edinoruqi

## Máquina de c.c. Descripción

- La **culata** es la parte del estator que forma parte del circuito magnético y que soporta los polos.
- Rodeando a la culata está la **carcasa** de hierro de fundición y que es la envolvente de la máquina.
- Sobre la culata se fijan los **polos principales o polos inductores** donde se arrolla el devanado **inductor**, también denominado **de excitación** o **de campo**.
- Cada polo consta de un **núcleo polar** donde, se arrolla el bobinado del polo, y de una expansión denominada **zapata polar**.
- Los **polos auxiliares o de conmutación** tienen como función mejorar la conmutación en el colector de delgas y, a veces, también compensar la reacción de inducido. Se disponen entre los polos principales y se conectan en serie con el inducido.
- El rotor tiene un devanado cerrado y un **colector de delgas** que permite conectarlo a un circuito eléctrico exterior a través de unas escobillas situadas en el estator. Este devanado es el **inducido**.

## Colector de delgas



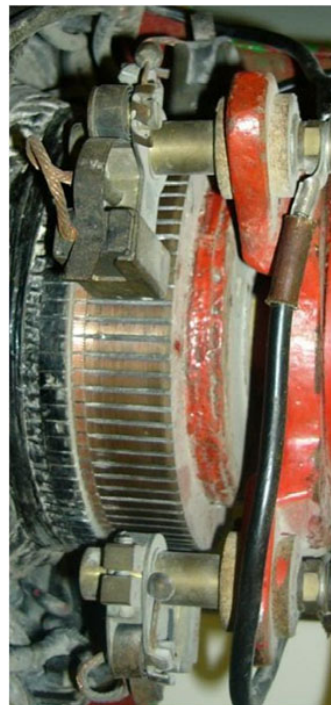
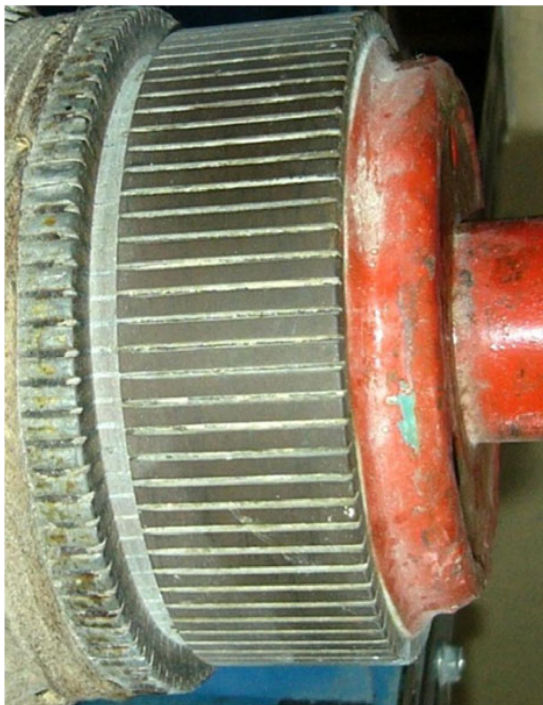
### Delga

- 1 Superficie de contacto con las escobillas.
- 2 Talón para la conexión a las bobinas.
- 3 Cola de milano.

Fuente: Wikimedia Commons

Autor: Hawkins Electrical Guide, Vol. 1

## Colector de delgas y escobilla





## Máquinas de c.c. Devanados

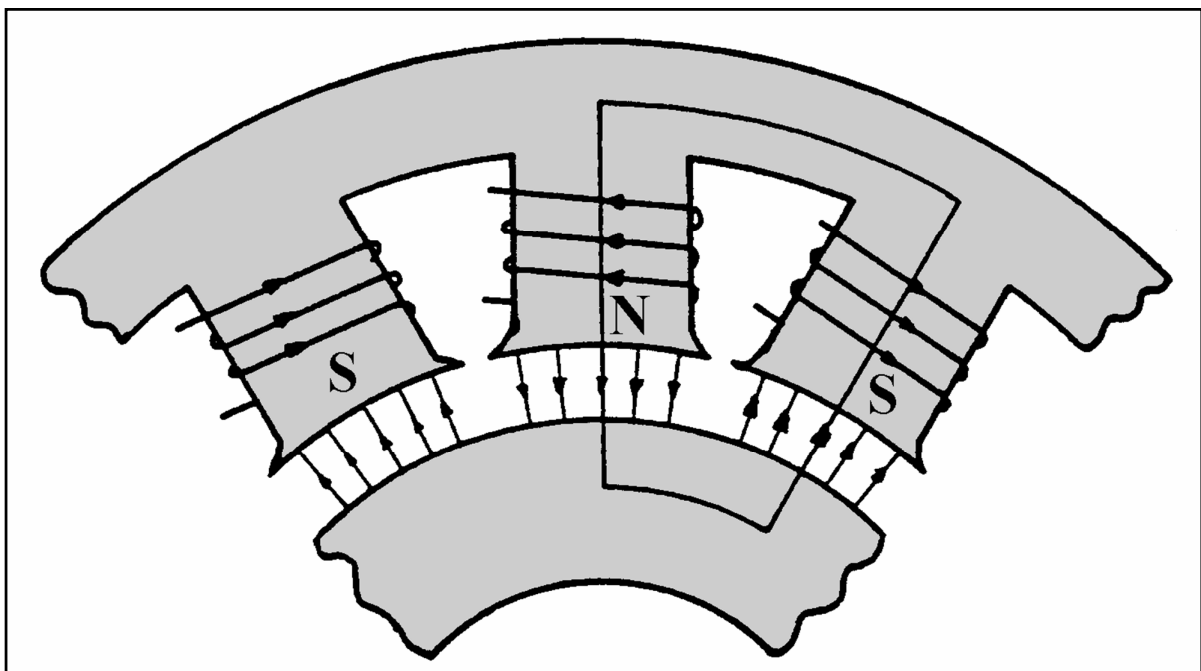
MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA			
<i>Devanado</i>	<i>Situación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor	Estator	0 Hz (corriente continua)	Bobinas polares
Inducido	Rotor	$f = \frac{p n}{60}$ en bobinas  $f = 0$ Hz en bornes	Bobinas en ranuras conectadas en sus extremos a un colector de delgas

El devanado **inducido** es un devanado cerrado que se conecta con el exterior a través de un colector de delgas.

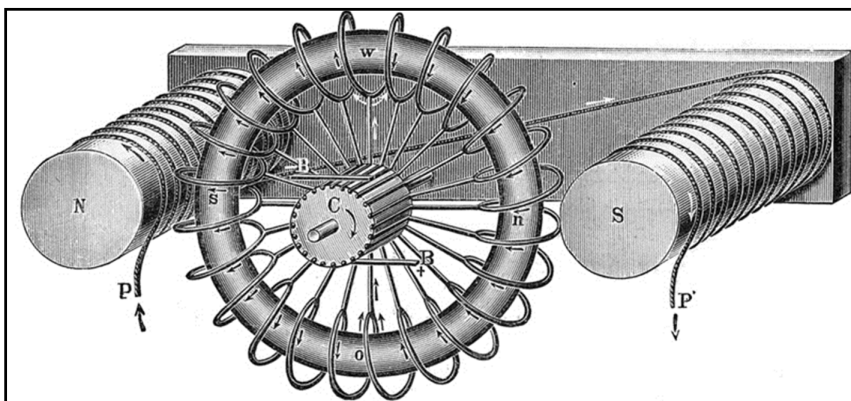
Esto hace que quede dividido en un número par de **ramas en paralelo** idénticas (ver la página 4).

**2a** = Número de ramas en paralelo del inducido.

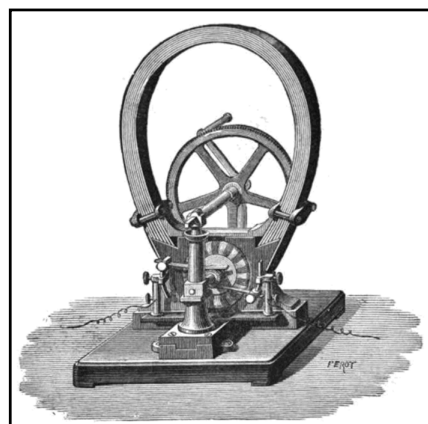
### Devanado concentrado (inductor)



## Máquina de Gramme (devanado en anillo)

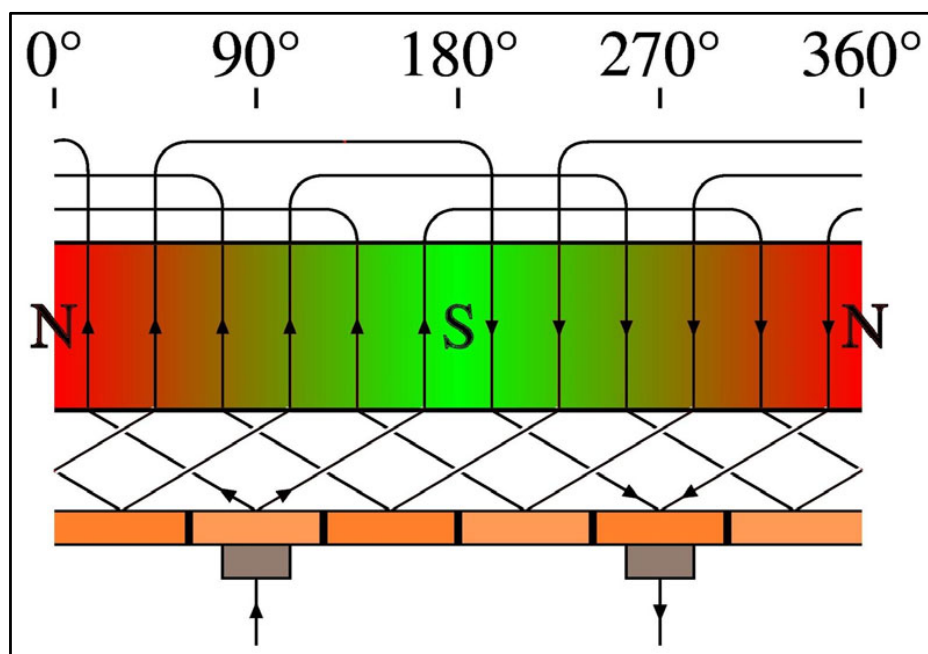


Fuente: Wikimedia Commons: "Bibliothek allgemeinen und praktischen Wissens für Militäranwärter Band III, 1905".



Fuente: Wikimedia Commons: "Electric lighting: A practical treatise". Hippolyte Fontaine. 1878

## Devanado de inducido de tambor



Fuente: Wikimedia Commons  
Autor: Stündle

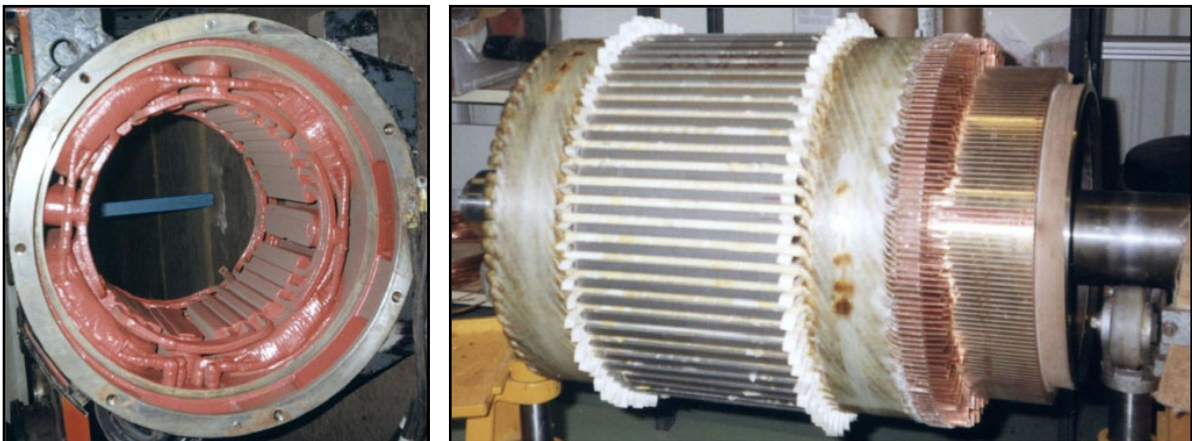
El devanado **inducido** es un devanado cerrado que se conecta con el exterior a través de un colector de delgas.

Puede ser **en anillo** (actualmente ya no se utiliza) o **de tambor**.

## Máquinas de c.c. Otros devanados

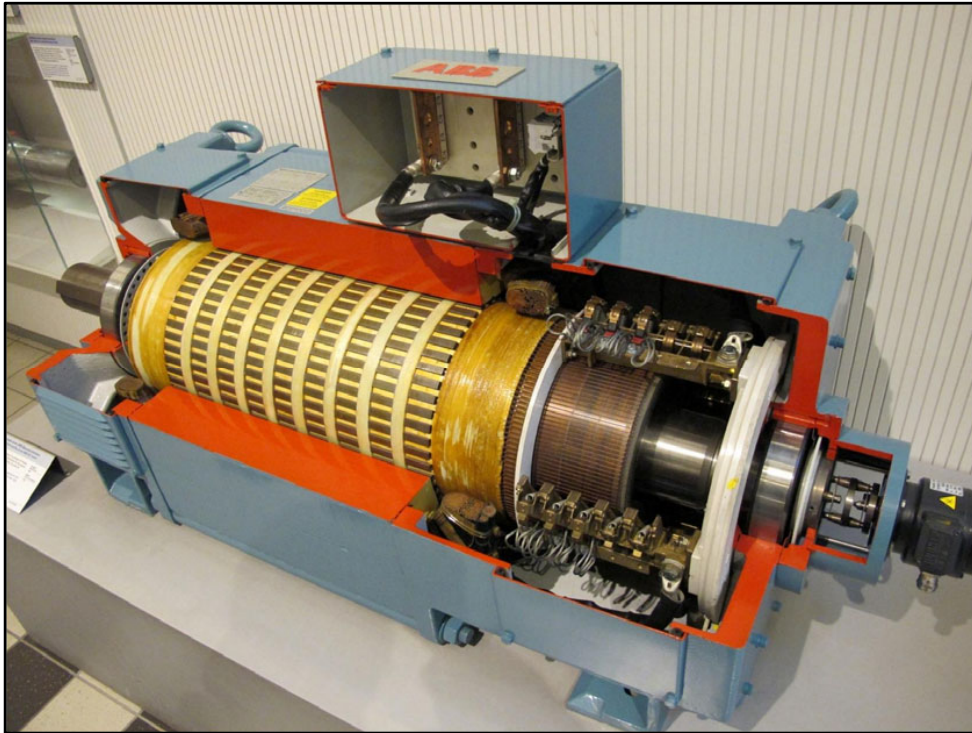
- En algunas máquinas de c.c. el inductor es de imanes permanentes, por lo que carecen de devanado inductor.
- Además de los devanados inductor e inducido, las máquinas de corriente continua pueden poseer otros devanados: de compensación y de conmutación, que se conectan en serie con el inducido.
- El **devanado de compensación** se aloja en ranuras longitudinales practicadas en las zapatas polares (en el lado que mira al entrehierro). Su misión es anular la reacción de inducido; es decir, el campo magnético creado por la corriente que circula por el inducido.
- El **devanado de conmutación** es el devanado de los polos auxiliares o de conmutación que se colocan en el estator a mitad de camino entre dos polos inductores. La misión de este devanado es mejorar la conmutación en el colector de delgas.
- Si la máquina carece de devanado de compensación se aumenta el número de espiras del devanado de conmutación para que también sirva para compensar la reacción de inducido.

## Máquina de corriente continua



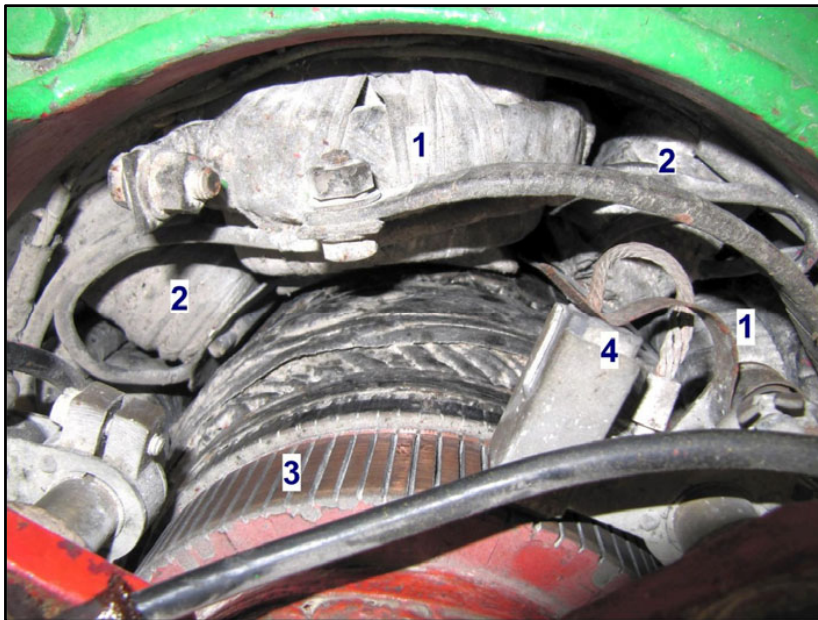
Estator y rotor de una máquina de corriente continua durante su proceso de fabricación.

## Máquina de corriente continua



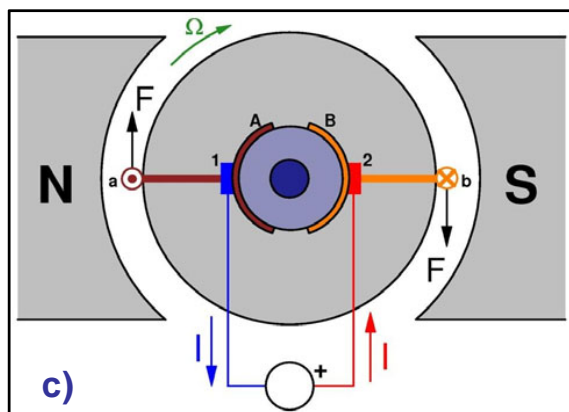
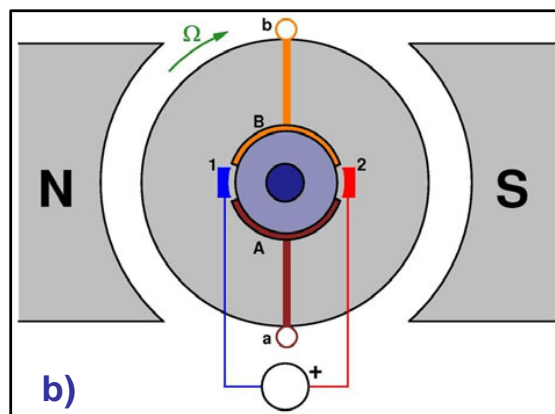
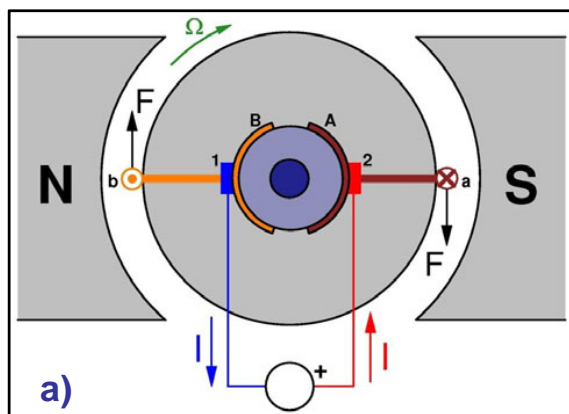
Fuente: Wikimedia Commons; Autor: ABB

## Máquina de corriente continua



- 1:** Polo principal del inductor.
- 2:** Polo auxiliar o de conmutación.
- 3:** Colector de delgas.
- 4:** Escobilla.

## Principio de funcionamiento de un motor de c.c. elemental



1, 2 Escobillas

A, B Delgas

a, b Lados de la bobina unidos respectivamente a las delgas A y B.

En las figuras a), b) y c) se representan 3 instantes del giro del motor. Entre cada una de estas figuras la máquina ha girado 90°.

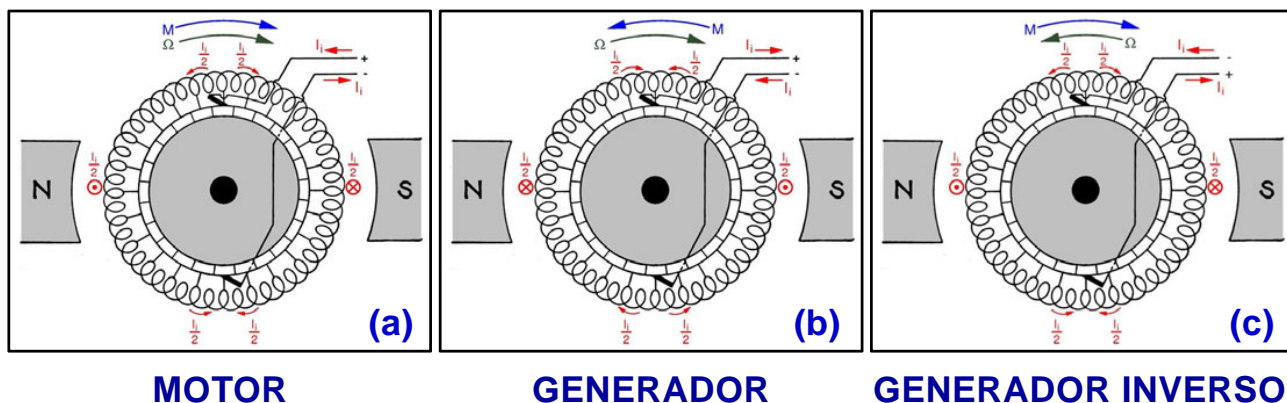
## Principio de funcionamiento de un motor de corriente continua

- Cuando la máquina actúa como **motor** da lugar en el eje a un **par motor**; es decir, un par que actúa en el mismo sentido que la velocidad de giro (luego produce energía mecánica), y en bornes del inducido a una **fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.)**, que se opone a la circulación de la corriente que le impone la red eléctrica externa (luego, absorbe energía eléctrica de la red).
- Para que la máquina pueda funcionar como motor las corrientes de los conductores del inducido que están frente a un polo inductor dado deben ser siempre del mismo sentido.
- Esto obliga a que la corriente de un conductor se invierta cuando el movimiento del rotor lo hace pasar de estar frente a un polo a estar frente a otro de polaridad contraria. Esto se consigue mediante el colector de delgas.
- Por lo tanto, el colector de delgas hace que la corriente continua que le llega del exterior se convierta en una corriente alterna (aunque no sinusoidal) en el bobinado inducido.

## Principio de funcionamiento de un generador de corriente continua

- Cuando la máquina actúa como **generador** da lugar en el eje a un **par de frenado**; es decir, un par que actúa en sentido contrario a la velocidad de giro (luego consume energía mecánica que debe ser suministrada por un motor acoplado al eje de la máquina de corriente continua), y en bornes del inducido a una **fuerza electromotriz (f.e.m.)**, que provoca la circulación de la corriente que se suministra al circuito exterior conectado al inducido (luego, suministra energía eléctrica al exterior).
- La f.e.m. inducida en cada conductor del inducido cambia de sentido cuando pasa de estar situado frente a un polo inductor a estar frente a un polo de signo contrario.
- Para que al exterior se suministre corriente continua el colector de delgas conmuta las conexiones de cada conductor cuando se produce la inversión de sentido de su f.e.m. inducida.
- Por lo tanto, el colector de delgas actúa de rectificador mecánico de la tensión del inducido.

### Motor y generador de c.c.



- Si una máquina de c.c. pasa de actuar como motor (Fig. a) a funcionar como generador manteniendo el mismo sentido de giro (Fig. b), la polaridad en los bornes del inducido no varía, pero se invierten los sentidos de la corriente del inducido  $I_i$  y del par  $M$ .
- Si una máquina de c.c. pasa de actuar como motor (Fig. a) a funcionar como generador cambiando el sentido de giro (Fig. c), se invierte la polaridad en los bornes del inducido, pero se mantienen los mismos sentidos de la corriente del inducido  $I_i$  y del par  $M$ .

*Figuras modificadas de la obtenida en Wikimedia Commons. Origen: Hawkins Electrical Guide, Volume 5. Copyright 1917 by Theo. Audel & Co.*

## Magnitudes básicas. F.e.m.

- Se denomina E a la fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en el devanado inducido de un motor de corriente continua y a la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) en el inducido en un generador de c.c.
- Se cumple que

$$E = K_E n \Phi_M$$

$$E = K_M \Omega \Phi_M$$

En las ecuaciones anteriores:

- n es la velocidad de la máquina medida en r.p.m.
- $\Omega$  es la velocidad de la máquina medida en rad/s.
- $\Phi_M$  es el **flujo por polo**. Es el flujo que atraviesa a una espira diametral que estuviera colocada justo frente a un polo inductor. Se mide en Wb.
- $K_E$  y  $K_M$  son constantes constructivas distintas para cada máquina.

## Constantes constructivas $K_E$ y $K_M$

- Las constantes constructivas  $K_E$  y  $K_M$  se calculan así:

$$K_E = \frac{1}{60} \frac{p}{a} Z$$

$$K_M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} Z$$

En las ecuaciones anteriores:

- 2p es el número de polos de la máquina.
- 2a es el número de ramas en paralelo en que queda dividido el inducido por las escobillas.
- Z es el número de conductores del inducido.
- Es evidente que se verifica la siguiente relación:

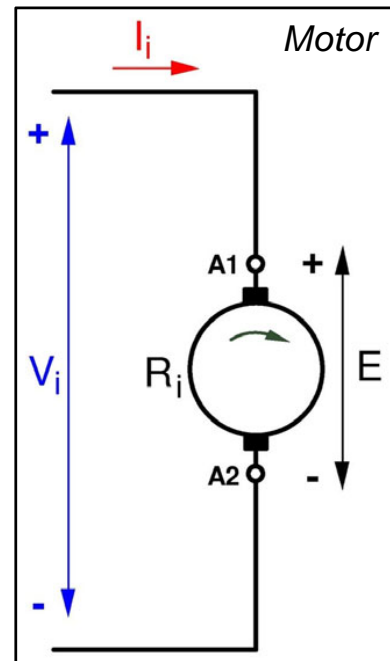
$$K_E = \frac{2\pi}{60} K_M$$

## Ecuación eléctrica del inducido de un motor de c.c.

- En un **motor** de c.c. se verifica que

$$V_i = E + R_i I_i + V_{esc}$$

- $V_i$  es la tensión con que se alimenta al circuito del inducido.
- $I_i$  es la corriente del inducido.
- $R_i$  es la resistencia del circuito del inducido (incluye la resistencia del bobinado inducido y de los devanados conectados en serie con el, si los hay).
- $V_{esc}$  es la caída de tensión en un par de escobillas ( $\approx 2$  V).



## Ecuación eléctrica del inducido de un generador de c.c.

- En un **generador** de c.c. se verifica que

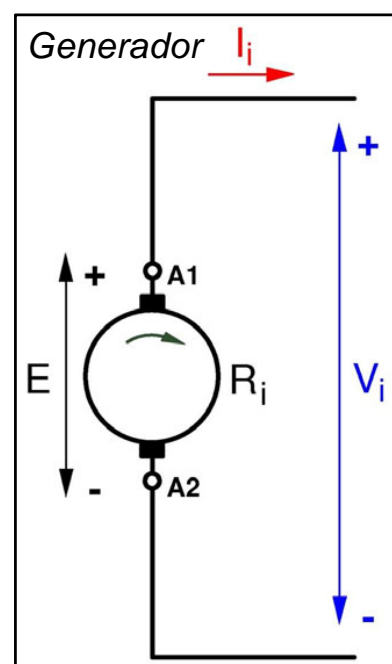
$$V_i = E - R_i I_i - V_{esc}$$

- En un **motor**  $E$  es una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) y se cumple que

$$E < V_i$$

- En un **generador**  $E$  es una fuerza electromotriz (f.e.m.) y se cumple que

$$E > V_i$$





## Magnitudes básicas. Par

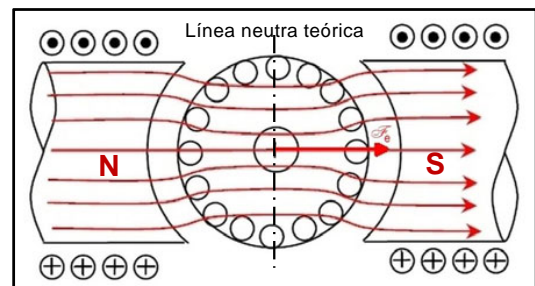
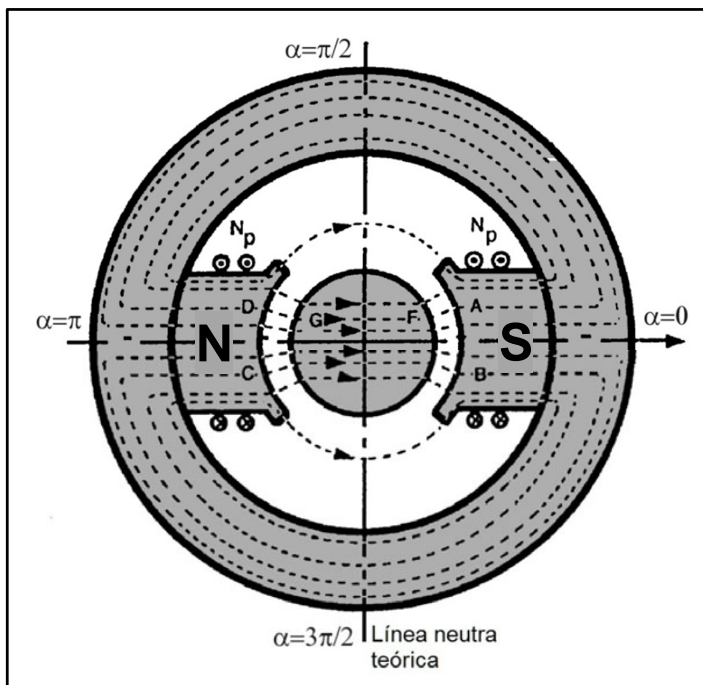
- El par  $M$  que produce una máquina de c.c. se puede calcular así

$$M = K_M I_i \Phi_M$$

- De la ecuación anterior se deduce que si se mantiene el signo del flujo  $\Phi_M$ , el par cambia de sentido cuando cambia de signo la corriente del inducido  $I_i$ . Esto es lo que sucede cuando una máquina pasa de funcionar como motor a funcionar como generador manteniendo el mismo sentido de giro.
- También se deduce que cuando se desea cambiar el sentido de giro de un motor de c.c. hay que cambiar de signo a la corriente del inducido o al campo magnético, pero no a ambos simultáneamente.
- Se puede deducir que el par también se puede obtener así

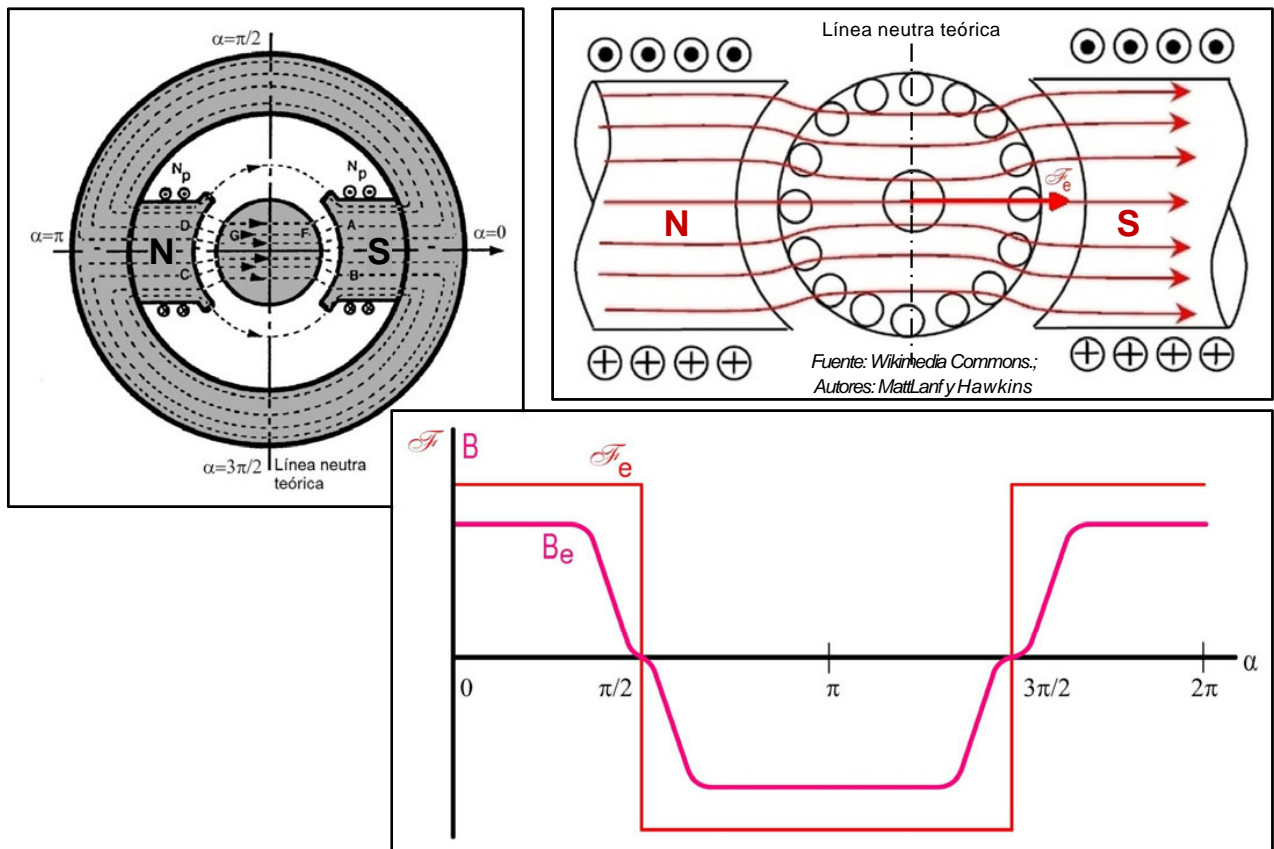
$$M = \frac{E \cdot I_i}{\Omega} = \frac{E \cdot I_i}{\frac{2\pi}{60} n}$$

## Inductor



Fuente: Wikimedia Commons.  
Autores: MattLanf y Hawkins

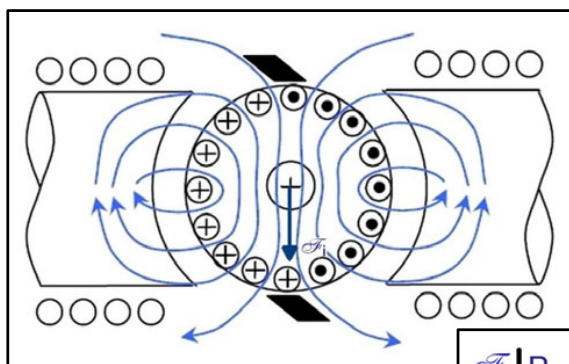
## Campo magnético inductor



## Campo magnético inductor

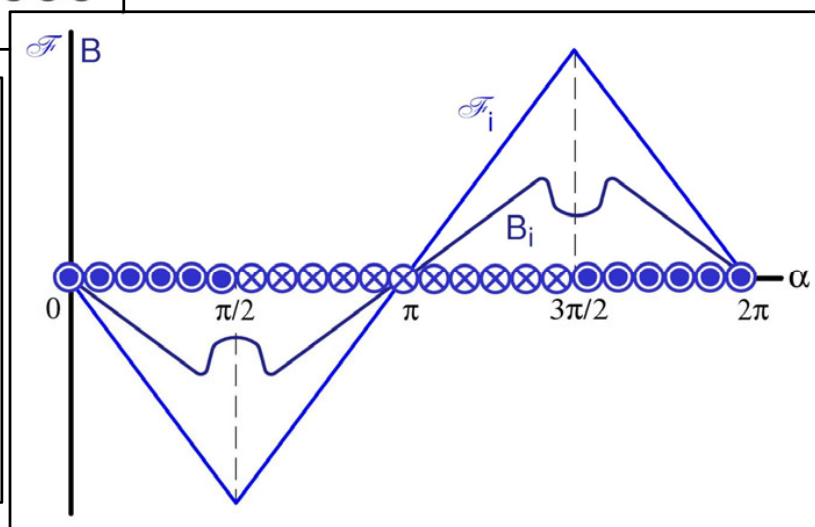
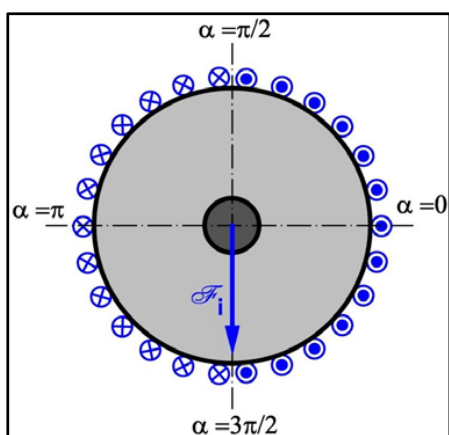
- En la diapositiva anterior se muestra una máquina de dos polos funcionando en vacío (sin corriente en el inducido), por lo que el campo magnético es solamente el originado por el inductor.
- El origen de ángulos se ha elegido arbitrariamente en el centro del polo sur inductor.
- Al ser de dos polos, en esta máquina los ángulos eléctricos coinciden con los ángulos geométricos. Para dar mayor generalidad a los razonamientos y hacerlos válidos para máquinas de más polos, se va a trabajar con ángulos eléctricos.
- En la diapositiva se muestra la distribución a lo largo del entrehierro de la fuerza magnetomotriz (f.m.m.)  $\mathcal{F}_e$  y de la inducción magnética  $B_e$  del inductor.
- La f.m.m.  $\mathcal{F}_e$  tiene forma rectangular. La inducción  $B_e$  es constante en el entrehierro bajo cada polo y disminuye rápidamente entre los polos y se hace nula justo medio camino entre dos polos inductores sucesivos.
- Luego, en este caso la **línea neutra** coincide con su posición teórica y pasa por las posiciones angulares a  $\pi/2$  y  $3\pi/2$  radianes eléctricos.
- Hay tantas líneas neutras como pares de polos tiene la máquina.

## Reacción de inducido



Reacción de inducido de una máquina de corriente continua en carga cuando tiene sus escobillas sobre la línea neutra teórica.

Fuente: Wikimedia Commons.  
Autores: MattLanf y Hawkins

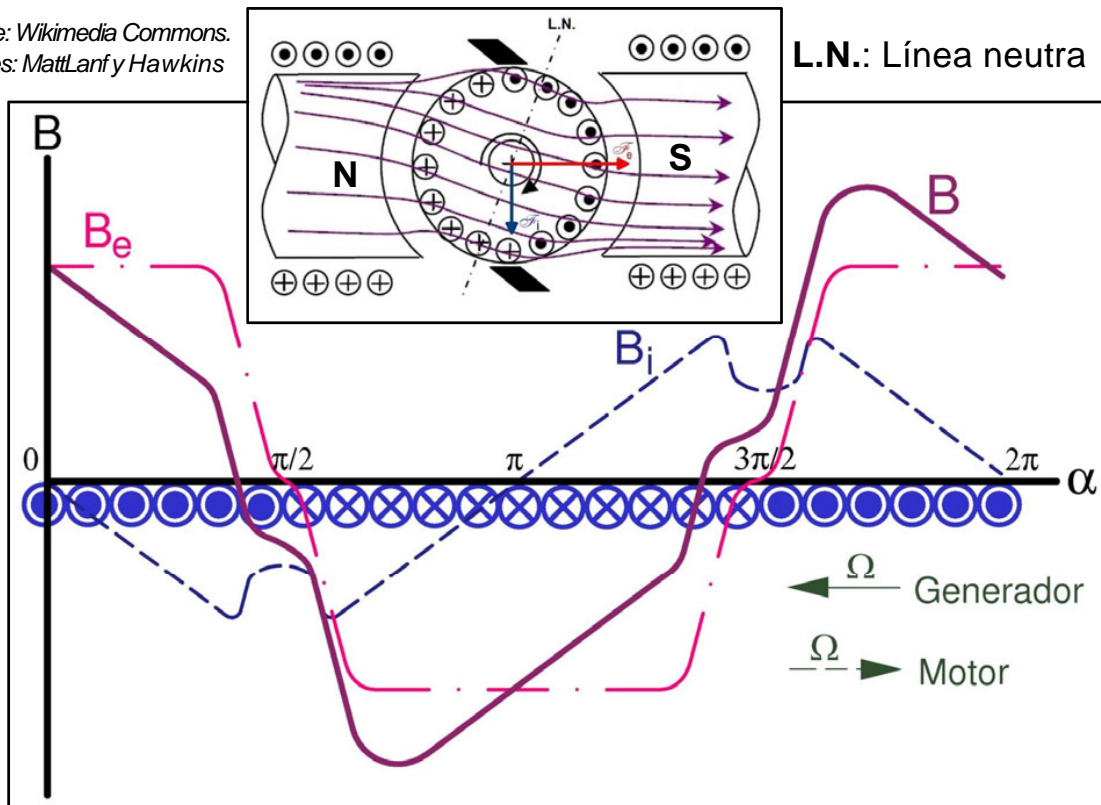


## Reacción de inducido

- En la diapositiva anterior se muestra el campo magnético originado por las corrientes del inducido cuando una máquina de c.c. está en carga.
- Se supone que las escobillas están situadas sobre la línea neutra teórica (L.N.T.). Esto es, la colocación de las escobillas sobre el colector de delgas es tal que se produce la conmutación de la corriente de una bobina justo cuando pasa por la posición donde se encuentra la L.N.T.
- La fuerza magnetomotriz (f.m.m.)  $\mathcal{F}_i$  creada por las corrientes del inducido se denomina **reacción de inducido**.
- En este caso la f.m.m. del inducido es **transversal**. Tiene sus máximos a  $90^\circ$  eléctricos de los máximos del campo magnético inductor.
- La f.m.m. del inducido  $\mathcal{F}_i$  varía linealmente, teniendo valor nulo en los ejes de cada polo inductor y los valores máximos en la L.N.T.
- La inducción magnética del inducido  $B_i$  tiene la misma forma que la f.m.m. en la zona de entrehierro uniforme bajo cada polo (varía linealmente) y presenta un fuerte decrecimiento en la zona interpolar debido al aumento del entrehierro en dicha zona.

## Reacción de inducido: Inducción total

Fuente: Wikimedia Commons.  
Autores: MattLanf y Hawkins



## Reacción de inducido. Desfase de la línea neutra

- En la figura anterior se muestra la inducción total  $B$  que tiene una máquina de c.c. en carga debido a la acción conjunta de las f.m.m.s inductora e inducida.
- El caso mostrado en la figura grande de la diapositiva anterior corresponde a la máquina funcionando como generador y girando en sentido horario (ver la figura pequeña) o a la máquina actuando como motor y girando en sentido antihorario (ver la página 20).
- Se observa que ahora la inducción magnética se anula en unas posiciones distintas a las del campo magnético inductor.
- Por lo tanto, la línea neutra cambia de posición con respecto a la línea neutra teórica. Este desfase de la línea neutra no es constante, pues depende de la corriente del inducido, y es en el sentido del movimiento para generadores y en el sentido contrario a la velocidad en motores.
- Luego, en generadores la línea neutra se **adelanta** y en motores se **retrasa**.

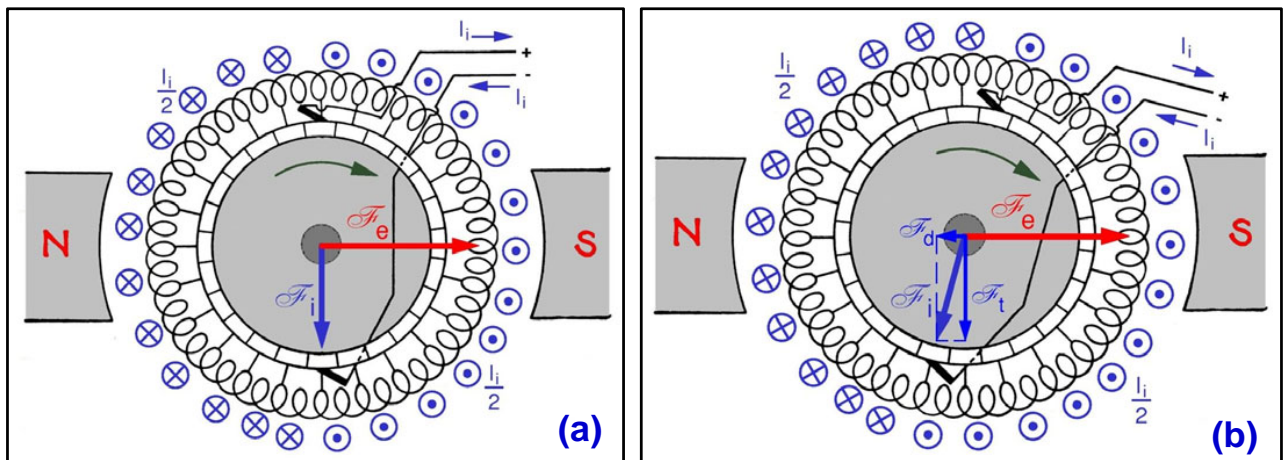
## Reacción de inducido. Efecto desmagnetizante

- Recordemos que en el ejemplo que se está analizando los polos de la máquina ocupan las zonas que van de  $3\pi/2$  a  $\pi/2$  y de  $\pi/2$  a  $3\pi/2$  radianes eléctricos, respectivamente.
- En las diapositivas anteriores se puede comprobar que la f.m.m. del inducido  $\mathcal{F}_i$ , en principio, parece tener un efecto nulo sobre el flujo de un polo  $\Phi_M$ .
- En efecto, si la máquina funciona en la zona lineal (no hay saturación) la f.m.m.  $\mathcal{F}_i$  refuerza el campo magnético una mitad de un polo en la misma proporción que la disminuye en la otra mitad del mismo polo y el flujo total de un polo  $\Phi_M$  no varía.
- Pero, dado que sí existe saturación en el circuito magnético de la máquina, sucede que el aumento del campo magnético en un medio polo debido a la f.m.m.  $\mathcal{F}_i$  es menor que la disminución del campo en el otro medio polo. Por lo tanto, existe un **efecto desmagnetizante de la reacción de inducido** y el flujo por polo  $\Phi_M$  disminuye cuando hay reacción de inducido.

## Reacción de inducido. Deformación del campo magnético

- En la diapositiva anterior se ha mencionado que cuando hay reacción de inducido el campo magnético aumenta en unas zonas de los polos y disminuye en otras.
- Esta modificación de la forma de onda de la inducción magnética en el entrehierro hace que la fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida sobre las espiras del inducido situadas bajo un polo no sea igual en todas ellas (a diferencia de lo que pasa cuando no hay reacción de inducido).
- Las espiras que están en la zona donde el campo magnético ha sido reforzado darán lugar a una f.e.m. mayor que cuando no hay reacción de inducido. Esto aumenta la tensión entre las delgas correspondientes a estas espiras, lo que dificulta la conmutación y puede producir chisporroteo en el colector.

## Dirección de la reacción de inducido



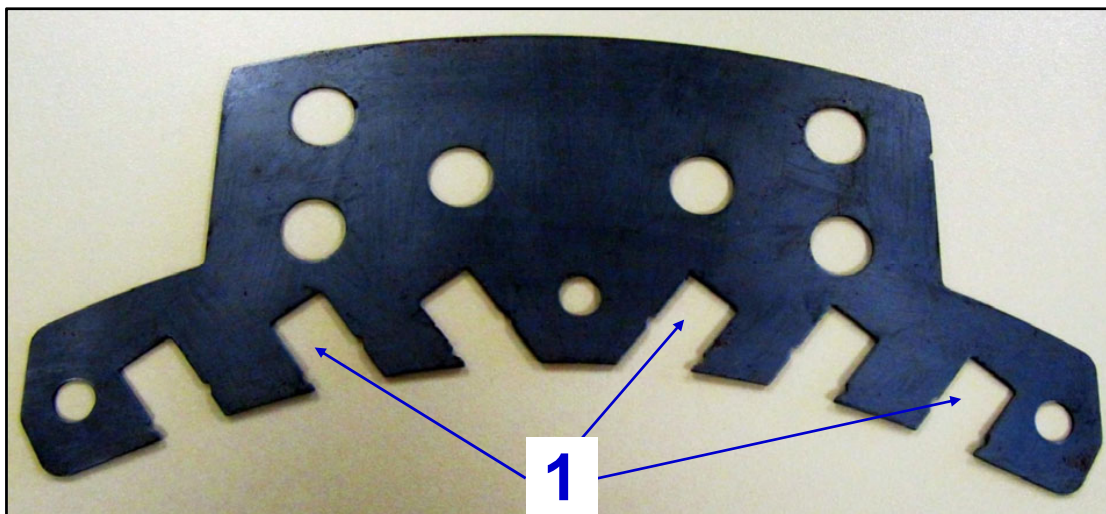
- Cuando las escobillas se colocan sobre la línea neutra teórica la reacción de inducido  $\mathcal{F}_i$  es **transversal** (Fig. a).
- Cuando se desplazan las escobillas intentando colocarse en la nueva línea neutra, la reacción de inducido  $\mathcal{F}_i$  cambia de orientación y ahora, además de la componente transversal  $\mathcal{F}_i$ , tiene también una componente **longitudinal**  $\mathcal{F}_d$  de sentido contrario a la f.m.m. del inductor  $\mathcal{F}_e$  (Fig. b). Por lo tanto, en este caso aparece una f.m.m.  $\mathcal{F}_d$  **desmagnetizante**.

Figuras modificadas de la obtenida en Wikimedia Commons. Origen: Hawkins Electrical Guide, Volume 5. Copyright 1917 by Theo. Audel & Co.

## Corrección de la reacción de inducido

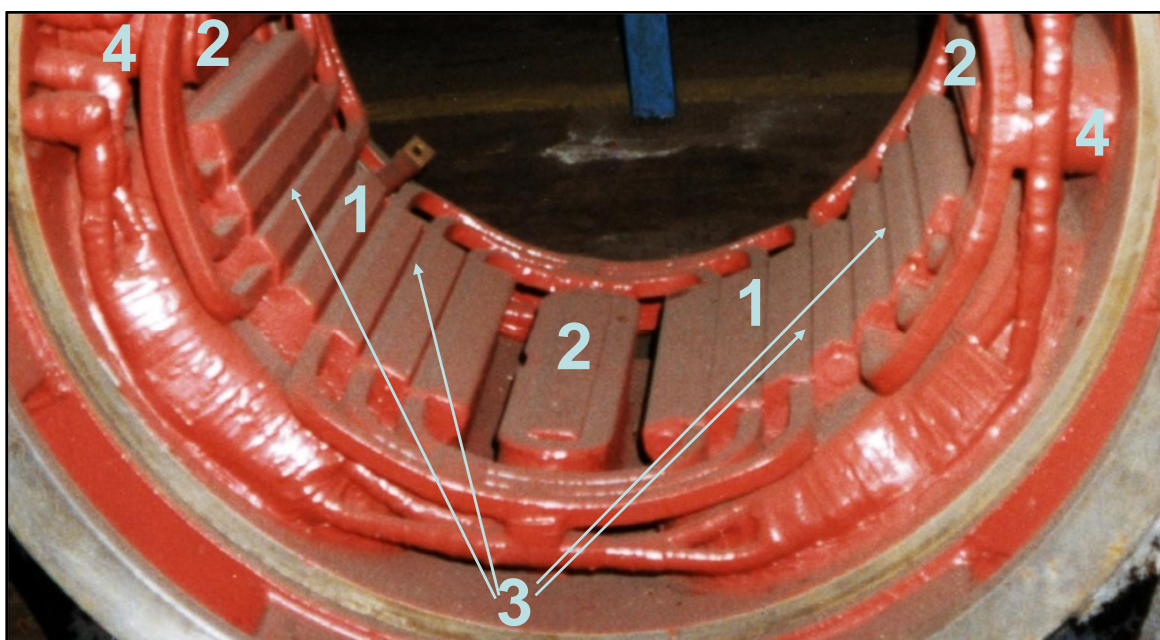
- La reacción de inducido produce efectos indeseables por lo que interesa eliminarla o reducir sus efectos lo más posible.
- En máquinas pequeñas se pueden **desplazar las escobillas** para situarlas en la nueva posición de la línea neutra cuando hay reacción de inducido. Se **adelantan** cuando la máquina es generador y se **retrasan** cuando es motor. Este sistema introduce una componente desmagnetizante a la reacción de inducido y exigiría cambiar la posición de las escobillas cuando varía la carga.
- El mejor sistema, que se utiliza en máquinas grandes y medianas con apreciables variaciones de carga, consiste en dejar las escobillas sobre la línea neutra teórica e introducir un **devanado de compensación** conectado en serie con el inducido. Este devanado se coloca en ranuras longitudinales practicadas en la zapata de los polos inductores y por él se hace pasar una corriente igual a la del inducido, pero de sentido contrario.
- En la mayor parte de las máquinas la reacción de inducido se corrige mediante los **polos auxiliares o de conmutación**. Como se verá más adelante, estos polos se usan, en principio, para mejorar la conmutación y su devanado (el **devanado de conmutación**) se conecta en serie con el inducido. Cuando estos polos se usan también para mejorar la reacción de inducido habrá que dotar de un mayor número de espiras a su devanado.
- El devanado de compensación corrige la deformación del campo magnético y el desplazamiento de la línea neutra. El de conmutación corrige el desplazamiento de la línea neutra, pero no la deformación del campo magnético debida a la reacción de inducido.

## Devanado de compensación



- Chapa magnética para formar un polo inductor de una máquina de c.c. En la parte inferior de la zapata se aprecian las ranuras **1** para alojar el **devanado de compensación**.
- Aunque el inductor puede fabricarse de hierro macizo, los polos a veces se construyen apilando chapas para minimizar las pequeñas pérdidas magnéticas cuando hay cambios de la corriente de excitación o cuando el inductor se alimenta con una corriente rectificadora que tiene rizado.

## Devanados auxiliares



1: Polo inductor.

2: Polo de conmutación.

3: Devanado de compensación.

4: Devanado de conmutación

Tanto el devanado de compensación como el de conmutación se conectan en serie con el inducido

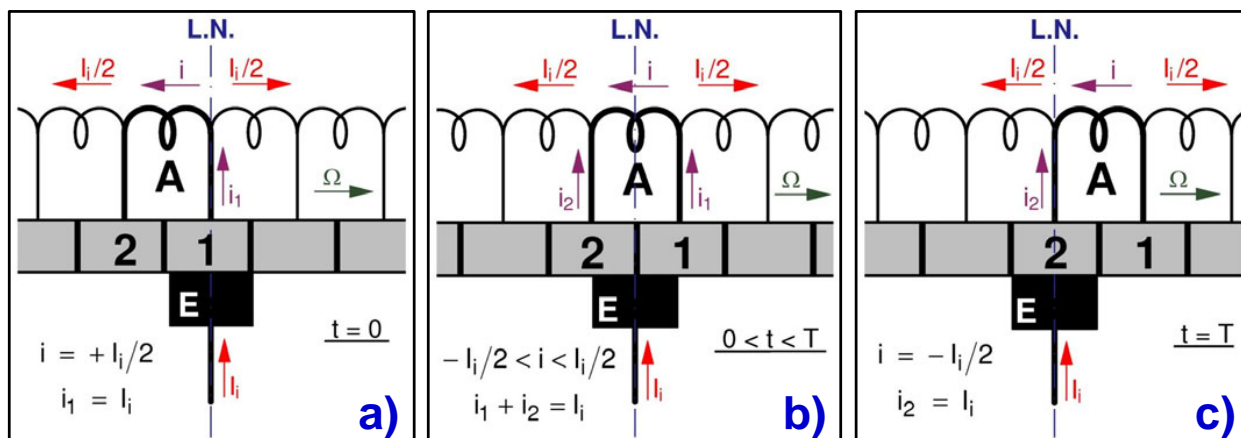
## Conmutación ideal. Hipótesis

- No se inducen f.e.m.s sobre la bobina que conmuta.
- Se desprecian las resistencias de las bobinas y de los conductores. Solo existe la resistencia de contacto entre delga y escobilla.
- La escobilla está situada sobre la línea neutra.
- La máquina gira a una velocidad  $\Omega$  constante.
- El ancho de una escobilla es igual al de una delga (aunque en la práctica normalmente una escobilla es más ancha y contacta con varias delgas simultáneamente).
- Solo hay dos escobillas (no hay escobillas en paralelo). Luego, la corriente que circula por una escobilla es la corriente total del inducido  $I_i$ .

$R_e$  = Resistencia de contacto delga-escobilla cuando la escobilla cubre totalmente a la delga.

$R_1$  = Resistencia de contacto de la delga 1 con la escobilla E.

$R_2$  = Resistencia de contacto de la delga 2 con la escobilla E.



L.N. = Línea neutra; T = Período de conmutación;

A = Bobina del devanado inducido en anillo; E = Escobilla; 1, 2: Delgas

$$R_1 = R_e \frac{T}{T - t}$$

$$R_2 = R_e \frac{T}{t}$$

$$R_1 i_1 = R_2 i_2$$

$$i_1 t = i_2 (T - t)$$

$$i_1 + i_2 = I_i$$

$$i_1 = I_i \frac{T - t}{T}$$

$$i_2 = I_i \frac{t}{T}$$

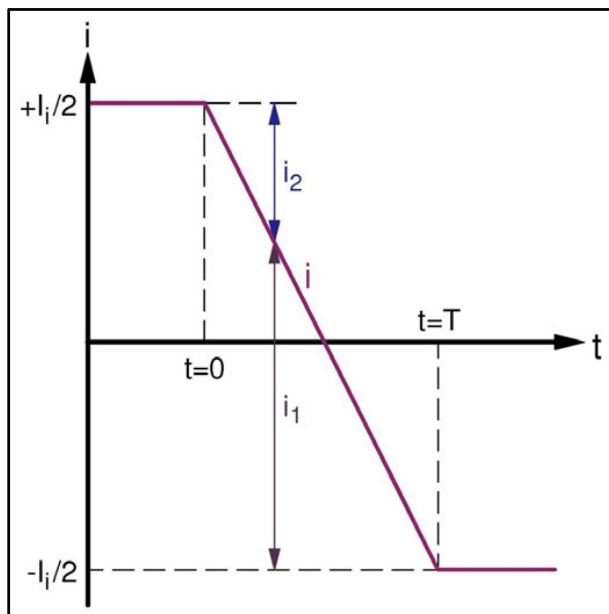
$$i_1 = \frac{I_i}{2} + i$$

$$i = \frac{I_i}{2} \left( 1 - 2 \frac{t}{T} \right)$$

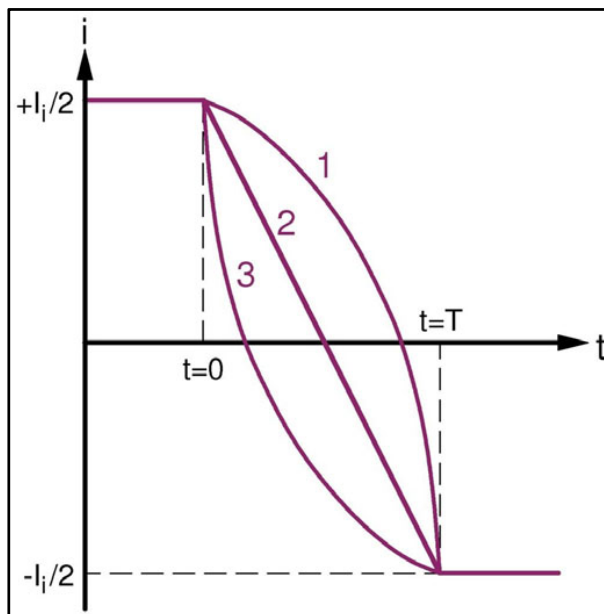
i varía linealmente



## Conmutación



Conmutación lineal



Efectos de la f.e.m. reactiva:

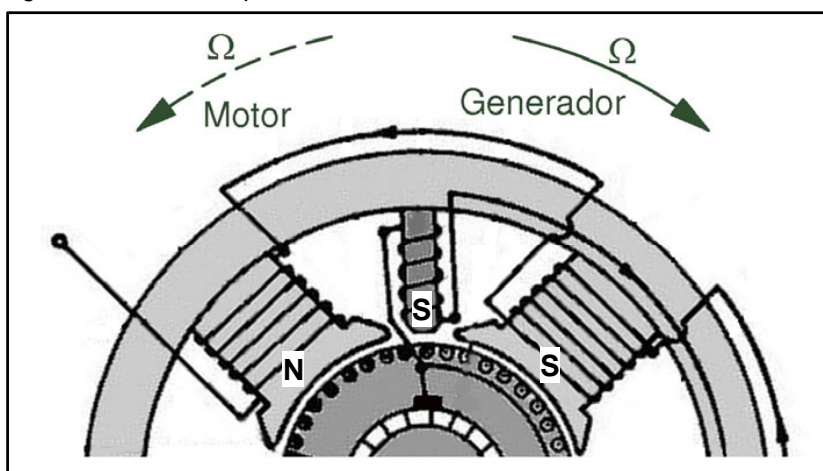
- 1: Conmutación retrasada.
- 2: Conmutación lineal.
- 3: Conmutación adelantada.

## Polos auxiliares o de conmutación

**GENERADOR:** Polo auxiliar del mismo signo que el polo principal (o inductor) que le sigue según el movimiento del rotor.

**MOTOR:** Polo auxiliar del mismo signo que el polo principal que le precede según el movimiento del rotor.

Fig. modificada de la publicada en Wikimedia Commons; Autor: Edinoruqi



Si no hay devanado de compensación los **polos auxiliares** tienen la doble misión de reducir la reacción de inducido y de mejorar la conmutación.

Interesa que su acción varíe linealmente con la f.m.m.  $\mathcal{F}_i$  por lo que, para reducir el efecto de la saturación, estos polos tienen un entrehierro mayor que los polos inductores.

En máquinas pequeñas se desplaza la línea de escobillas con respecto a la línea neutra en lugar de usar polos auxiliares.

## Conmutación. Resumen

- En el caso ideal en el que se verifican las hipótesis enunciadas se obtiene una **conmutación lineal**.
- En la figura se muestra la conmutación de la bobina **A** de un devanado en anillo que está conectada a las delgas **1** y **2**. Durante el **período de conmutación T** la corriente  $i$  en la bobina **A** pasa de ser  $+I_i/2$  a ser  $-I_i/2$ .
- Al principio de la conmutación la corriente  $I_i$  que envía la escobilla pasa íntegramente por la delga **1** y al final  $I_i$  pasa en su totalidad por la delga **2**. Durante la conmutación la corriente de la escobilla se reparte entre ambas delgas, disminuyendo paulatinamente la corriente  $i_1$  de la delga **1** y aumentando la corriente  $i_2$  de la delga **2**.
- En este caso ideal se obtiene que la corriente  $i$  varía linealmente entre  $+I_i/2$  y  $-I_i/2$ , lo que significa que  $i_1$  e  $i_2$  también varían linealmente.
- Como la superficie de contacto entre una delga y la escobilla varía linealmente durante la conmutación (si la velocidad es constante), sucede que a medida que disminuye la superficie de contacto entre la escobilla y la delga **1** disminuye en la misma medida la corriente  $i_1$ . Análogamente, aumentan en la misma proporción la superficie de contacto de la escobilla con la delga **2** y la corriente  $i_2$ .
- Esto significa que la densidad de corriente (corriente por unidad de superficie de la escobilla) es constante en toda la superficie de la escobilla y durante todo el proceso de conmutación. La escobilla se aprovecha por igual en toda su superficie y no se sobrecarga en ningún punto.
- En la realidad, sí que existen efectos de autoinducción y de inducción mutua entre las bobinas que están conmutando. Esto hace que la conmutación no sea lineal y se retrase el momento en que la corriente  $i$  de la bobina **A** se invierte.
- Se tiene pues una **conmutación retrasada** (curva 1), con lo que la densidad de corriente aumenta en la delga **1** respecto a cuando la conmutación es lineal y la escobilla estará más cargada en la zona de contacto con la delga **1**.
- Para corregir este efecto se compensan las f.e.m.s de autoinducción e inducción mutua originando una f.e.m. de sentido contrario. Esto exige que haya un campo magnético no nulo sobre la bobina que conmuta para que produzca dicha f.e.m. de compensación.
- Esto se consigue bien desplazando las escobillas respecto a la línea neutra o bien mediante polos auxiliares o de conmutación.
- Hay que tener cuidado de no sobrecompensar porque entonces se tendría una **conmutación adelantada** (curva 3) y se sobrecargaría la zona de la escobilla en contacto con la delga **2**.

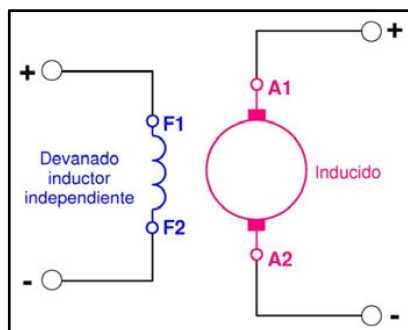
## Sistemas de excitación

- Los circuitos inductor e inducido de una máquina de c.c. se pueden conectar entre sí de diferentes maneras, dando lugar a máquinas de comportamientos diferentes.
- Existen estas formas de conexión:
  - **Excitación independiente:** Los circuitos inductor e inducido se conectan a redes de corriente continua distintas.
  - **Excitación derivación o shunt:** Los circuitos inductor e inducido se conectan en paralelo a una única red de corriente continua.
  - **Excitación serie:** Los circuitos inductor e inducido se conectan en serie entre sí y el conjunto se conecta a una única red de corriente continua. Esta conexión en la práctica no se utiliza para generadores.
  - **Excitación compuesta o compound:** Cada polo inductor tiene dos bobinas de forma que existen dos circuitos inductores. Uno se conecta en serie y el otro en paralelo con el circuito inducido y el conjunto se conecta a una única red de corriente continua.

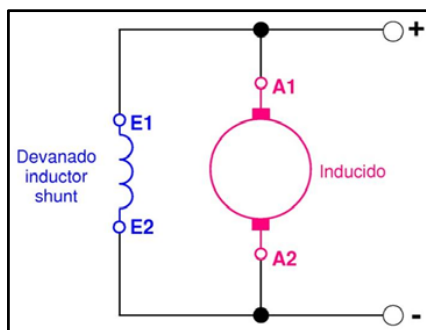
## Máquinas compound

- Dependiendo de cómo se realicen las conexiones serie y paralelo de los inductores de una máquina compound se tienen estas dos variantes:
  - **Corta derivación:** El inductor shunt se conecta directamente en paralelo con las escobillas del inducido y el conjunto de ambos se conecta en serie con el inductor serie.
  - **Larga derivación:** El inductor shunt se conecta en paralelo al conjunto del inducido más el inductor serie.
- Dependiendo de los sentidos de las f.m.m.s de los bobinados inductores se tienen estos dos tipos de máquinas compound:
  - **Compound aditiva:** Ambos bobinados inductores dan lugar a campos magnéticos del mismo sentido y la excitación total es la suma de las de ambos. Este es el tipo más habitual de máquina compuesta y es la que se ha representado en las diapositivas de este texto.
  - **Compound diferencial:** Los bobinados inductores dan lugar a campos magnéticos de sentidos opuestos y la excitación total es la diferencia de las de ambos.

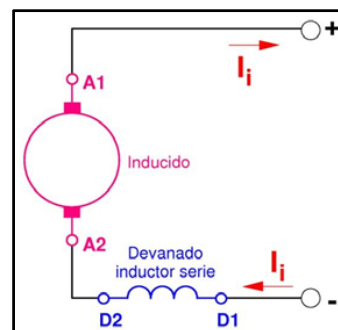
## Tipos de generadores de c.c.



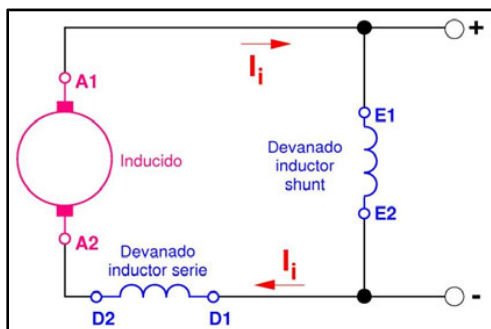
Excitación independiente



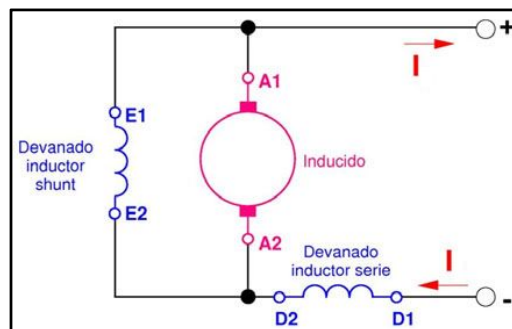
Excitación derivación (shunt)



Excitación serie



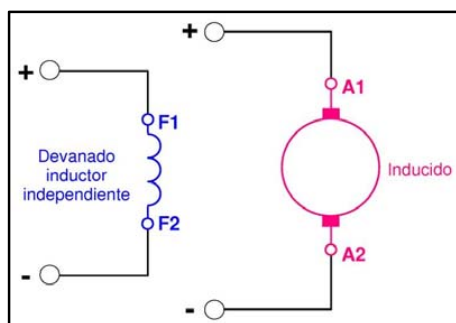
Excitación compuesta (compound)  
Larga derivación



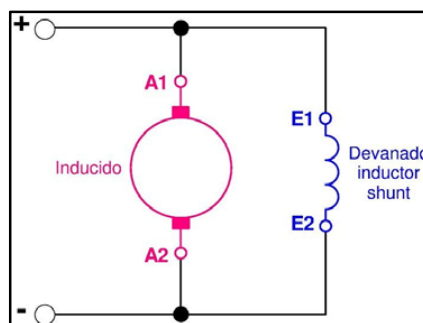
Excitación compuesta (compound)  
Corta derivación

Todas estas conexiones corresponden a la máquina girando en sentido horario. Para giro antihorario hay que invertir las conexiones a los bornes A1 y A2.

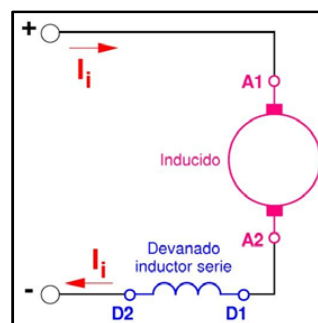
## Tipos de motores de c.c.



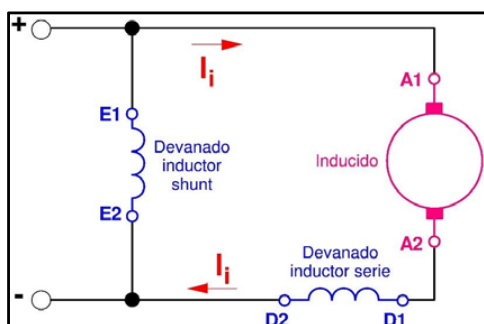
Excitación independiente



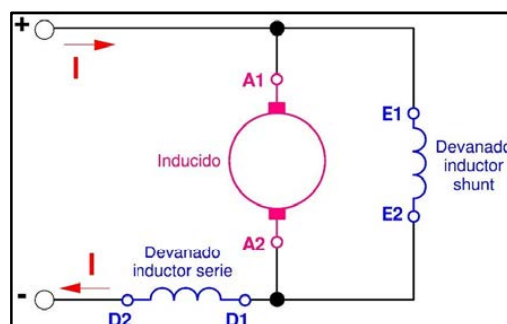
Excitación derivación (shunt)



Excitación serie



Excitación compuesta (compound)  
Larga derivación



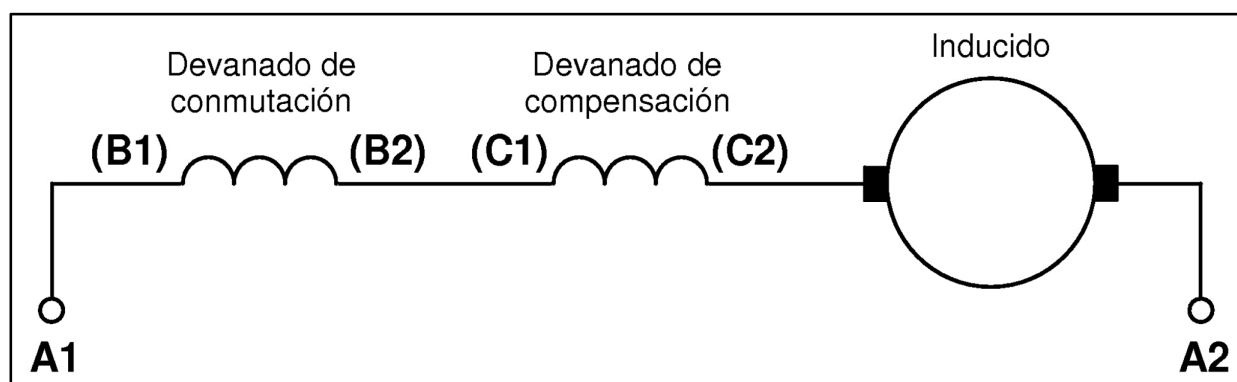
Excitación compuesta (compound)  
Corta derivación

Todas estas conexiones corresponden a la máquina girando en sentido horario. Para giro antihorario hay que invertir las conexiones a los bornes A1 y A2.

## Designación de bornes normalizada

Devanado	NORMATIVA ACTUAL (UNE-EN 60034-8)		NORMATIVA ANTERIOR	
	Principios	Finales	Principios	Finales
Inducido	(A1)	(A2)	A	B
Inducido + devanados auxiliares	A1	A2	-	-
Polos auxiliares	B1	B2	G	H
Compensación	C1	C2		
Excitación serie	D1	D2	E	F
Excitación shunt	E1	E2	C	D
Excitación independiente	F1	F2	J	K

## Bornes del circuito del inducido



### Inducido más bobinados auxiliares conectados en serie

- Los circuitos auxiliares (de compensación y de conmutación) se conectan en serie con el inducido de forma permanente y, por lo tanto, forman parte del circuito inducido a pesar de estar situados en el estator.
- En las figuras de todas las diapositivas de este documento cuando se dibuja el inducido no se representa solo al inducido propiamente dicho, sino que se incluye también a los devanados auxiliares, si los hay.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [2] CORTES. 1977. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo II: Máquinas de corriente continua*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [3] FAURE BENITO. 2000. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Madrid: Colegio oficial de ingenieros navales y oceánicos.
- [4] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [5] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 3*. Moscú: Editorial Mir.
- [7] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo I*. Moscú: Editorial Mir.
- [8] LANGSDORF. 1968. *Principios de las máquinas de corriente continua*. Méjico: McGraw-Hill.
- [9] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [10] SERRANO IRIBARNEGARAY. 1989. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.