

FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*José Francisco Gómez
González*

Benjamín González Díaz

*María de la Peña Fabiani
Bendicho*

Ernesto Pereda de Pablo



**Universidad
de La Laguna**

**Departamento de
Ingeniería Industrial**



Tema 10: Máquinas de corriente continua



PUNTOS OBJETO DE ESTUDIO

- ▶ Fundamentos de las máquinas de cc.
- ▶ Funcionamiento como generador.
- ▶ FEM generada.
- ▶ El problema de la conmutación.
- ▶ Funcionamiento como motor.
- ▶ El torque inducido.
- ▶ La máquina de cc real.
- ▶ Problemas de arranque y conmutación.
- ▶ Reversibilidad y circuito equivalente del motor/generador.
- ▶ Regulación y rendimiento.
- ▶ Máquinas de cc más comunes: máquina con excitación serie, derivación y compuesta.
- ▶ Características como motor/generador y curvas terminales.
- ▶ Aplicaciones

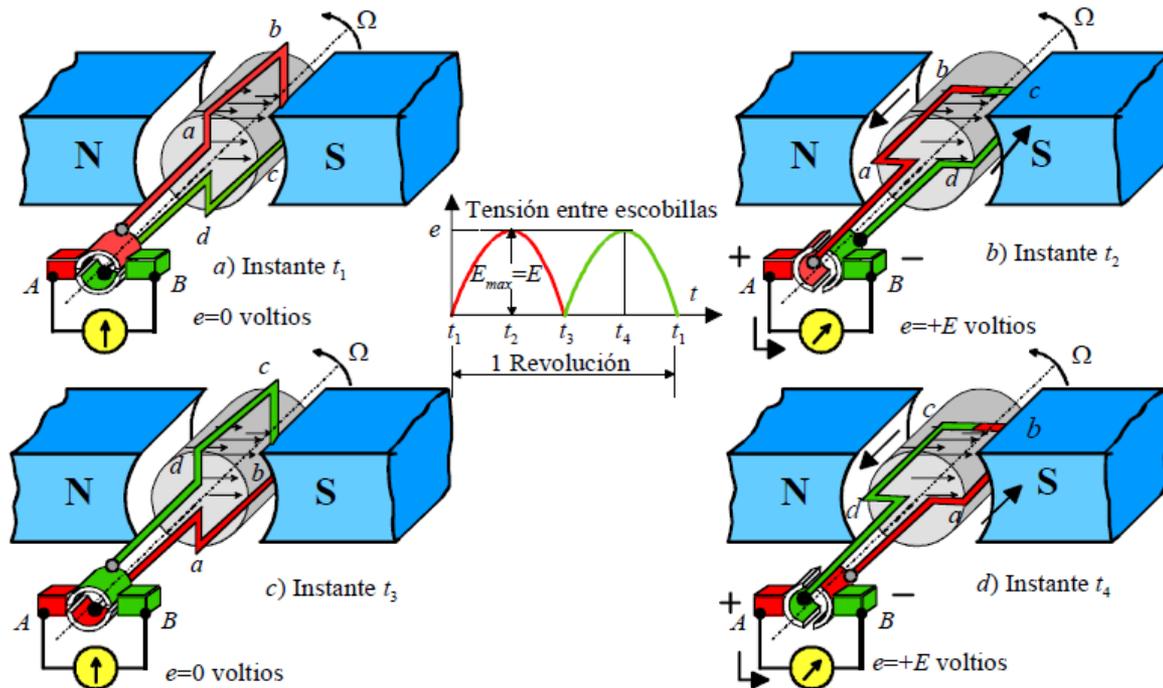
Introducción a los generadores

- ▶ El desarrollo de la máquina de c.c. se centra en la búsqueda de procedimientos que transforman la c.a. inducida en una espira, al girar dentro de un campo magnético, en corriente continua.
- ▶ La ventaja fundamental de los motores de c.c. frente a los motores de c.a. ha sido su mayor grado de flexibilidad para el control de la velocidad y el par. Sin embargo, debido al desarrollo de la electrónica de potencia, su aplicación se ha reducido en pro de los motores de c.a., cuyo coste de fabricación y mantenimiento es más reducido.

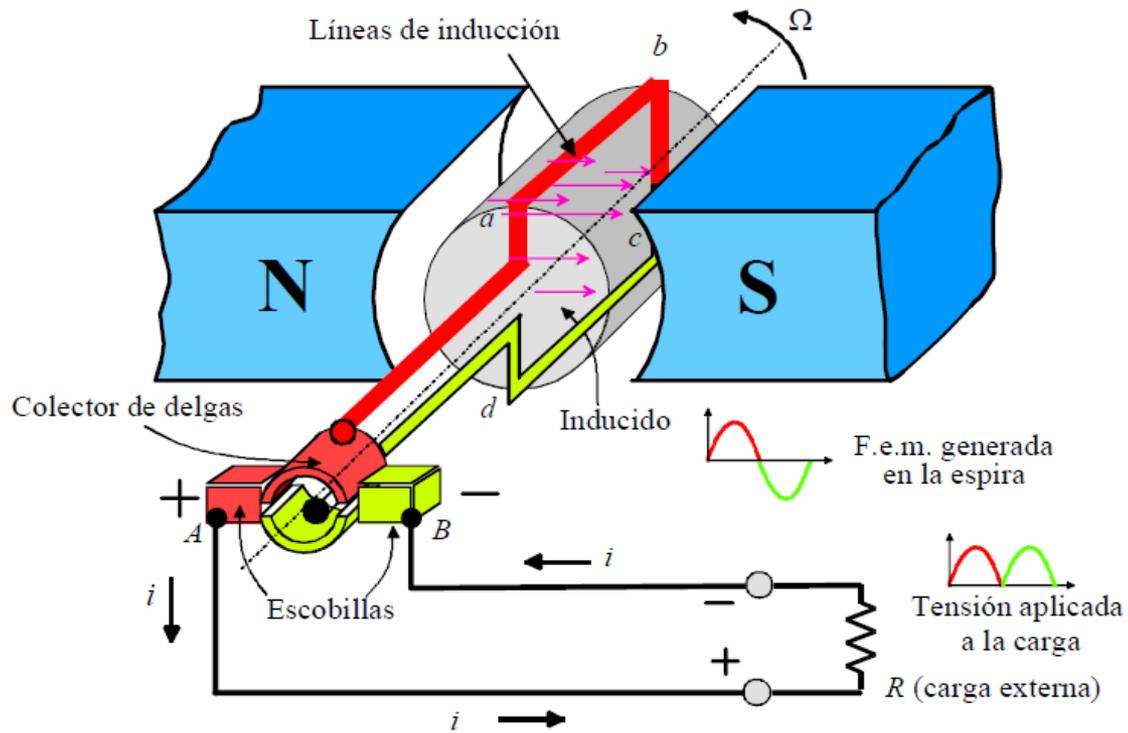
Aspectos constructivos

- ▶ El estator es la parte fija al que se fijan los polos. Para mejorar la conmutación existen los polos auxiliares o de conmutación, el devanado de estos polos se conectan en serie con el inducido.
- ▶ El rotor está formado por el inducido y el colector de delgas (conmutador). El conjunto de cilindro formado por delgas es a lo que se llama colector. Las delgas están aisladas entre sí y del cubo del colector.
- ▶ Para extraer o suministrar corriente al colector se utilizan escobillas de grafito

Funcionamiento del colector (I)



Funcionamiento del colector (II)



Principio de funcionamiento

- ▶ El nombre de máquinas de c.c. se debe a que el valor de la frecuencia de la carga es $f_L=0$, lo cual se consigue por la acción rectificadora del colector.
- ▶ El inductor (devanado de excitación) que está en los polos del estator es alimentado con c.c.

Generador (I)

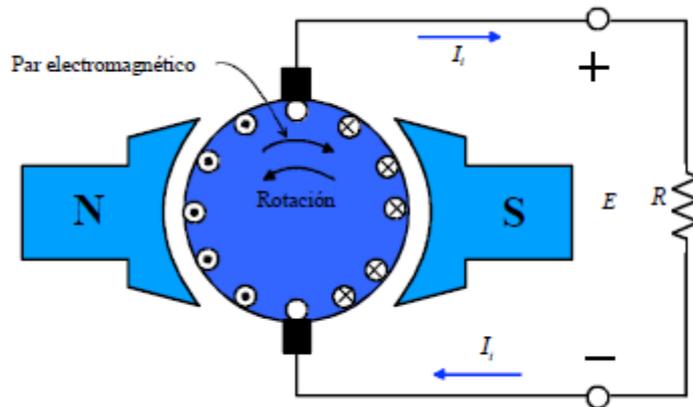
- ▶ Se suministra energía de rotación al eje y
- ▶ Se aplica c.c. a la excitación (inductor).
- ▶ Cuando el rotor gira en los conductores se induce una f.e.m. alterna de frecuencia

$$f_2 = \frac{np}{60}$$

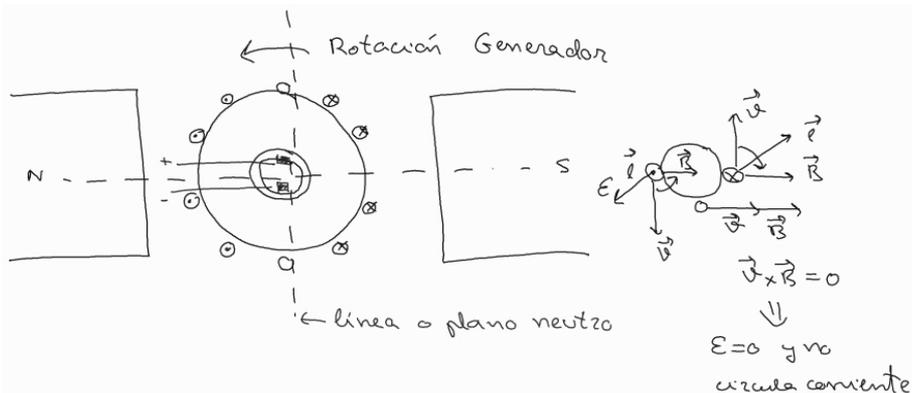
- ▶ Según la ley de Faraday para conductores en movimiento en un campo magnético uniforme la f.e.m. inducida es

$$\varepsilon = \vec{\ell} \bullet (\vec{v} \times \vec{B})$$

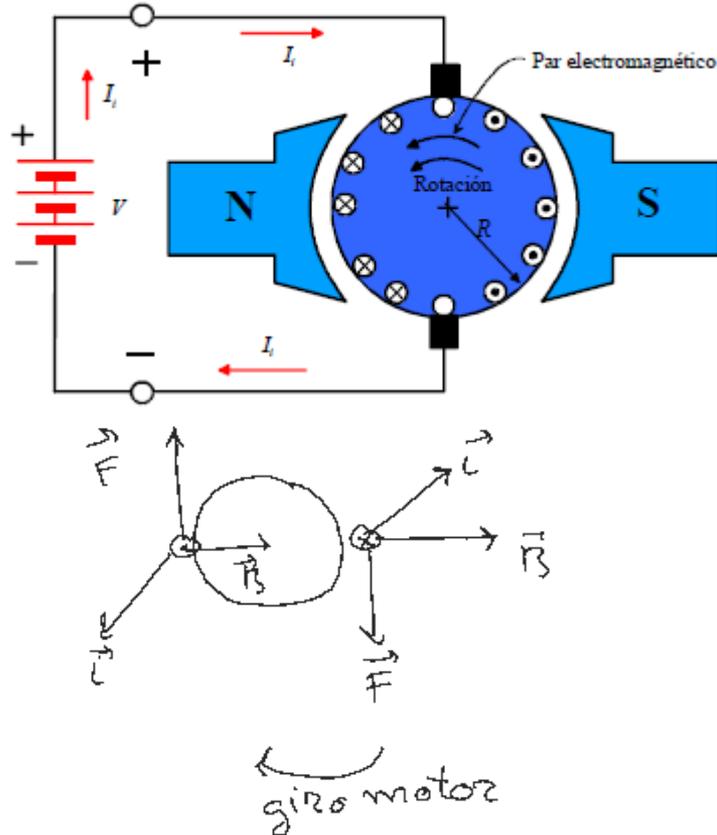
Generador (II)



- ▶ Debido a la acción rectificadora del colector se obtiene una c.c. entre las escobillas de salida.
- ▶ Las escobillas están en la línea neutra porque en esa posición los conductores tienen $\varepsilon=0$ y por lo tanto en la conmutación de una delga a las siguientes no aparecen chispas (arcos eléctricos).



Motor



- ▶ Se suministra c.c. al inducir y a las escobillas del inducido
- ▶ Si se circular corriente por los conductores y como están en el seno de un campo magnético, sobre ellos se ejercerá una fuerza que dará lugar a un par de giro.

$$\vec{F} = l \cdot \vec{i} \times \vec{B}$$

Reacción del inducido (I)

- ▶ Cuando una máquina de c.c. funciona en vacío (como generador) no existe corriente en el Inducido y el flujo en el entrehierro está producido por la f.m.m. del inductor.
- ▶ Cuando se cierra el circuito del inducido aparece una corriente por los conductores del rotor y produce una f.m.m. del inducido, que se combina con la del estator para producir el flujo resultante.
- ▶ Se llama reacción del inducido al efecto que ejerce la f.m.m. del rotor sobre la f.m.m. del inductor, y que hace variar la forma y magnitud del flujo en el entrehierro

Reacción del inducido (II)

- ▶ Una consecuencia es el desplazamiento que sufre la línea neutra:
 - ▶ Cuando la máquina trabaja en vacío, la línea neutra magnética coincide con la línea neutra geométrica (o media entre polos)
 - ▶ Cuando circula corriente por el inducido y estando funcionando la máquina como generador, la línea neutra magnética se adelanta respecto del sentido de giro del rotor. En el motor se retrasa.
- ▶ Este desplazamiento de la línea neutra magnética lleva consigo un fuerte chisporroteo en el colector, ya que durante la conmutación la escobilla correspondiente pondrá en cortocircuito una sección del devanado en el cual se induce una cierta f.e.m. por existir flujo en esa zona. Por tanto, para evitarlo habrá que desplazar las escobillas hasta encontrar la línea neutra real.

Reacción del inducido (III)

- ▶ En la mayoría de las máquinas de c.c. para eliminar el desplazamiento de la línea neutra con las variaciones de carga y asegurar una mejor conmutación, se emplean los llamados polos auxiliares o polos de conmutación, que son pequeños núcleos magnéticos que se colocan en la línea neutra teórica, que van provistos de un devanado que se conecta en serie con el inducido, y que producen un campo magnético opuesto al de la reacción transversal (del rotor).

Conmutación (I)

- ▶ Se entiende por conmutación el conjunto de fenómenos vinculados con la variación de corriente en las espiras del inducido al pasar éstas por la zona donde se las cierra en cortocircuito por las escobillas colocadas en el colector. Una buena conmutación debe realizarse sin la formación de chispas en el colector, mientras que una mala conmutación, concurrente con la formación de chispas, produce, para un trabajo prolongado de la máquina un deterioro notable de la superficie del colector que perturba el buen funcionamiento de la máquina.

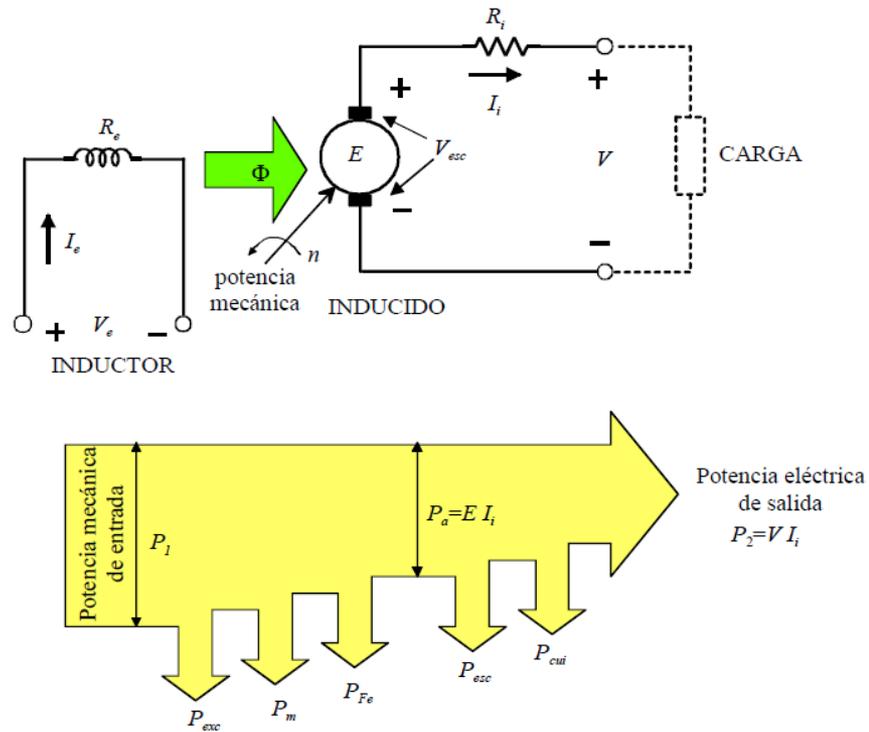
Conmutación (II)

- ▶ El chisporroteo entre las escobillas y el colector obedece a causas mecánicas y eléctricas:
 - ▶ Entre las primeras figuran: defectuoso ajuste de las escobillas con el colector, resalte de algunas delgas, insuficiente equilibrado del rotor, etc.
 - ▶ La causa eléctrica fundamental del chisporroteo la constituye la elevación de la tensión entre delgas adyacentes del colector, que en especial, puede ser provocada por los fenómenos de autoinducción de las secciones del arrollamiento del inducido

Conmutación (III)

- ▶ La corriente I_i de salida de la escobilla se toma de la delga 3, la corriente en la sección C considerada es $I_i/2$ y tiene sentido de derecha a izquierda.
- ▶ En un instante intermedio la sección C está pasando por la línea neutra y debe invertir su sentido, apareciendo el reparto de corrientes que se indica en la figura. El momento en que la corriente de la bobina es nula coincide precisamente con media duración de la conmutación. El final de la misma se obtiene cuando la escobilla deja de hacer contacto con la delga 3, en cuyo instante la corriente en la sección C se ha invertido y vuelve a tomar el valor de partida $I_i/2$.
- ▶ El paso produce unos arcos eléctricos.

Circuitos equivalentes



Circuito equivalente del estator (circuito de campo) (I)

- ▶ En el caso de que el estator sea de imanes permanentes, no tiene sentido hablar de circuito equivalente. Esos imanes permanentes crearán un flujo por polo Φ , que será el que aparecerá en el circuito equivalente del rotor y será un valor fijo marcado por los imanes permanentes utilizados.
- ▶ En el caso más general de un estator consistente en un devanado arrollado sobre unos polos salientes, el circuito equivalente será, simplemente, el de una bobina (inductancia). Como toda inductancia real, su circuito equivalente será el de una inductancia L_e en serie con una resistencia parásita, que será la resistencia del hilo conductor con el que se ha bobinado para hacer el devanado.

Circuito equivalente del estator (circuito de campo) (II)

- ▶ El valor de la inductancia L_e es el que relaciona el flujo que se crea en una máquina para una corriente I_e del estator determinada.

$$\phi = L_F I_e$$

- ▶ El valor de L_F es una constante en la zona de comportamiento lineal del material ferromagnético. A medida que nos acercamos a la zona de saturación, el campo B llega a una saturación con el incremento de la corriente I_e , lo que equivale a decir que L_F disminuye.

Circuito equivalente del estator (circuito de campo) (III)

- ▶ El valor de L_F es una constante en la zona de comportamiento lineal del material ferromagnético. A medida que nos acercamos a la zona de saturación, el campo B llega a una saturación con el incremento de la corriente I_e , lo que equivale a decir que L_F disminuye.
- ▶ Cuando se conecta una tensión de continua V_f al estator, empieza a aumentar la corriente hasta que se alcanza el régimen permanente en que

$$I_e = \frac{V_f}{R_F}$$

Circuito equivalente del estator (circuito de campo) (IV)

- ▶ Mientras no se varíe la tensión o se añada alguna resistencia en serie con el estator, la corriente permanecerá constante y, por tanto, también el flujo y la energía magnética.
- ▶ Las pérdidas en la resistencia R_f serán pérdidas por efecto Joule, y una vez llegado al régimen permanente, el gasto de energía de la fuente que alimenta al estator se va precisamente en esas pérdidas por efecto Joule.
- ▶ .

Circuito equivalente del rotor (armadura) (I)

- ▶ El circuito equivalente del rotor tiene bobina real, una tensión que se induce en las espiras del inducido al estar girando dentro de un campo magnético, y una caída de tensión en las escobillas.
- ▶ Como una espira está formada por dos barras, tenemos que la tensión inducida por la ley de Faraday es

$$E = 2Blv$$

- ▶ En el conjunto de todas las espiras del devanado del inducido se inducirá una tensión que será proporcional a la que se induce en cada espira, y que depende de la velocidad de giro de la máquina, sus dimensiones y el valor del campo magnético.

Circuito equivalente del rotor (armadura) (II)

- ▶ En general se puede poner la expresión

$$E_A = k_E n \phi$$

- ▶ donde k es una constante que depende, entre otras cosas, del número de espiras, n son las revoluciones a las que gira la máquina, y Φ es el flujo por polo que atraviesa las espiras y depende del campo magnético y las dimensiones de la máquina.
- ▶ En el caso de un generador la EA se denomina fuerza electromotriz y en el caso de un motor una fuerza contraelectromotriz.
- ▶ Si una corriente de armadura fluye a través del sistema de escobillas y conmutador, esta corriente pasa a través de los conductores del rotor y se genera un par.

Circuito equivalente del rotor (armadura) (III)

- ▶ Por la Ley de Ampere de la fuerza, este par generado es proporcional al flujo y a la corriente de armadura.

- ▶
$$T_{gen} = k_T \phi I_a$$

- ▶ Siendo k_T es una constante que depende del tamaño del rotor, del número de vueltas del rotor, y de los detalles de interconexión de estas vueltas.

- ▶ Del circuito equivalente se tiene

$$V = R_a I_a + 2V_{es} + E_A$$

Circuito equivalente del rotor (armadura) (IV)

$$\underbrace{VI_a}_{\text{Palim}} = \underbrace{R_a I_a^2}_{\text{Pérdidas en Cu de armadura}} + \underbrace{2V_{es} I_a}_{\text{Pérdidas en escobillas}} + \underbrace{E_A I_a}_{\text{Potencia Generada}}$$

- ▶ $P_{gen} = E I_a$ es la potencia que sale del circuito eléctrico como potencia mecánica. Por consiguiente, la ley de conservación de la energía demanda que la potencia generada sea

$$P_{gen} = \omega_m T_{gen} = E_A I_a \quad (\text{de esta relación se ve que } K_T = K_E)$$

- ▶ La potencia de salida P , será la potencia generada menos las pérdidas por rotación

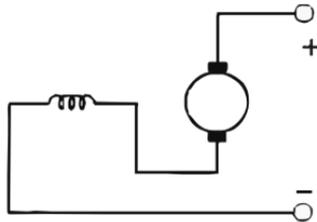
$$P = P_{gen} - P_{rot}$$

La excitación en las máquinas de c.c.

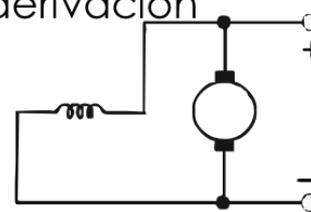
- ▶ Se distinguen:
 - ▶ Máquinas con excitación independiente: el devanado inductor es alimentado mediante una fuente de alimentación externa.
 - ▶ Máquinas autoexcitadas: se excita a si misma tomando la corriente inductora del propio inducido (caso de funcionamiento como generador) o de la misma red que alimenta el inducido (caso de trabajar como motor)
 - ▶ Se clasifican a su vez en:
 - ▶ Máquina serie
 - ▶ Máquinas shunt o derivación
 - ▶ Máquinas compound o compuestas

Máquinas autoexcitadas

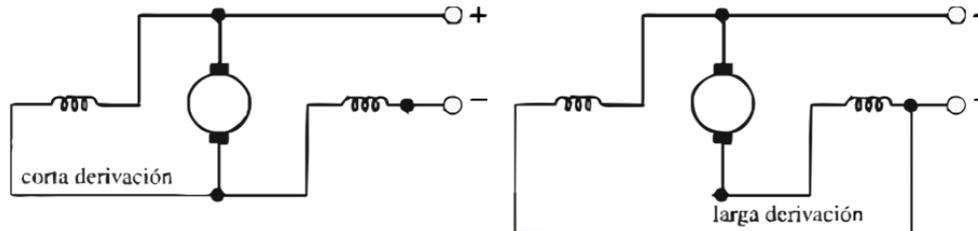
Máquina serie



Máquinas shunt o derivación



Máquinas compound o compuestas



Inversión del sentido de giro de un motor de c.c

- ▶ La corriente en uno de los devanados, a saber:
 - ▶ Manteniendo fija la polaridad del devanado de excitación, cambiamos la polaridad del inducido.
 - ▶ Manteniendo fija la polaridad del inducido se cambia la polaridad del devanado de excitación.
- ▶ En la práctica se suele optar por la primera solución puesto que la segunda acarrea ciertos problemas debido a la elevada inductancia del devanado de excitación y al magnetismo remanente de las piezas polares.

Regulación de la velocidad de giro del motor

- ▶ La velocidad de giro de un motor es directamente proporcional a la tensión aplicada al inducido e inversamente proporcional al flujo magnético. Ello nos permite deducir que la variación de dicha velocidad puede conseguirse de cualquiera de las tres formas siguientes:
 - ▶ Cambiando la resistencia del devanado de campo
 - ▶ Cambiando el voltaje del inducido
 - ▶ Cambiando la resistencia del inducido
- ▶ De todos ellos, el más utilizado es el de control de voltaje en el inducido (Ward-Leonard).

Motor Universal (Motor de c.a. de colector)

- ▶ La construcción de un motor universal es en esencia, igual a la de un motor serie de c.c. y sus características de funcionamiento también son análogas. La corriente que recorre el inducido y el inductor tiene una frecuencia de 50 Hz, por lo que simultáneamente el flujo del inductor y el par de rotación tienen el mismo sentido relativo. Por lo que un motor serie de corriente continua puede funcionar como motor de corriente alterna, pero en el caso de corriente alterna tanto en el rotor como en el estator es preciso que ambos sean construidos de chapa magnética.
- ▶ Se utilizan en: batidoras, máquinas de afeitar, taladros eléctricos de mano, secadores, etc.