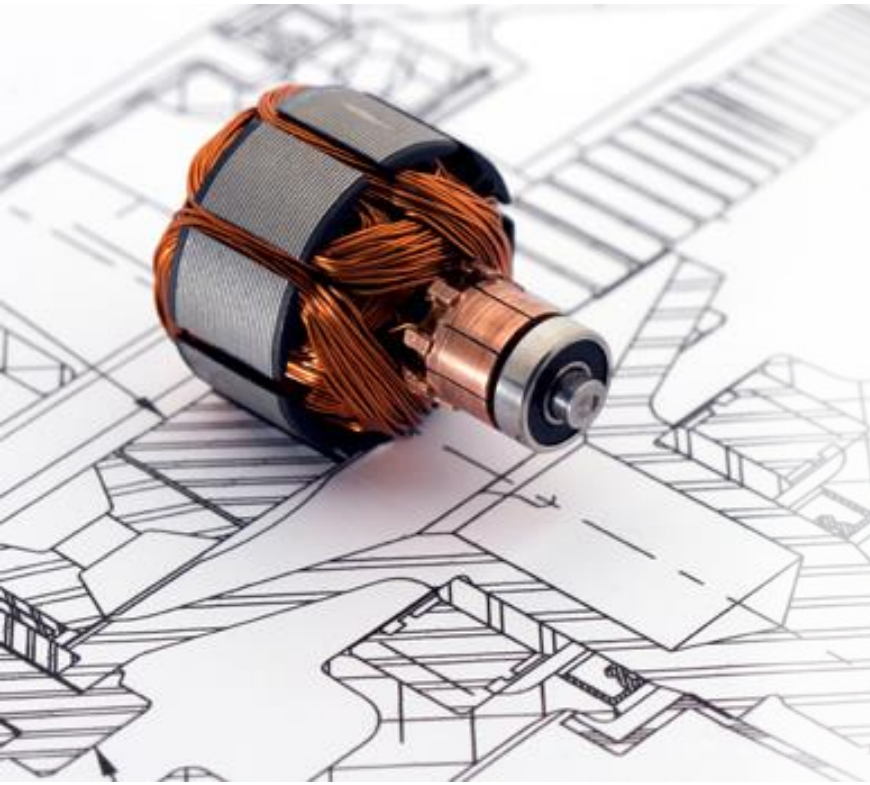
Javier Pereda
Profesor
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Pontificia Universidad Católica de Chile



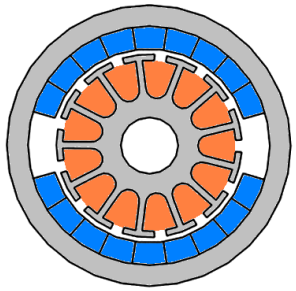
IEE 2213
Máquinas Eléctricas

8. Máquina DC

Características y aplicaciones; principio de funcionamiento y operación; tipos de bobinados reales; reacción de armadura y compensación (escobillas con grado variable, devanados compensadores e interpolos); clasificación; circuitos equivalentes y torque electromagnético; operación como generador; Control de partida y velocidad.

V.2018

Máquina DC
Características y Aplicaciones



- **F**ue la principal máquina eléctrica antiguamente, sobretodo en aplicaciones donde se requería de un **amplio control sobre la velocidad y/o torque**, ya es mucho más simple de controlar que las máquinas AC (inducción y síncrona).
- **H**oy son utilizadas en aplicaciones de baja potencia (robótica, herramientas y casos específicos) ya que los **accionamientos solucionaron el problema de control de las máquinas AC**, las que son más eficientes, robustas y baratas.
- **E**l **estator** de la máquina DC es alimentado con **corriente continua o con imanes** ya que la idea es generar un campo magnético invariante y estático.
- **E**l **rotor** de máquina DC consta de varias bobinas aisladas entre si y distribuidas. Estas bobinas se conectan al **colector** (sistema que caracteriza este tipo de máquinas).
- **E**l **colector** es un dispositivo mecánico que se encarga de conectar sólo determinadas boninas según la posición mecánica del rotor respecto al estator (el resto de las bobinas queda en circuito abierto). Es un tipo de **conmutador mecánico**.
- **E**l colector consume/genera corriente/voltaje DC. Sin embargo la f.e.m generada en cada bobina del motor es sinusoidal pero **el colector actúa como rectificador**.
- **E**l **ángulo de las fuerzas magnetomotrizes** del estator y rotor es **constante** gracias al colector.

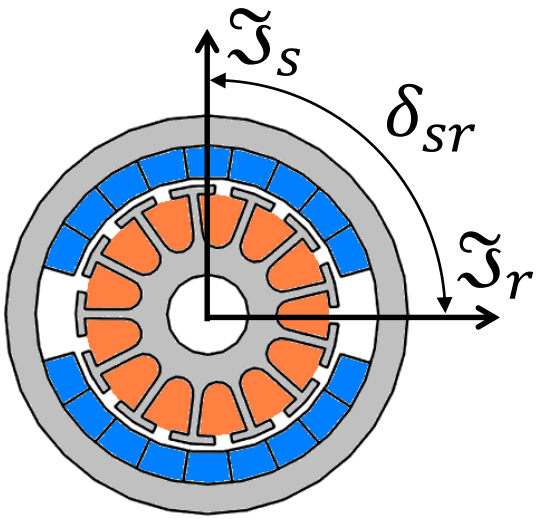
Máquina DC

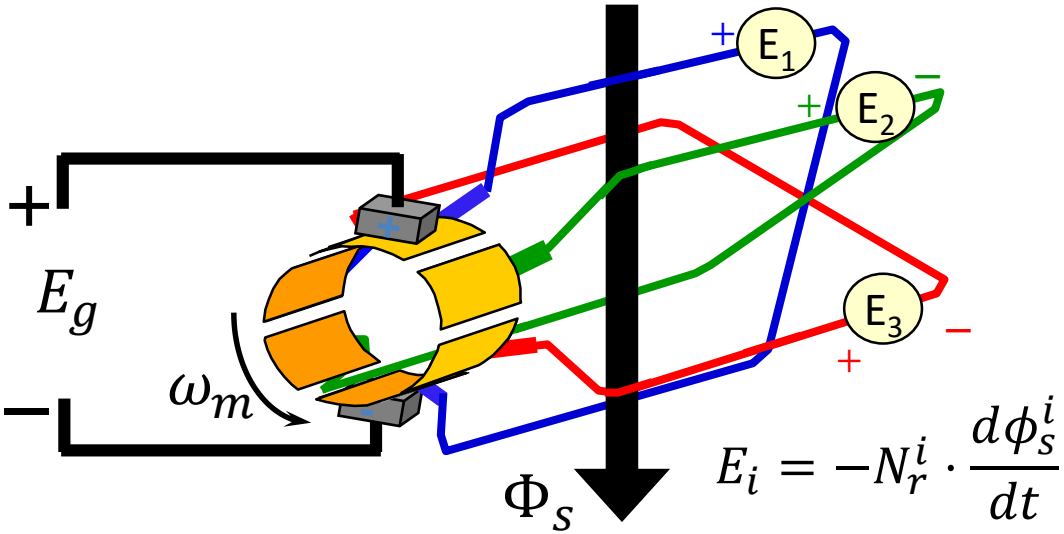
Principios del funcionamiento

① El estator se alimenta con DC o imanes (no hay un CMR): $\omega_s = 0$
② El rotor o mejor dicho colector se alimenta con DC (o genera DC).
③ El colector tiene una corriente DC pero si vemos el voltaje inducido en las bobinas (E_i) del rotor veremos que es AC (ω_r=-ω_m):

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \quad \Rightarrow \quad \omega_s = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_m = -\omega_r$$

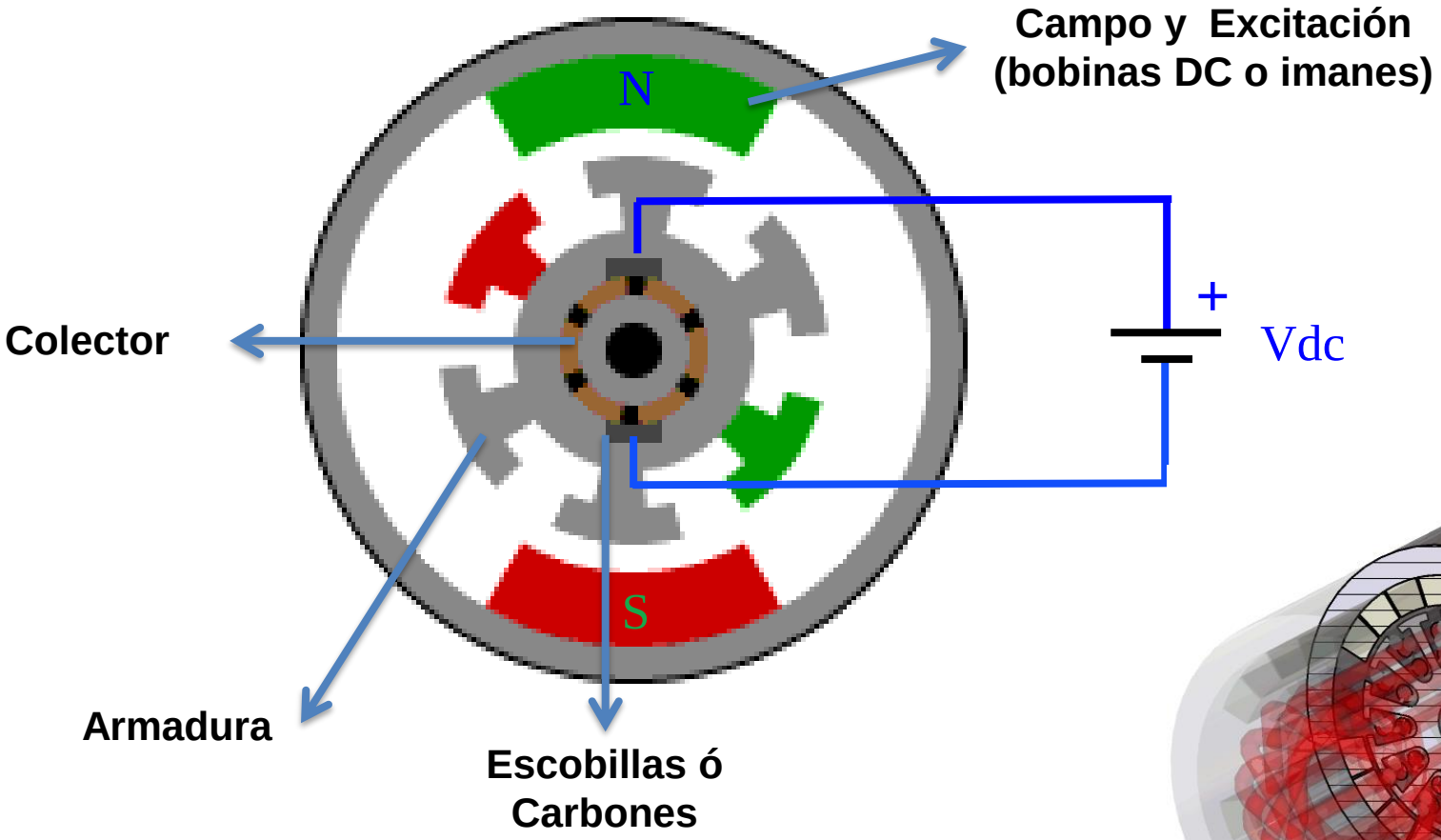
El rotor está compuesto por varias bobinas, las que se alimentan de forma estratégica mediante un **colector** para que el ángulo δ_{sr} entre las f.m.m del rotor y estator sea constante, lo que genera una corriente y torque "continuos". El colector conmuta las bobinas alimentadas del rotor exclusivamente según la posición mecánica del rotor:

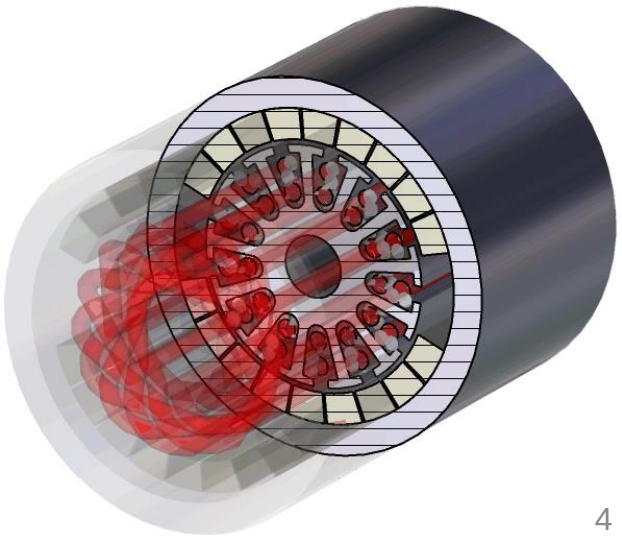




Máquina DC

Principios del funcionamiento





Máquina DC
Aplicaciones



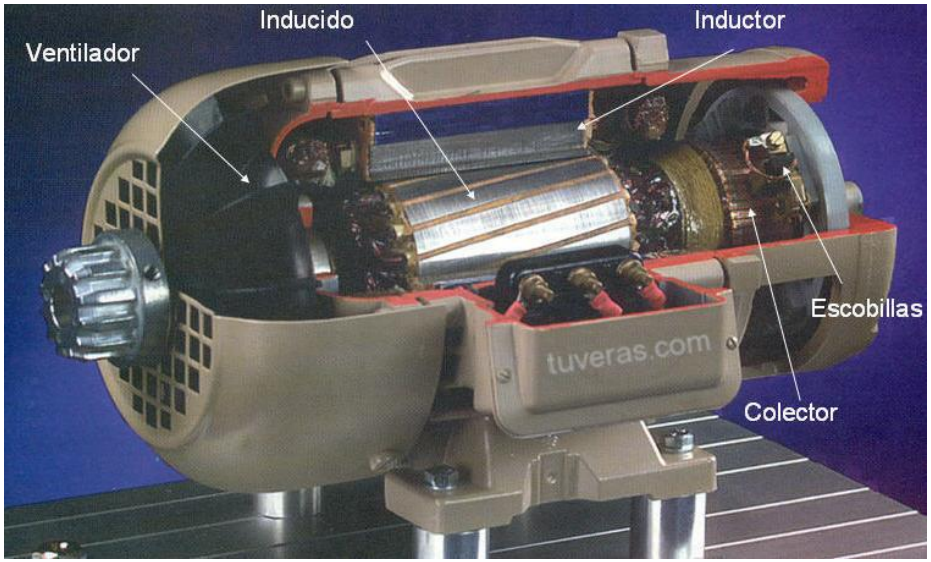


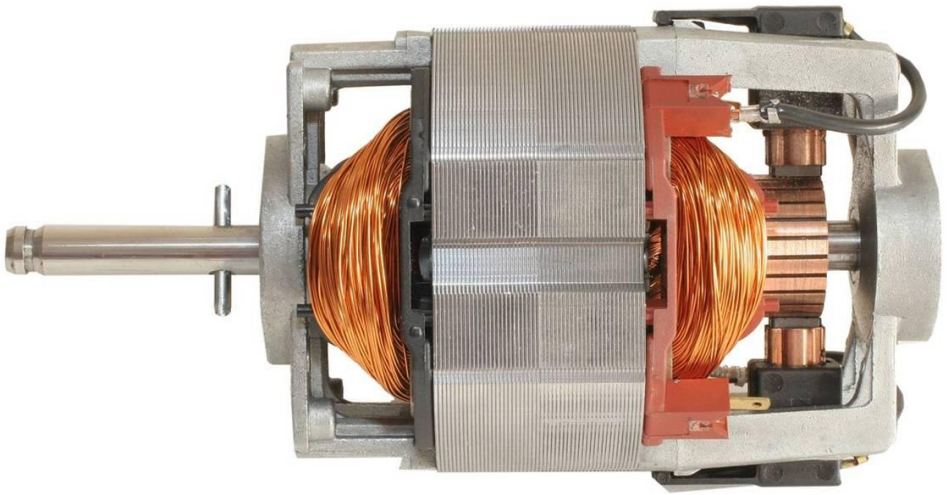


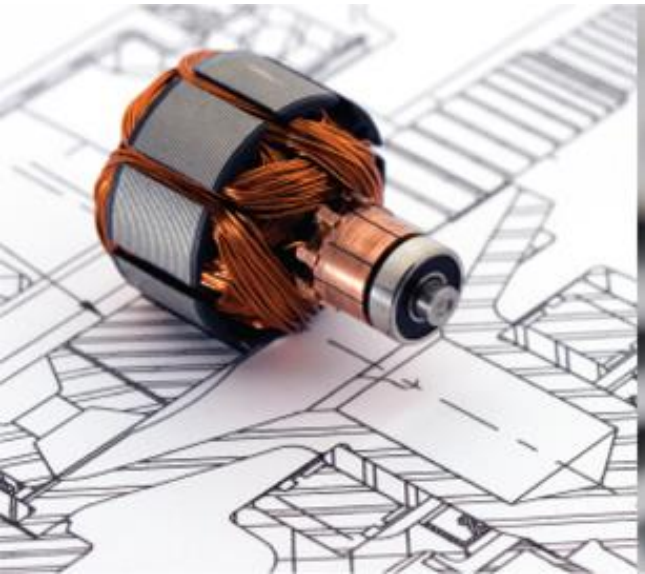


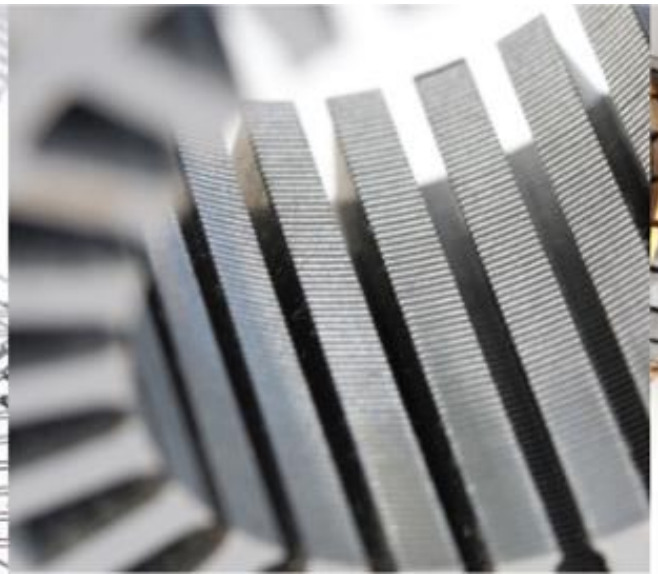


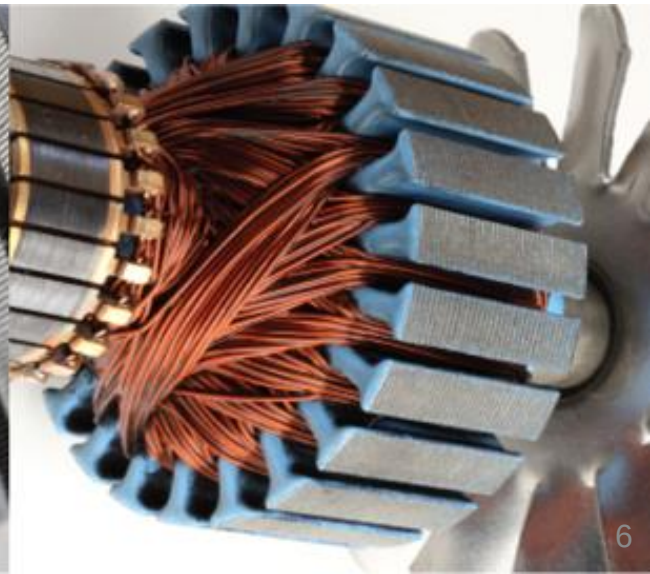
Máquina DC
Características Constructivas





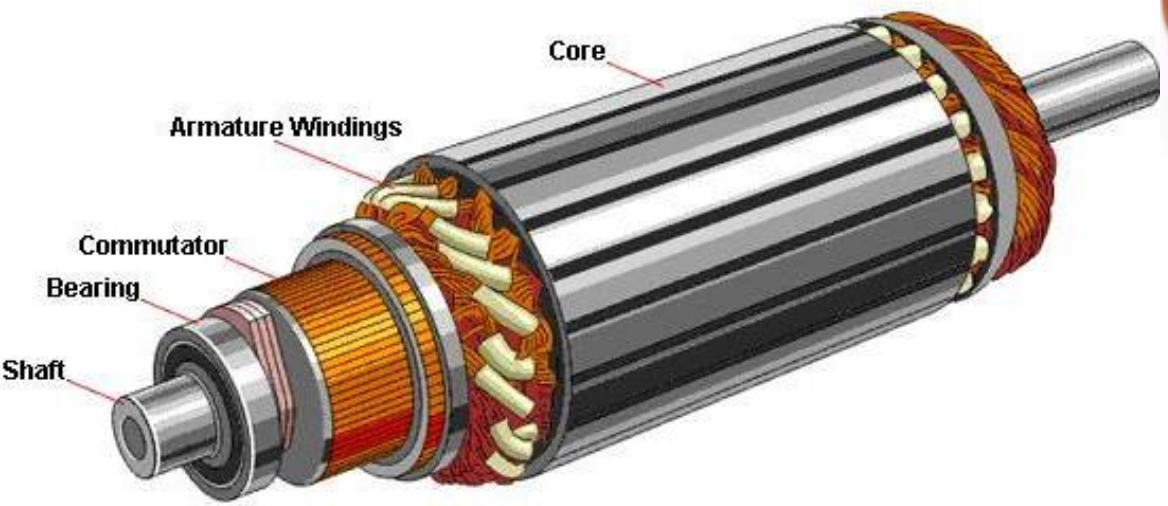


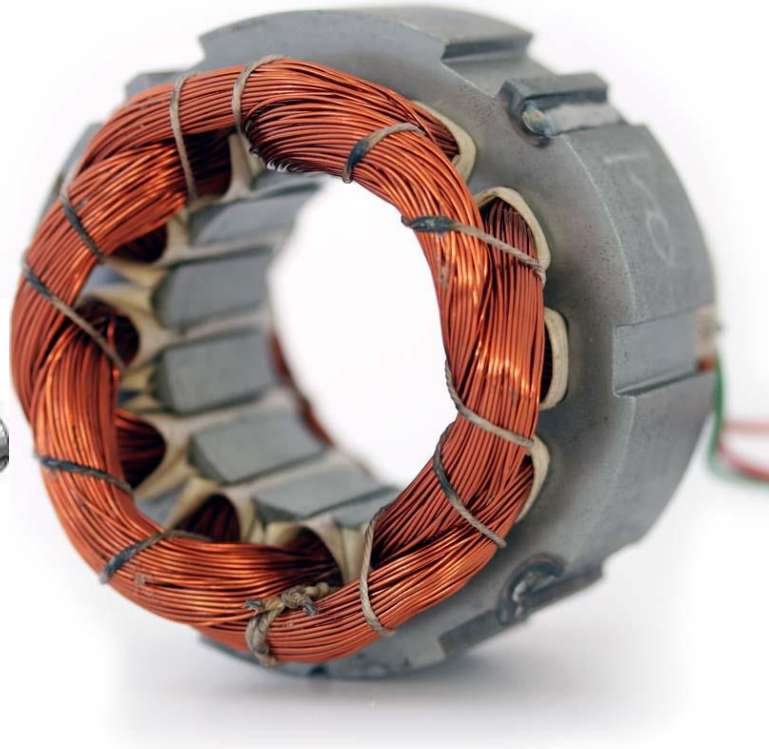




Máquina DC
Características Constructivas

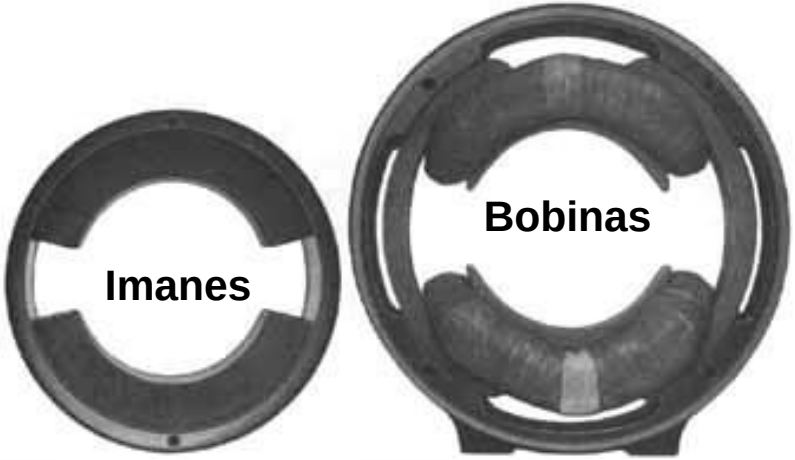






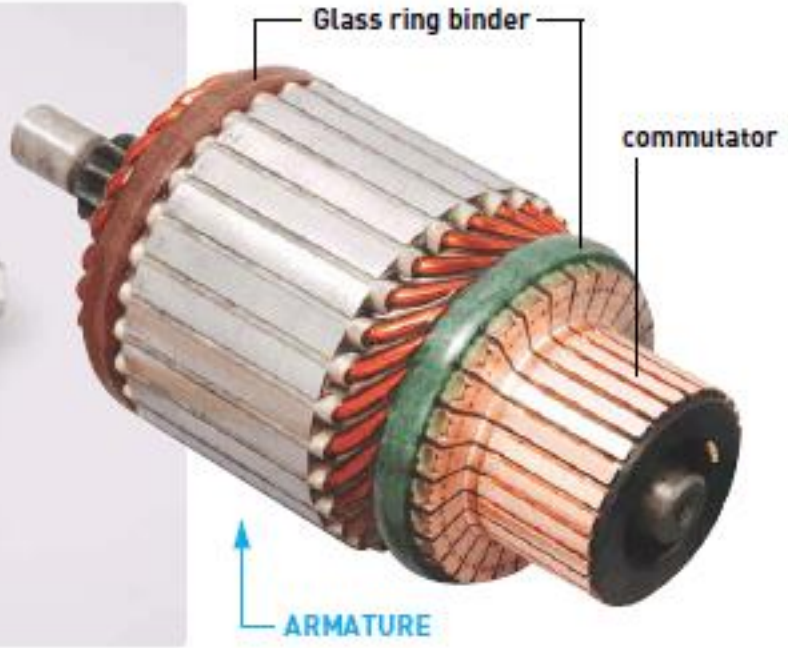
Máquina DC

Características Constructivas





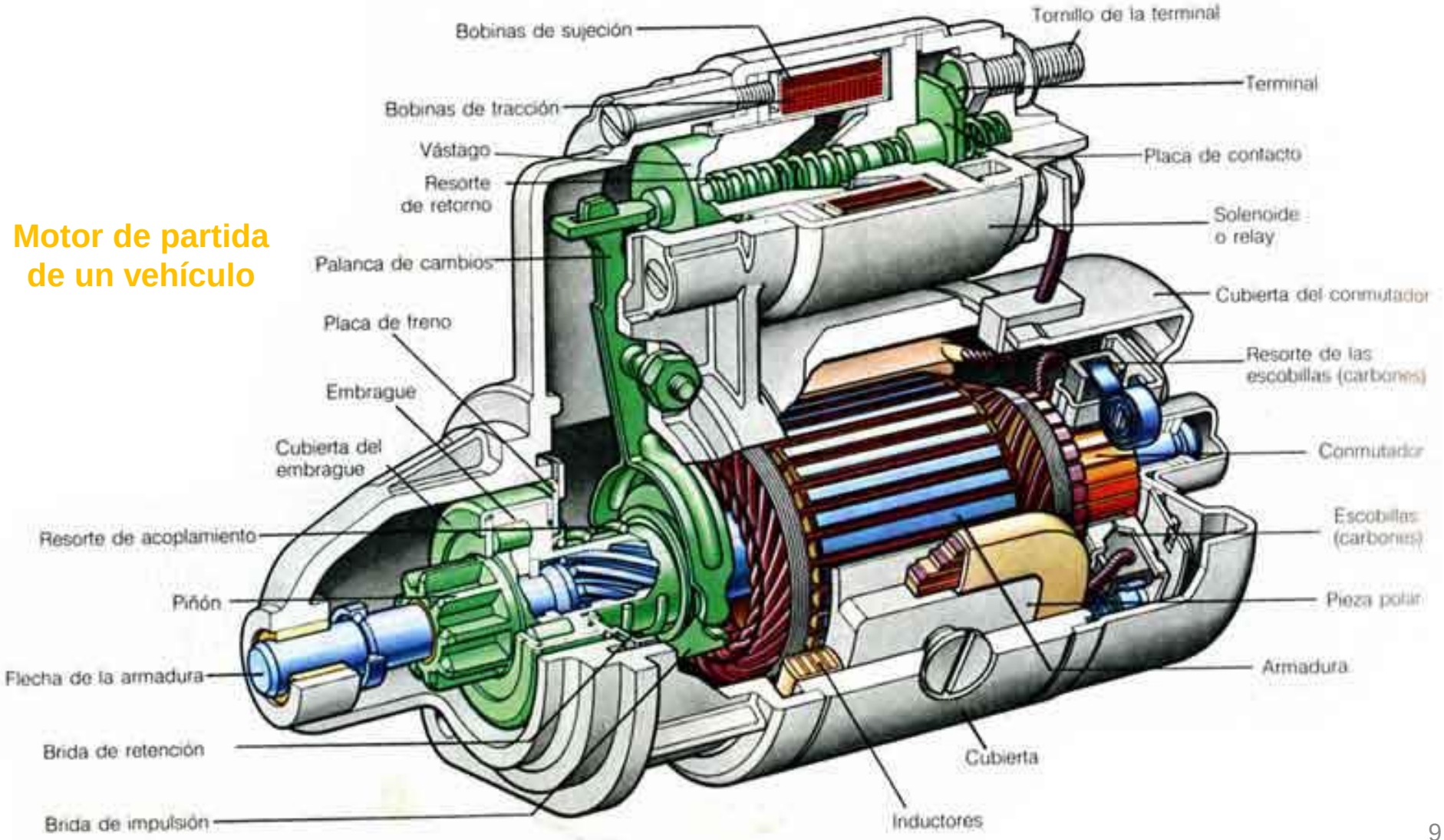




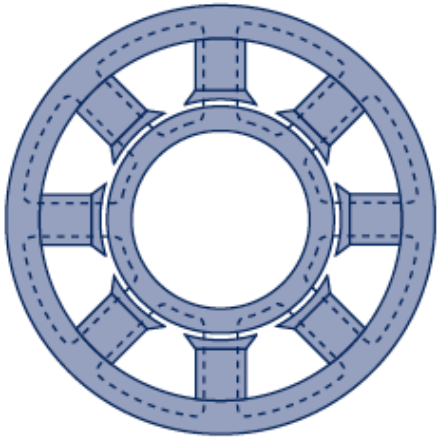
Máquina DC

Características Constructivas

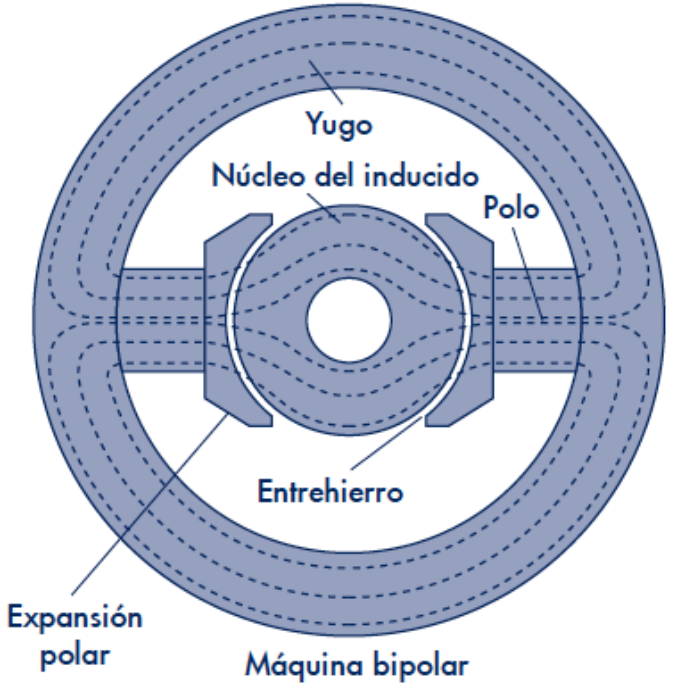
Motor de partida de un vehículo



Máquina DC
Número de Polos



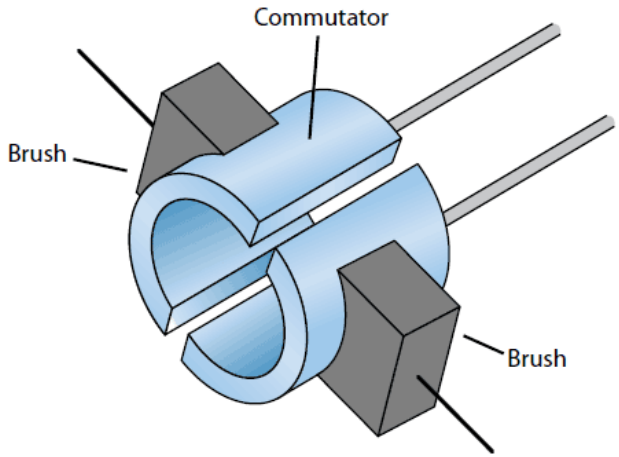
Máquina hexapolar

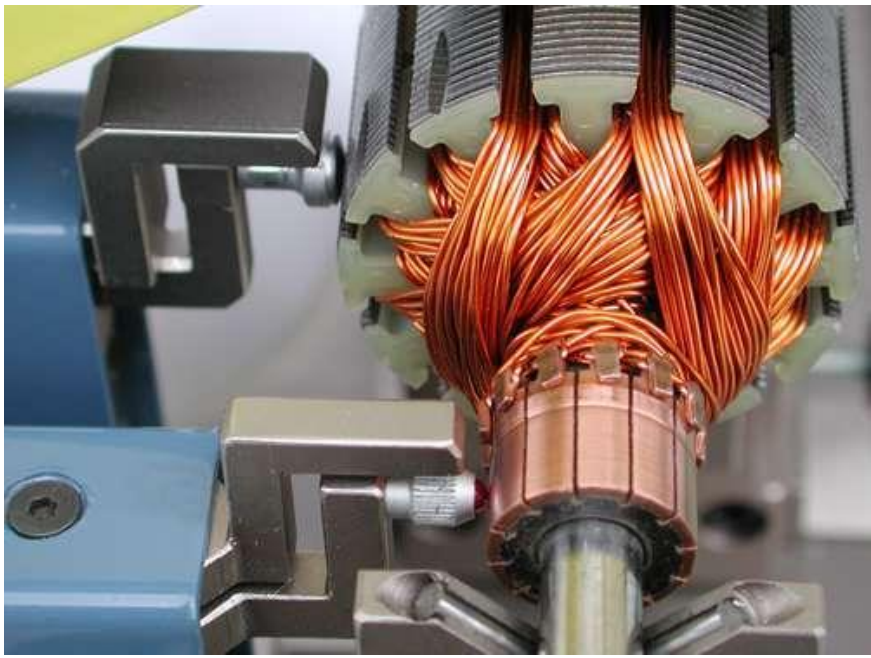


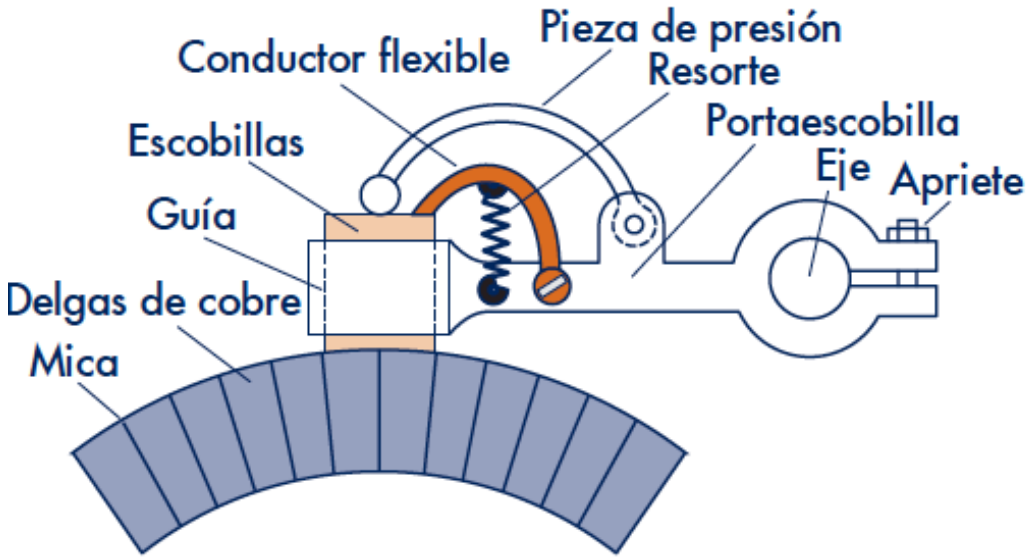
Máquina bipolar

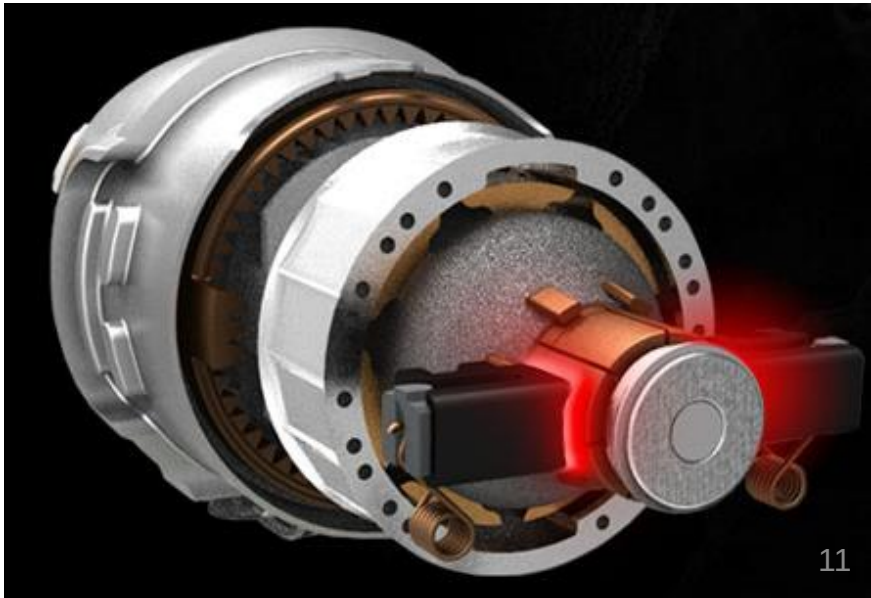
Máquina DC

Colector (Conmutador)



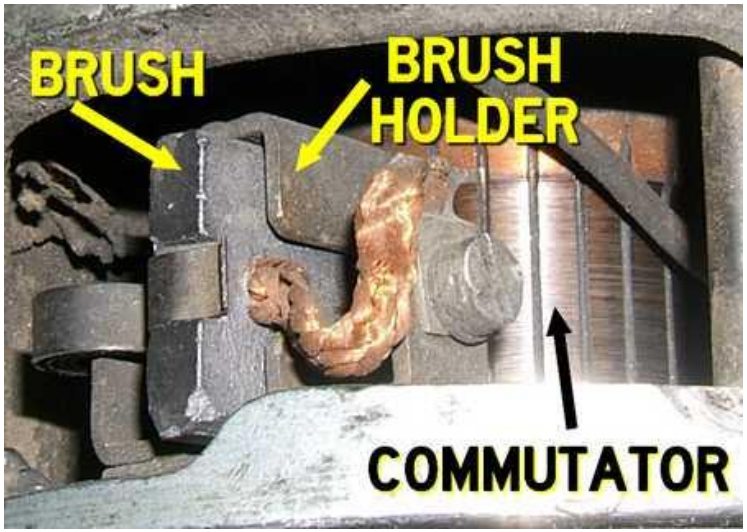


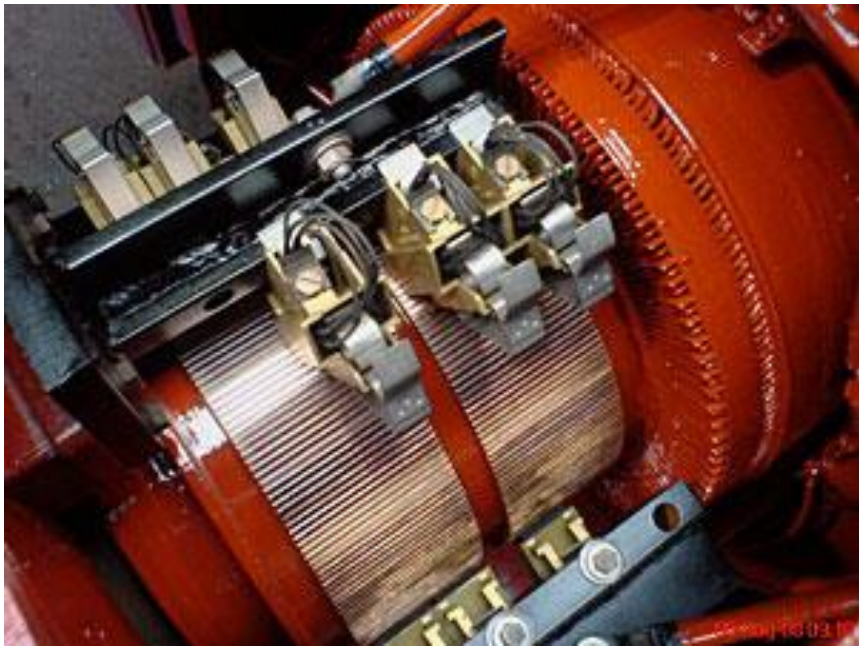


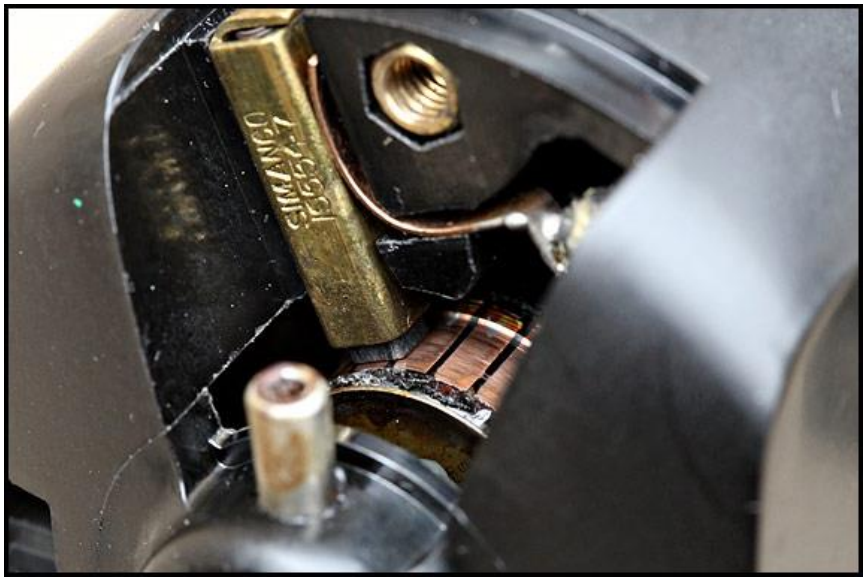


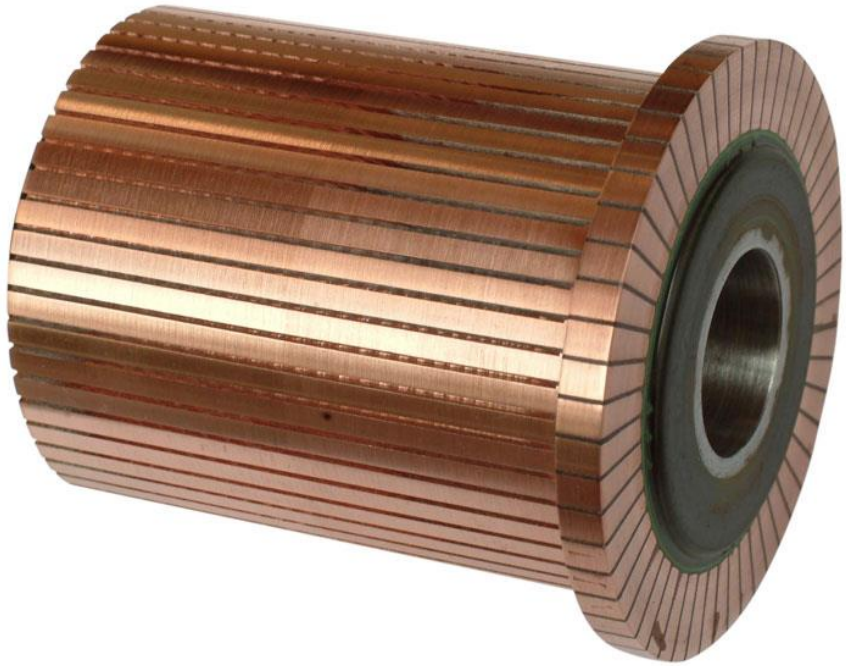
Máquina DC

Colector (Conmutador)







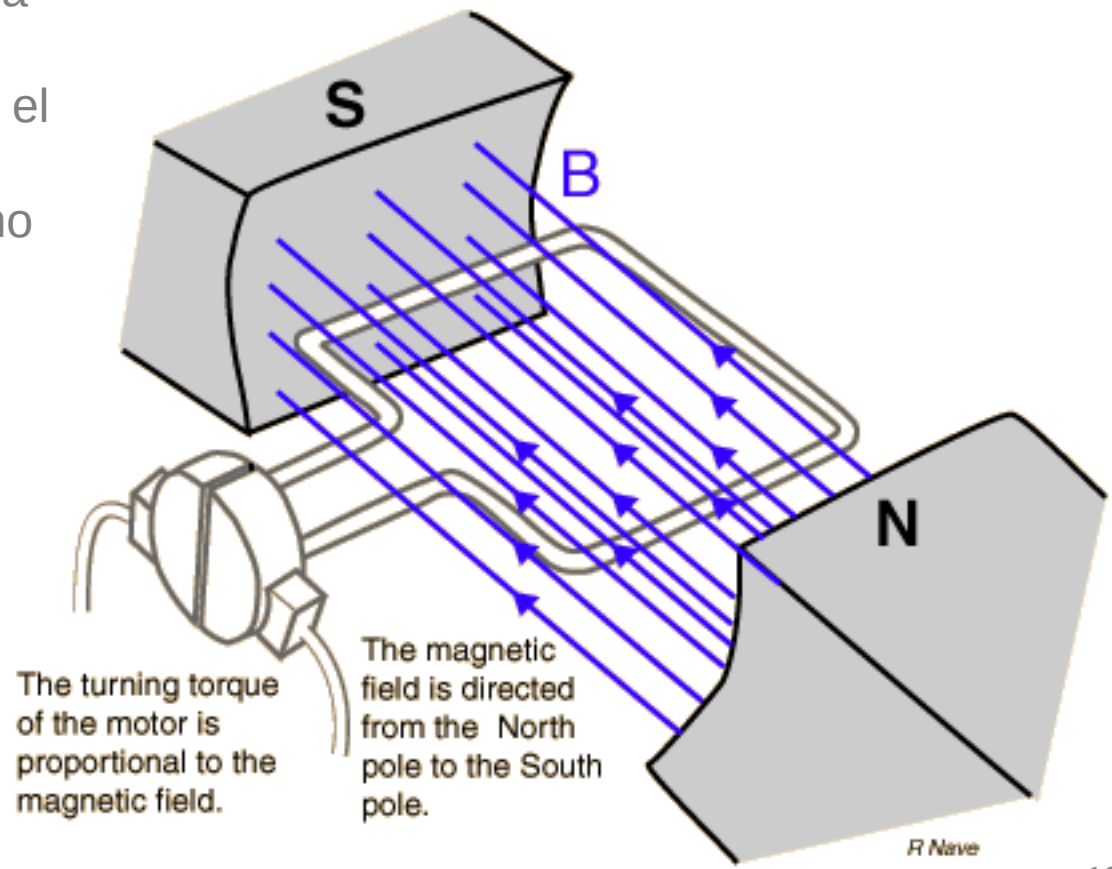


Máquina DC
Principios de operación

El estator genera un **campo** magnético constante que atraviesa el rotor. Podemos observar dos posibles fenómenos:

- Si aplicamos un corriente en la bobina del rotor generaremos una fuerza que producirá que el rotor gire (torque).
- Si aplicamos un torque externo para girar el rotor se inducirá una f.e.m. En la bobina.

Se debe tener en cuenta que ambos fenómenos pueden suceder a la vez.



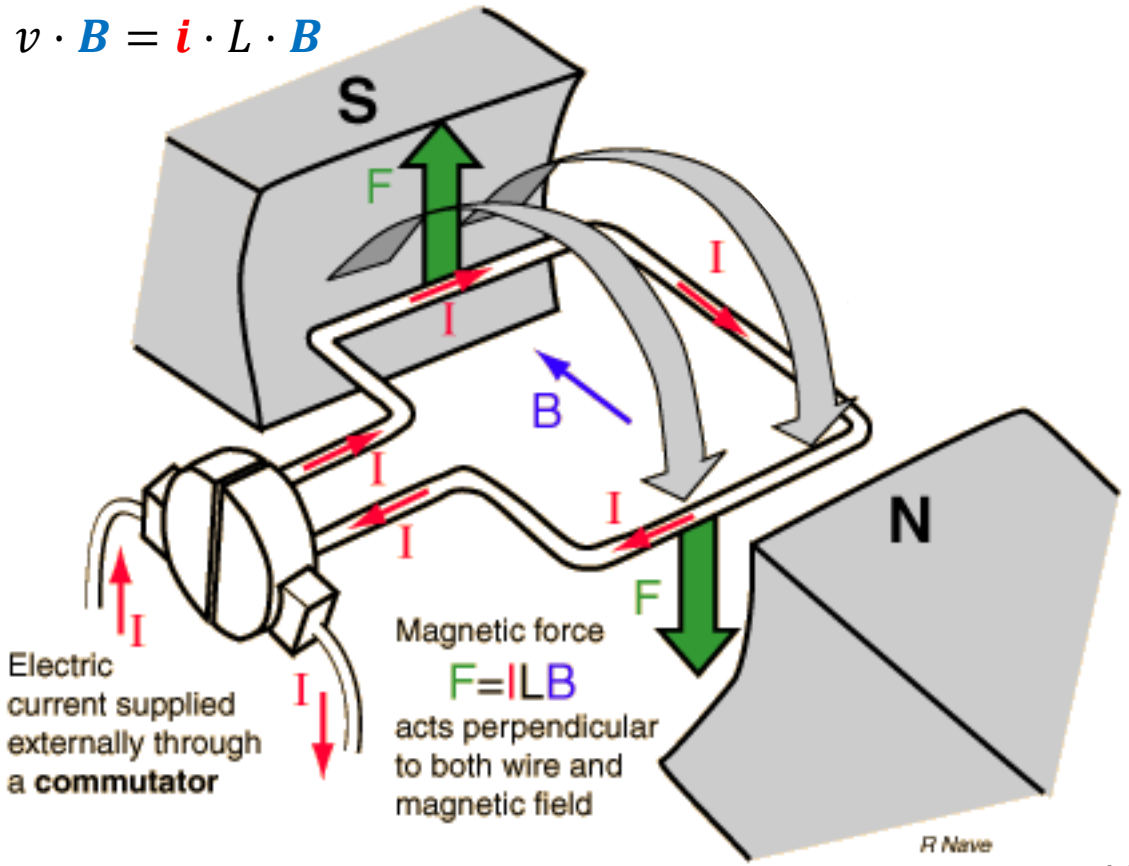
Máquina DC
Principios de operación

Motor: la bobina del rotor se alimenta con una **corriente** que interactúa con el **campo** magnético y genera una **fuerza** (Fuerza de Lorentz) que hace girar el rotor. Notar que el ángulo entre la dirección de i y el campo B es siempre 90º.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{F} = q \cdot v \cdot \boldsymbol{B} = \boldsymbol{i} \cdot L \cdot \boldsymbol{B}$$

Generador: el rotor gira debido a una **fuerza** externa y se induce una f.e.m en la bobina (Ley de Faraday) debido a que desde el rotor se ve un **campo** variable. Luego, conectamos la bobina del rotor a una carga y se genera una **corriente**.

$$E = -N_r \frac{d\phi_B}{dt}$$



Máquina DC
Principios de operación

Motor: la bobina del rotor se alimenta con una **corriente** que interactúa con el **campo** magnético y genera una **fuerza** (Fuerza de Lorentz) que hace girar el rotor.

$$F = i \cdot L \cdot B$$

$$T = r \times F = r \cdot F \sin\delta$$

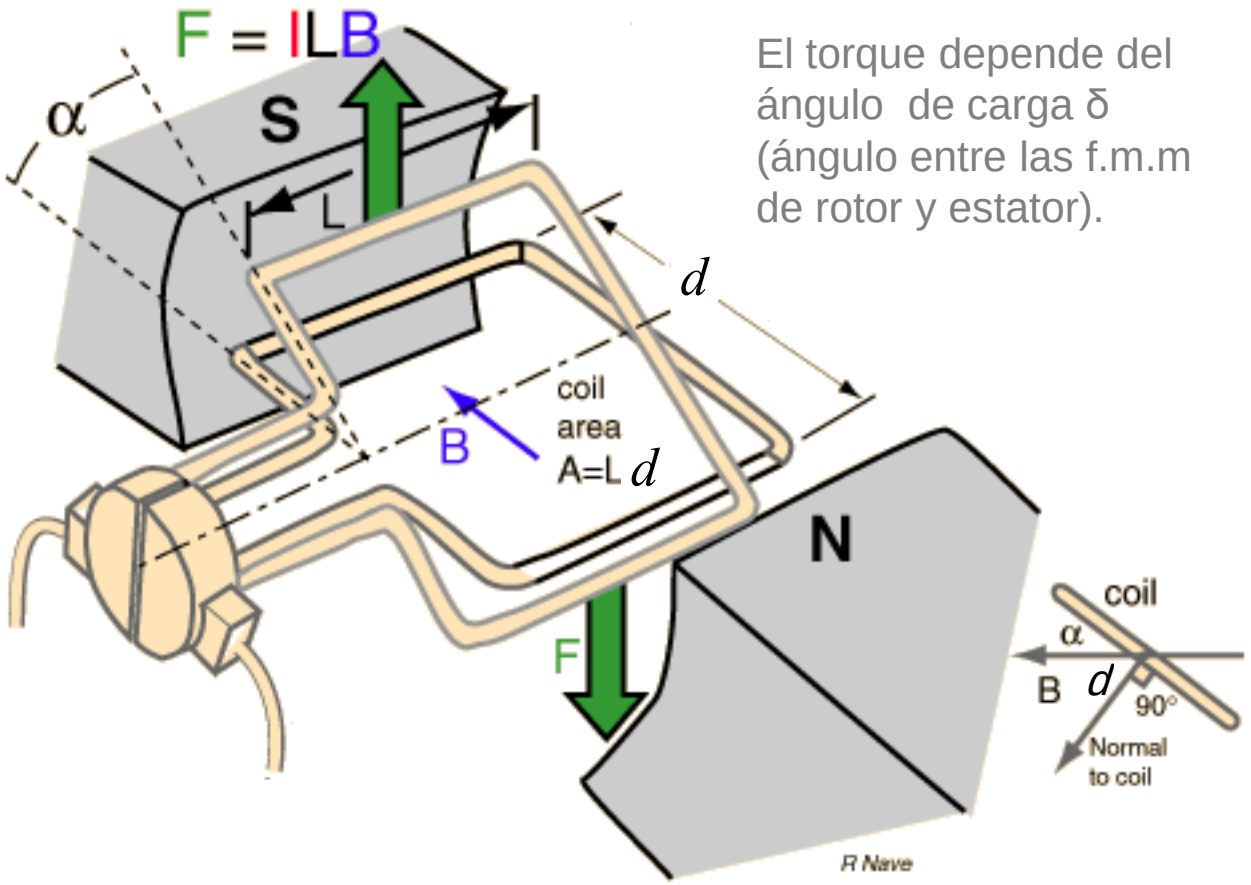
Notar que la bobina tiene dos brazos de acción:

$$T = 2 \cdot (i \cdot L \cdot B) \cdot \frac{d}{2} \sin\delta$$

$$T = i \cdot L \cdot B \cdot d \sin\delta$$

Notar que el torque se multiplicara por N si la bobina tiene N vueltas.

$$T = i \cdot N \cdot L \cdot B \cdot d \sin\delta$$



El torque depende del ángulo de carga δ (ángulo entre las f.m.m de rotor y estator).

Máquina DC

Principios de operación

La f.e.m inducida en cada espiras del rotor es (L. Faraday): $E_i = -N_r^i \frac{d\varphi_{ci}}{dt}$

Donde el flujo enlazado por cada bobina es: $\varphi_{ci} = \varphi_{cm} \cos\delta$

Y el flujo de campo es (L. Ampère): $\varphi_{cm} = \frac{N_c \cdot i_c}{\Re}$

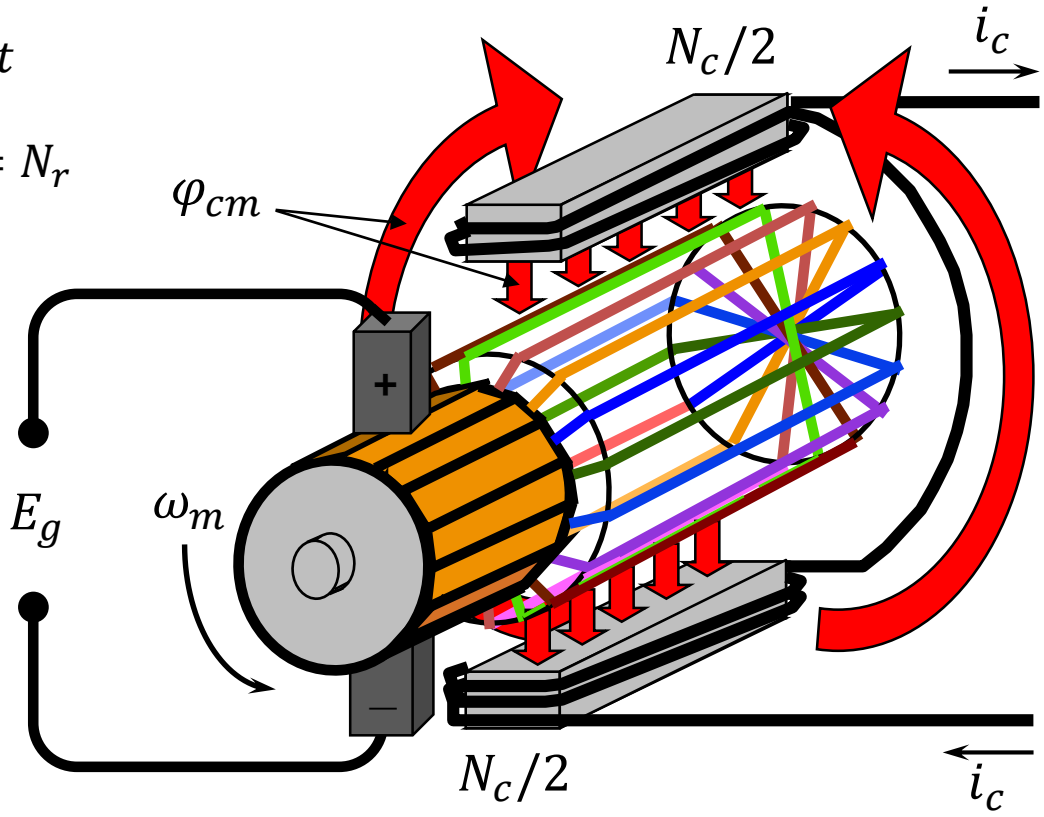
El ángulo de carga varia: $\delta = \omega_m t$

Remplazando y suponiendo: $N_r^i = N_r$

$$E_i = i_c \frac{N_c \cdot N_r}{\Re} \omega_m \sin \omega_m t$$

El colector debe estar diseñado para conectar la espira en el ángulo donde se genera la mayor f.e.m y torque (δ=90º):

$$E_g \approx E_i^{max} = \frac{N_c \cdot N_r}{\Re} \omega_m \cdot i_c$$

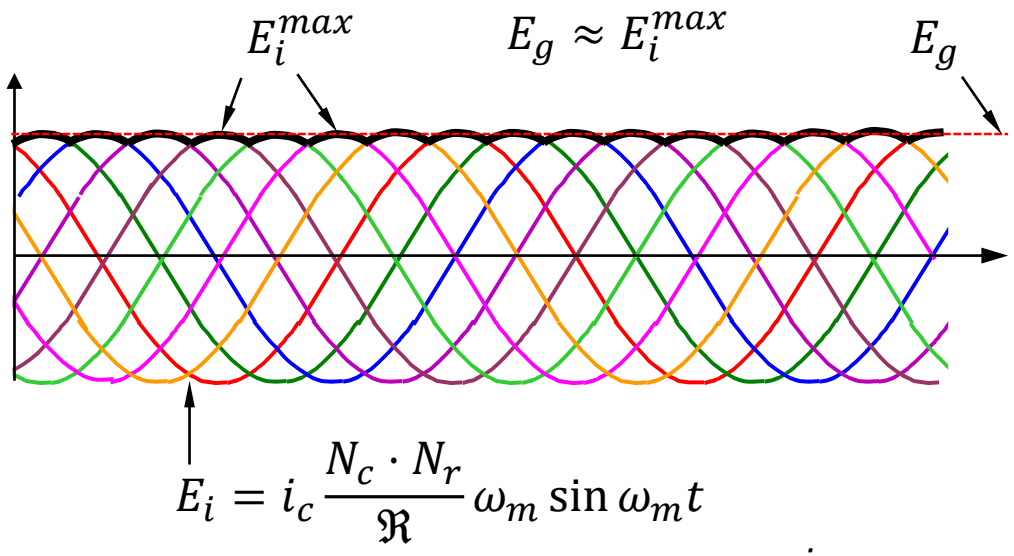


Máquina DC
Principios de operación

Graficando el concepto:

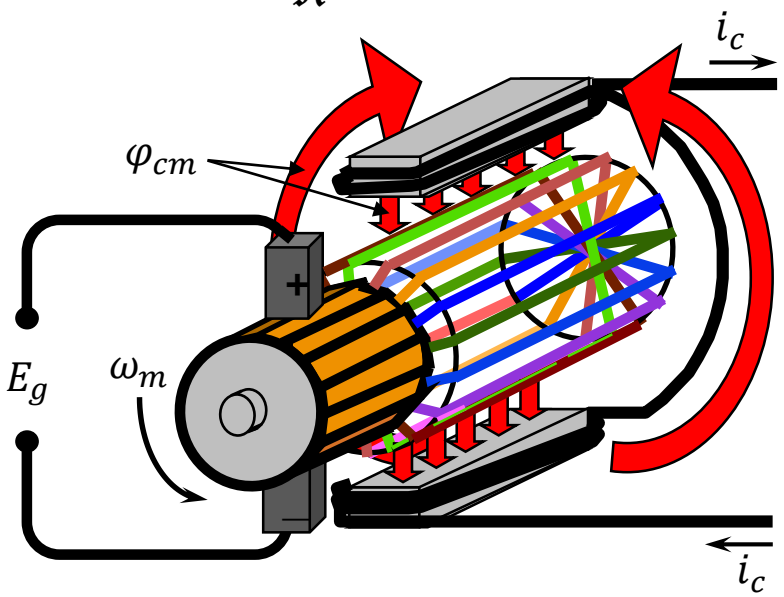
$$E_g \approx E_i^{max} = \frac{N_c \cdot N_r}{\Re}\omega_m \cdot i_c$$

$$L_{sr}^{max} = \frac{N_s \cdot N_r}{\Re_{sr}} \Rightarrow G = \frac{N_c \cdot N_r}{\Re}$$



Inductancia rotacional (G):
es el valor máximo de la inductancia mutua estator-rotor (L_{sr}), la cual se supone constante (esto se vio en la lectura de máquina cilíndrica).

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

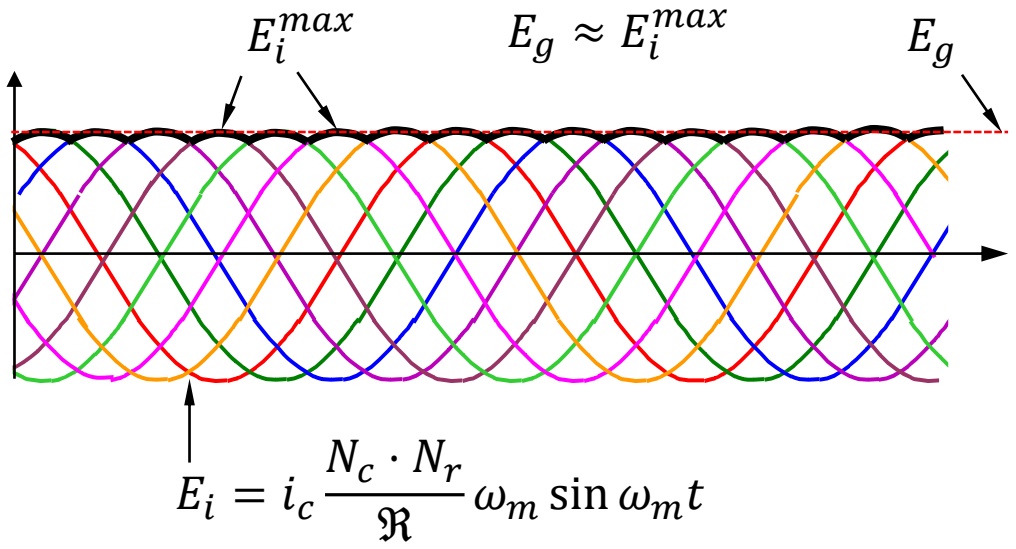


Máquina DC
Principios de operación

Como se vio en CMR y existencia de torque medio:

$$T_e = -\frac{\Im_s \cdot \Im_r}{\Re_{sr}} \sin \delta_{sr}$$

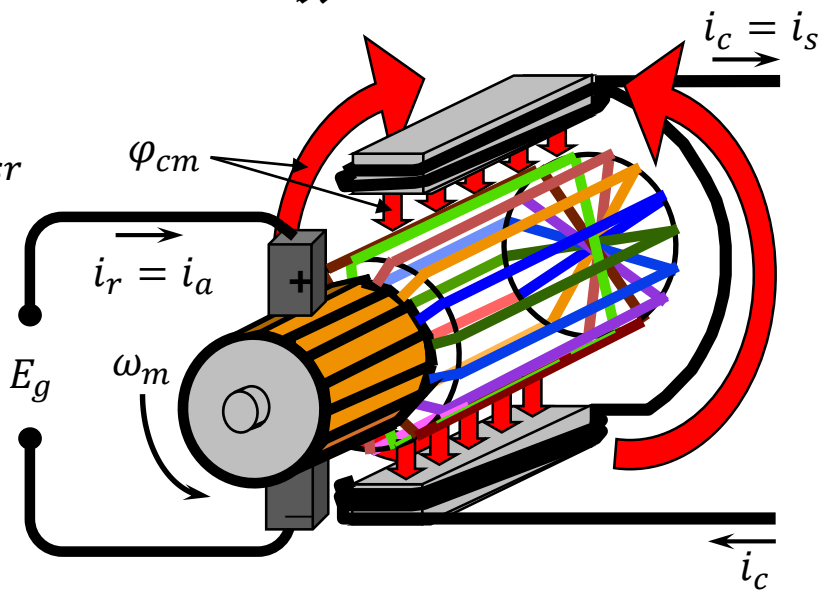
$$T_e = -i_s \cdot i_r \frac{N_s \cdot N_r}{\Re_{sr}} \sin \delta_{sr}$$



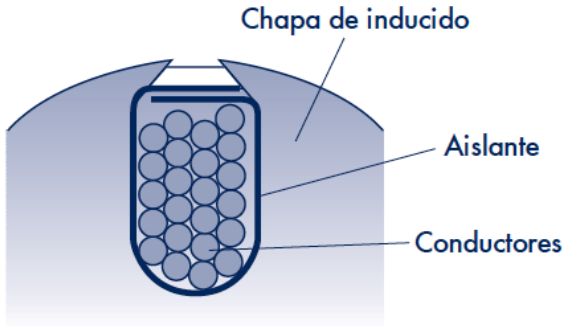
$$G = \frac{N_c \cdot N_r}{\Re} \quad \Rightarrow \quad T_e = -G \cdot i_s \cdot i_r \sin \delta_{sr}$$

El colector se encarga de optimizar y mantener a δ=90º:

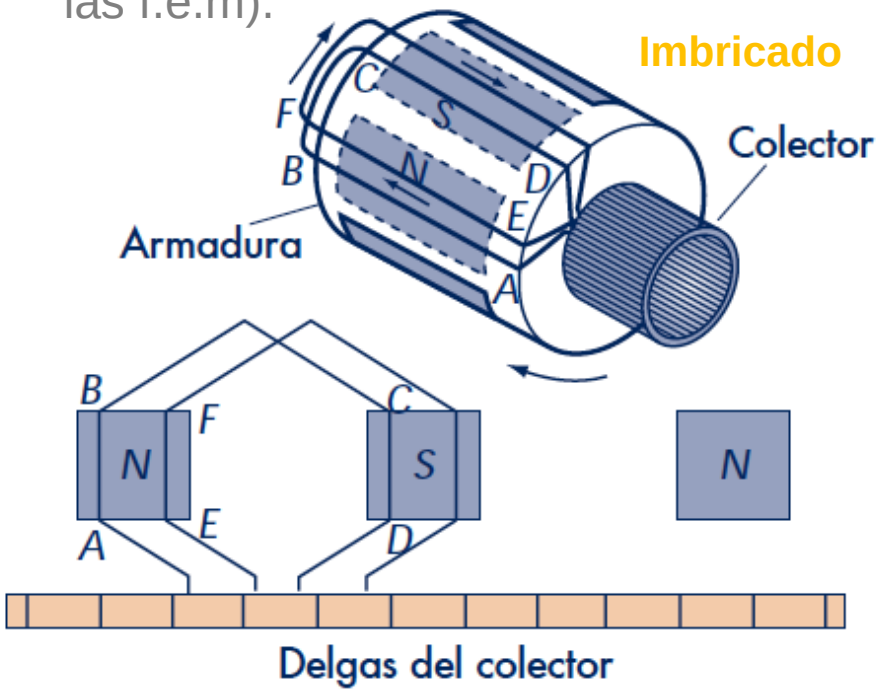
$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c \qquad E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

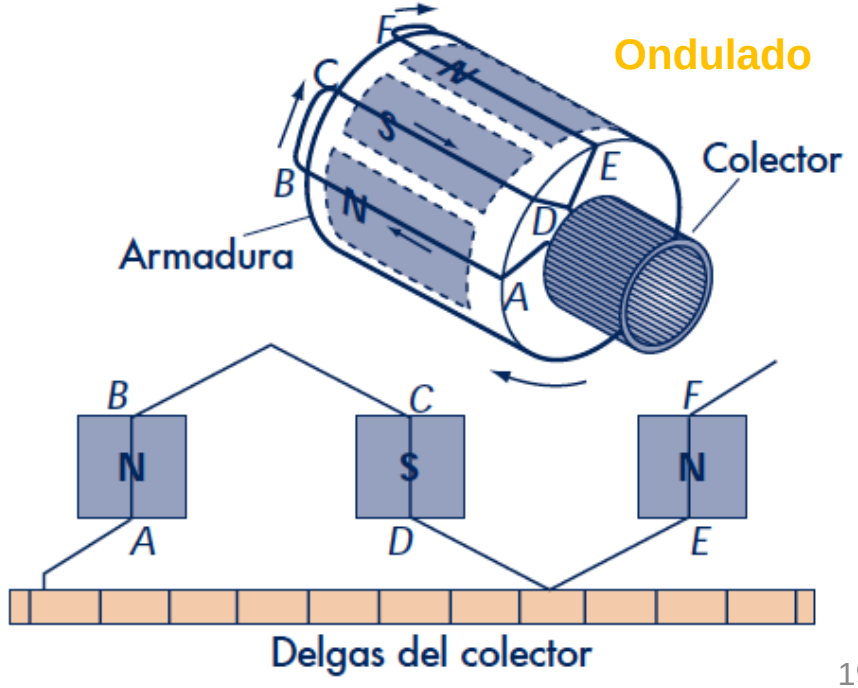


Máquina DC
Bobinado Real del Rotor



Tipo Anillo: Fue el primero que se utilizó y generalmente se emplea en ilustraciones pedagógicas por ser el más simple pero en la práctica no se usa.
Tipo Imbricado (Lap): Consta de una serie de bobinas interconectadas por cada delga adyacente para aprovechar la f.e.m generada en todas las bobinas.
Tipo Ondulado (Wave): Similar al anterior pero con las bobinas dispuesta de forma que no se traslapen con la adyacente (así también se aprovechan todas las f.e.m).

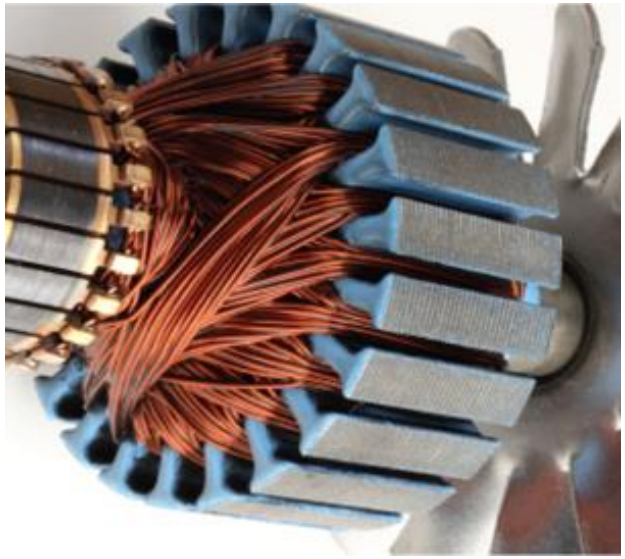


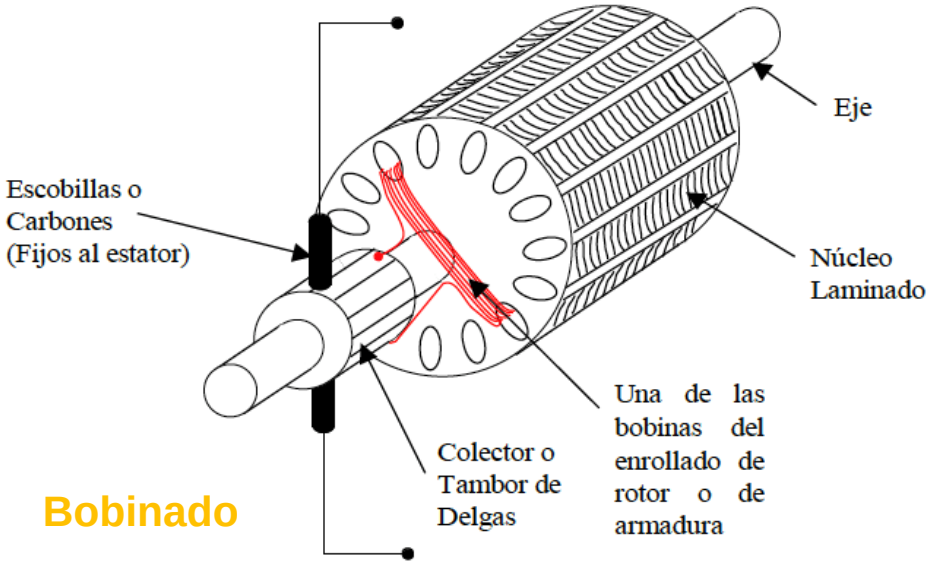


Máquina DC

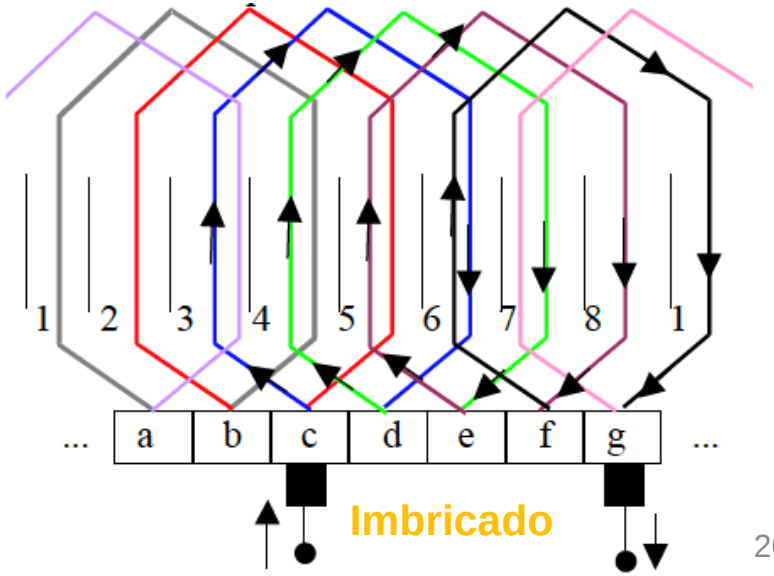
Bobinado Real del Rotor

El bobinado tipo tambor (imbricado y ondulado) aprovechan las f.e.m generadas en todas las bobinas, lo que se traduce en un voltaje de mayor amplitud y más plano (menos armónicas) en los bornes de las escobillas. De esta forma se consigue que la máquina dc genere un voltaje prácticamente continuo. El enrollado imbricado es el más utilizado y el tipo anillo se utiliza sólo para explicar el funcionamiento de la máquina debido a su simplicidad.





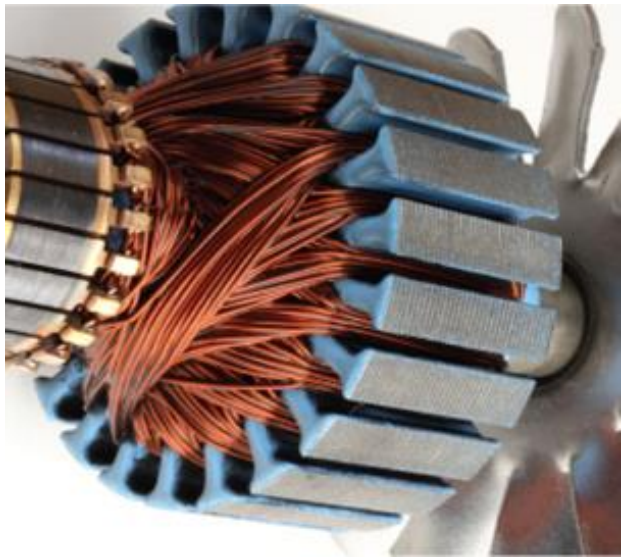
Bobinado



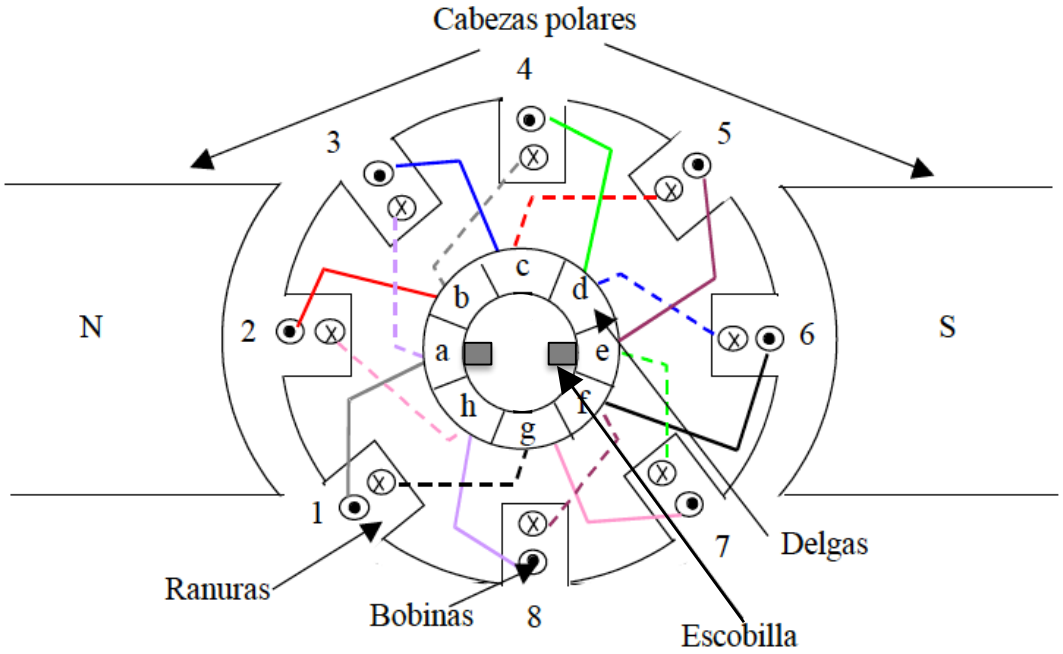
Imbricado

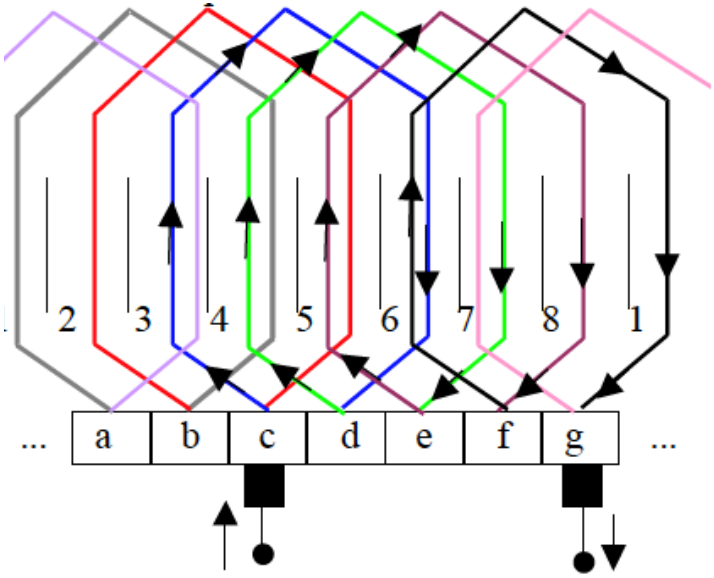
Máquina DC

Bobinado Real del Rotor



En este tipo de bobinado la corriente toma dos caminos desde una escobilla a la otra. Ej: la corriente de la escobilla superior va a la delga c y se divide por la bobina roja y la azul, las que se conectan con otras bobinas hasta llegar a la delga g donde está la segunda escobilla. Ambos caminos recorren bobinas con arreglos inversos pero donde el flujo de campo también es inverso.

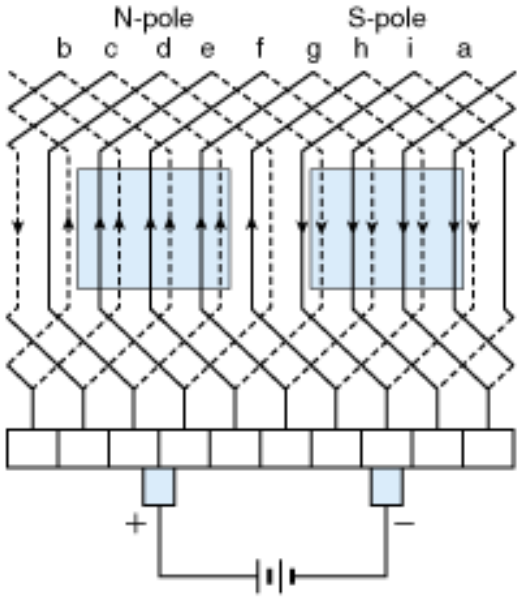


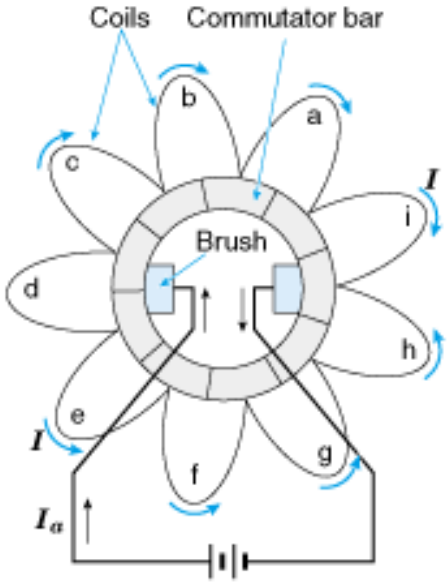


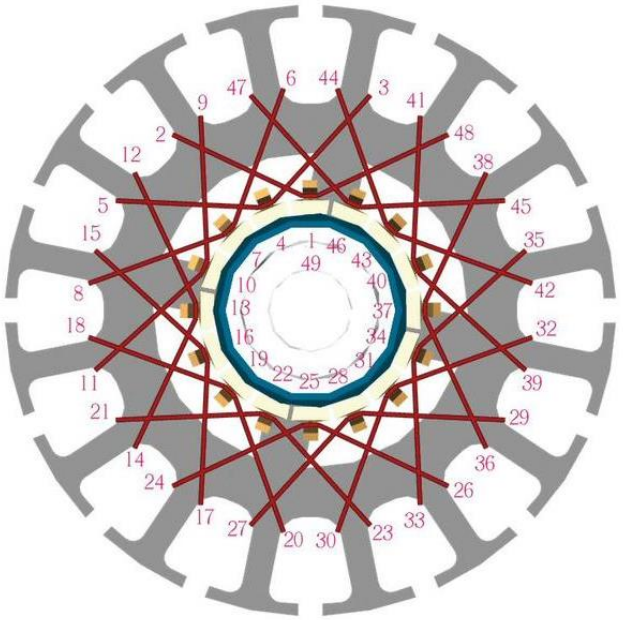
Imbricado

Máquina DC
Bobinado Real del Rotor

Imbricado







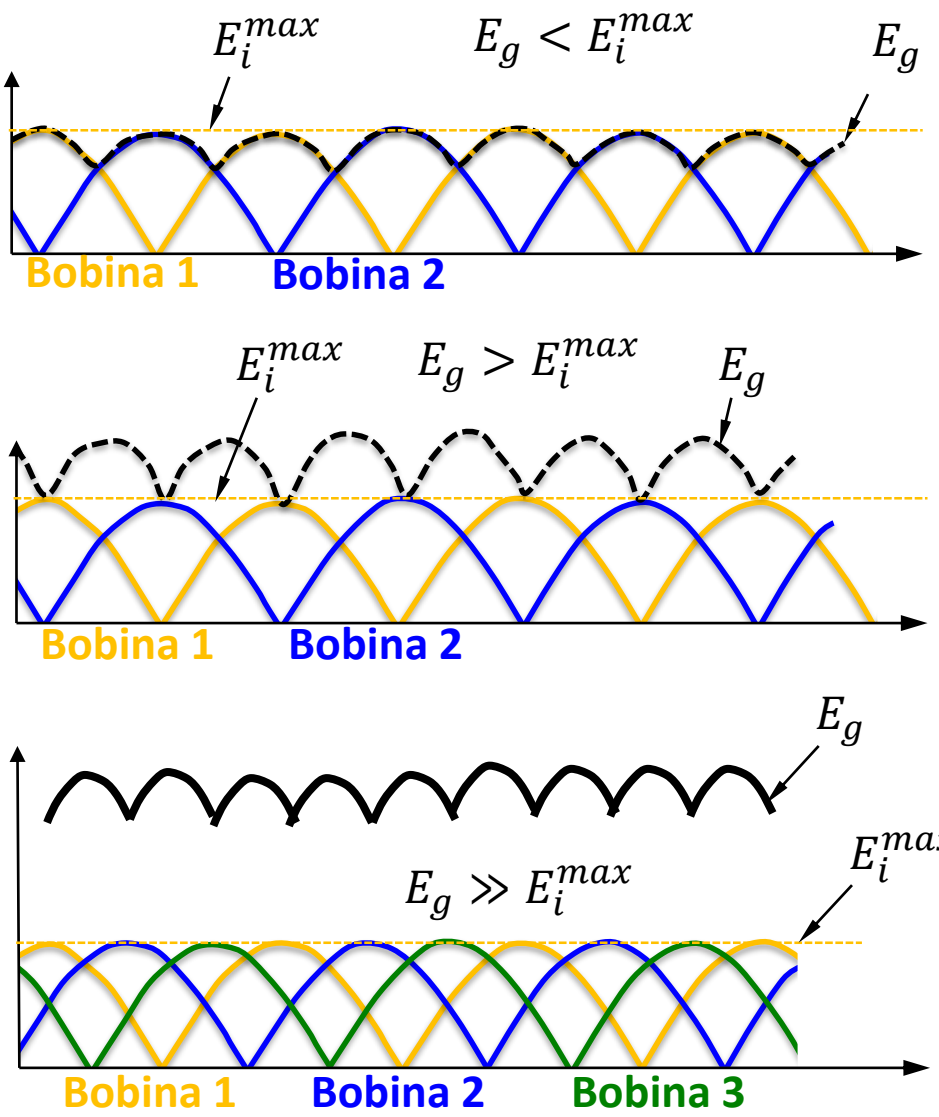
Máquina DC

Bobinado Real del Rotor

Bobinado tipo anillo:
El voltaje obtenido en los bornes de la máquina es levemente menor que el voltaje máximo alcanzado en cada bobina.

Bobinado tipo tambor (imbricado ó ondulado): Al utilizar todas las bobinas del rotor, sus voltajes se suman y se obtiene un voltaje en bornes mayor a el voltaje máximo alcanzado en cada bobina.

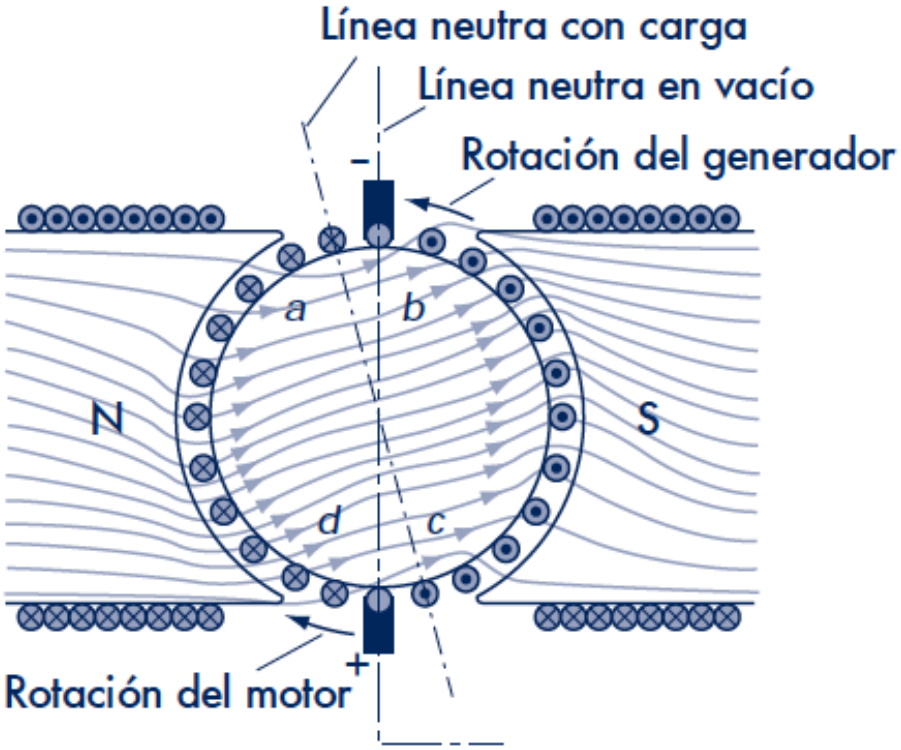
El voltaje en bornes aumentará considerablemente con el número de bobinas utilizadas en el rotor.



Máquina DC

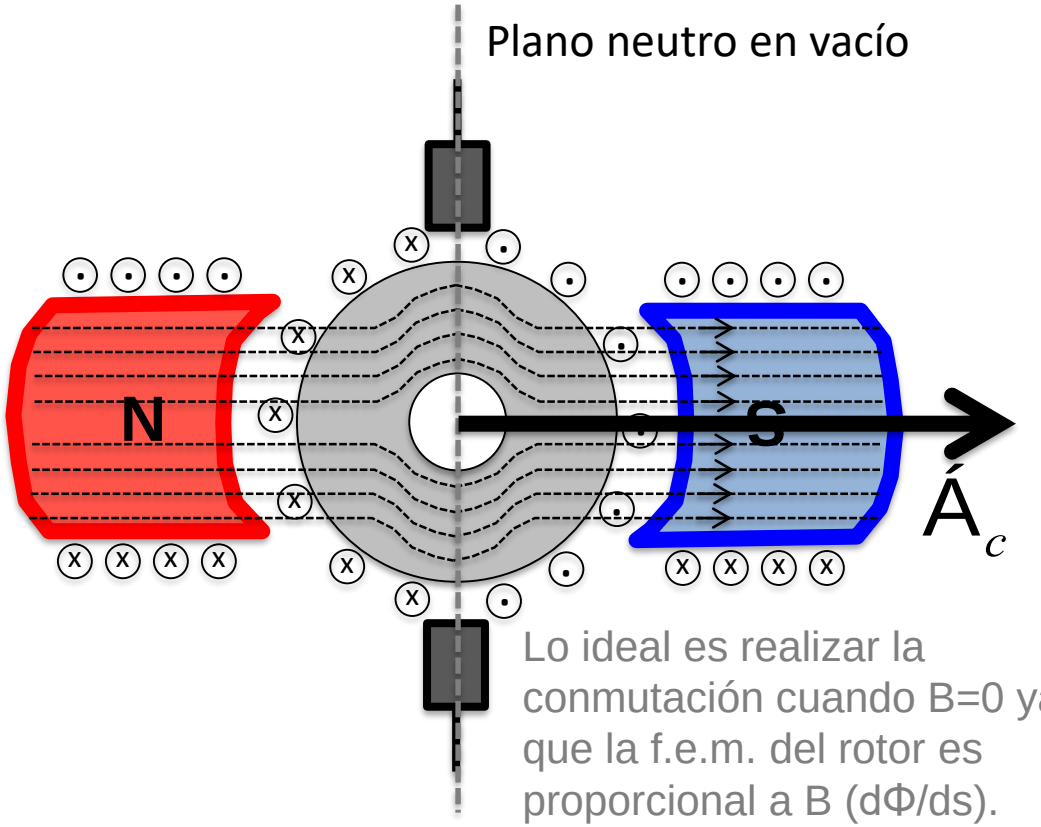
Reacción de la Armadura

Cuando circula una corriente por las bobinas del rotor se genera un flujo magnético que se suma al generado por el estator (campo), lo que genera una distorsión en el campo magnético resultante (entrehierro), lo que recibe el nombre de **Reacción de Armadura (Inducido).**



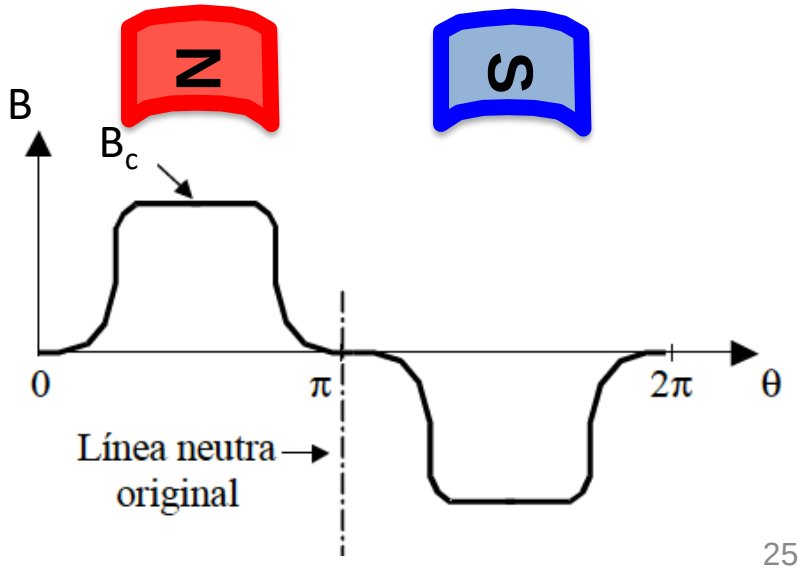
Máquina DC
Reacción de la Armadura

Operación en vacío: Cuando la máquina está en vacío (no hay corriente en el rotor) sólo se genera una f.m.m en el estator, la cual tiene una dirección perpendicular a el plano neutro. El plano neutro es el punto donde el campo magnético es nulo y coincide en este caso con el plano de las escobillas.



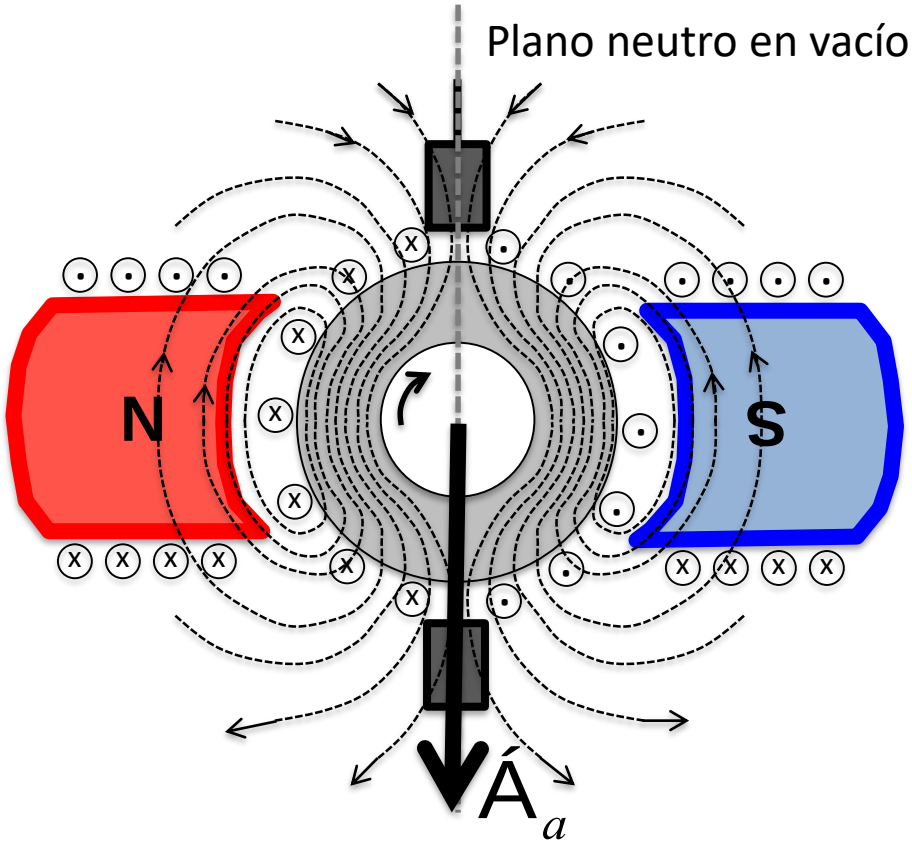
Lo ideal es realizar la conmutación cuando B=0 ya que la f.e.m. del rotor es proporcional a B (dΦ/ds).

La distribución de flujo ideal es una onda cuadrada pero en la realidad es semi-trapezoidal debido a los flujos de dispersión.

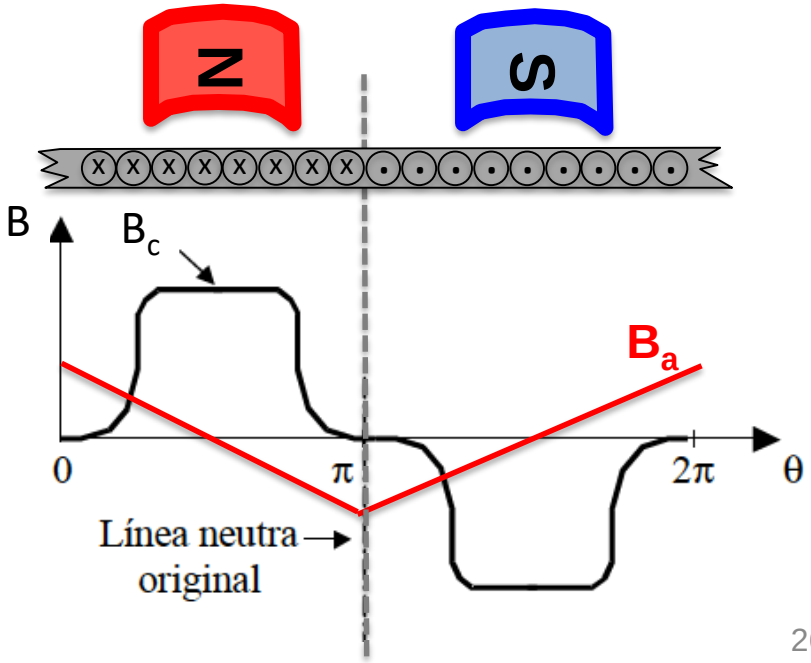


Máquina DC
Reacción de la Armadura

Operación con corriente en armadura: Cuando hay una corriente en la armadura (rotor) tenemos una fuerza magnetomotriz generada en la armadura, la cual tiene una dirección perpendicular a la f.m.m del campo.



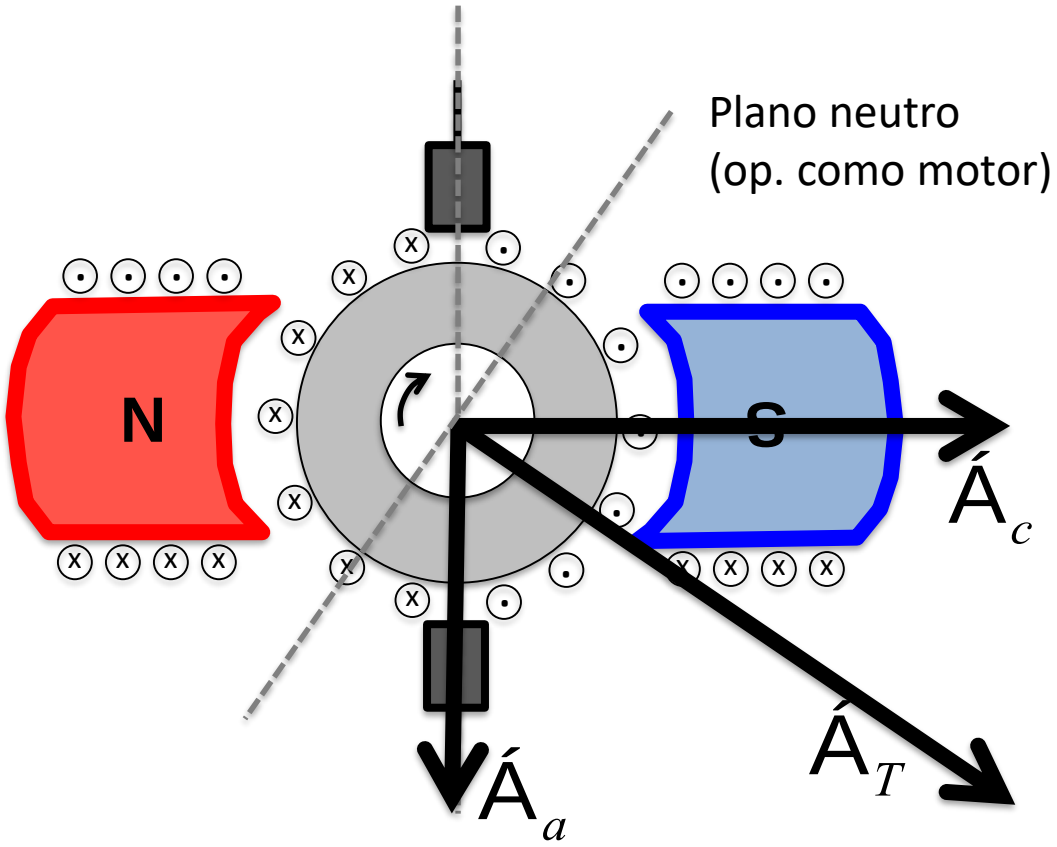
La f.m.m del rotor será triangular si hay una distribución continua de las bobinas rotóricas y muchas de estas (Ley de Ampère).

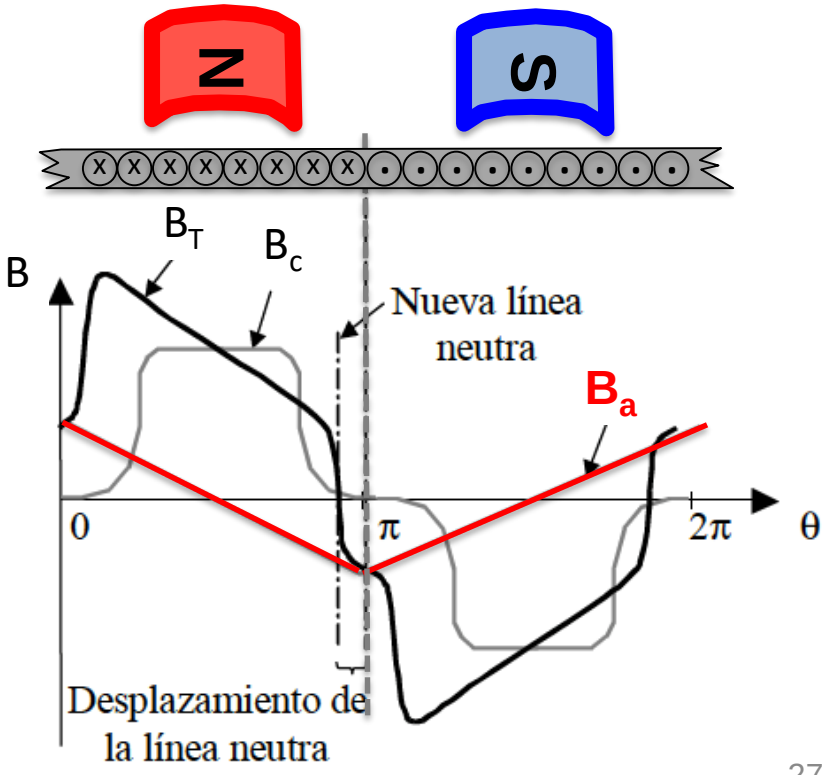


Máquina DC

Reacción de la Armadura

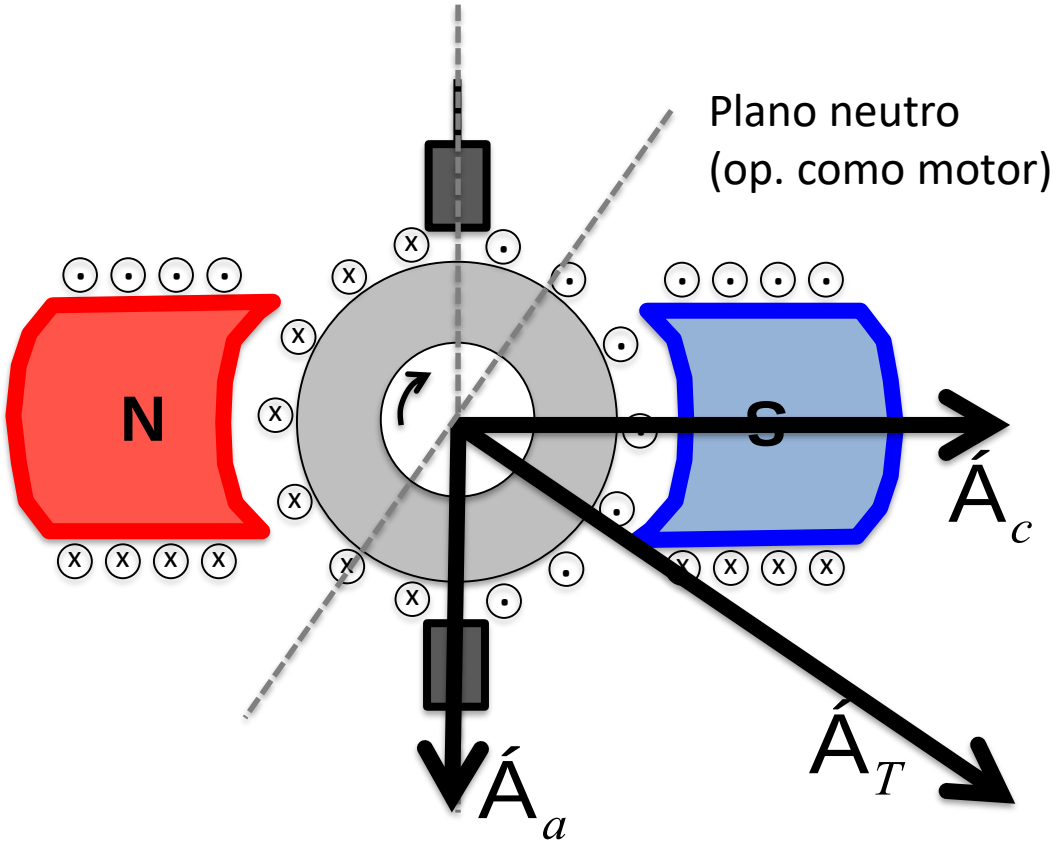
Campo resultante: La f.m.m total será la suma de las f.m.m. del campo y armadura. Se puede ver que el plano neutro se desplaza algunos grados en dirección del giro (motor) o en sentido contrario (generador).

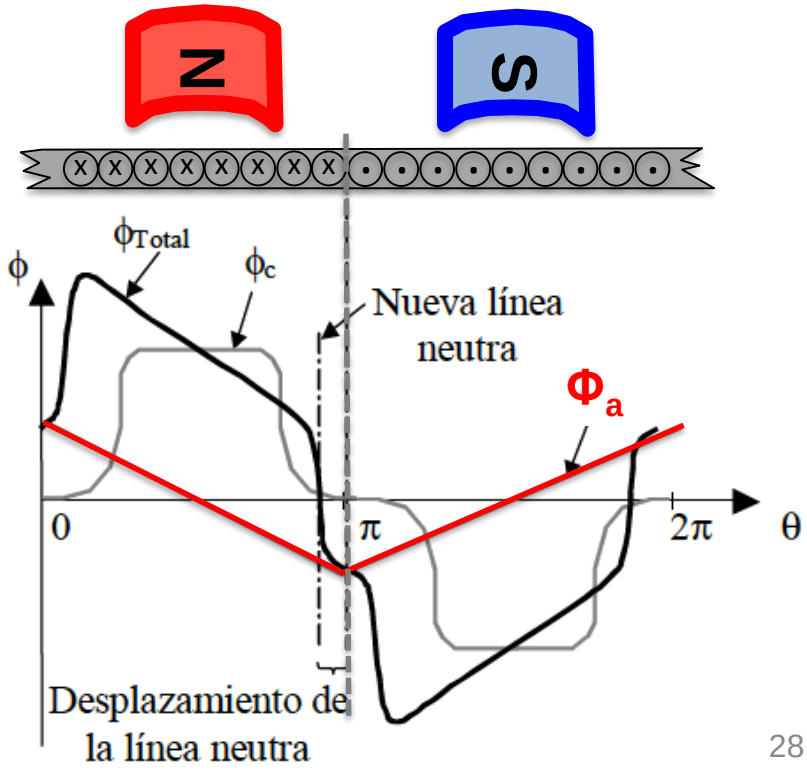




Máquina DC
Reacción de la Armadura

Problema del desplazamiento del neutro: Este desplazamiento generará **chispas!** muy indeseadas en el colector porque la escobilla cortocircuita una parte del devanado donde existe una f.e.m generada por la existencia de campo magnético (Ley de Faraday: E es proporcional a dΦ/dt).

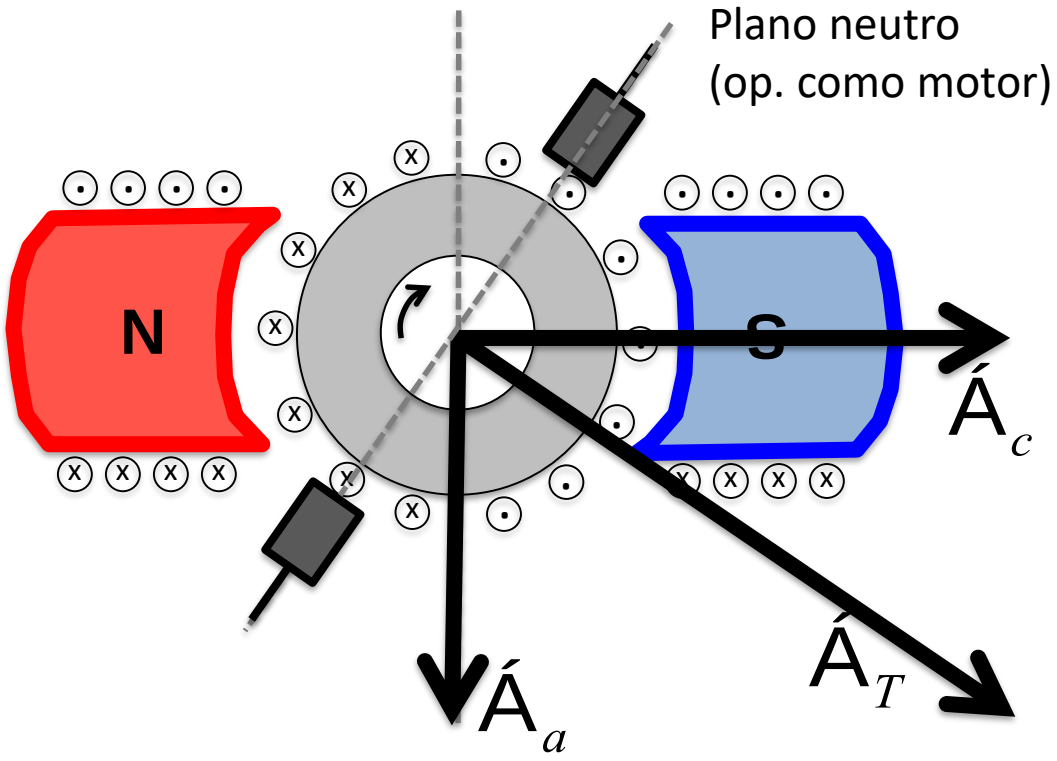


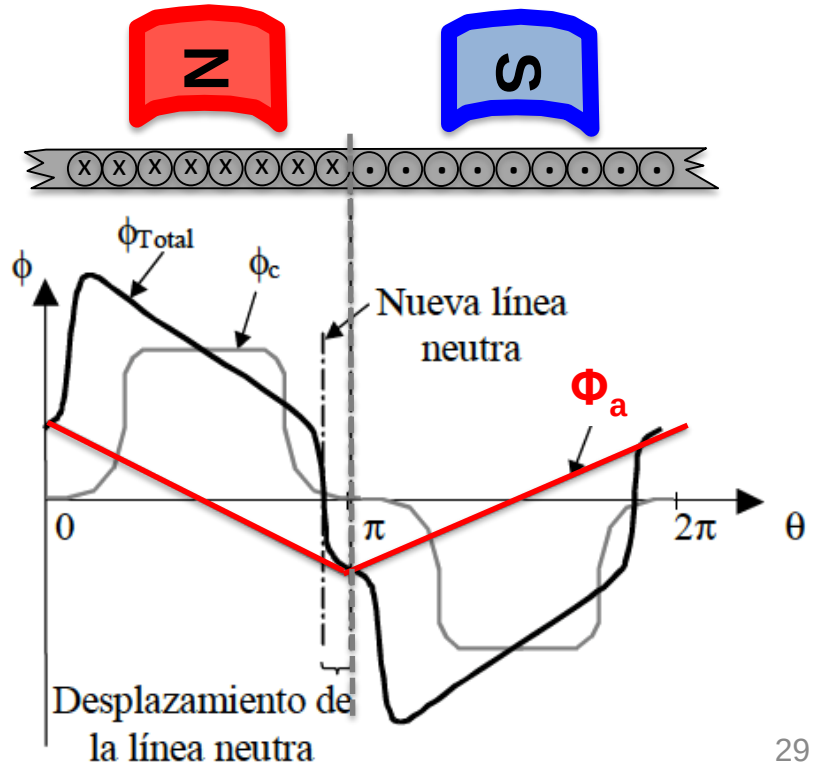


Máquina DC

Reacción de la Armadura (Solución 1)

Solución 1: Una solución es **desplazar las escobillas** para que coincidan con el plano de neutro. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el ángulo del plano neutro depende del las f.m.m. y estas son variables según la carga (corriente). Por lo tanto para tener una solución en todo punto se operación se requiere escobillas ajustables, lo que es un problema técnico mayor.

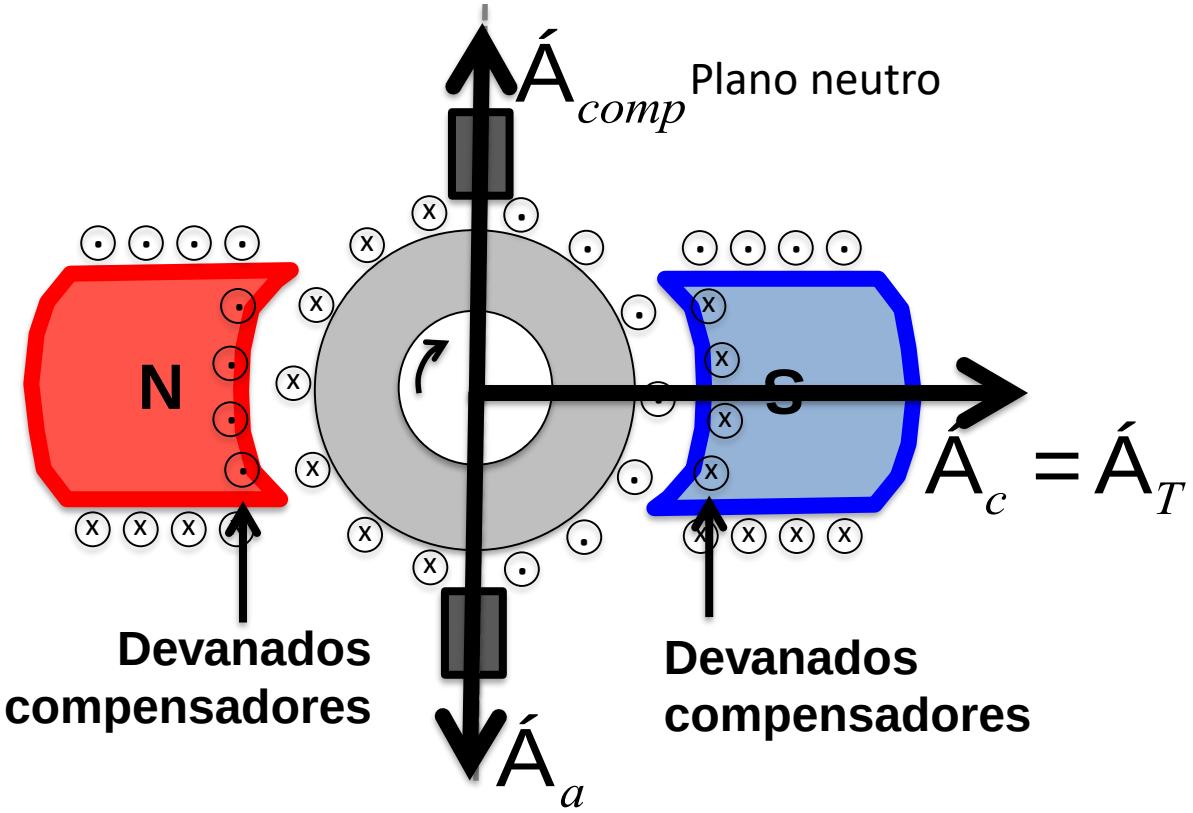




Máquina DC

Reacción de la Armadura (Solución 2)

Solución 2: Una de las soluciones más eficaces es neutralizar la reacción del inducido mediante devanados compensados en el campo (estator) que se insertan en ranuras especialmente dispuestas en las cabezas polares del estator. Estas bobinas compensadoras deben generar una f.m.m de dirección inversa al inducido.

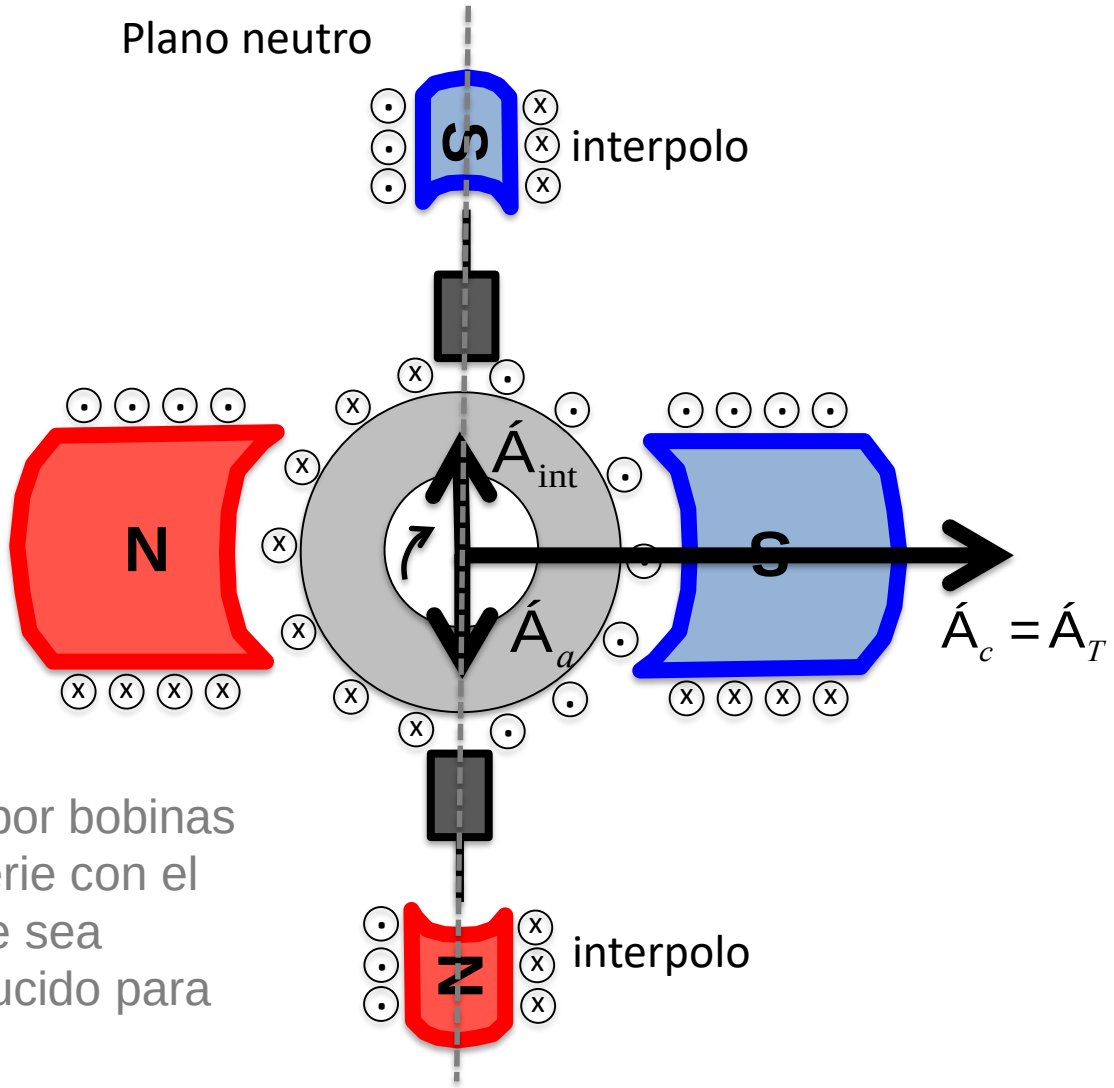


Desventajas: esta solución genera mayores pérdidas por la resistencia de los devanados compensadores y supone una construcción más compleja, un motor más voluminosos y pesado.

Máquina DC

Reacción de la Armadura (Solución 3)

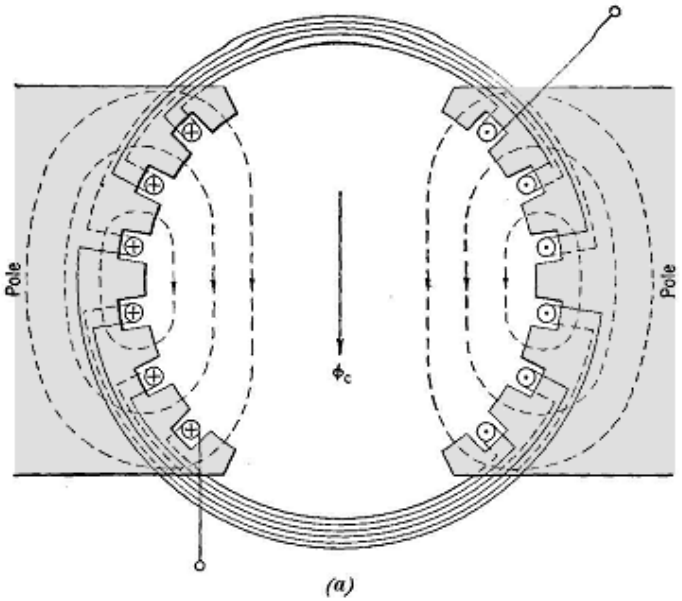
Solución 3: La solución más utilizada es agregar polos auxiliares, **interpolos** o polos de conmutación. Son polos que van situados en el estator alineados con las líneas de neutro teóricos y están conectadas en serie con las bobinas del inducido (armadura) y bobinados para que generen una f.m.m contraria a la del inducido para de esta forma anularlo.

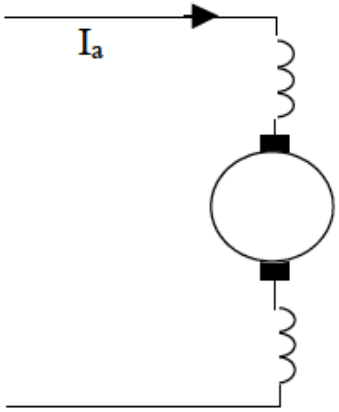


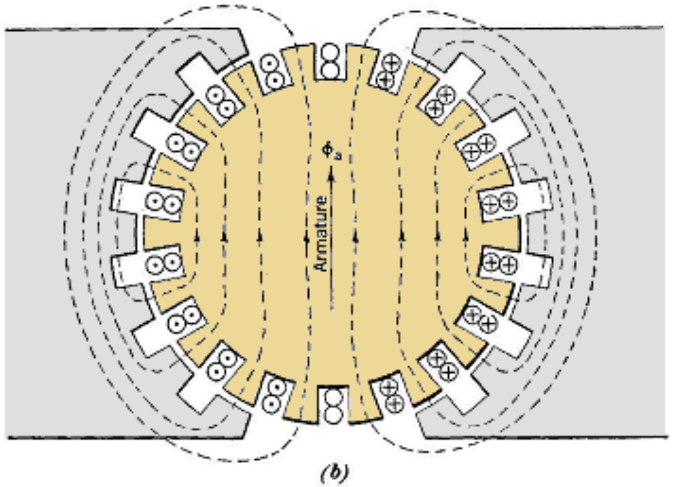
Interpolos: están compuestos por bobinas (no imanes) y conectados en serie con el rotor. La idea es que la corriente sea proporcional o la misma del inducido para anular la f.m.m.

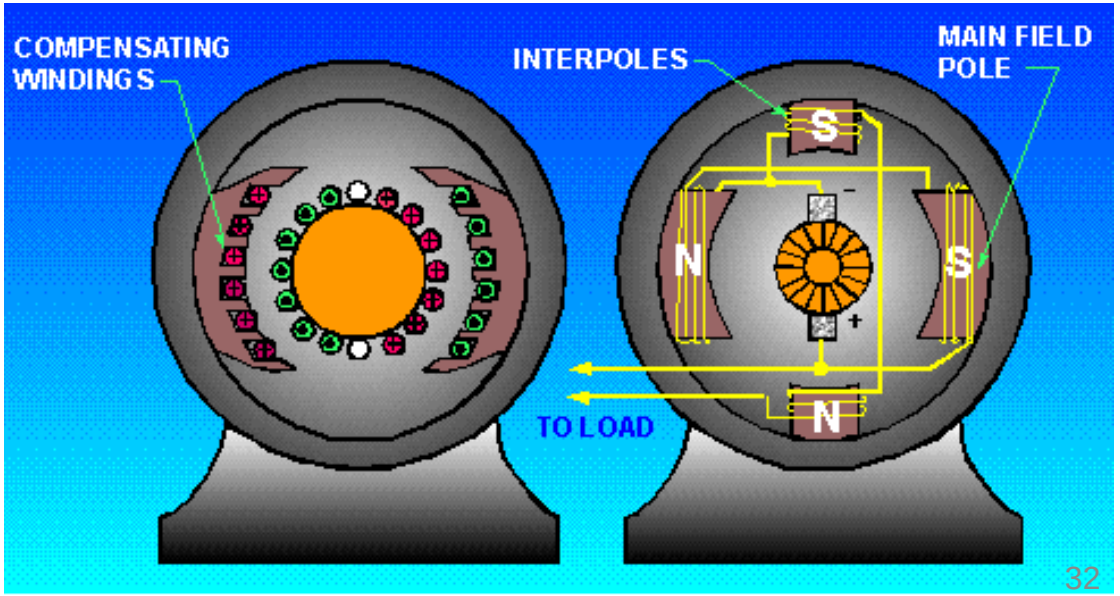
Máquina DC

Bobinas compensadoras

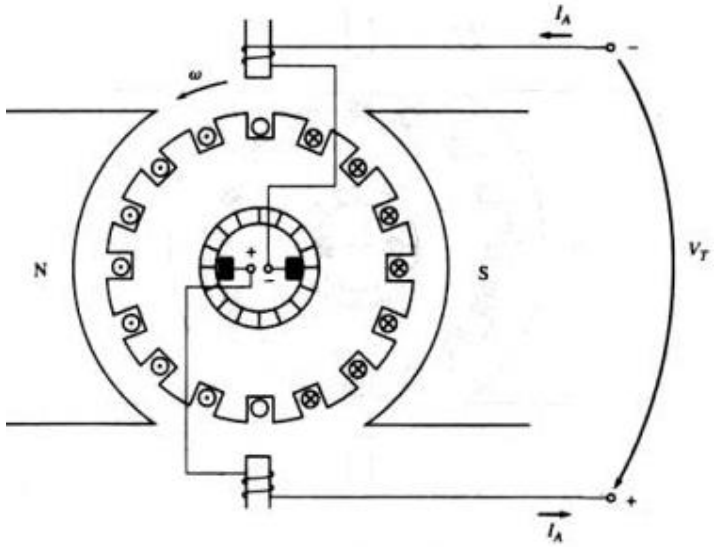


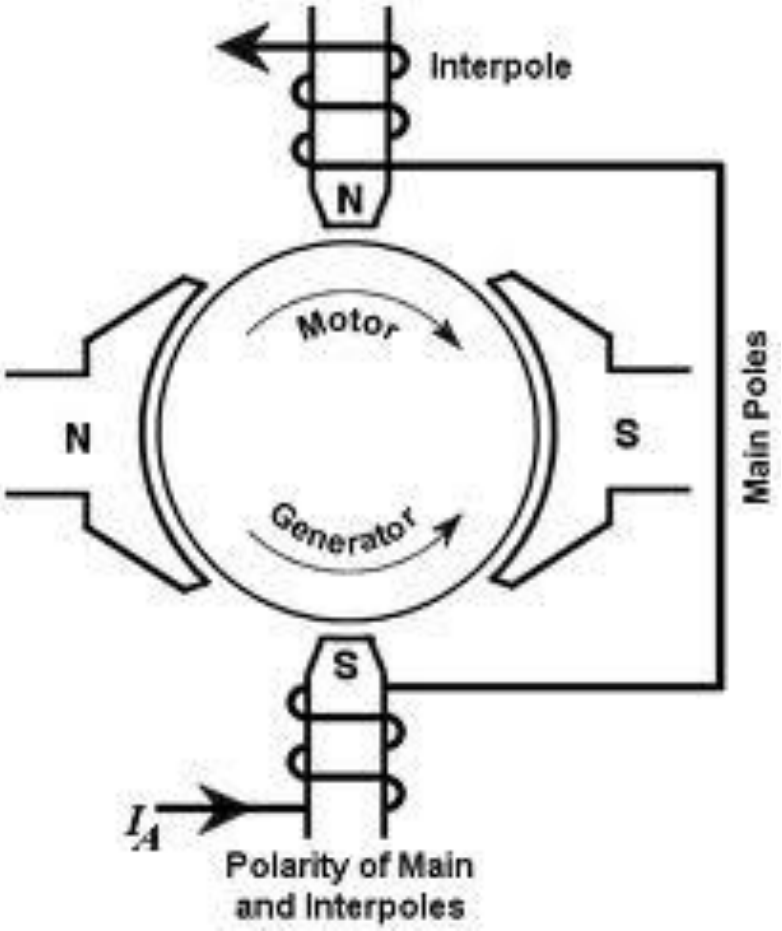


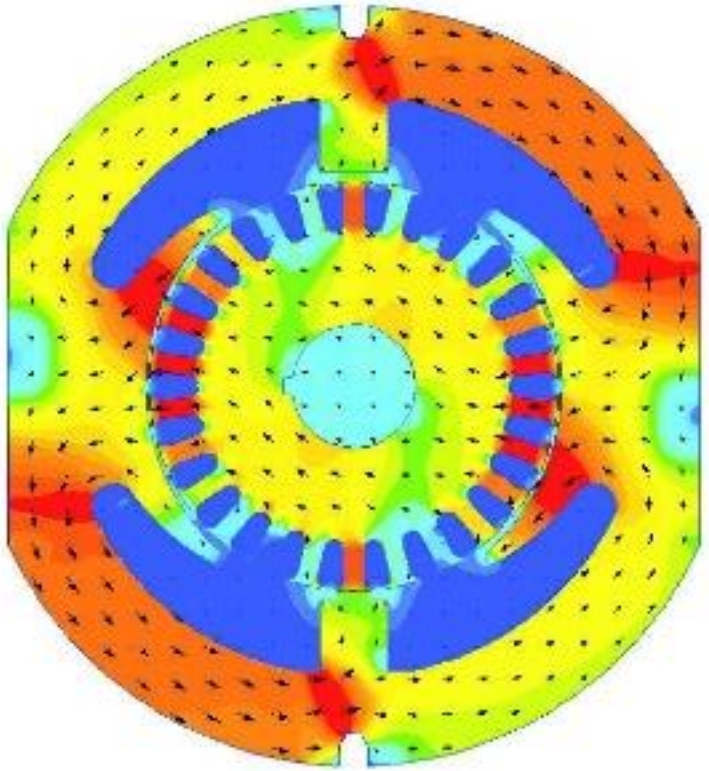




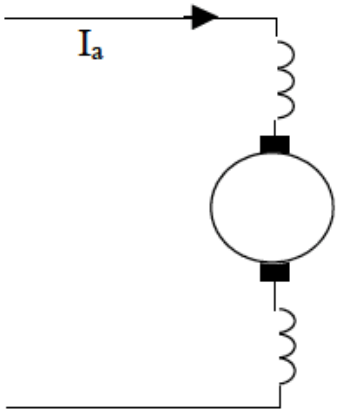
Máquina DC
Interpolos





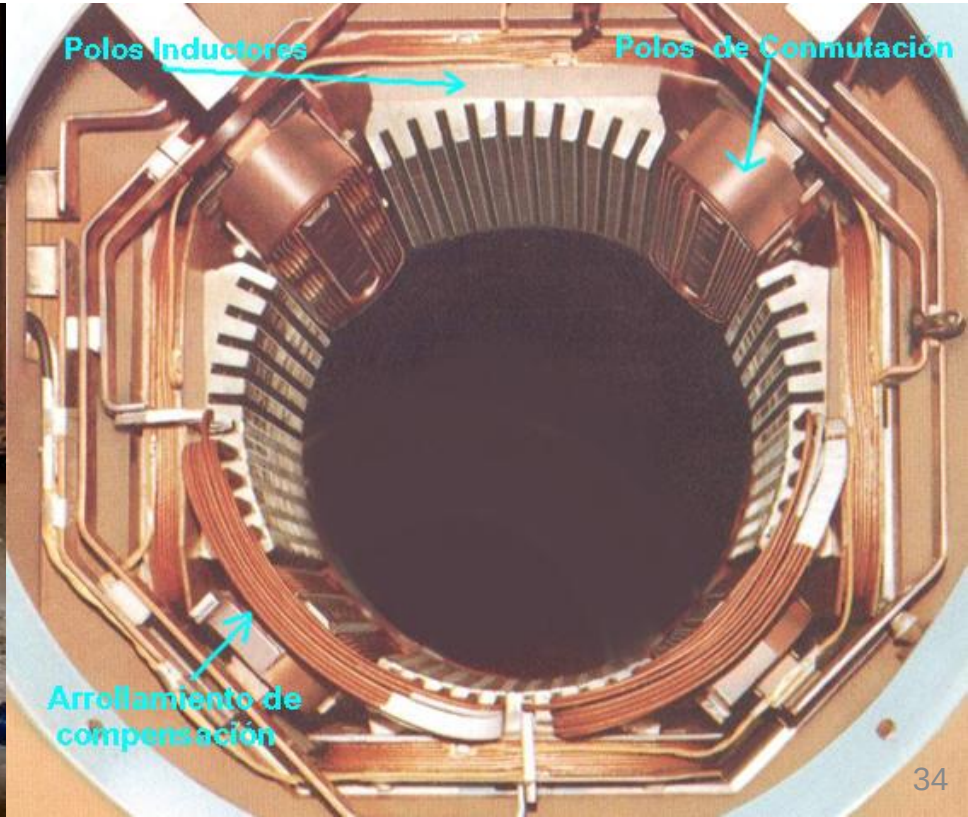


Máquina DC
Interpolos





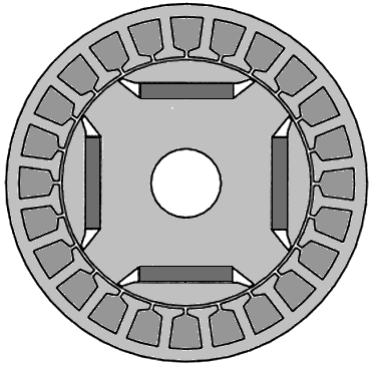


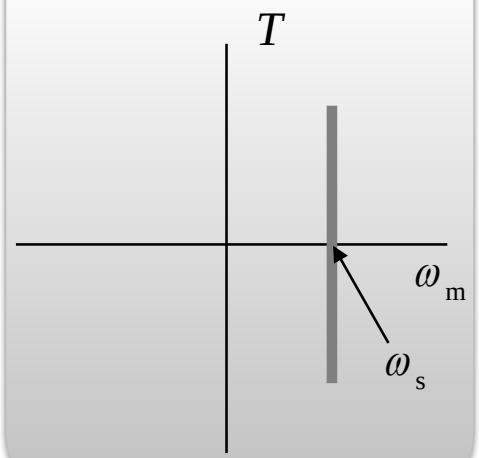


Principales Máquinas Eléctricas

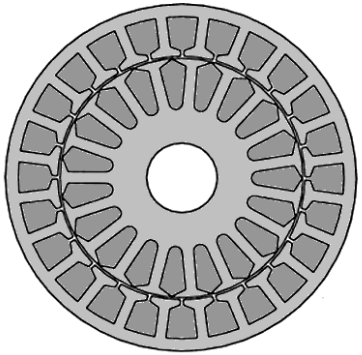
Característica Torque-Velocidad

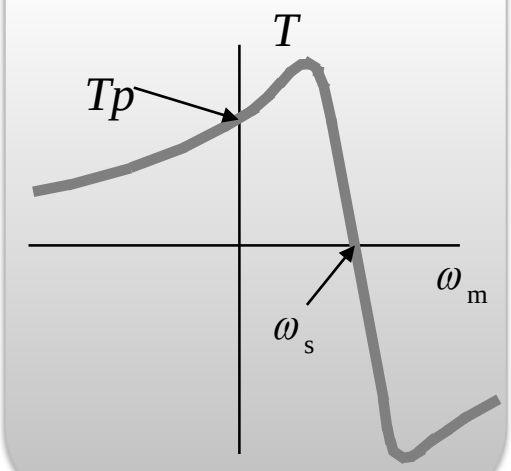
SINCRONA



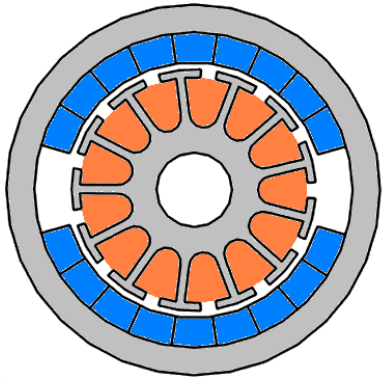


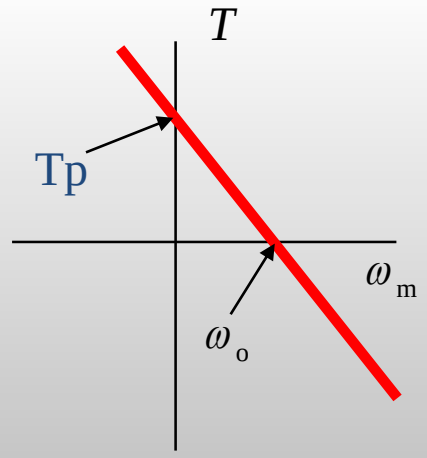
INDUCCION





CONTINUA

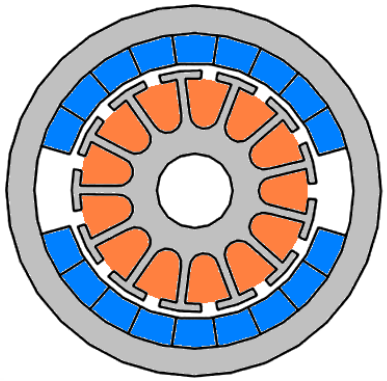


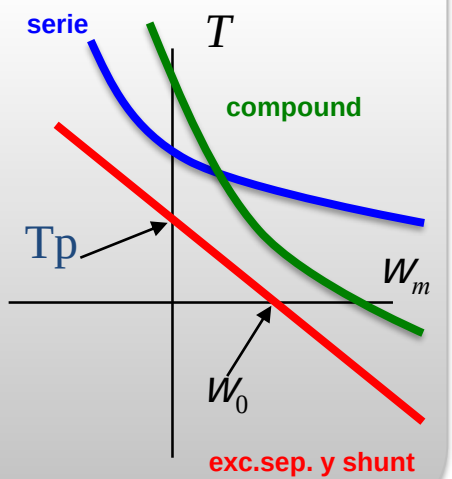


(exc. separada y shunt)

Máquina DC
Característica Torque-Velocidad

CONTINUA





Como no existe un campo magnético rotatorio en el estator, la condición de existencia de **torque medio** establece que:

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r$$

$$\omega_s = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \omega_r = \omega_m$$

Podemos ver que desde el punto de vista del rotor (sistema de referencia solidario al rotor) se ve un CMR generado por el estator y un CMR generado por el rotor que tienen la misma velocidad que el rotor.

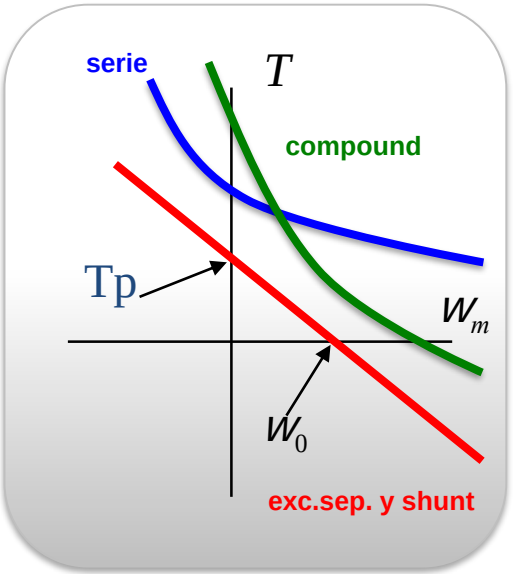
Las ecuaciones fundamentales de la máquina DC son:

$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c \qquad E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

Máquina DC
Clasificación

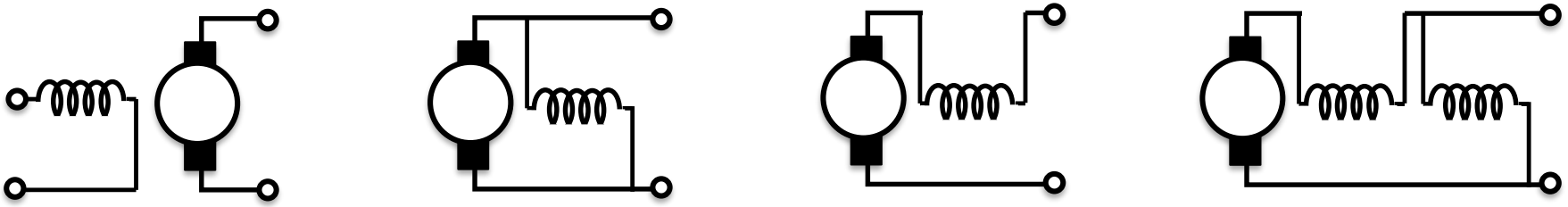
$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$



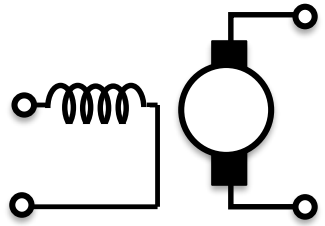
Máquina DC

- **Excitación Separada**
- **Autoexitadas**
  - **Paralela (Shunt)**
  - **Serie y Universal**
  - **Compound** acumulativa o diferencial

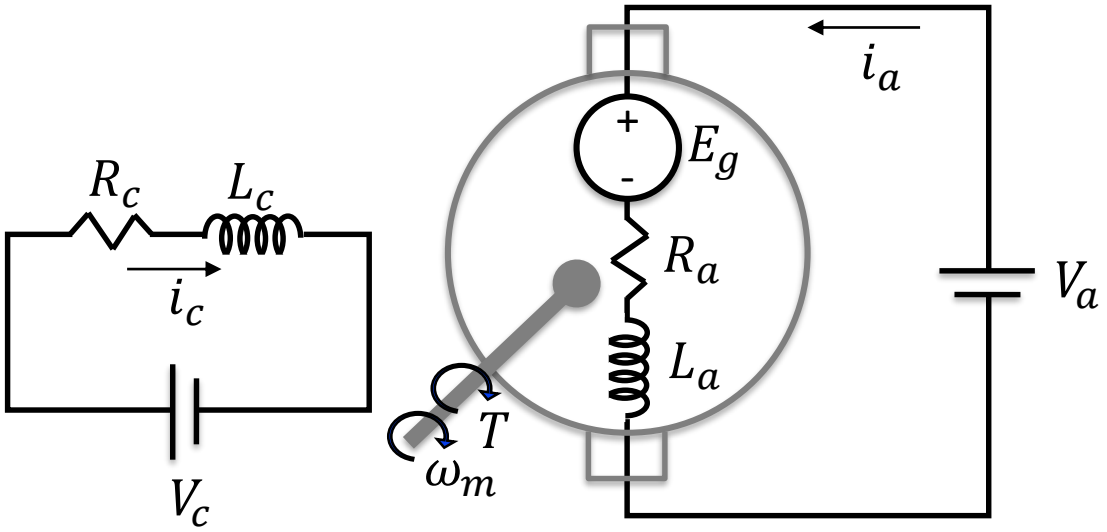


Máquina DC

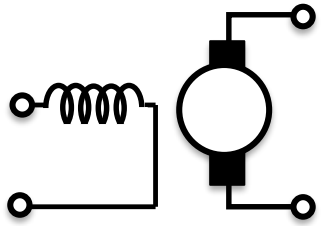
Máquina de Excitación Separada



Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son (op. como motor):



Máquina DC
Máquina de Excitación Separada



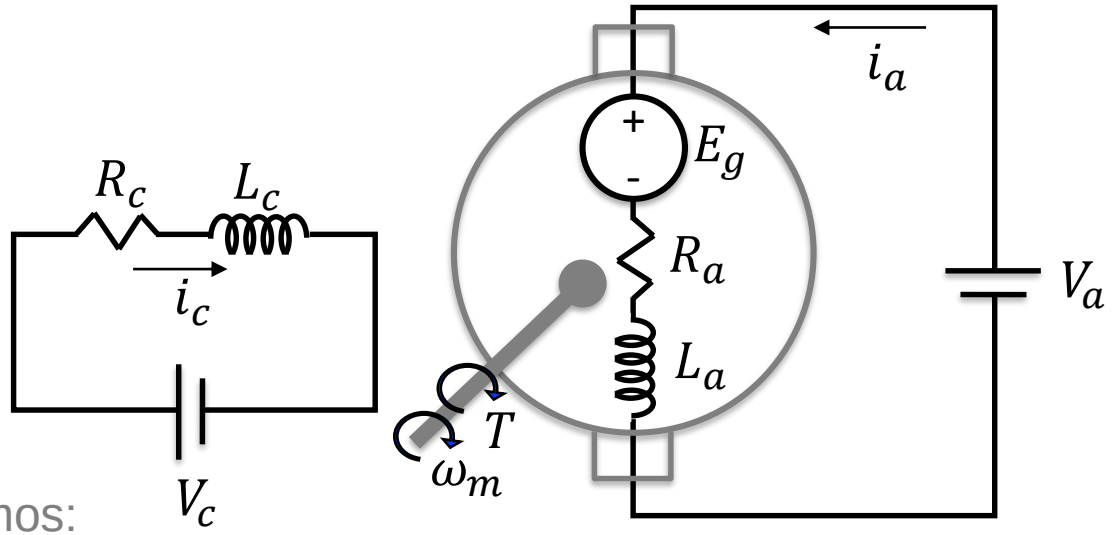
Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son (op. como motor):

$$V_c = R_c \cdot i_c + L_c \frac{di_c}{dt}$$

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_g$$

El balance de torque es:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - \sum T_R = G i_c i_a - \sum T_R$$



En **régimen permanente** tenemos:

$$V_c = R_c \cdot i_c \quad \Rightarrow \quad i_c = V_c / R_c$$

$$V_a = R_a \cdot i_a + E_g \quad \Rightarrow \quad i_a = \frac{V_a - E_g}{R_a}$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad T_e = G i_c i_a = \sum T_R$$

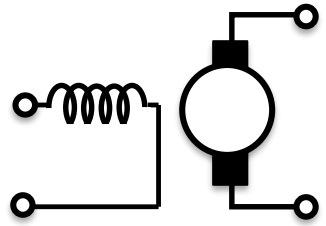
$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

$$\Rightarrow \quad T_e = \frac{G V_c V_a}{R_a R_c} - \frac{G^2 V_c^2}{R_a R_c^2} \omega_m$$

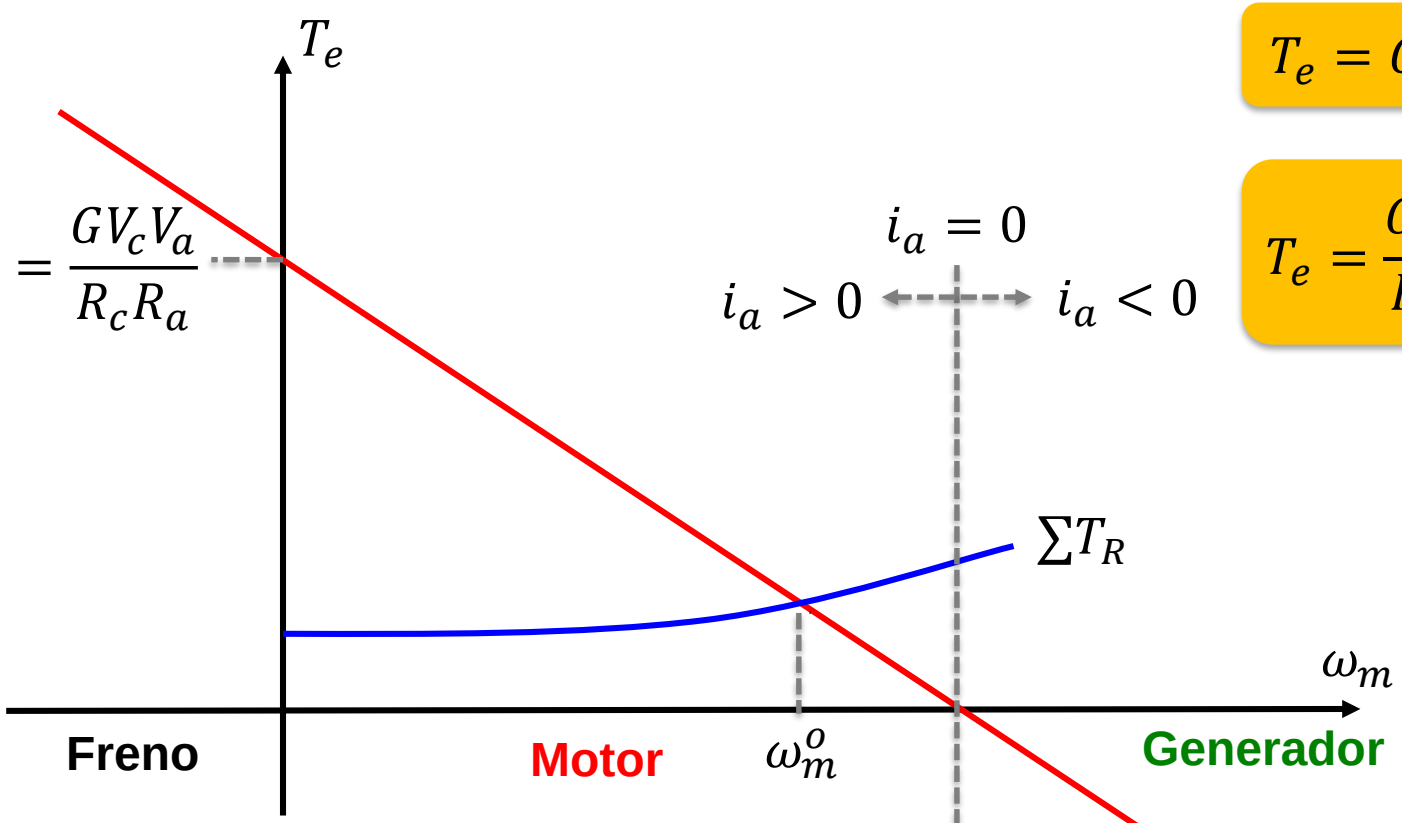
Máquina DC

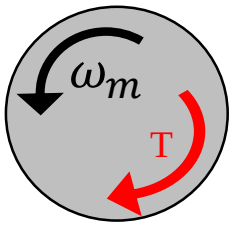
Máquina de Excitación Separada

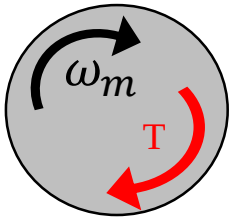


$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

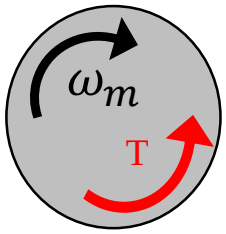
$$T_e = \frac{GV_cV_a}{R_aR_c} - \frac{G^2V_c^2}{R_aR_c^2}\omega_m$$





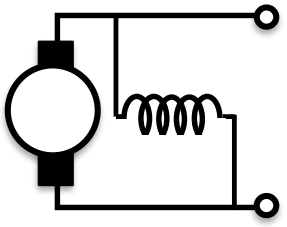


$$\omega_m = \omega_0 = \frac{R_cV_a}{GV_c}$$

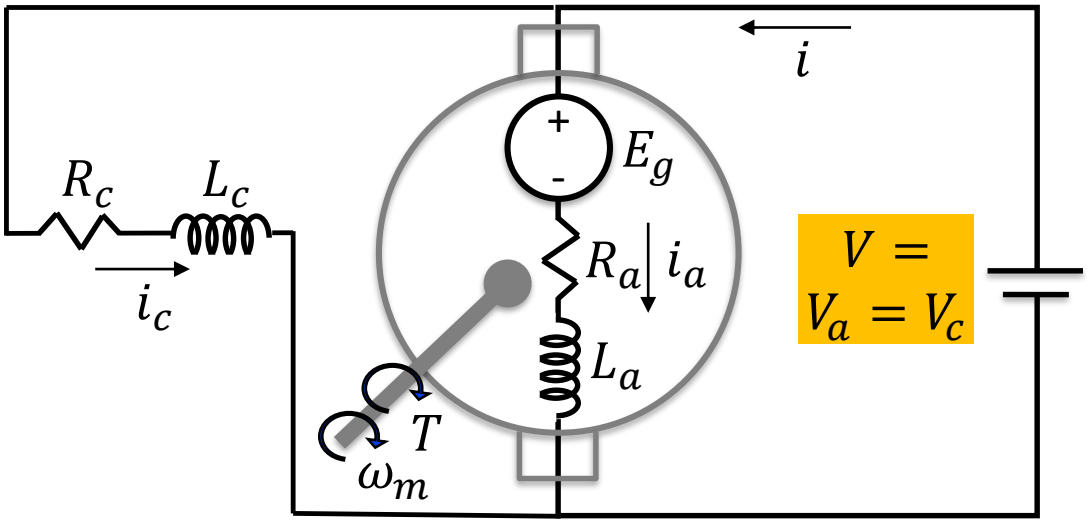


Máquina DC

Máquina Shunt (paralela)

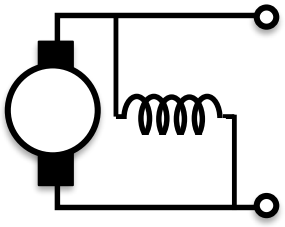


Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son las mismas (motor):



Máquina DC

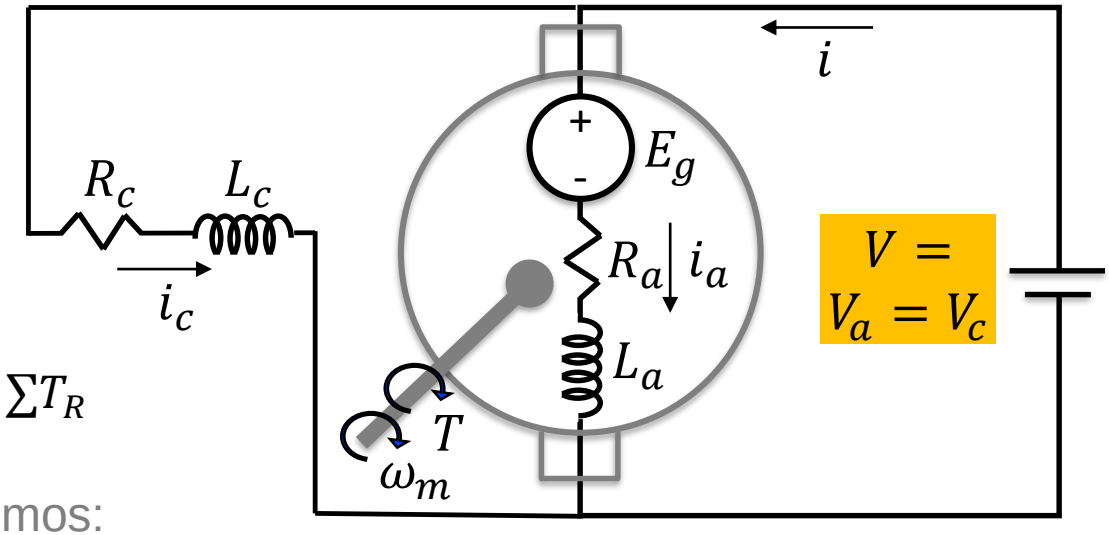
Máquina Shunt (paralela)



Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son las mismas (motor):

$$V_c = R_c \cdot i_c + L_c \frac{di_c}{dt}$$

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_g$$



El balance de torque es:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - \sum T_R = G i_c i_a - \sum T_R$$

En **régimen permanente** tenemos:

$$V = R_c \cdot i_c \quad \Rightarrow \quad i_c = V/R_c$$

$$V = R_a \cdot i_a + E_g \quad \Rightarrow \quad i_a = \frac{V - E_g}{R_a}$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad T_e = G i_c i_a = \sum T_R$$

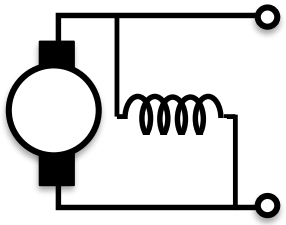
$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

$$\Rightarrow \quad T_e = \frac{GV^2}{R_a R_c} - \frac{G^2 V^2}{R_a R_c^2} \omega_m$$

Nota: la única diferencia con la máquina de excitación separada es el voltaje común.

Máquina DC
Máquina Shunt (paralela)



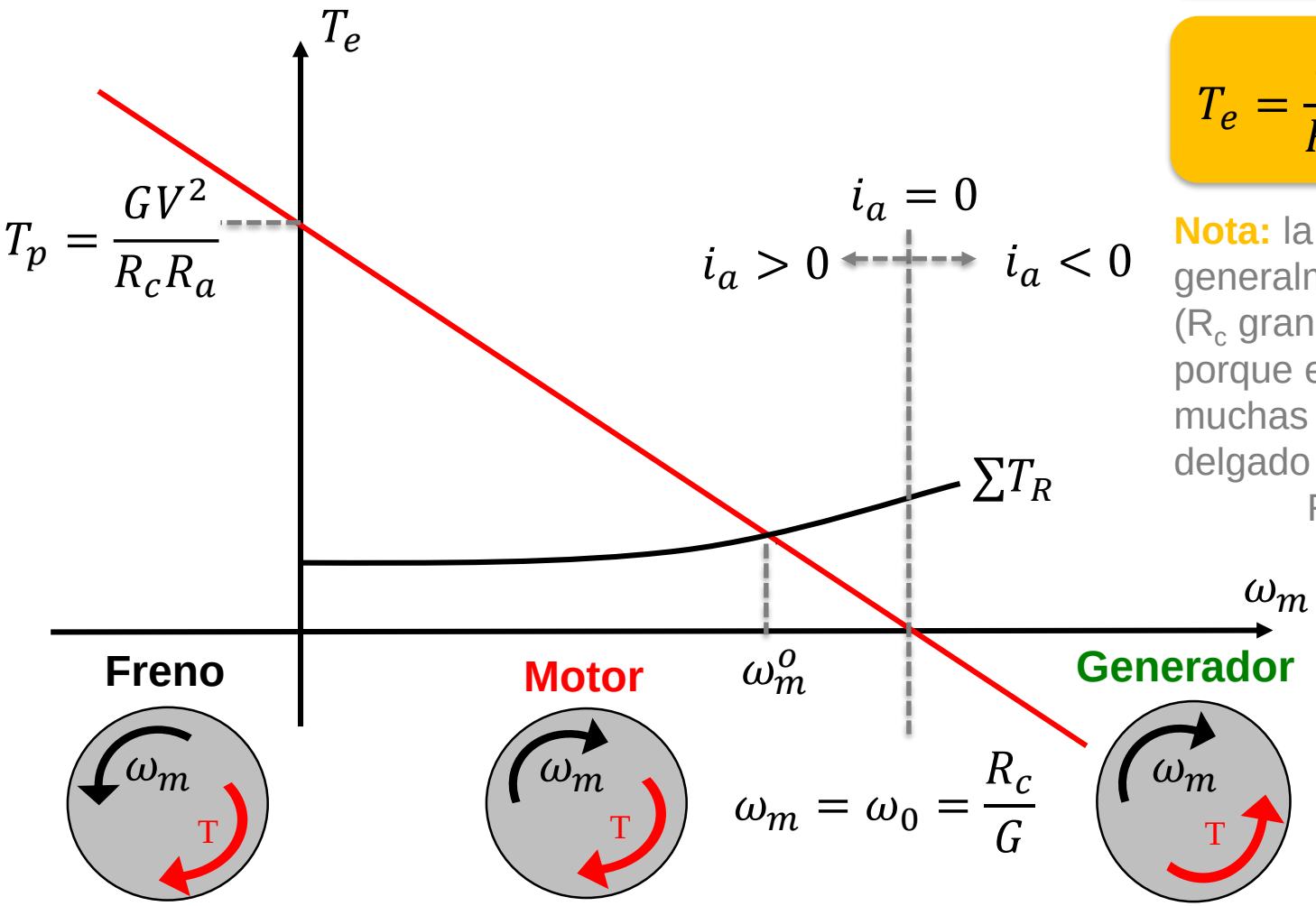
$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

$$T_e = \frac{GV^2}{R_a R_c} - \frac{G^2 V^2}{R_a R_c^2}\omega_m$$

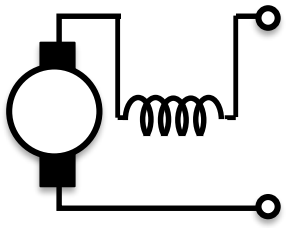
Nota: la bobina de campo generalmente es muy resistiva (R_c grande y i_c pequeño) porque es un enrollado de muchas vueltas y conductor delgado ($i \approx i_a$).

$R_c \approx$ 80 a 100 Ω

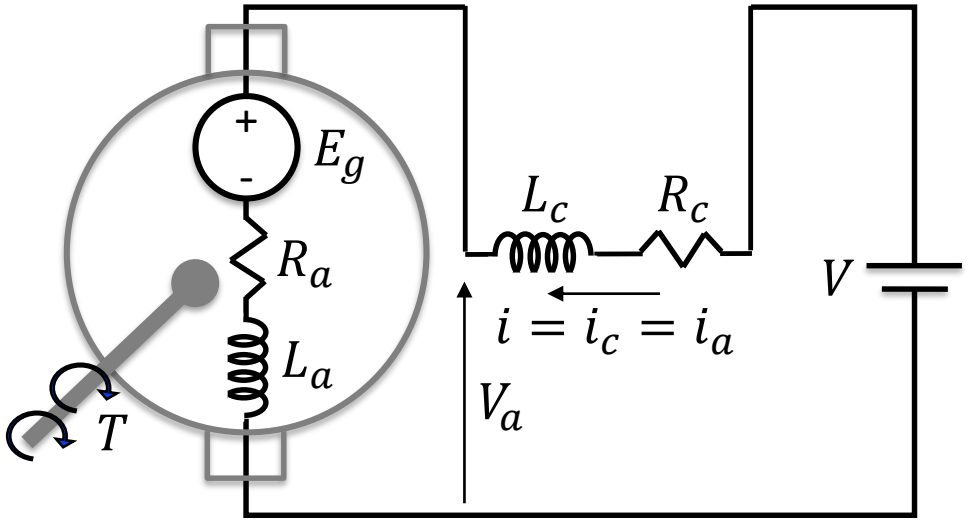
$R_a \approx$ 0,01 Ω



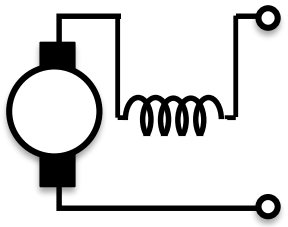
Máquina DC
Máquina Serie



Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son (motor):



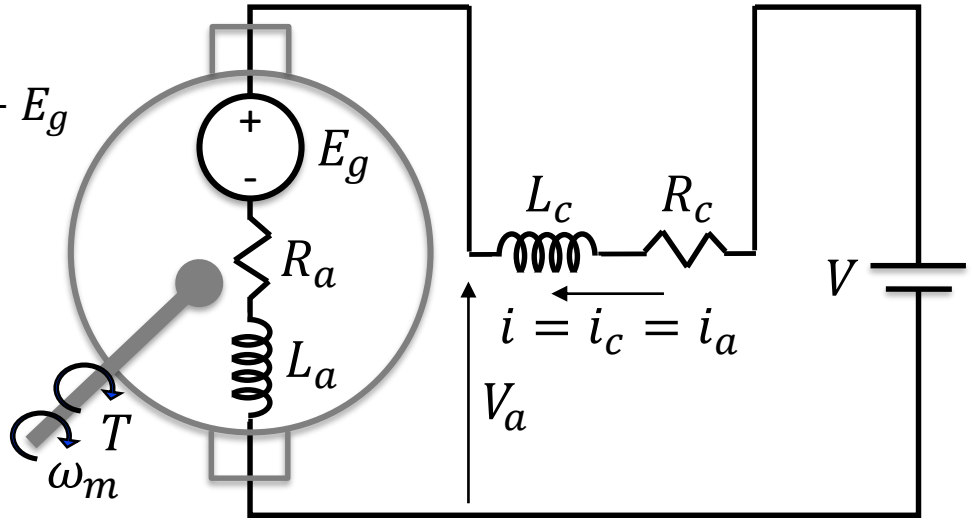
Máquina DC
Máquina Serie



Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son (motor):

$$V = V_c + V_a$$

$$V = R_c \cdot \mathrm{i}_c + L_c \frac{di_c}{dt} + R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_g$$



El balance de torque es:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - \sum T_R = G i^2 - \sum T_R$$

En **régimen permanente** tenemos:

$$V = (R_c + R_a) \cdot i + E_g$$

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i$$

$$V = (R_c + R_a) \cdot i + G \cdot \omega_m \cdot i$$

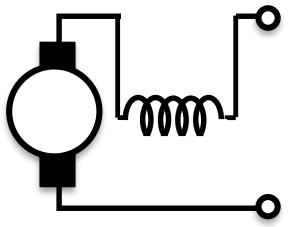
$$i = \frac{V}{R_c + R_a + G \cdot \omega_m}$$

$$T_e = G \cdot i^2$$

$$i = G \frac{V^2}{(R_c + R_a + G \cdot \omega_m)^2}$$

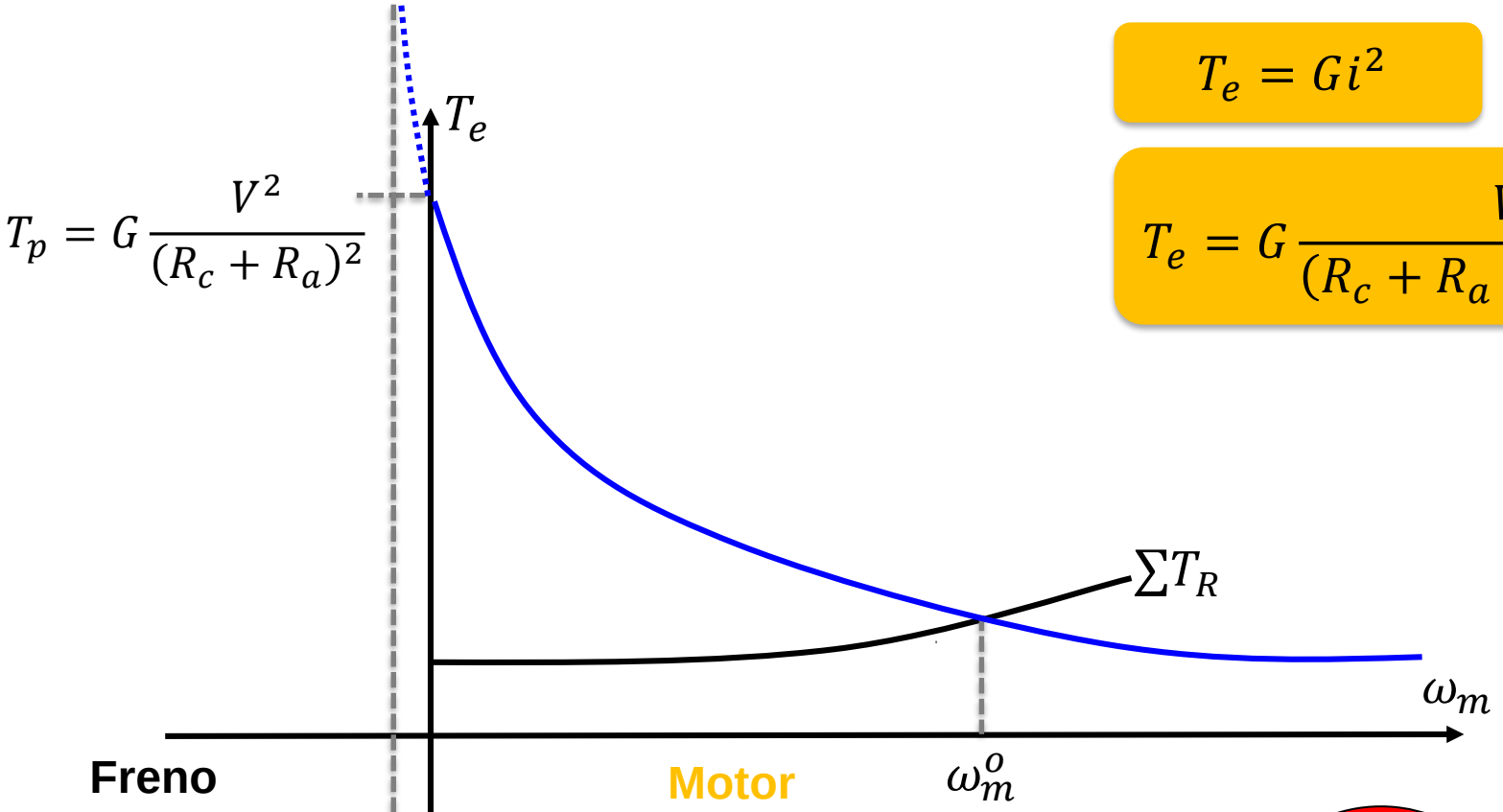
Máquina DC

Máquina Serie

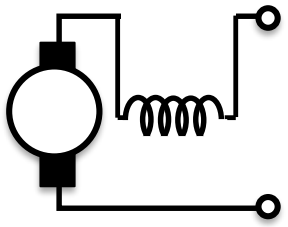


$$T_e = Gi^2$$

$$T_e = G\frac{V^2}{(R_c + R_a + G \cdot \omega_m)^2}$$



Máquina DC
Máquina Serie

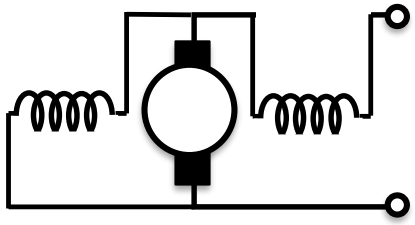


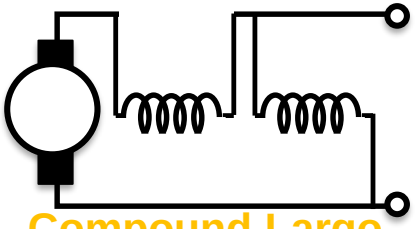
La máquina serie operando como motor **no tiene transición** a generador y viceversa. Esto se explica por el hecho de que cuando la corriente empieza a decrecer, afecta también a la excitación, reduciendo el voltaje inducido Eg.

El motor además no tiene velocidad definida en vacío ($\omega_0 \rightarrow \infty$). Esta máquina operando en vacío se **embala**. Por lo tanto, no es un motor que pueda dejarse operando sin carga o con cargas mecánicas débiles.

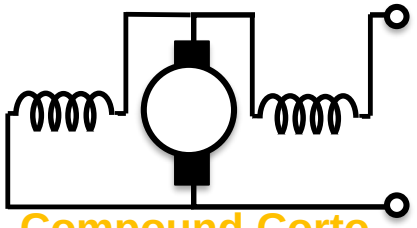
El motor serie presenta **torques de partida** elevadísimos, por lo cual fue ampliamente utilizado en tracción. (Ferrocarriles, Metros, Trolebuses)

Máquina DC
Máquina Compound

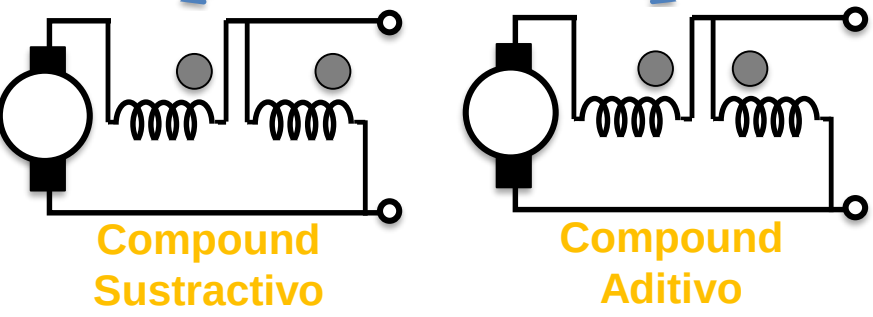




Compound Largo

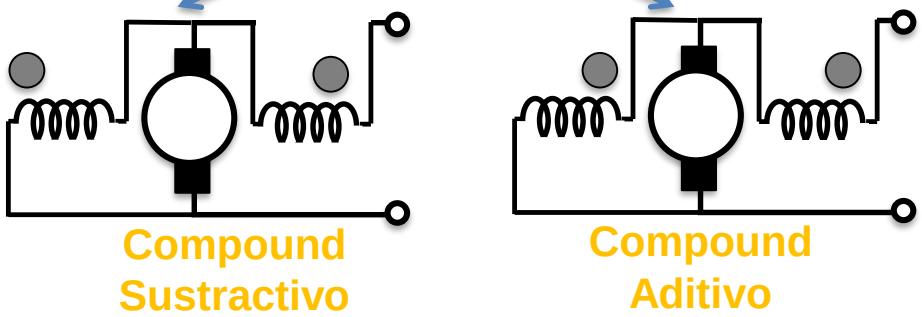


Compound Corto



Compound Sustractivo

Compound Aditivo



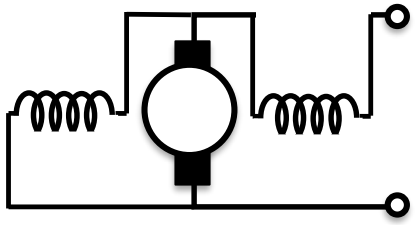
Compound Sustractivo

Compound Aditivo

Caracteristicas de las bobinas de campo:

- La **bobina en serie** tiene una baja resistencia (similar a la de armadura).
- La **bobina en paralelo** tiene un alta resistencia (cientos o miles de veces mayor a la de armadura y serie).
- En concecuencia, el **compound largo y corto** no tienen mayor diferencia.
- La compound **sustractiva** practicamente no se utiliza (inestable)

Máquina DC
Máquina Compound

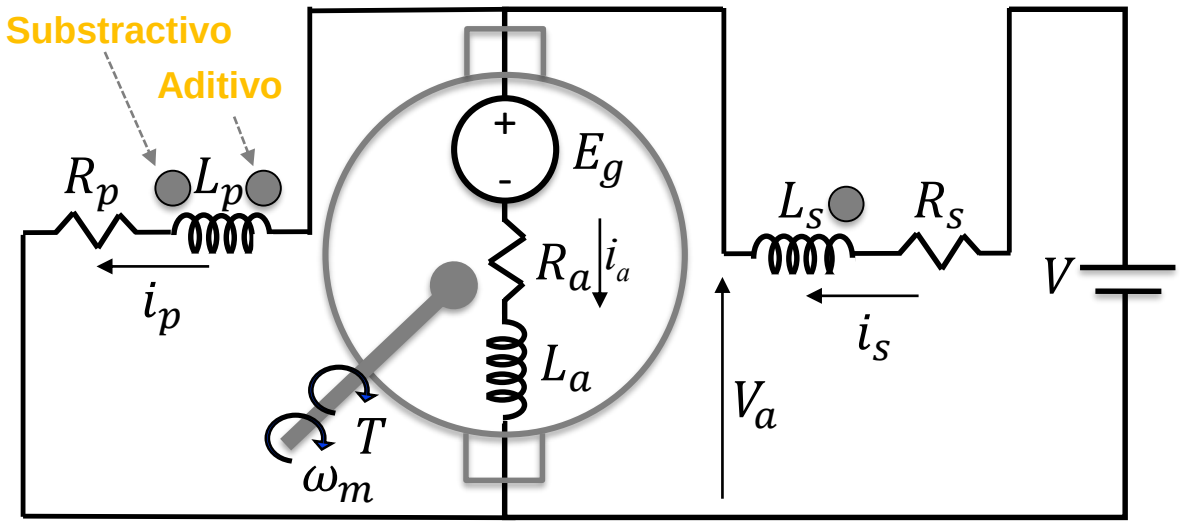


Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son (motor):

$$V = R_s \cdot \mathrm{i}_s + L_s \frac{di_s}{dt} + V_a$$

$$V_a = R_p \cdot \mathrm{i}_p + L_p \frac{di_p}{dt}$$

$$V_a = R_a \cdot \mathrm{i}_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_g$$



El balance de torque es:

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = T_e - \sum T_R = Gi^2 - \sum T_R$$

En **régimen permanente** tenemos (R_p muy alta y R_s muy baja):

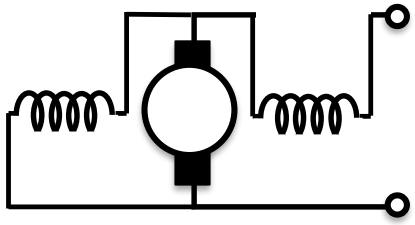
$$V = R_s \cdot \mathrm{i}_s + V_a$$

$$V_a = R_p \cdot \mathrm{i}_p$$

$$V_a = R_a \cdot \mathrm{i}_a + E_g$$

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad T_e = Gi_c i_a = \sum T_R$$

Máquina DC
Máquina Compound



Las **ecuaciones dinámicas** del circuito equivalente son (motor):

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c \quad \xrightarrow{\text{superposición}} \quad E_g = G_s \cdot \omega_m \cdot i_s + G_p \cdot \omega_m \cdot i_p$$

$$G_s = \frac{N_s \cdot N_r}{\Re} \qquad G_p = \frac{N_p \cdot N_r}{\Re} \quad \Rightarrow \quad \frac{G_s}{G_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c \quad \xrightarrow{\text{superposición}} \quad T_e = G_s \cdot i_s \cdot i_a + G_p \cdot i_p \cdot i_a \quad \xrightarrow{i_s \approx i_a} \quad T_e = G_s \cdot i_a^2 + G_p \cdot i_p \cdot i_a$$

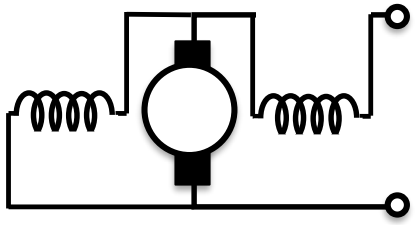
$$T_e = \frac{E_g \cdot i_a}{\omega_m}$$

Remplazando todas las ecuaciones se puede obtener una ecuación de torque precisa pero con una gran cantidad de términos, lo que no es práctico.

Por otro lado, podemos ver que la máquina compound puede expresarse como la suma de dos torques, un torque de la rama en serie y otro de la rama en paralelo, cuyos términos podemos obtener de estas máquinas.

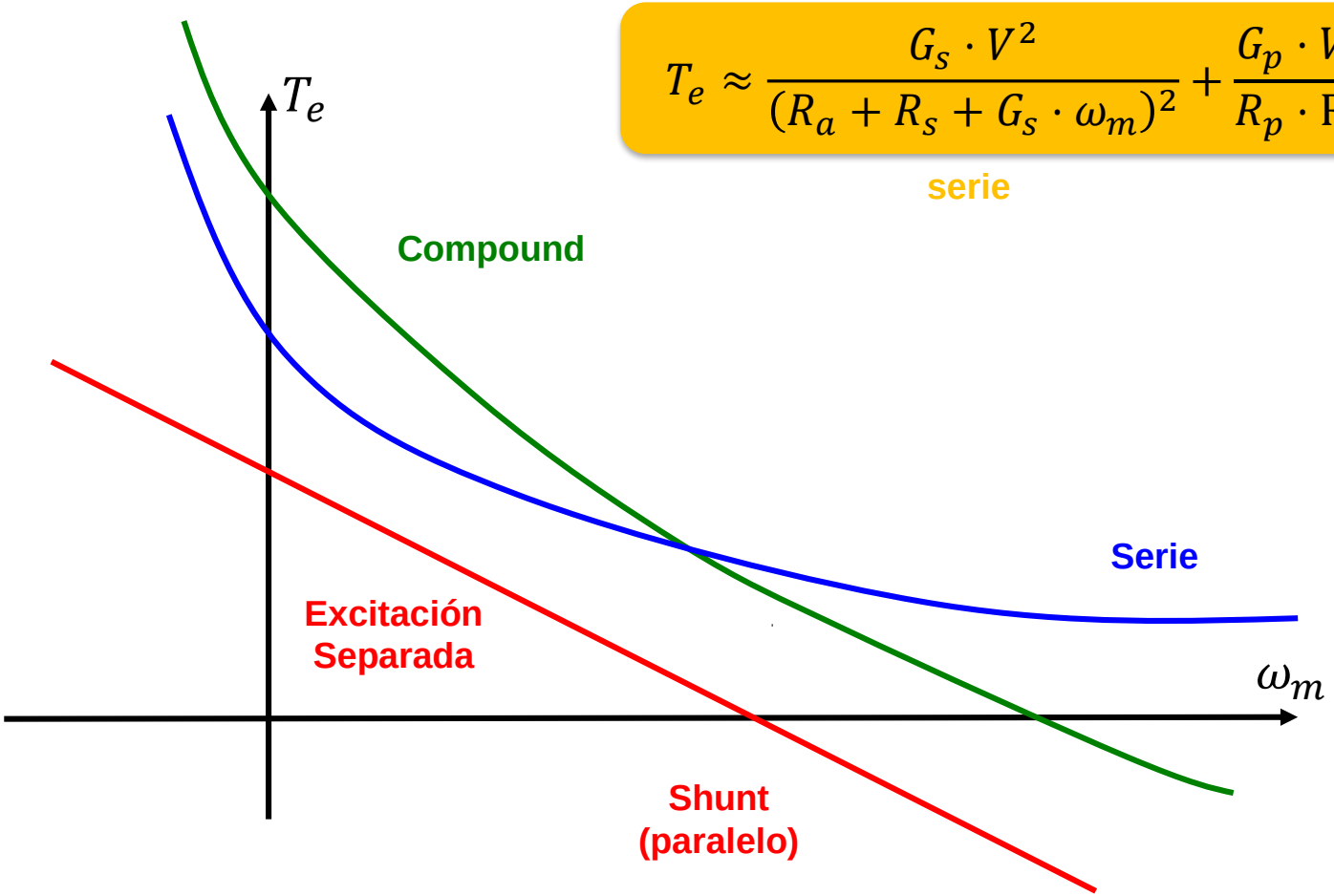
$$T_e \approx \underbrace{\frac{G_s \cdot V^2}{(R_a + R_s + G_s \cdot \omega_m)^2}}_{\text{serie}} + \underbrace{\frac{G_p \cdot V_a^2}{R_p \cdot R_a} - \frac{G_p^2 \cdot V_a^2}{R_a \cdot R_p^2}\omega_m}_{\text{paralelo}} \qquad V_a \approx V$$

Máquina DC
Máquina Compound

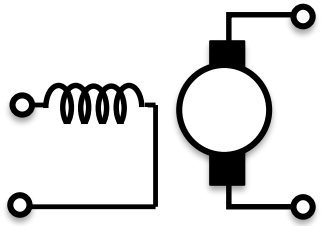


$$T_e \approx \frac{G_s \cdot V^2}{(R_a + R_s + G_s \cdot \omega_m)^2} + \frac{G_p \cdot V_a^2}{R_p \cdot \mathrm{R}_a} - \frac{G_p^2 \cdot V_a^2}{R_a \cdot R_p^2}\,\omega_m$$

serie paralelo



Generador DC
Máquina de Excitación Separada

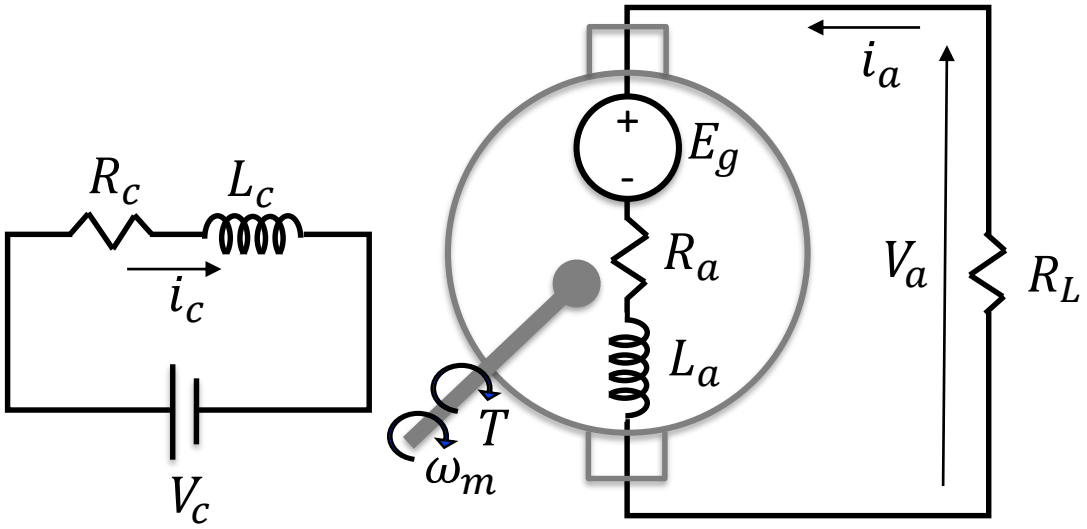


Operación como Generador: Cuando se opera como generador la corriente de armadura es negativa porque el voltaje inducido E_g es mayor que el voltaje en bornes V_a:

$$E_g > V_a \Rightarrow i_a < 0$$

El balance de torque es:

$$T_e = G i_c i_a = \sum T_R$$



El **torque electromagnético es negativo** debido al signo de la corriente de armadura, lo que significa que es un torque resistente al giro (las ecuaciones son las mismas que en la operación como motor):

$$V_c = R_c \cdot i_c \Rightarrow i_c = V_c / R_c$$

$$V_a = R_a \cdot i_a + E_g \Rightarrow i_a = \frac{V_a - E_g}{R_a}$$

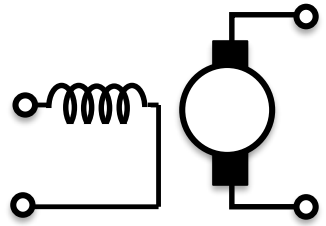
$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

$$\Rightarrow T_e = \frac{G V_c V_a}{R_a R_c} - \frac{G^2 V_c^2}{R_a R_c^2} \omega_m$$

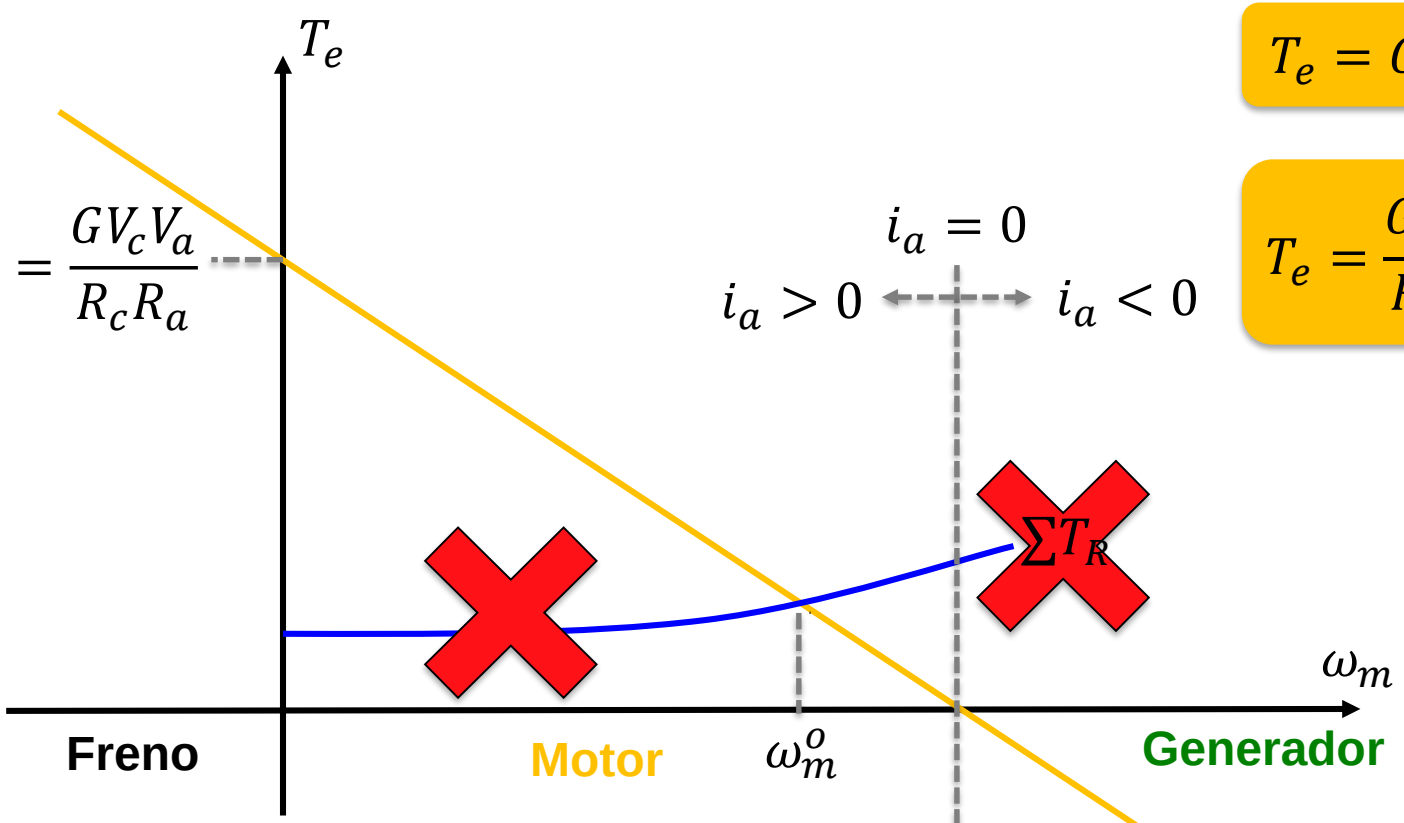
Generador DC

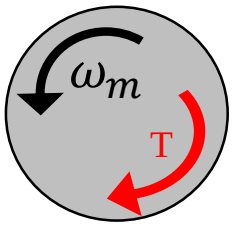
Máquina de Excitación Separada

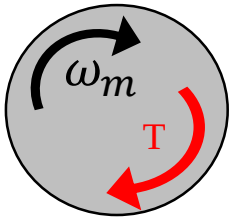


$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

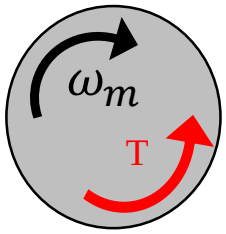
$$T_e = \frac{GV_cV_a}{R_aR_c} - \frac{G^2V_c^2}{R_aR_c^2}\omega_m$$



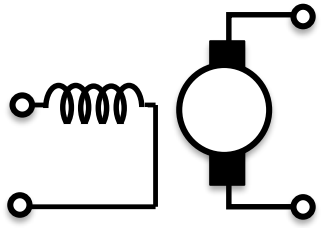




$$\omega_m = \omega_0 = \frac{R_cV_a}{GV_c}$$

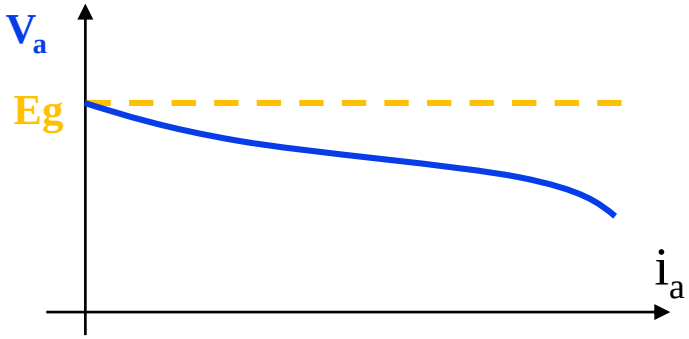


Generador DC
Máquina de Excitación Separada



Característica de Carga: Es el voltaje en bornes del generador en función de la corriente de carga manteniendo E_g constantes (velocidad y campo constantes):

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$



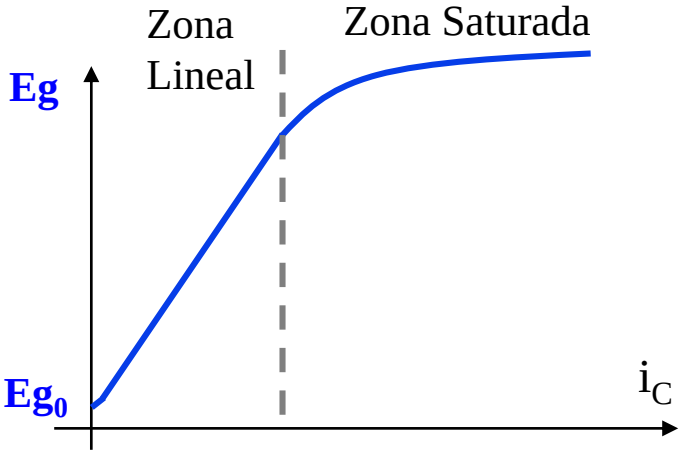
ω_m= cte
i_c = cte

Característica en Vacío: Es el voltaje inducido (E_g =V_a en vacío) en función de la corriente de campo (i_c) a velocidad constante y en vacío (i_a=0).

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

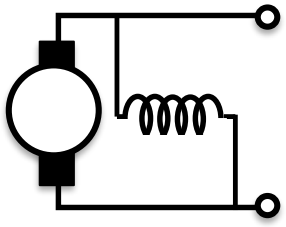
La ecuación es valida sólo en la parte lineal porque se asume G=cte, pero la relación E_g-ω se cumple incluso en saturación manteniendo ic.

$$\frac{E_g\Big|^{\omega_1}}{E_g\Big|^{\omega_2}} = \frac{G \cdot \omega_1 \cdot i_c}{G \cdot \omega_2 \cdot i_c} = \frac{\omega_1}{\omega_2}\Bigg|^{i_c=cte}$$



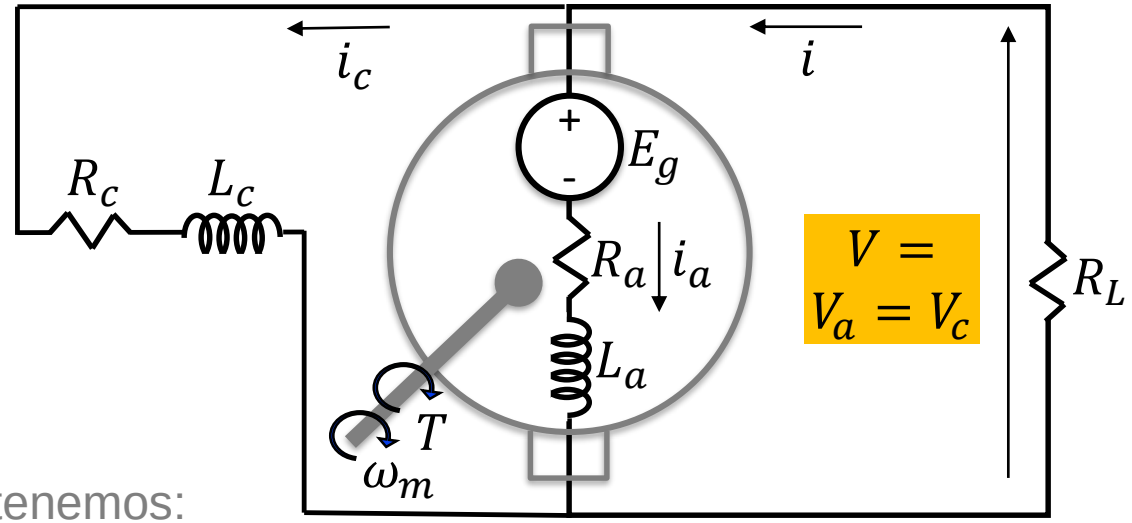
ω_m= cte
i_a = 0

Generador DC
Máquina Shunt (paralela)



Operación como Generador: De forma similar al generador de excitación separada tenemos:

$$E_g > V_a \Rightarrow i_a < 0$$



El balance de torque es igual:

$$T_e = G i_c i_a = \sum T_R$$

El **Torque debe ser negativo** tenemos:

$$V = R_c \cdot i_c \Rightarrow i_c = V/R_c$$

$$V = R_a \cdot i_a + E_g \Rightarrow i_a = \frac{V - E_g}{R_a}$$

$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

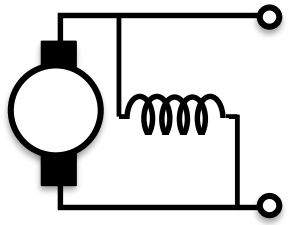
$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

$$\Rightarrow T_e = \frac{GV^2}{R_a R_c} - \frac{G^2 V^2}{R_a R_c^2}\omega_m$$

Importante: El problema para generar es que se debe asegurar una corriente de armadura suficiente para alimentar el campo y la carga (i debe ser negativo). Por lo tanto, se deben cumplir otras condiciones especiales.

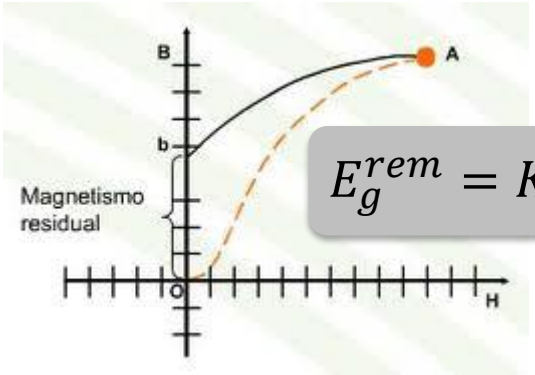
Generador DC

Máquina Shunt (paralela)



Condiciones de operación como generador:

Flujo remanente: Núcleo del estator compuesto por material magnético con lazo de histéresis abierto para permitir la existencia de flujo remanente. De este modo, la máquina podrá generar una pequeña tensión remanente, suficiente para alimentar el campo.



$$E_g^{rem} = K \cdot \omega_m \cdot \varphi_r$$

Flujo remanenete debe potenciarse con el flujo de campo: Si la corriente generada por el flujo remanente es tal, que produce un flujo φ_c en el mismo sentido φ_r, el valor de E_g aumentará hasta un valor de equilibrio dado por la saturación del núcleo magnético. En caso contrario E_g se anula y la máquina no genera.

Resistencia de campo menor a un valor critico (R_c<$R_{critico}$): Si la resistencia del enrollado de campo es demasiado elevada, no permitirá que circule la corriente suficiente para elevar el flujo. Existe un valor crítico de la resistencia de campo, más allá del cual la máquina genera una tensión muy débil (tensión de flujo remanente). Este valor de $R_{critico}$ depende de la máquina.

Generador DC

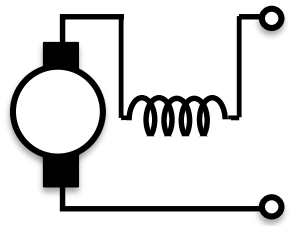
¿Y la máquina Serie?

¿Condiciones de operación como generador?

¿Puede operar en vacío?

¿Desventajas?

¿Control y estabilidad del voltaje?



Generador DC

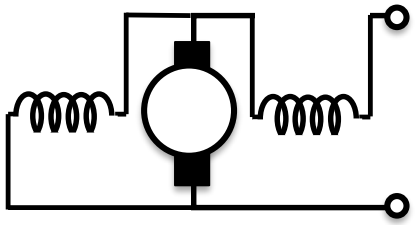
¿Y la máquina Compound?

¿Condiciones de operación como generador?

¿Puede operar en vacío?

¿Ventajas?

¿Control y estabilidad del voltaje?



Máquina DC
Control de Partida

Problema: Durante el arranque de una máquina DC se pueden generar altas corrientes debido a que las resistencias de los bobinados son relativamente bajas y el voltaje inducido es proporcional a la velocidad, por lo tanto en la partida no hay una f.e.m que reduzca la corriente del circuito.

Durante el arranque se cumple que:

$$V = R \cdot i \qquad E_g = 0 \quad (\omega_m = 0)$$

	Separada	Shunt	Serie	Compound
R	R_a	R_a	$R_a + R_s$	$R_a + R_s$
i	i_a	i_a	i	i_a , i

Solución: reducir el voltaje de alimentación durante el arranque, lo que se puede lograr mediante los siguientes métodos:

1. Conexión de resistencias en serie con la armadura
2. Fuente de alimentación variable (fuente de corriente o voltaje controlada)

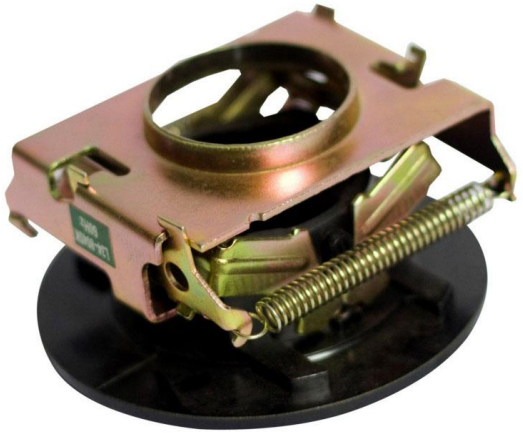
Máquina DC

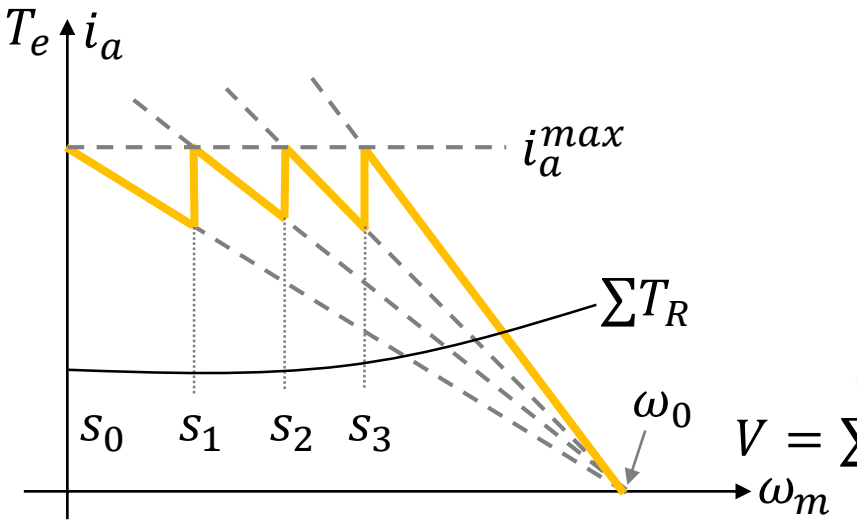
Control de Partida: 1. Resistencias

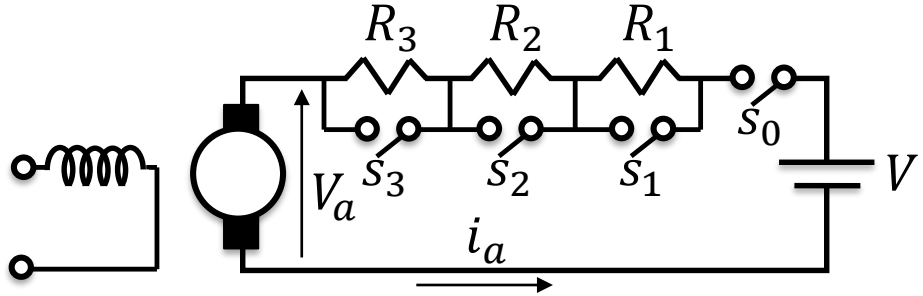
Se utiliza un reóstato (resistencia variable) o varias resistencias conectadas en serie mediante interruptores con el fin de que la resistencia de todo el circuito sea mayor a la partida y a bajas velocidades. Una vez que se alcanza una velocidad alta se desconectan todas las resistencias. Una posibilidad es usar interruptores centrífugos.

$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

$$T_p = \frac{G V_c V_a}{R_c R_a}$$

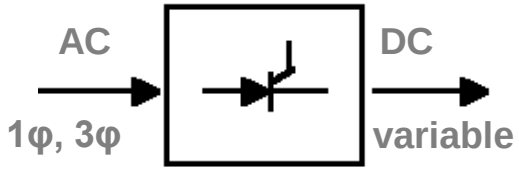






$$V = \sum R_i \cdot i_a + V_a = (R_a + \sum R_i) \cdot i_a + G \cdot \omega_m \cdot i_c$$

Máquina DC



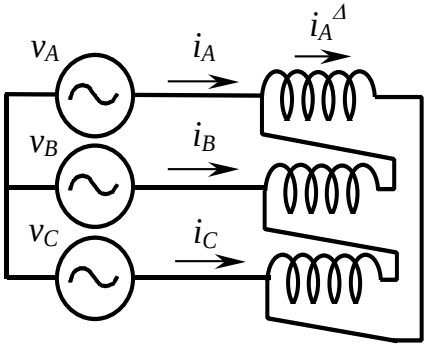
Control de Partida: 2. Fuente Variable

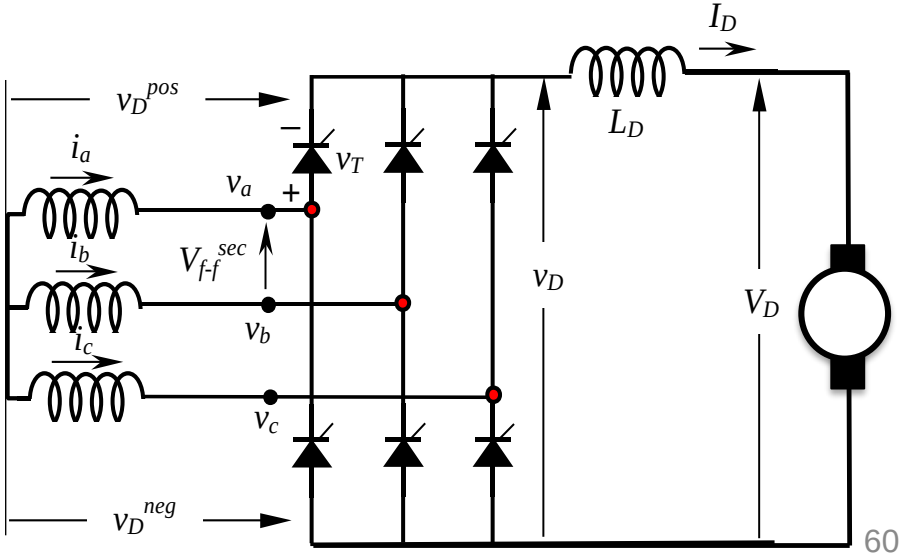
2.1. Conversor Electrónico AC-DC: Existen variados conversores electrónicos que pueden entregar un voltaje DC variable y controlado desde una fuente AC (red monofásica, trifásica, etc.). Acá se ilustra un ejemplo de un rectificador de onda completa trifásico controlado con tiristores (semiconductor que funciona como el diodo pero tienen un control de encendido, seleccionando el ángulo α={0-180º} en el cual comienza a conducir):

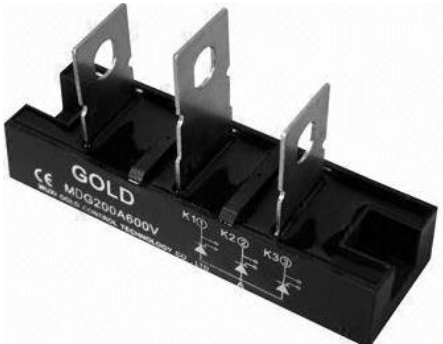


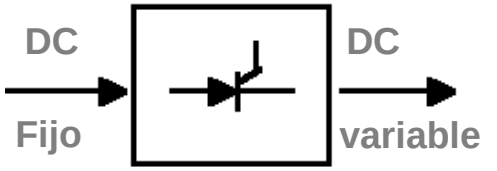


$$V_D \approx 2.34 \cdot V_{f-N}^{rms} \cdot \cos\alpha$$







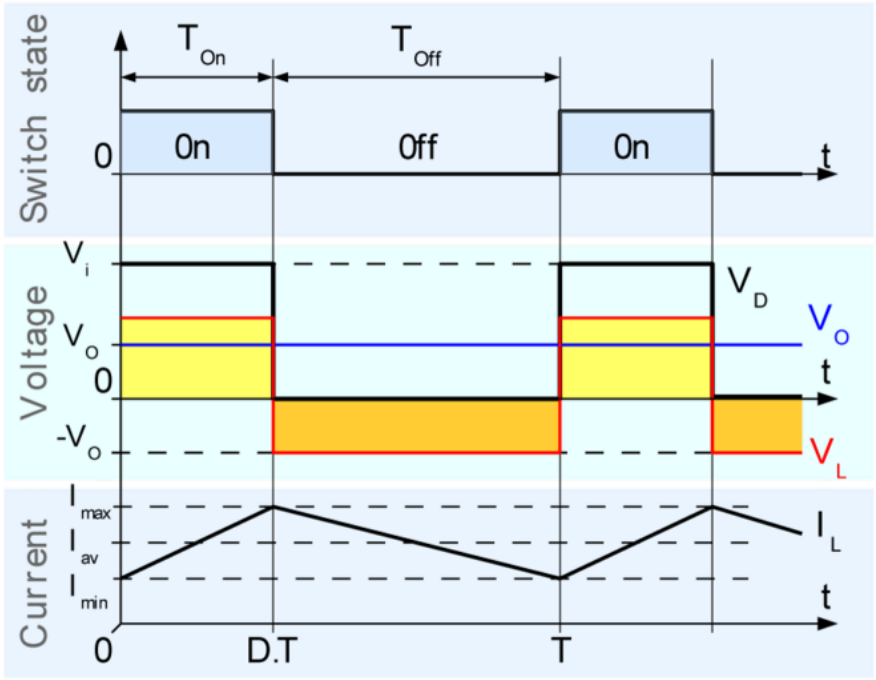


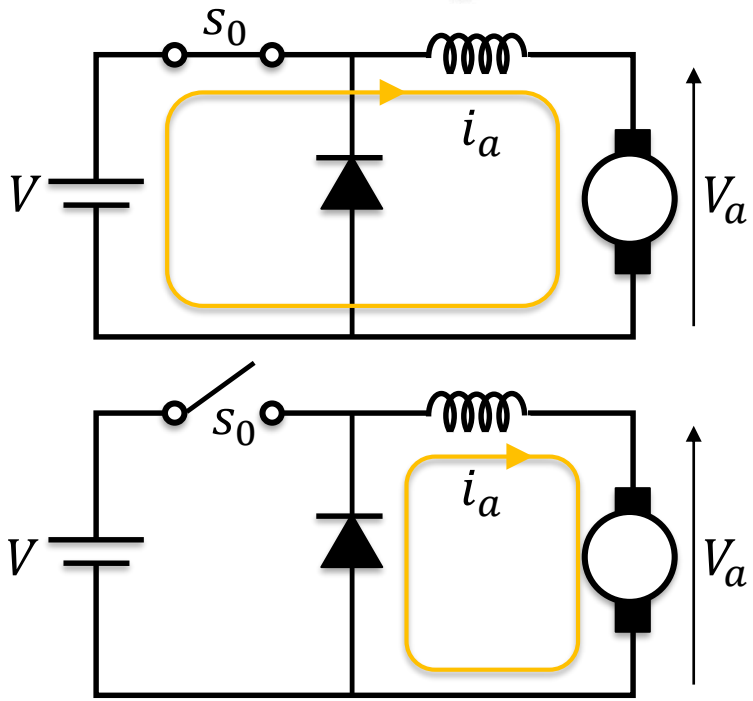
Máquina DC

Control de Partida: 2. Fuente Variable

2.2. Conversor Electrónico DC-DC: Existen variados conversores electrónicos que pueden entregar un voltaje DC variable y controlado desde una fuente DC (batería, generador DC, rectificador, etc.). Acá se ilustra un ejemplo de un “chopper” buck que entrega un voltaje en la carga igual o menor al de la fuente:







Máquina DC

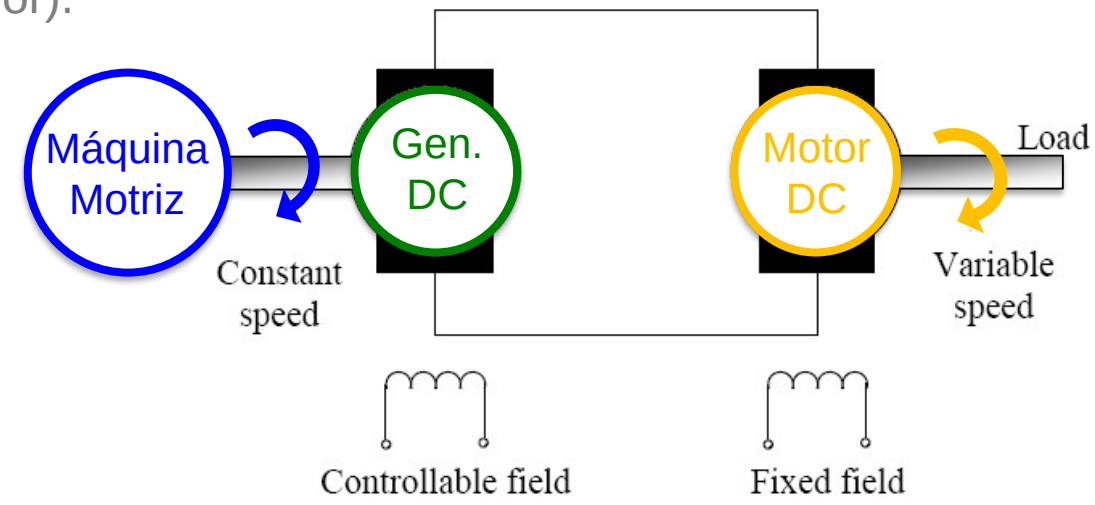
Control de Partida: 2. Fuente Variable

2.3. Grupo Ward-Leonard: Método para generar un voltaje controlado.

- **Máquina Motriz:** Puede ser un motor DC, AC (inducción ó síncrono), motor diesel, una turbina, etc.
- **Generador DC:** máquina DC de excitación separada con corriente de campo manipulada para controlar el voltaje generado.

$$E_g = G \cdot \omega_m \cdot i_c \quad \Rightarrow \quad V_a = R_a \cdot i_a + E_g$$

- **Motor DC:** originalmente era de excitación separada pero puede ser cualquiera (no requiere de resistencias variables, todo se controla desde el generador).



Máquina DC
Control de Velocidad

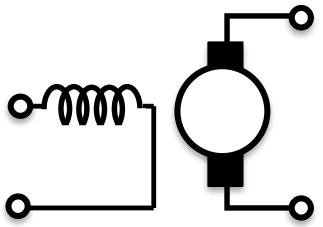
Ventaja de la máquina DC: En comparación con las máquinas AC (síncronas y de inducción), el control de velocidad de un motor DC es sumamente fácil y directo. Debido a esto, la máquina DC fue utilizada en aplicaciones donde se requería un control fino de la velocidad y del torque. Sin embargo, la electrónica de potencia y los nuevos sistemas de control han permitido que las maquinas AC se impongan a la DC en la actualidad.

Métodos de Control:

1. Variando la resistencia de la armadura.
2. Variando la fuente de alimentación (voltaje).
3. Variando la corriente de Campo.

La variación de los voltajes y corrientes se puede realizar con las mismas técnicas que en el control de partida (resistencias variables, control electrónico y grupo Ward-Leonard).

Máquina DC
Control de Velocidad



Máquina de Excitación Separada:

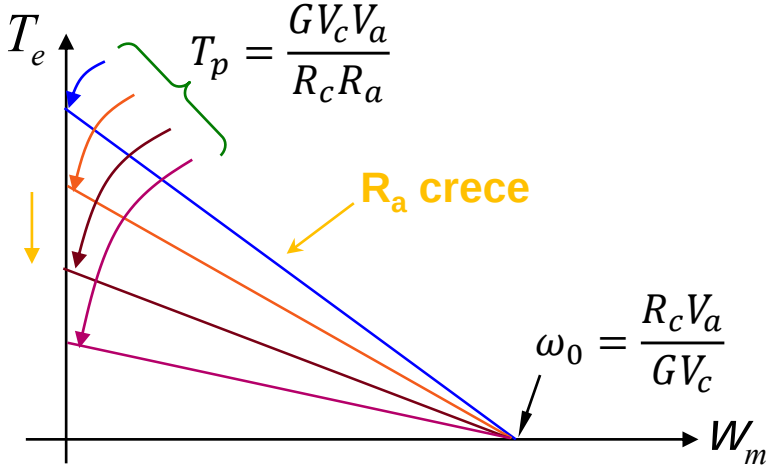
$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

$$T_e = \frac{GV_cV_a}{R_aR_c} - \frac{G^2V_c^2}{R_aR_c^2}\omega_m$$

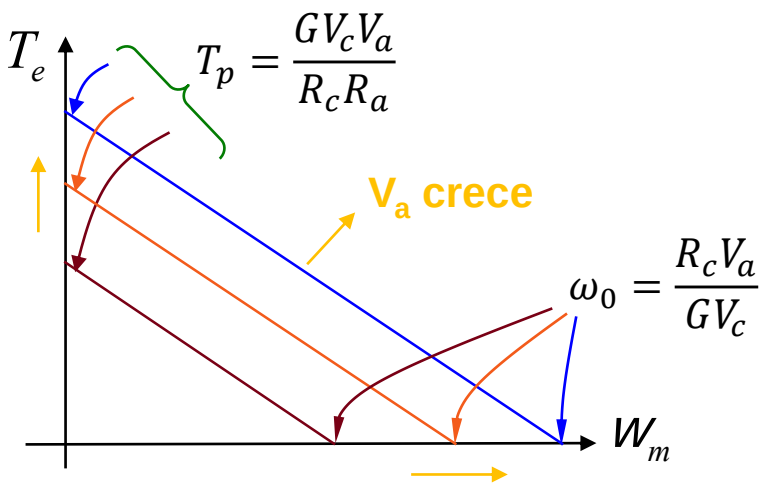
$$T_p = \frac{GV_cV_a}{R_cR_a}$$

$$\omega_0 = \frac{R_cV_a}{GV_c}$$

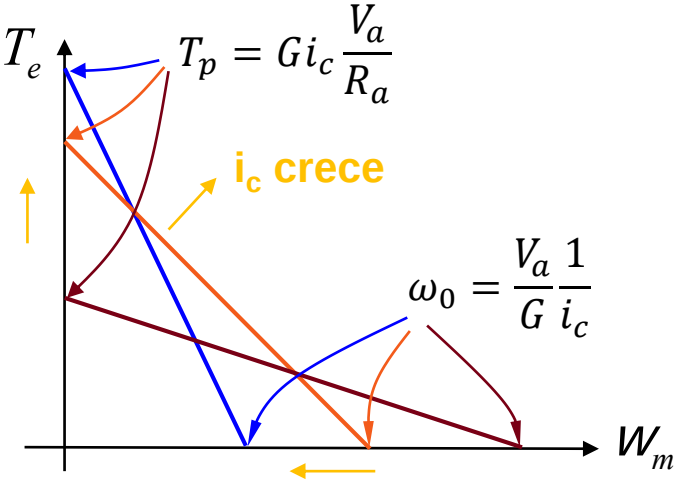
1. Variación de R_a



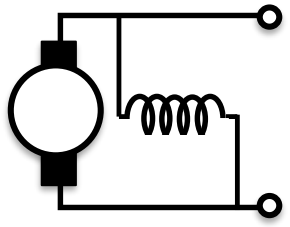
2. Variación de V_a



3. Variación de i_c



Máquina DC
Control de Velocidad



Máquina Shunt: El caso 1 y 3 no varían. El caso 2 varía al cuadrado (respecto al de excitación separada).

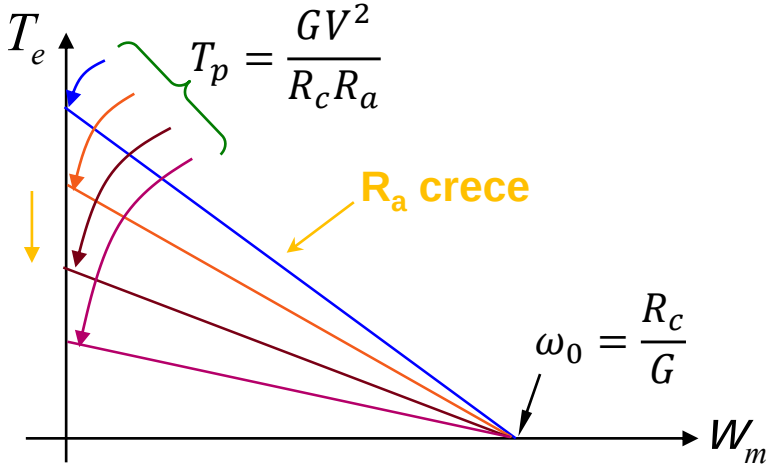
$$T_e = G \cdot i_a \cdot i_c$$

$$T_e = \frac{GV^2}{R_a R_c} - \frac{G^2 V^2}{R_a R_c^2}\omega_m$$

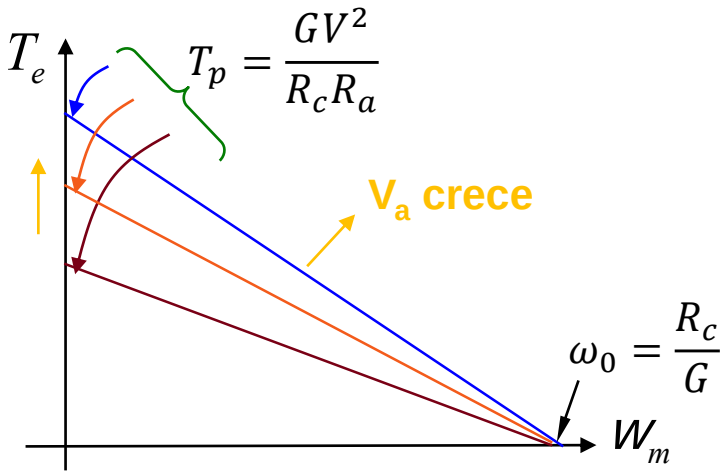
$$T_p = \frac{GV^2}{R_c R_a}$$

$$\omega_0 = \frac{R_c}{G}$$

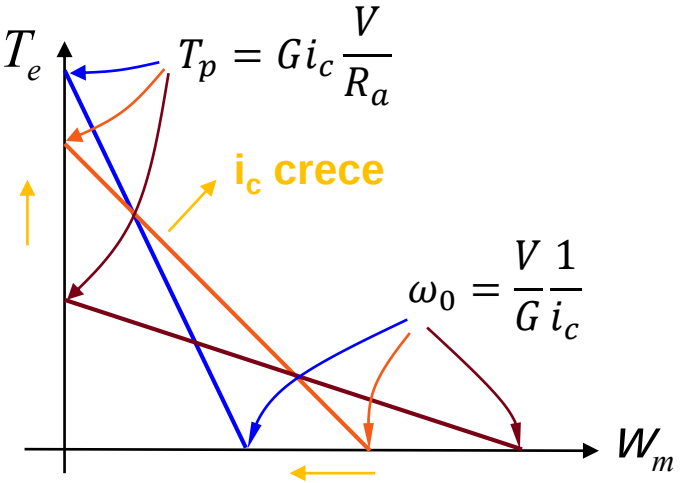
1. Variación de R_a



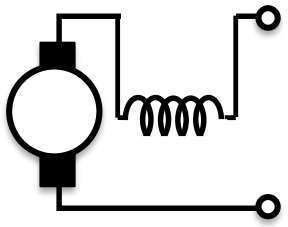
2. Variación de V_a



3. Variación de i_c



Máquina DC
Control de Velocidad

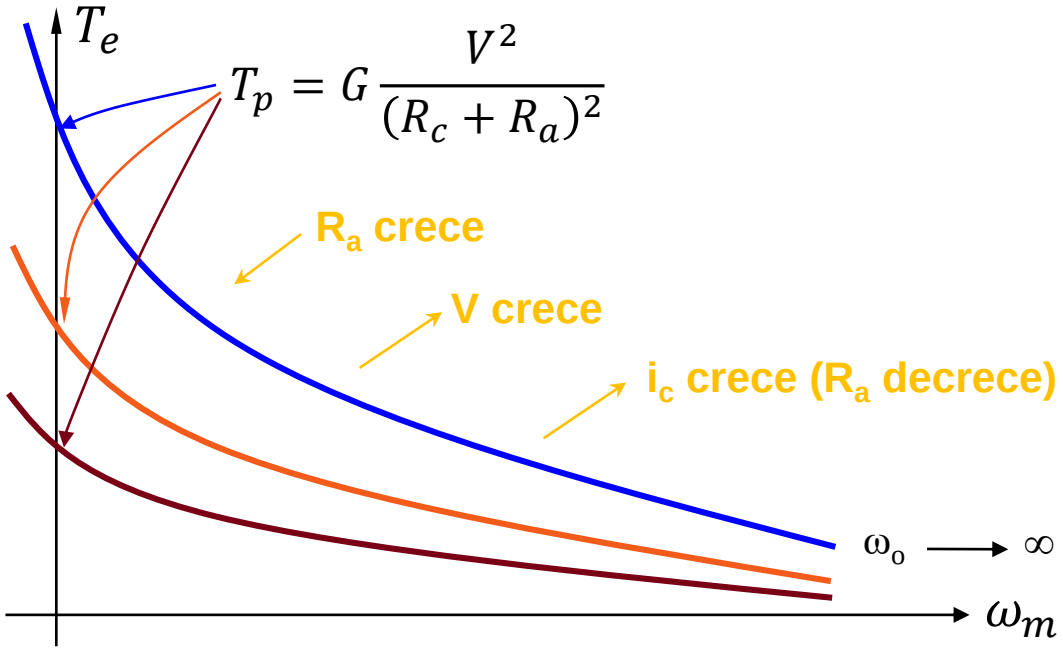


Máquina Serie: Cualquier control sobre los parámetros genera un efecto de desplazamiento de la curva de torque similar.

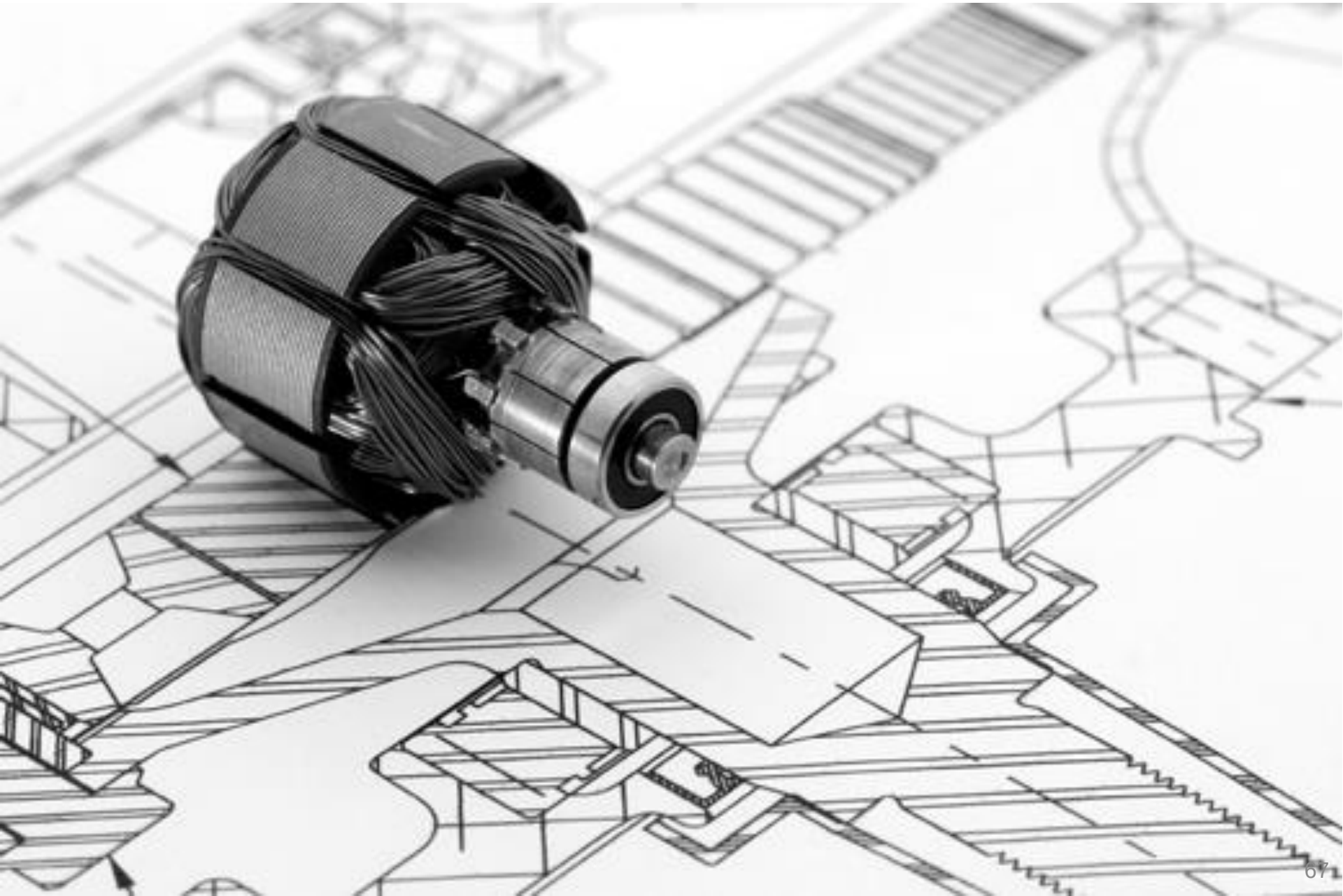
$$T_e = Gi^2$$

$$T_e = G\frac{V^2}{(R_c + R_a + G\cdot\omega_m)^2}$$

$$T_p = G\frac{V^2}{(R_c + R_a)^2}$$



Fin Lectura 8



Conclusiones

Lectura 8: Máquina DC

Características

La máquina DC opera con corrientes continuas pero genera un CMR en el rotor desde el punto de referencia rotórico mediante un colector. Una de sus grandes ventajas es su flexible y fácil control de velocidad y torque.

Tipos de Bobinas y Reacción de Armadura

Las bobinas reales son ondulados o imbricados para aprovechar el voltaje inducido en cada una de las bobinas del rotor. El rotor genera una f.m.m que interfiere con el campo magnético del estator, deformando la f.m.m. total (entrehierro) y generando un alto chisporroteo, lo cual se soluciona variando el plano de las escobillas, con devanados compensadores o interpolos.

Clasificación

Excitación separada, shunt, serie y compound (cada una con su curva de T).

Control

La máquina DC se controla mediante resistencia o voltaje variable (control de corriente) mediante resistencias, electrónica o el grupo Ward-Leonard.

Próxima Lectura

Lectura 9

Máquinas Monofásicas

