



UNIVERSIDADE
DE VIGO

Máquinas de corriente continua

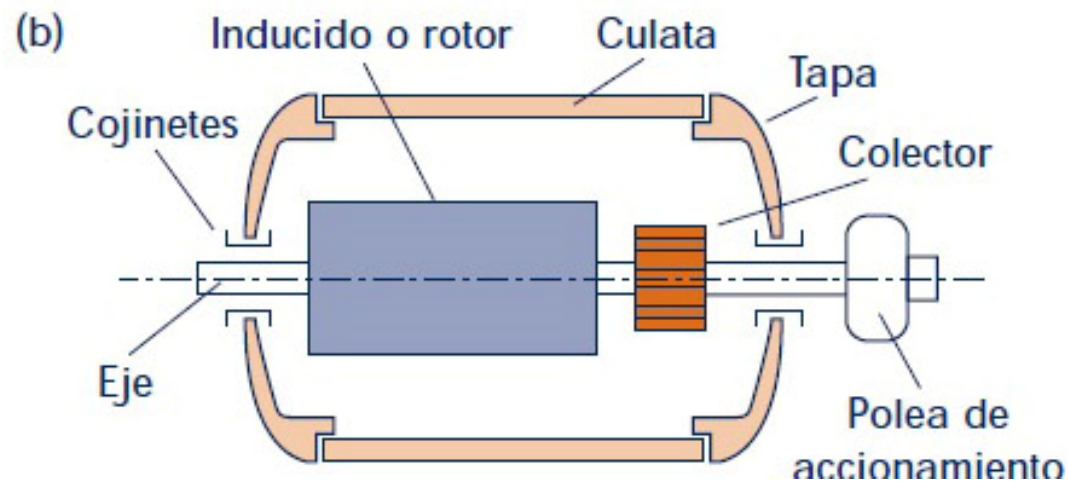
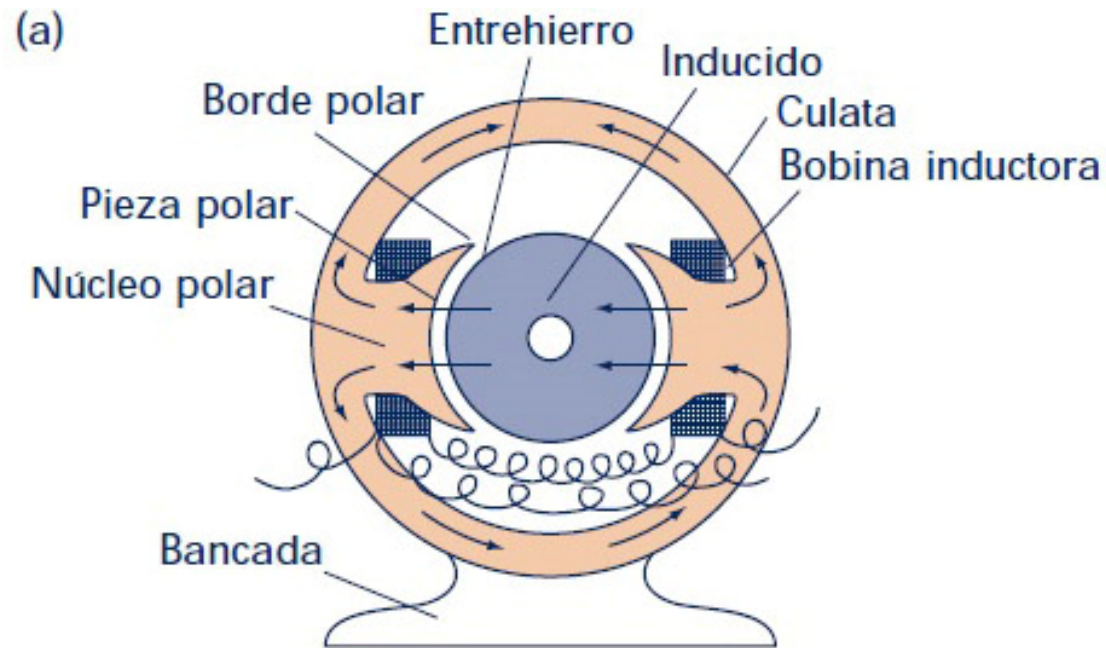
Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

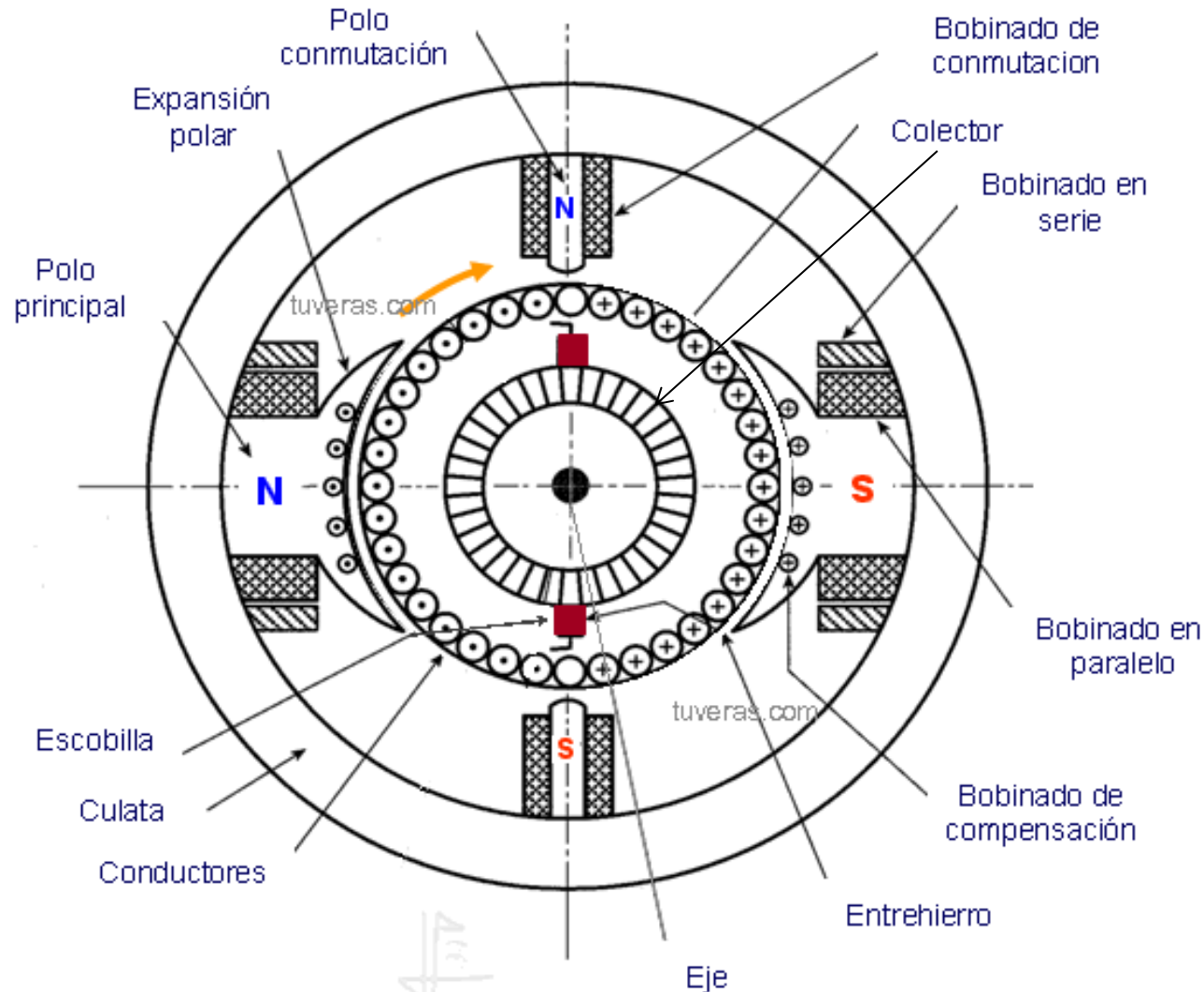
Máquinas de corriente continua

Constitución



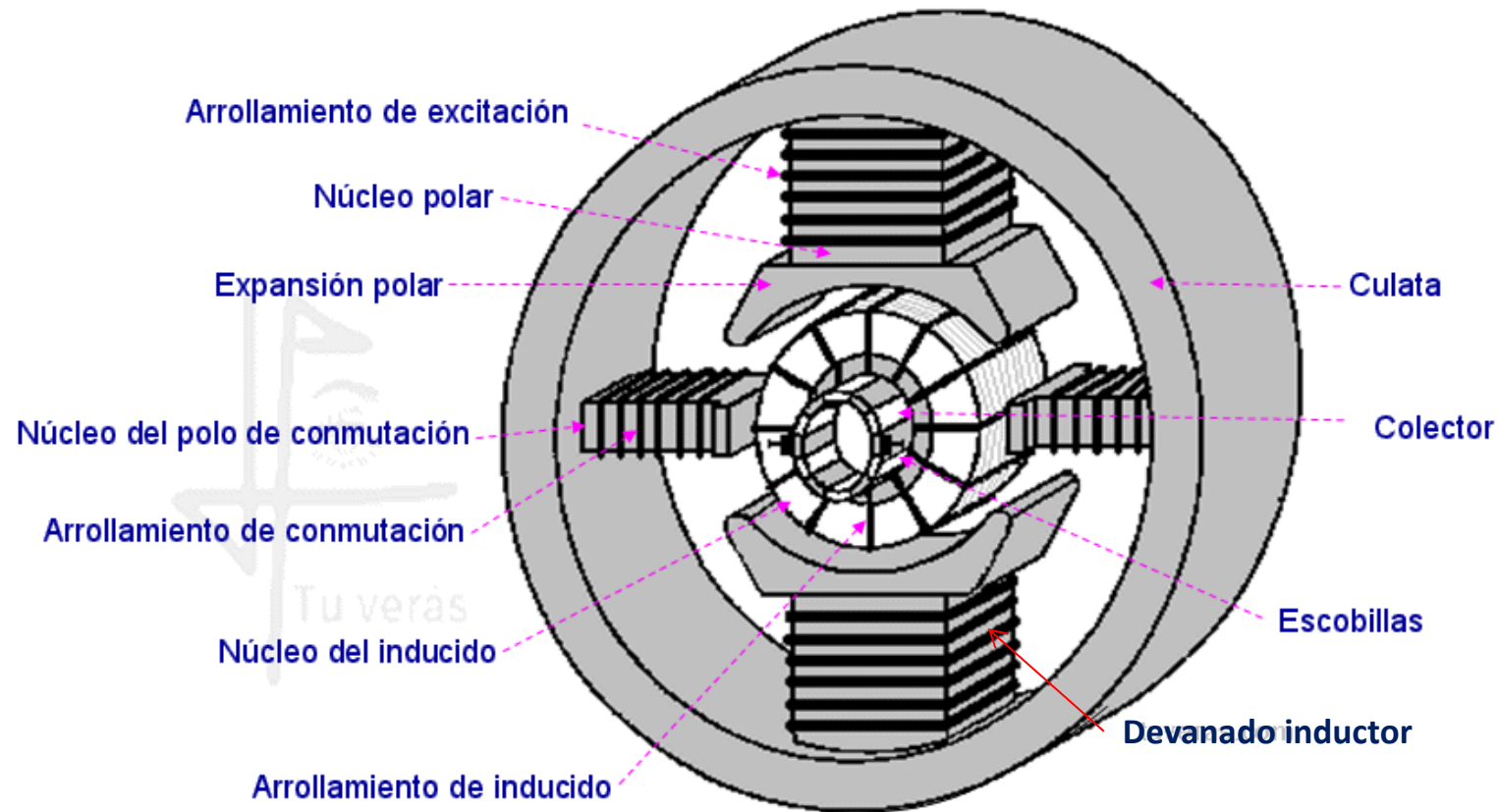
Máquinas de corriente continua

Constitución



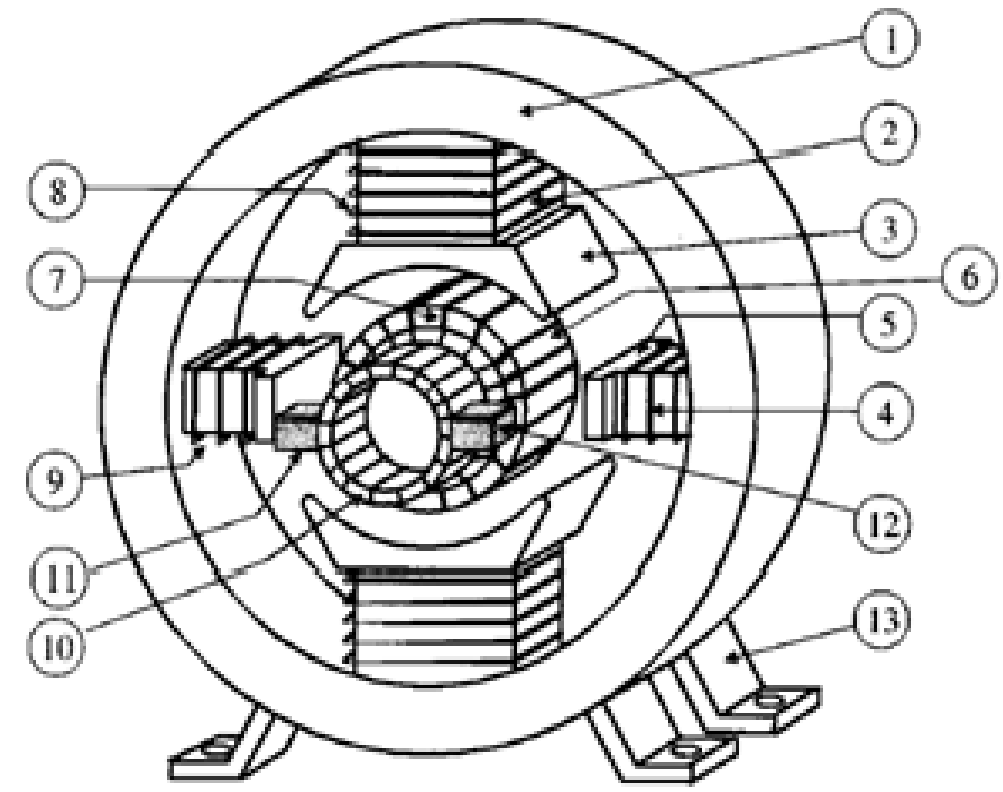
Máquinas de corriente continua

Constitución



Máquinas de corriente continua

Constitución

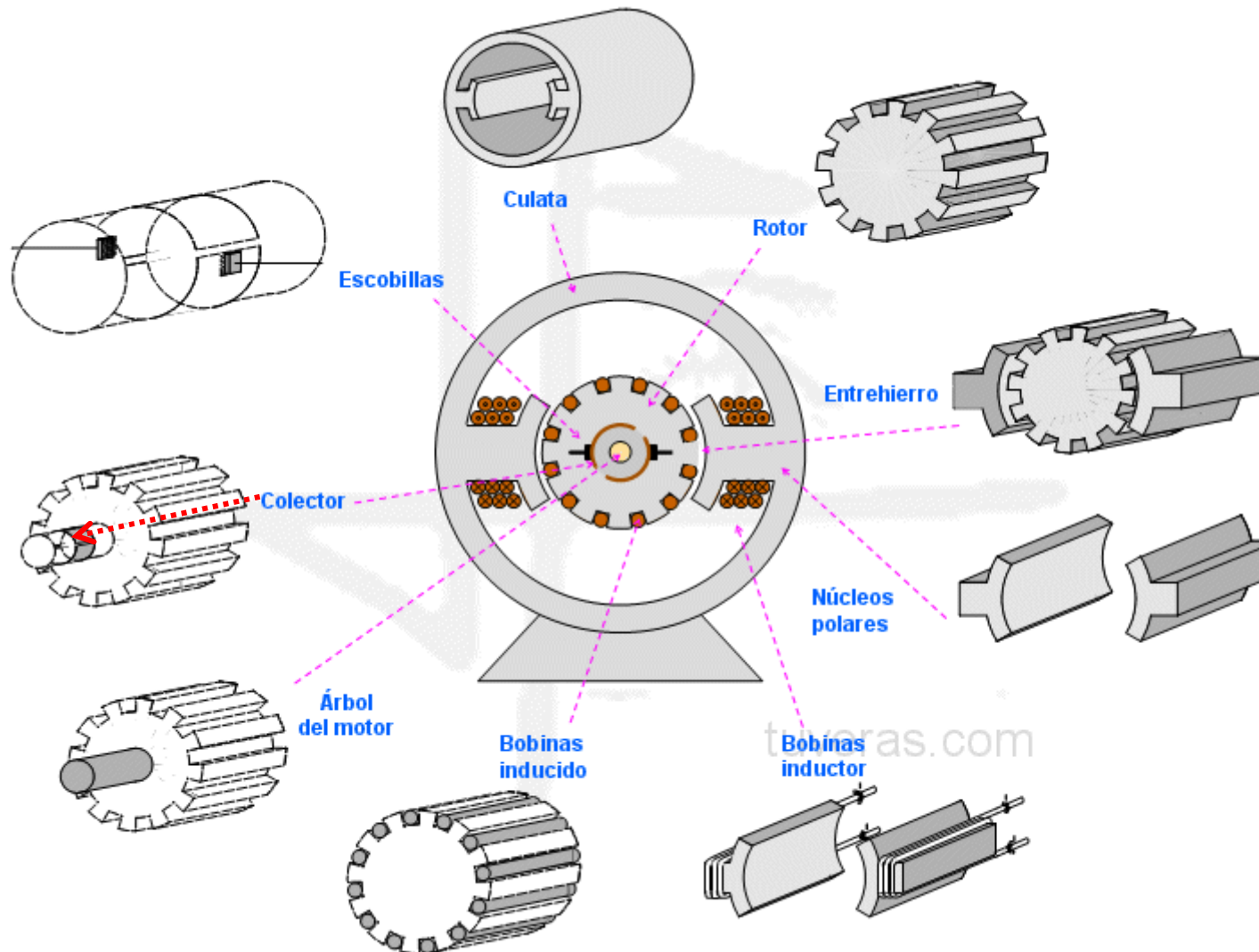


- 1- Culata
- 2- Núcleo Polar
- 3- Zapata polar
- 4- Polo auxiliar
- 5- Polo auxiliar
- 6- Inducido
- 7- Devanado del inducido
- 8- Devanado de excitación
- 9- Devanado de los polos auxiliares
- 10- Colector de delgas
- 11- Escobilla
- 12- Escobilla
- 13- Pies de la máquina

Partes constitutivas de la máquina de C.C.

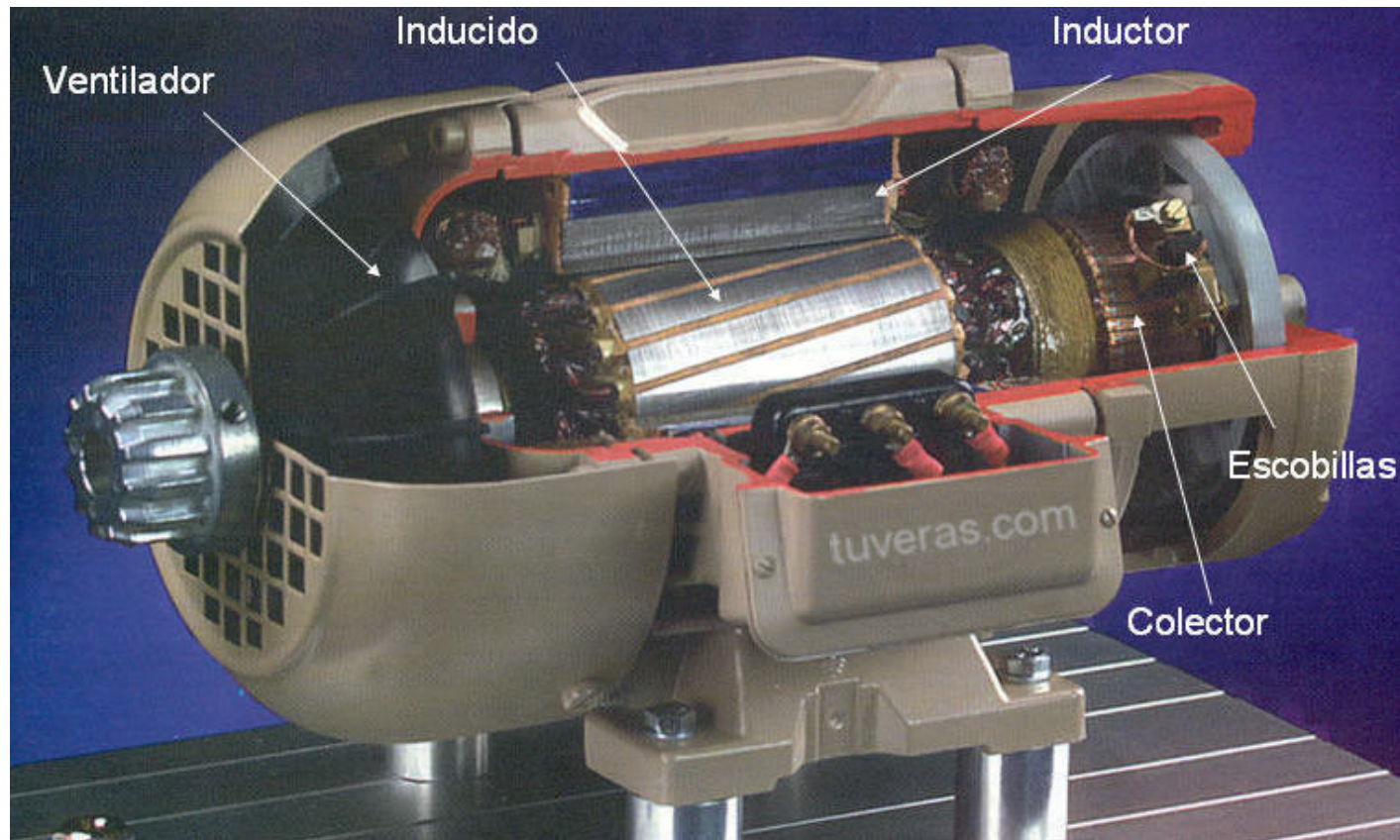
Máquinas de corriente continua

Constitución



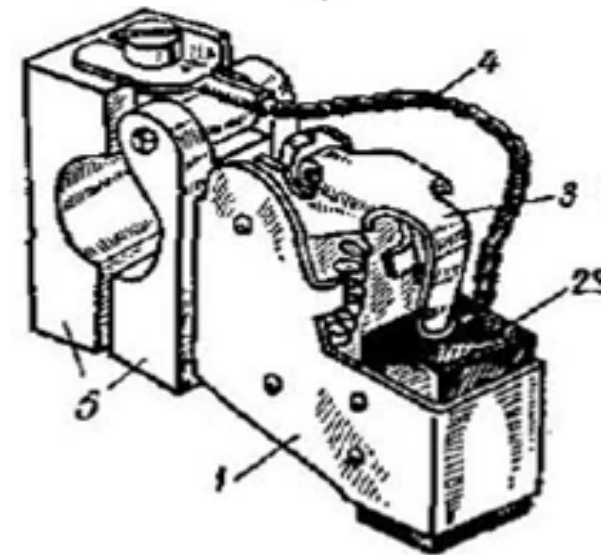
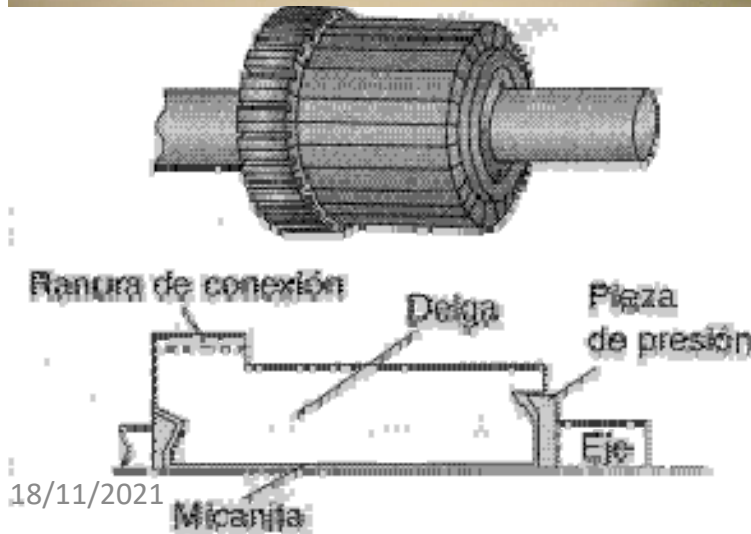
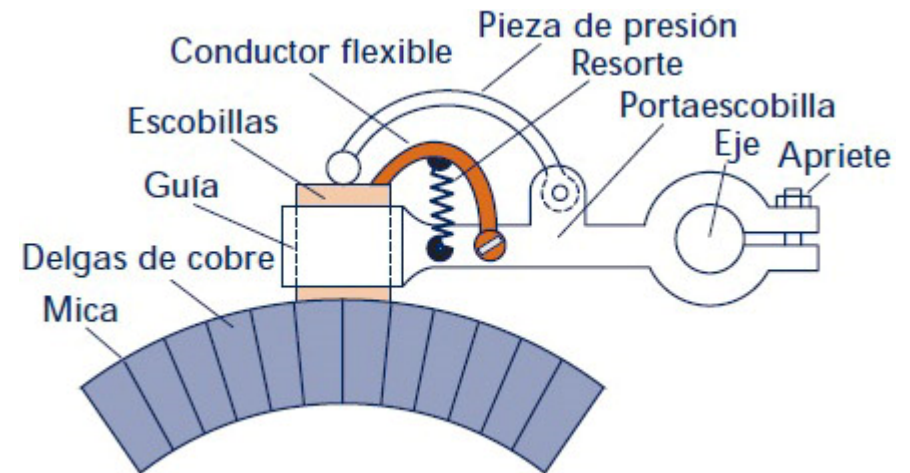
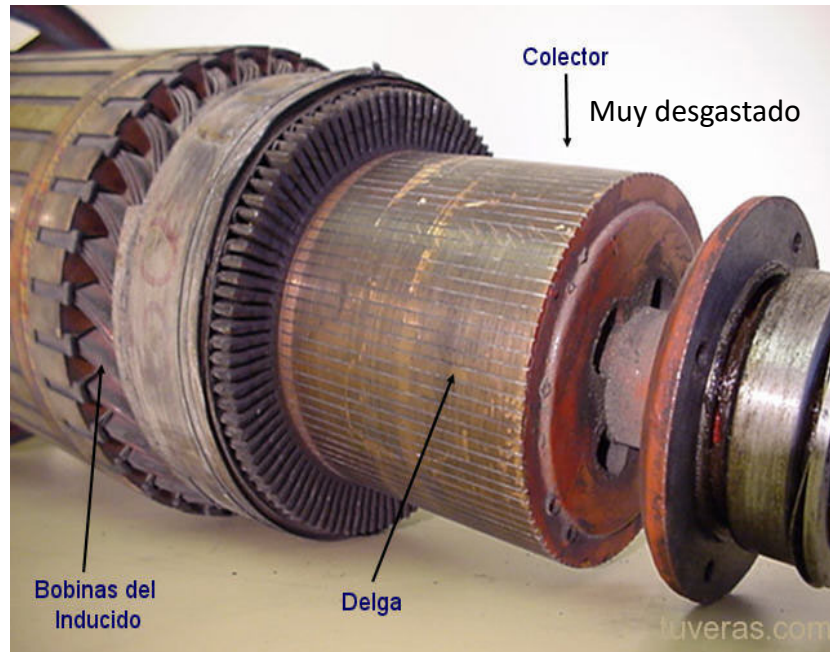
Máquinas de corriente continua

Constitución



Máquinas de corriente continua

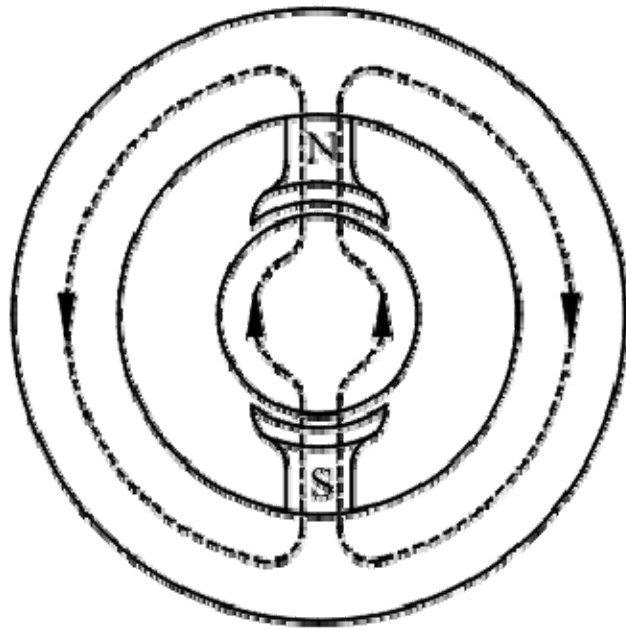
Constitución



Porta escobillas

Máquinas de corriente continua

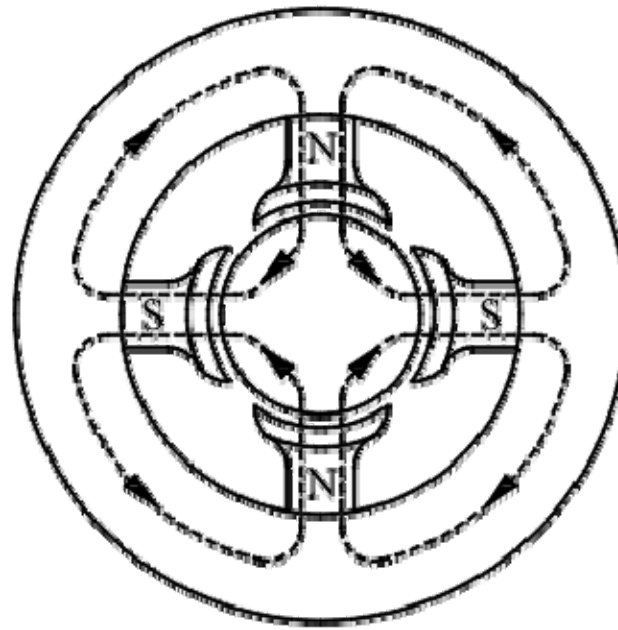
Constitución



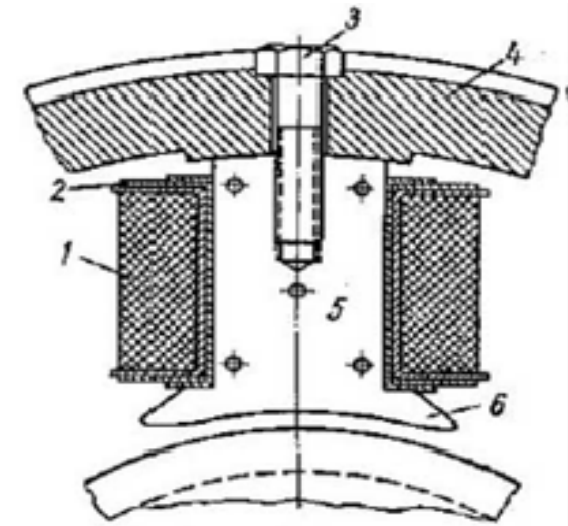
a)

Circuito magnético de las máquinas de c.c.

a) Bipolar, b) tetrapolar



b)

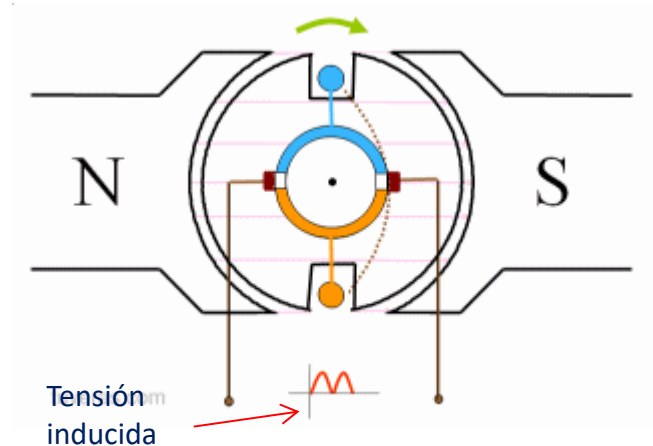


Corte transversal de un polo principal

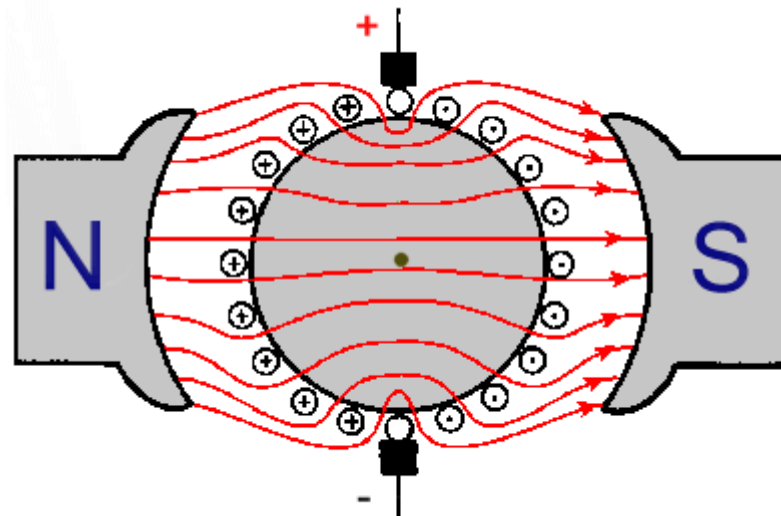
- 1- Bobina de excitación
- 2- Armazón
- 3- Pernos
- 4- Armazón
- 5- Núcleo
- 6- Zapata

Máquinas de corriente continua

Principio de funcionamiento

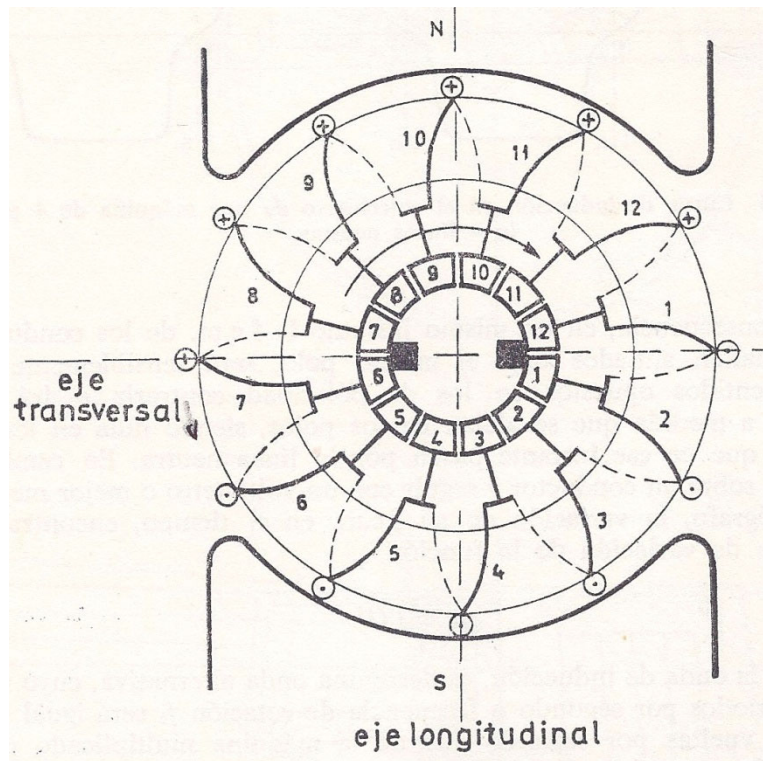


MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA ELEMENTAL

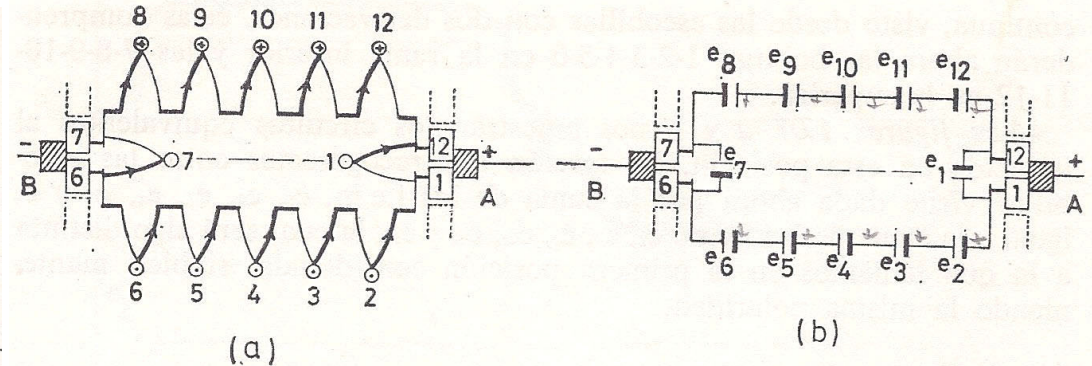


Máquinas de corriente continua

Principio de funcionamiento



Esquema elemental de una máquina de c.c. bipolar con inducido en anillo



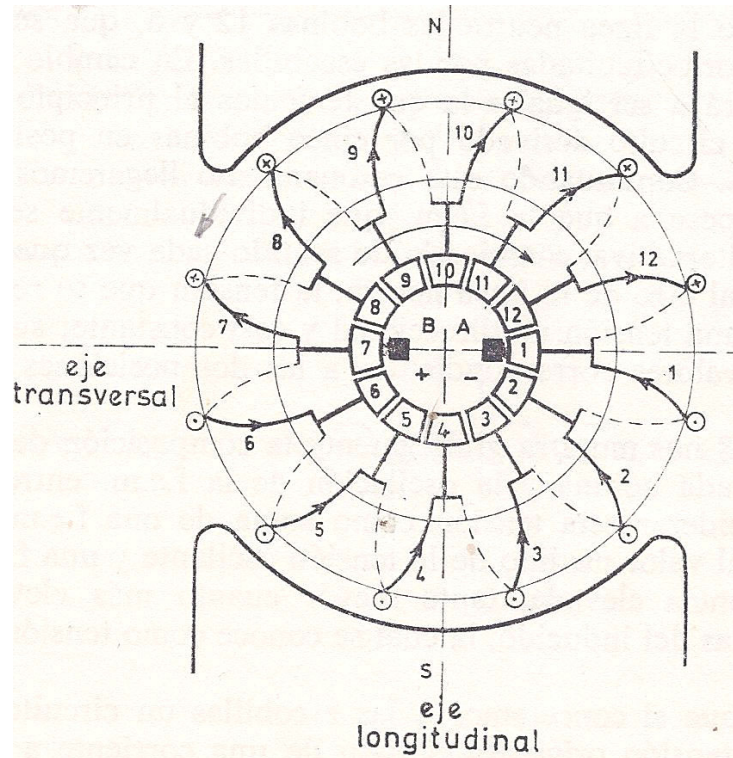
Circuito eléctrico equivalente al inducido bipolar de c.c. con sus escobillas de la figura de la izquierda. a) Bobinas elementales de una espira; b) con pilas eléctricas equivalentes a las bobinas.

La figura de la izquierda representa el esquema elemental de una máquina bipolar con un inducido de anillo de 12 bobinas y, por tanto, con un colector de 12 delgas.

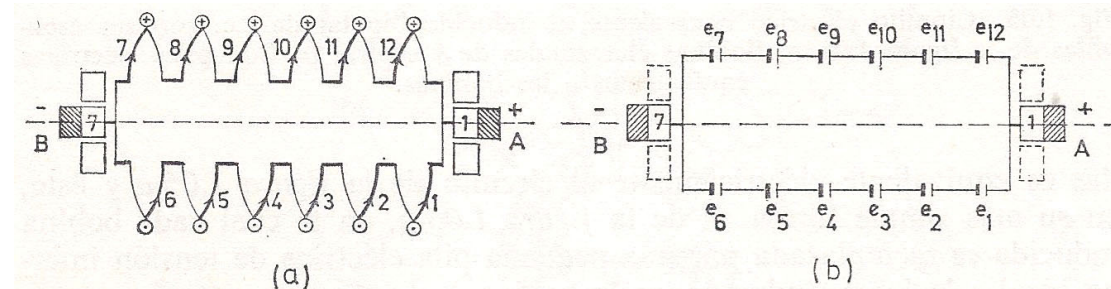
Al emplazar las escobillas A y B sobre el colector en la posición correspondiente a la línea neutra, el conjunto del devanado inducido visto desde las escobillas, queda dividido en dos circuitos de igual número de bobinas en paralelo.

Máquinas de corriente continua

Principio de funcionamiento



Esquema elemental de una máquina de c.c. bipolar con inducido en anillo

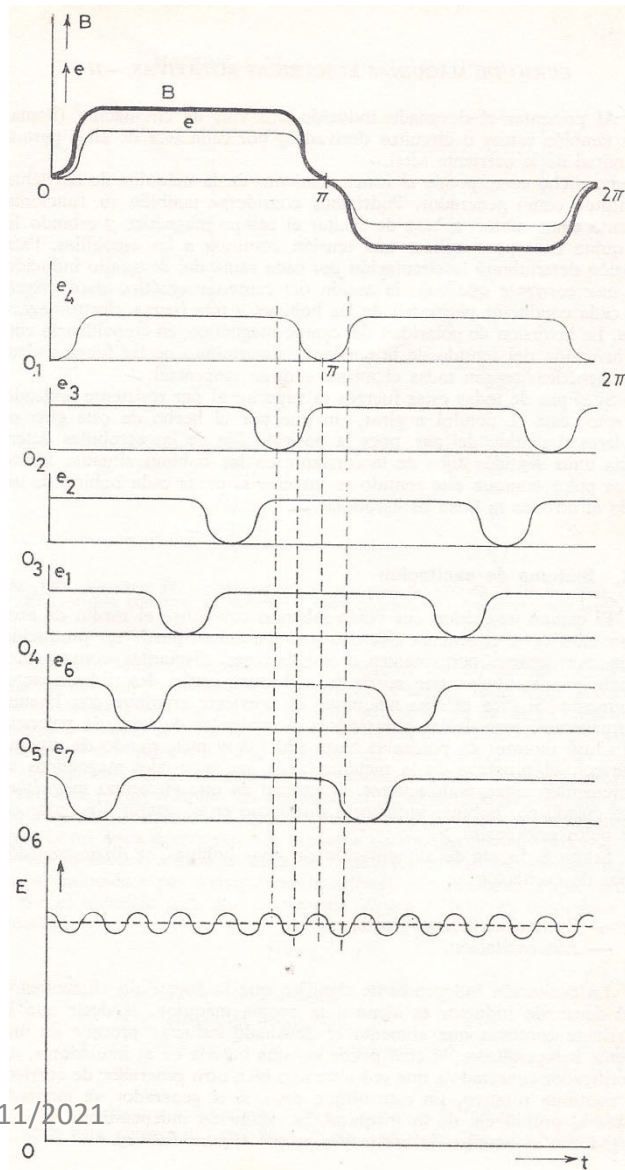


Circuito eléctrico equivalente al inducido bipolar de c.c. con sus escobillas de la figura de la izquierda. a) Bobinas elementales de una espira; b) con pilas eléctricas equivalentes a las bobinas.

Al girar el inducido, al hecho de mantener fijas las escobillas en la línea neutra da lugar a que al cabo del tiempo correspondiente a $1/24$ de vuelta, el anillo ocupará la posición que muestra la figura de la izquierda, las escobillas A y B, solo estarán en contacto con las delgas 1 y 7 respectivamente y el devanado inducido continua, visto desde las escobillas con dos derivaciones, estas comprenderán ahora las bobinas 1-2-3-4-5-6 en la rama inferior y las 7-8-9-10-11-12 en la superior.

Máquinas de corriente continua

Principio de funcionamiento

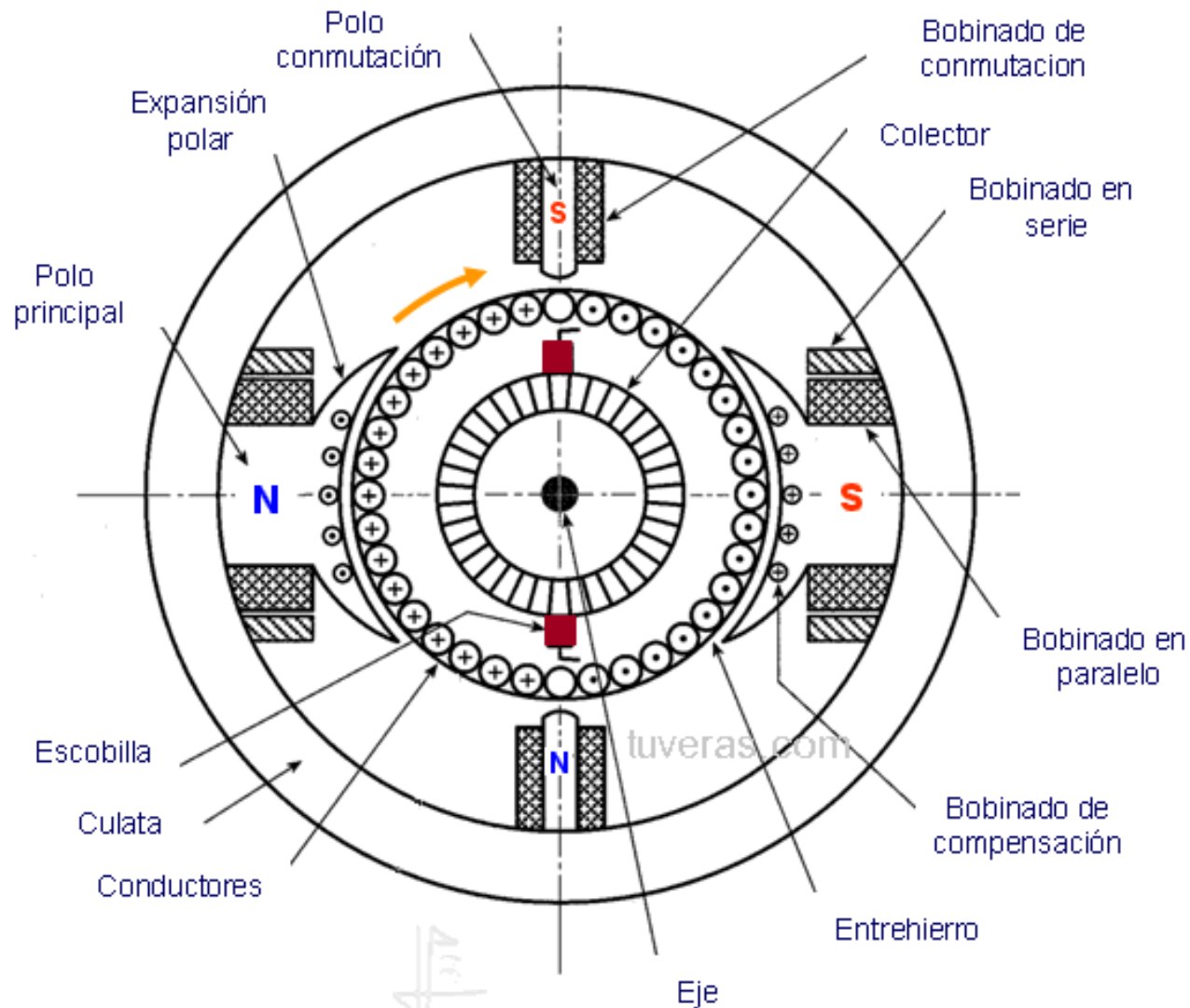


La figura nos muestra gráficamente la composición de las fems elementales de cada bobina y la oscilación de la fem entre las escobillas. Cabe considerar esta tensión inducida como suma de una fem continua constante, igual al valor medido de la tensión oscilante y una fem alternativa de frecuencia elevada, tanto mayor cuanto más elevado es el número de bobinas del inducido, la cual se conoce como tensión armónica de la máquina.

Si se conectan las escobillas a un circuito de carga cualquiera, esta tensión originará el paso de una corriente a través del mismo que partiendo de la escobilla positiva recorrerá el circuito exterior y volverá a la máquina por la escobilla negativa.

Máquinas de corriente continua

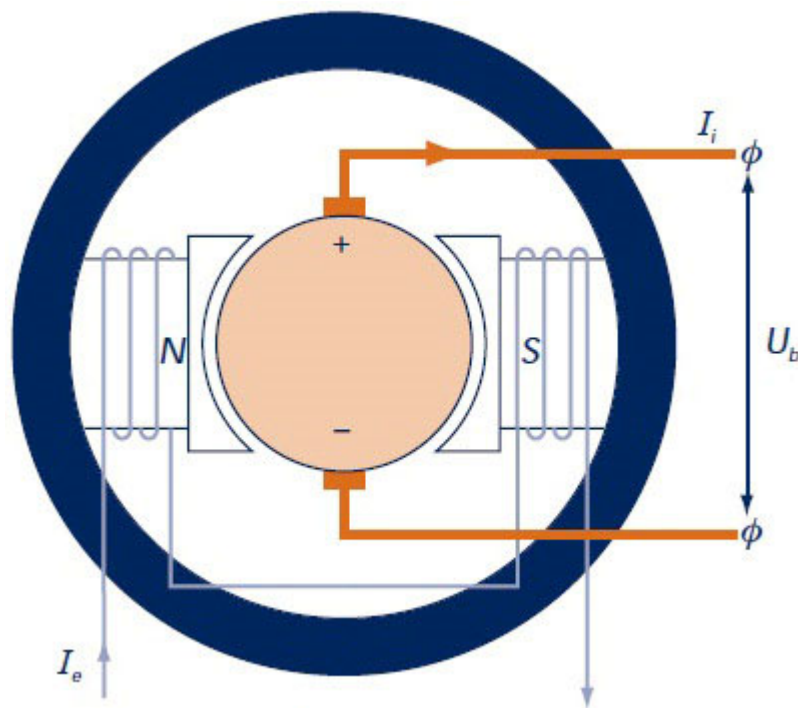
Excitación de la dinamo



Máquinas de corriente continua

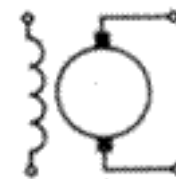
Excitación de la dinamo

Aunque existen máquinas de corriente continua con imanes permanentes, lo normal es que el campo magnético esté creado por bobinas inductoras dispuestas en el estator alrededor de los polos principales. Según la fuente de alimentación de estas bobinas, se distinguen dos tipos de excitación: **Excitación independiente** y **Autoexcitación**.



Excitación independiente

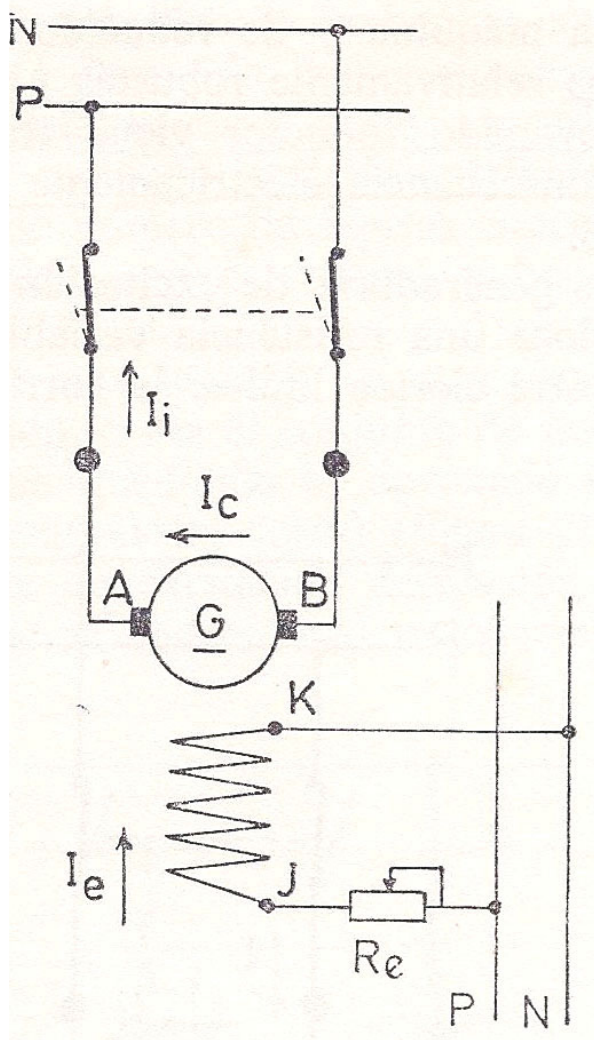
La **excitación independiente** significa que la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente de la máquina, como una batería de acumuladores, un rectificador conectado a una red alterna, o bien un generador de corriente continua rotativo de menor potencia. En este último caso, si el generador va montado sobre el propio eje de la máquina, la excitación independiente se denomina excitación propia.



Independiente

Máquinas de corriente continua

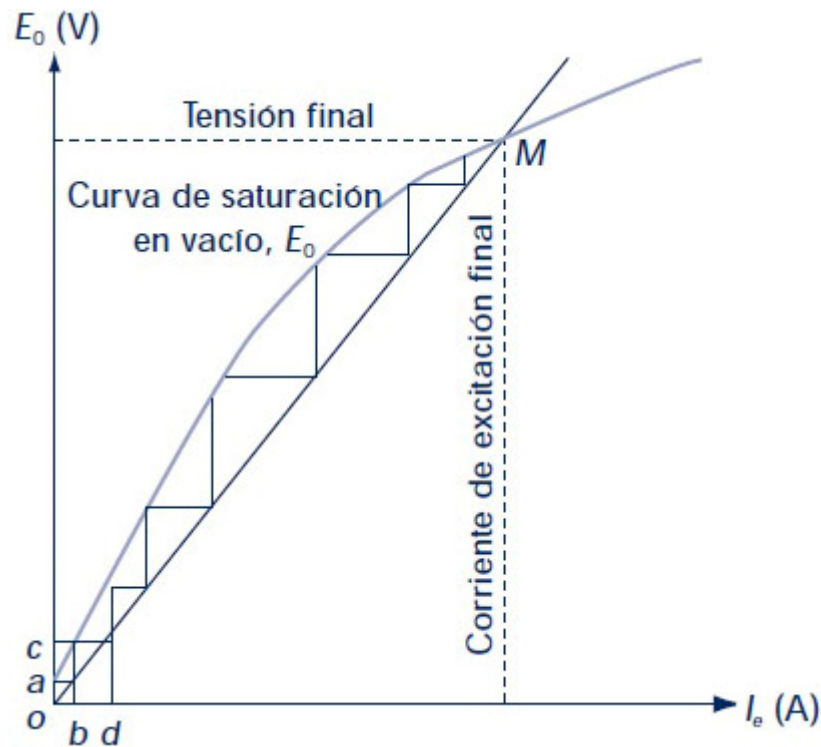
Excitación de la dinamo



La **excitación independiente** significa que la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente de la máquina, como una batería de acumuladores, un rectificador conectado a una red alterna, o bien un generador de corriente continua rotativo de menor potencia. En este último caso, si el generador va montado sobre el propio eje de la máquina, la excitación independiente se denomina excitación propia.

Máquinas de corriente continua

Excitación de la dinamo



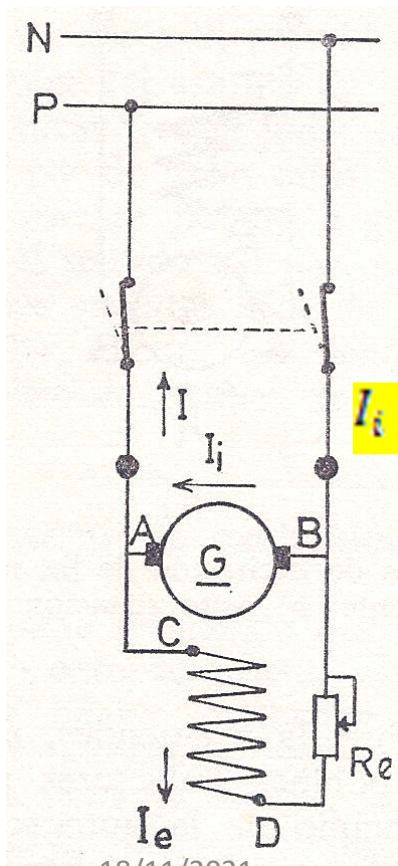
La **autoexcitación** significa que la corriente continua que excita las bobinas inductoras procede de la misma máquina generatriz. Para obtener la autoexcitación o cebado de la máquina, es preciso que exista un pequeño flujo en el circuito magnético, flujo que es posible producir y mantener gracias al fenómeno de histéresis magnética. Gracias a este flujo remanente, al hacer girar el inducido se inducirá en él una pequeña f.e.m. que aplicada al circuito inductor, con la polaridad conveniente, genera una débil corriente que refuerza el magnetismo remanente y la f.e.m. inicial debida al flujo remanente se incrementará. A mayor f.e.m., corresponderá mayor corriente, con el refuerzo consiguiente del flujo, luego se produce un nuevo aumento de la f.e.m. y así sucesivamente hasta alcanzar un equilibrio o estabilidad de la tensión en bornes que se traducirá en una constancia de la corriente de excitación y por tanto del flujo. A esta estabilidad se llega por causa de otra propiedad característica de los materiales magnéticos, la de saturación.

Máquinas de corriente continua

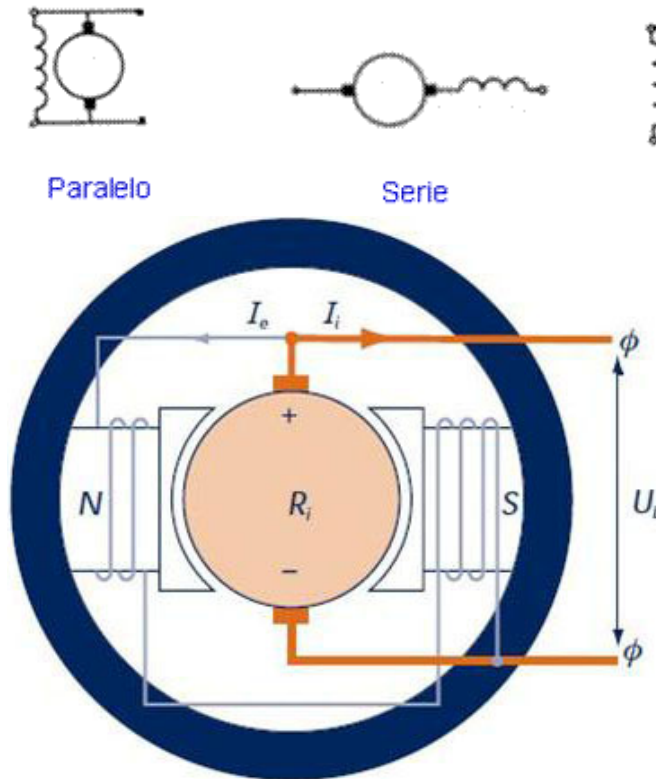
Excitación de la dinamo

Máquinas autoexcitadas

Dependiendo de la conexión entre el devanado inductor y el inducido se distinguen tres tipos de máquinas autoexcitadas: **la máquina serie, la máquina derivación y la máquina compuesta o compound.**

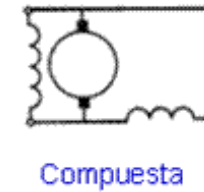


$$I_i = I_e + I$$

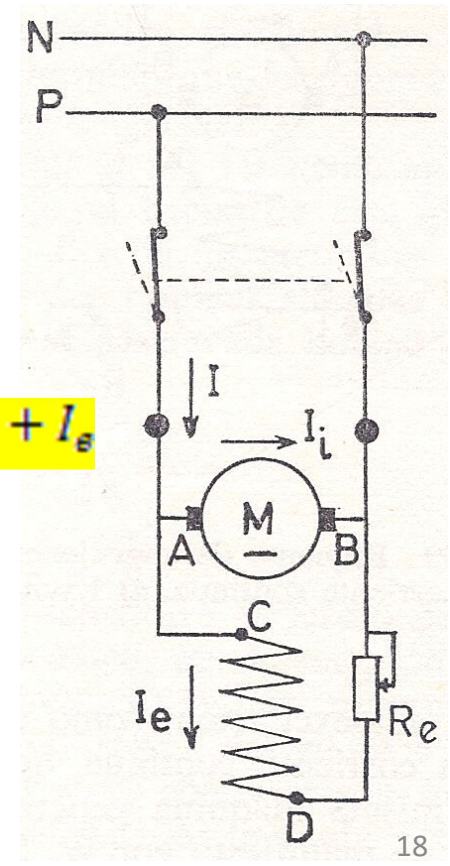


(b) Esquema

Autoexcitación derivación (paralelo)



Compuesta



$$I = I_i + I_e$$

c) Esquema eléctrico motor

18/11/2021

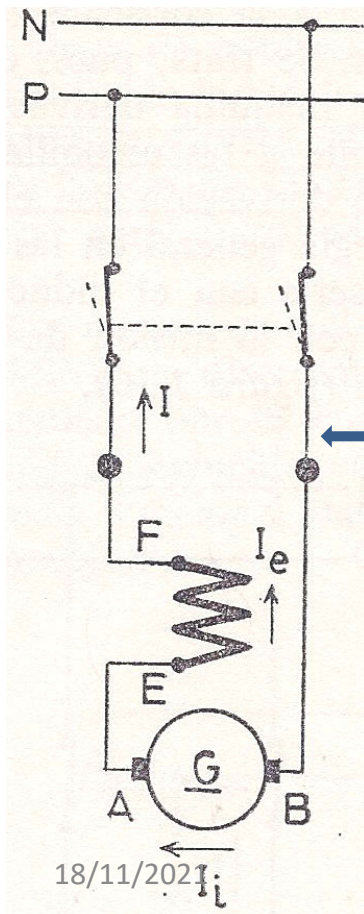
a) Esquema eléctrico generador

Máquinas de corriente continua

Excitación de la dinamo

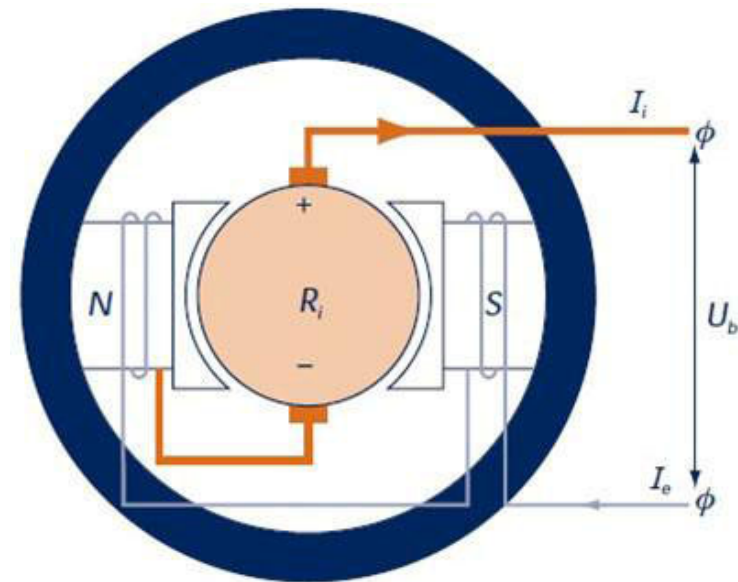
Máquinas autoexcitadas

Dependiendo de la conexión entre el devanado inductor y el inducido se distinguen tres tipos de máquinas autoexcitadas: **la máquina serie, la máquina derivación y la máquina compuesta o compound.**



$$I_i = I_e = I$$

a) Esquema eléctrico



(b) Esquema

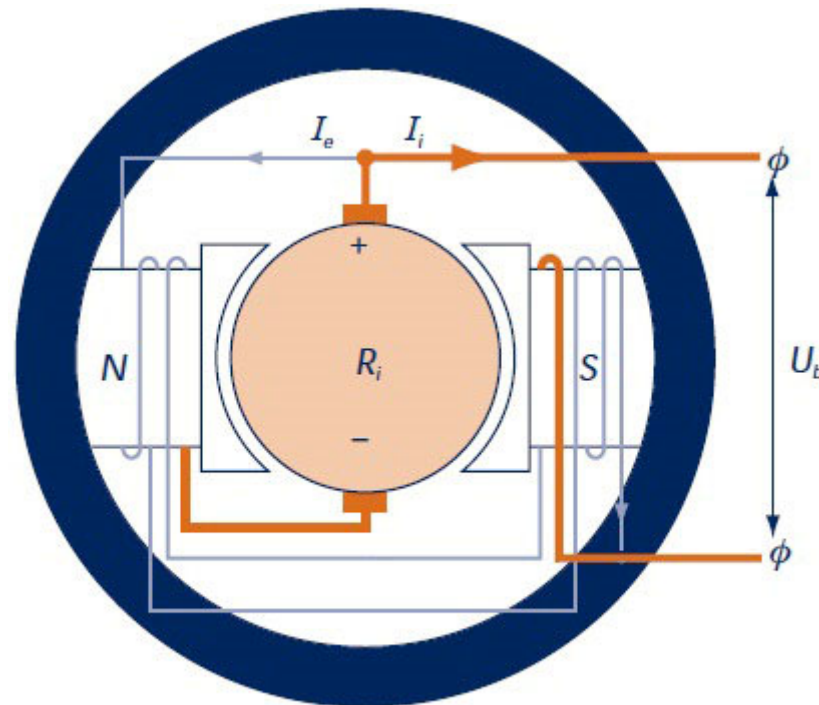
Autoexcitación serie

Máquinas de corriente continua

Excitación de la dinamo

Máquinas autoexcitadas

Dependiendo de la conexión entre el devanado inductor y el inducido se distinguen tres tipos de máquinas autoexcitadas: **la máquina serie, la máquina derivación y la máquina compuesta o compound.**



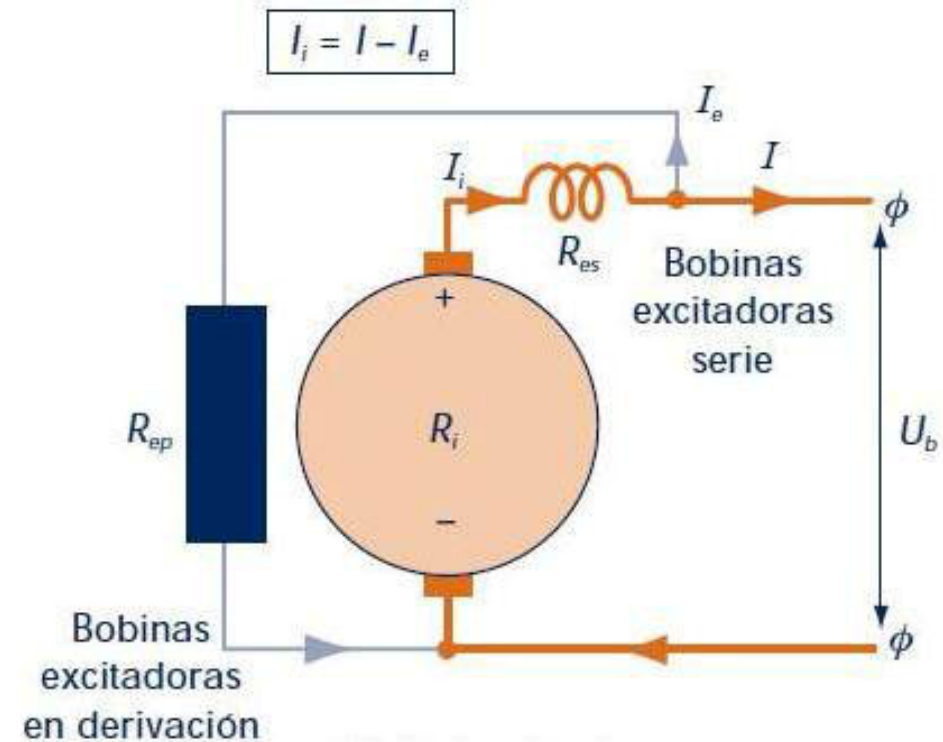
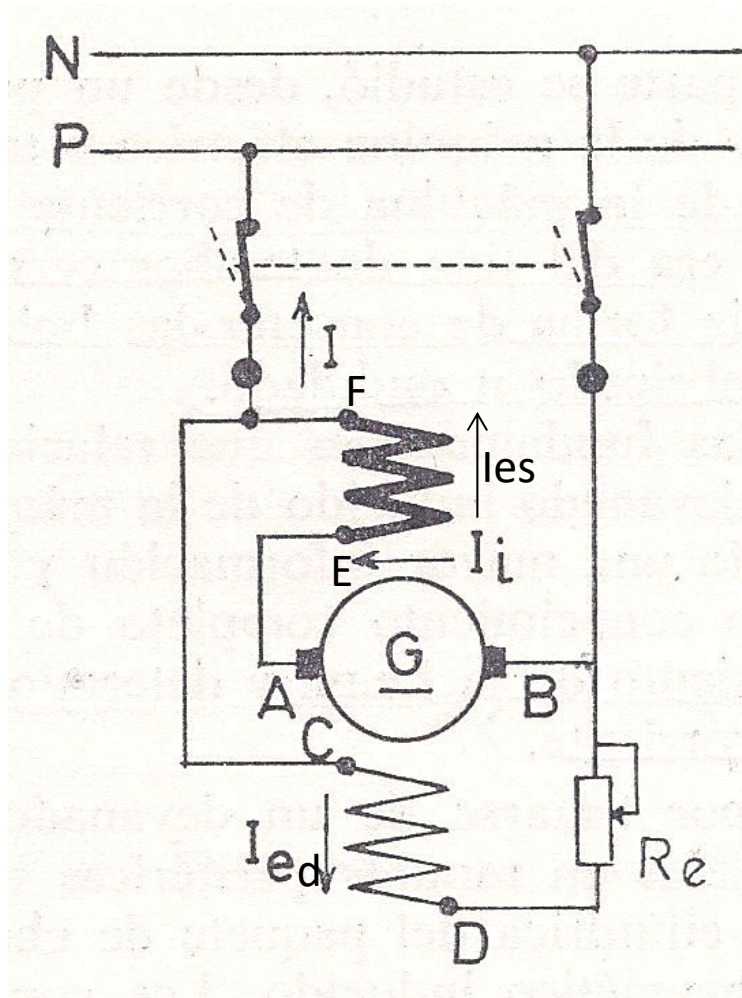
(c) Esquema

Autoexcitación compuesta

Máquinas de corriente continua

Excitación de la dinamo

Excitación compuesta



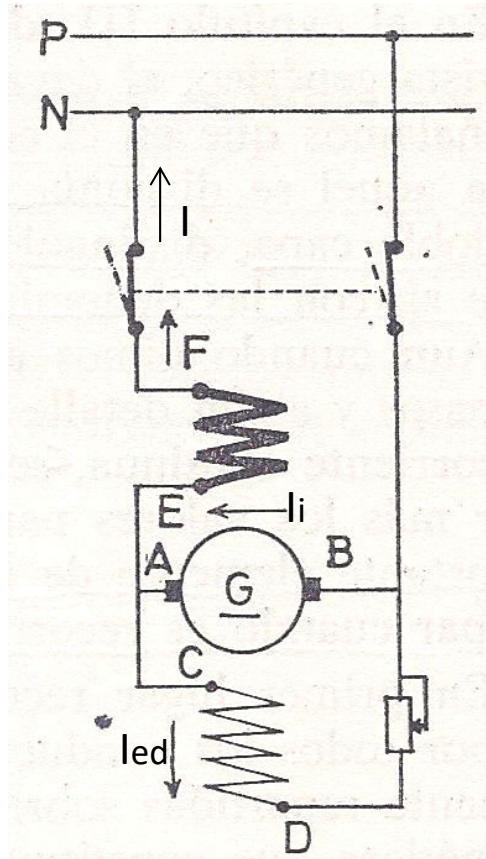
a) Compuesta larga

$$I_i = I_{es} = I_{ed} + I$$

Máquinas de corriente continua

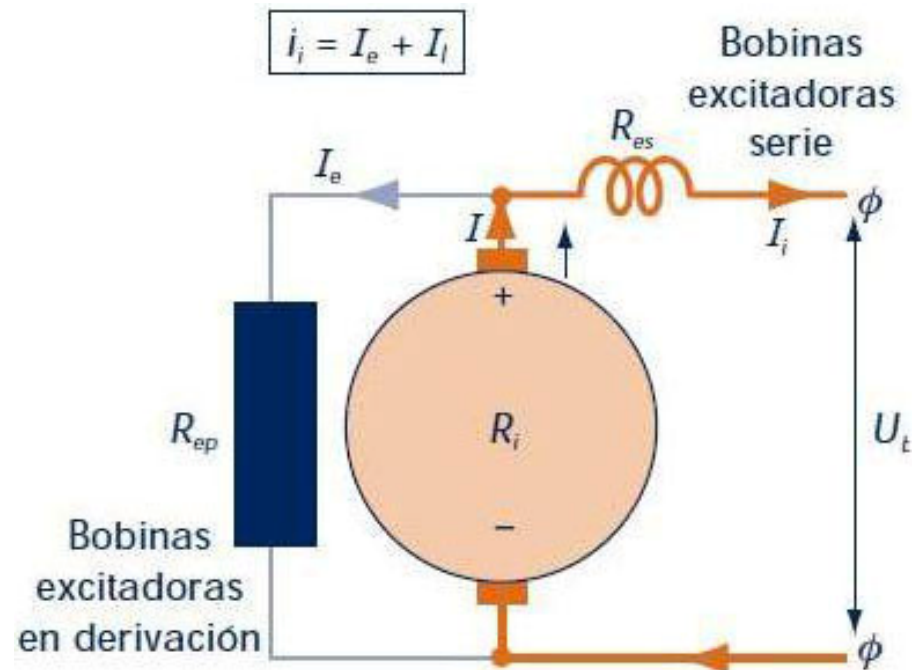
Excitación de la dinamo

Excitación compuesta



$$I_i = I_{ed} + I$$

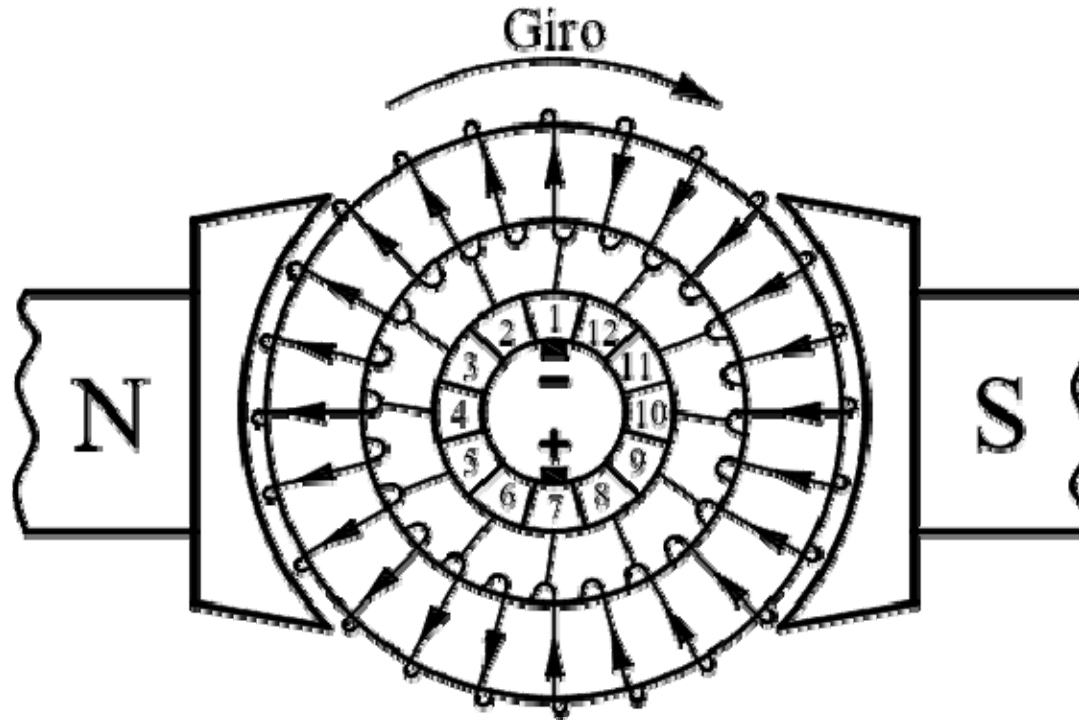
$$I_{es} = I$$



b) Compuesta corta

Máquinas de corriente continua

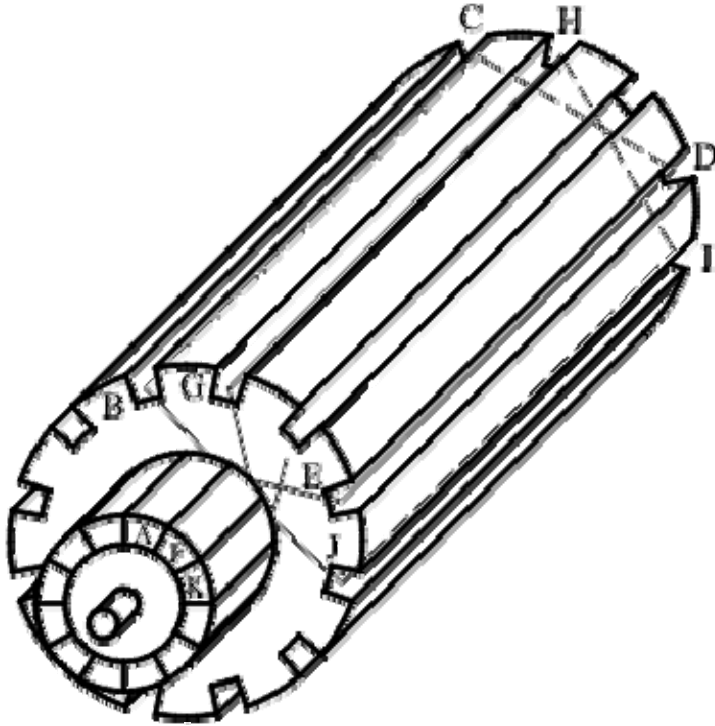
Devanados del inducido



Bobinado en anillo.- Es aquel en el cual las espiras son arrolladas sobre el anillo que constituye la armadura del inducido. Las bobinas solo poseen un lado activo, que es el que se encuentra en el lado exterior y es paralelo al eje de rotación, ya que únicamente éste corta líneas de fuerza al girar el inducido.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido



Bobinado en tambor.- Es aquel en el que los dos lados activos de cada bobina están colocados en la superficie exterior de la armadura. De esta forma, cada espira dispone de dos conductores activos.

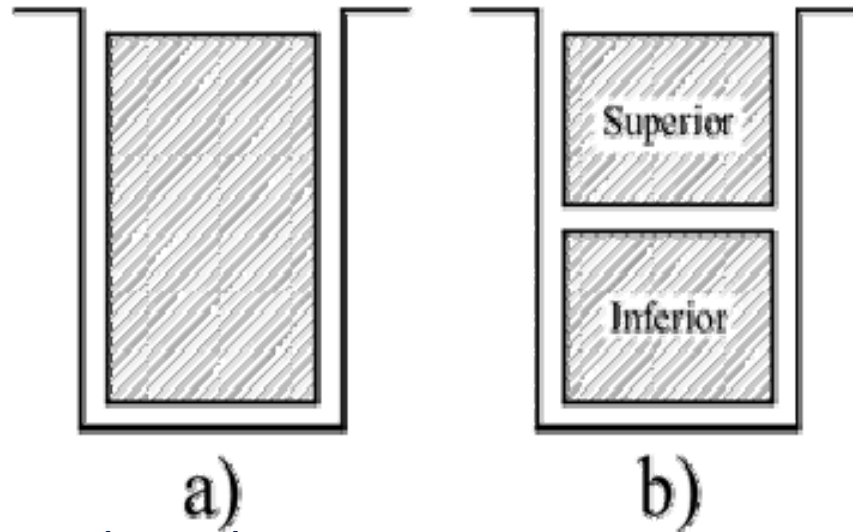
18/11/2021

Actualmente, se utilizan únicamente los bobinados en tambor por poseer las siguientes ventajas:

- ➡ Suponen una mayor economía de cobre, menos resistencia y, por consiguiente, menos pérdidas eléctricas y menor calentamiento, así como mejor rendimiento.
- ➡ Las bobinas del devanado en tambor pueden ser preparadas previamente sobre un molde adecuado, dándoles la forma conveniente, incluso haciendo uso de máquinas automáticas.
- ➡ El proceso de fabricación, representa una importante reducción de la mano de obra a emplear con el consiguiente abaratamiento del proceso.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido



Ranuras de armadura

- a) Ocupada por un solo lado activo. Bobinado de una capa.
- b) Ocupada por dos lados activos. Bobinado de dos capas.

Bobinados de una y dos capas por ranura.- Los bobinados en tambor pueden ser de una y dos capas por ranura, según que en una misma ranura haya uno o dos lados activos de bobinas distintas.

Cuando el bobinado es de dos capas, la capa que está en el fondo de la ranura se llama capa inferior, baja o interior y la que se encuentra junto al entrehierro es llamada capa superior, alta o exterior.

Hoy en día, los bobinados de máquinas de corriente continua se construyen generalmente en dos capas.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido

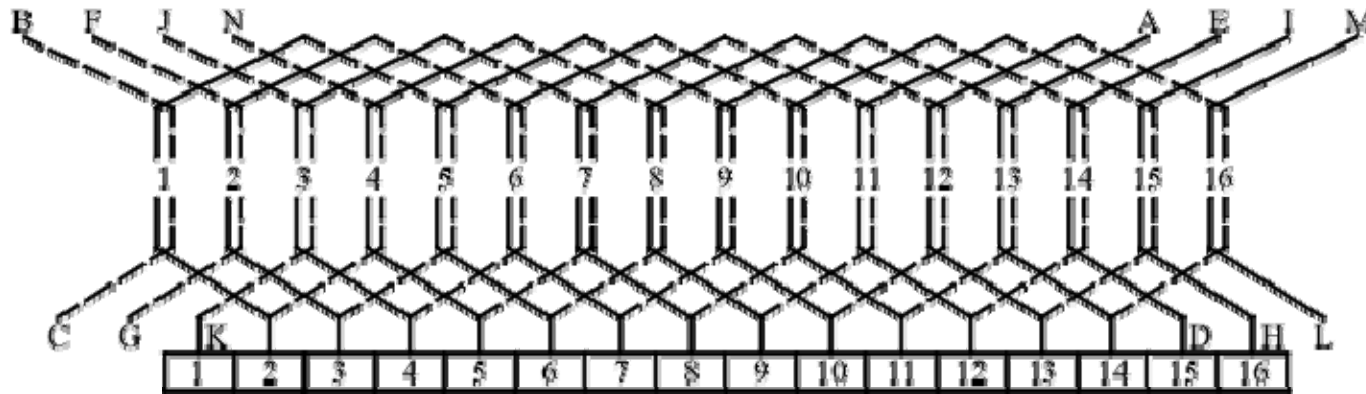
Bobinados abiertos y cerrados: Otra clasificación de los bobinados resulta de dividirlos en abiertos y cerrados.

Bobinados abiertos: Son aquellos en los cuales el conjunto de las bobinas presenta dos o más extremos libres que se llevan a la placa de bornas o al colector de anillos. Es el bobinado típico de las máquinas de corriente alterna, en las que existe una o más fases, cada una de las cuales tienen un principio y un final libres.

Bobinados cerrados: Son aquellos en los cuales el conjunto de las bobinas forman uno o más circuitos cerrados. **Es el bobinado típico de las máquinas de corriente continua,** en las que para su funcionamiento, se precisa colocar un colector de delgas sobre las que frotan las escobillas y entre las cuales debe existir siempre continuidad en el bobinado.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido

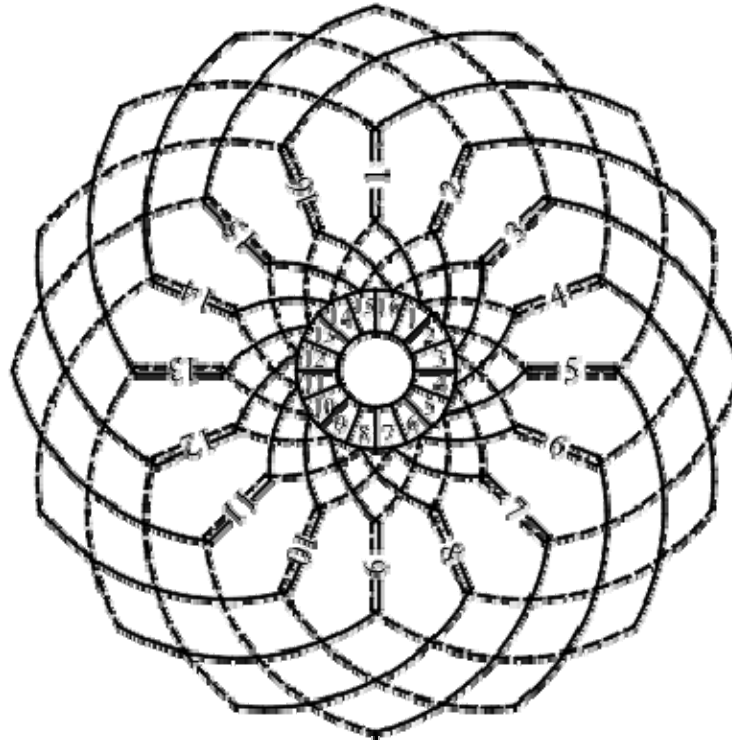


Representación rectangular

Representación rectangular: Para ejecutar gráficamente el esquema rectangular de un bobinado de maquina de corriente continua, debe imaginarse que el colector aumenta de diámetro hasta hacerse igual al del paquete chapas del inducido. Igualmente que las cabezas de bobinas del lado contrario al colector se abren en abanico, con lo que el colector, el paquete y las cabezas de las bobinas forman una sola superficie cilíndrica. Luego daremos un corte imaginario a este cilindro, según una de sus generatrices, y abriendo la superficie lateral de ese cilindro lo desarrollaremos sobre el plano.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido



Representación circular: Para ejecutar gráficamente el esquema circular de un bobinado de c. c., admitiremos que lo vemos desde el lado del colector y supondremos que las generatrices del cilindro que forma el paquete de chapas y, con ellas, los conductores, se abren hasta colocarse en el mismo plano que la cara anterior del colector. Finalmente, para poder representar las cabezas del lado contrario al colector, haremos la simple unión de los lados activos correspondientes.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido

Condiciones de los bobinados inducidos de c. c.: Los bobinados modernos de máquinas de c. c. son todos de tambor y en dos capas por ranura. Las condiciones generales que deben cumplir son las siguientes:

1ª.-Deben ser cerrados. Como quiera que las escobillas se apoyan sucesivamente sobre delgas diferentes, es necesario que el bobinado sea cerrado, para que siempre exista continuidad.

2ª.-Las f.e.ms. totales generadas en los distintos circuitos paralelos deben ser iguales.

3ª.-Las resistencias interiores de los distintos circuitos paralelos deben ser iguales.

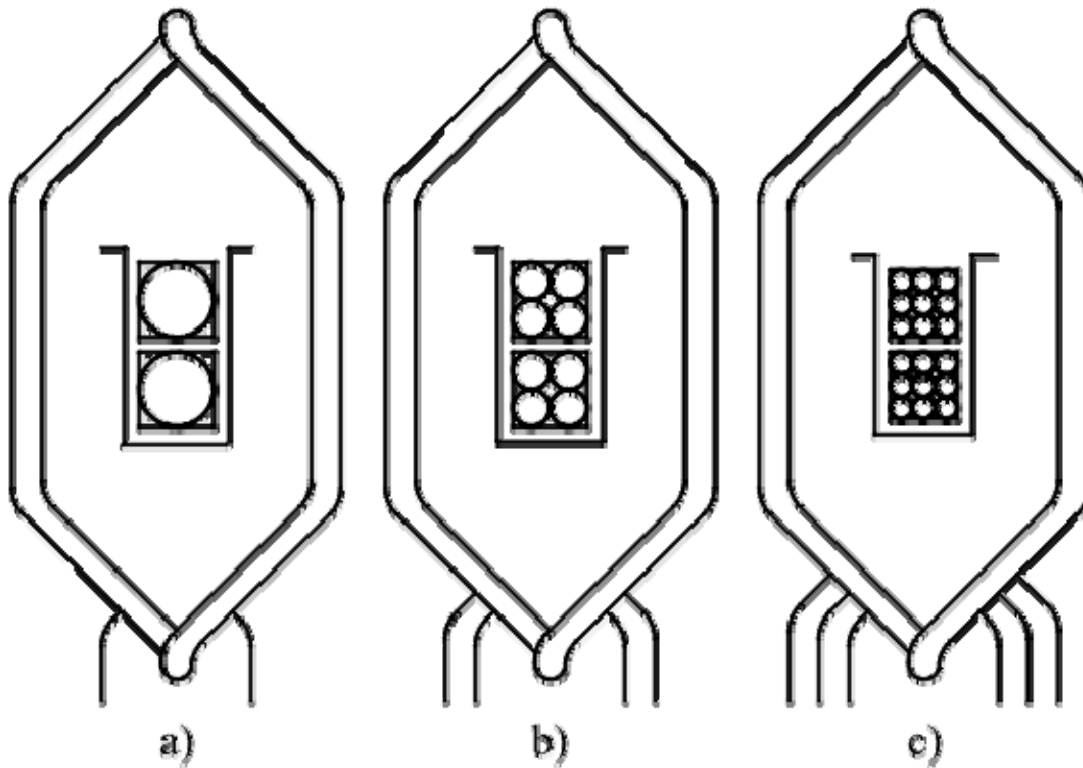
Para que se cumplan exactamente las condiciones 2ª y 3ª, es preciso que dichas ramas dispongan de igual número de espiras y que éstas tengan igual longitud de conductor.

Para que así sea, es preciso:

- ➡ Que todas las ramas en paralelo tengan el mismo número de lados activos de bobinas.
- ➡ Que todas las bobinas tengan el mismo número de secciones inducidas.
- ➡ Que todas las secciones inducidas tengan el mismo número de espiras.
- ➡ Que todas las bobinas sean ejecutadas sobre el mismo modelo de molde.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido



Bobinas de inducido de c. c. y su disposición en las ranuras

a) Con una sección inducida, b) con dos secciones inducidas, c) con tres secciones inducidas

Secciones inducidas: Recibe este nombre el conjunto de espiras comprendidas entre dos delgas del colector que se encuentran sucesivamente recorriendo el bobinado.

La sección inducida puede estar formada por una sola espira o de varias en serie, pero únicamente dispone de dos extremos libres los cuales se conectan a las dos delgas, entre las cuales está comprendida.

En los bobinados de tambor, cada sección inducida comprende dos haces activos; uno, colocado en la capa superior de una ranura, y el otro, situado en la capa inferior de la otra ranura que le corresponde.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido

Número de secciones inducidas: En un bobinado de dos capas por ranura, el número de bobinas “B” es igual al número de ranuras “K”.

$$B = K$$

Designando por “U” al número de secciones inducidas que constituye una bobina, el número total de secciones inducidas “S” del bobinado será igual al producto del número de bobinas por el de secciones inducidas de cada bobina.

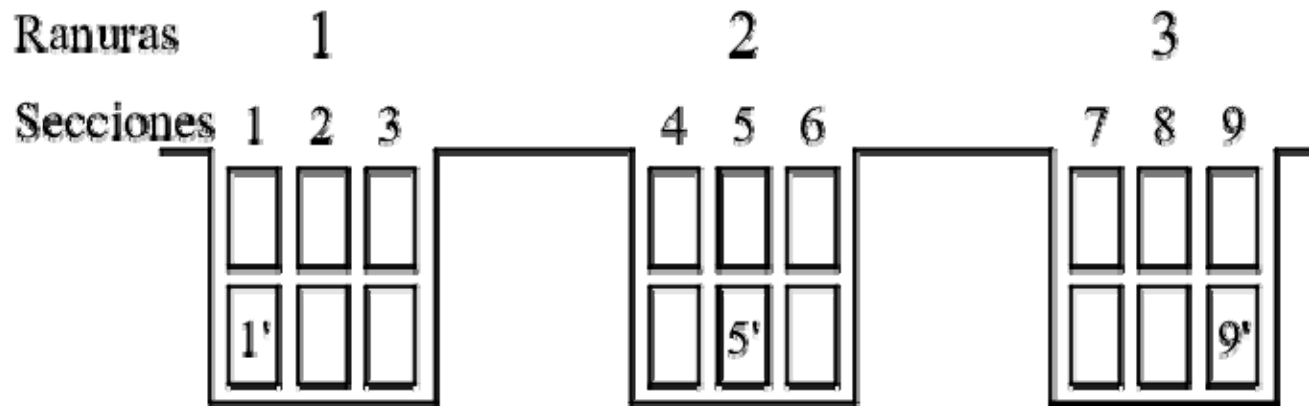
$$S = B \cdot U = K \cdot U$$

Por otra parte, el número de delgas del colector (D) debe ser igual al número total de bobinas (B).

$$B = D$$

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido



Numeración de las secciones inducidas

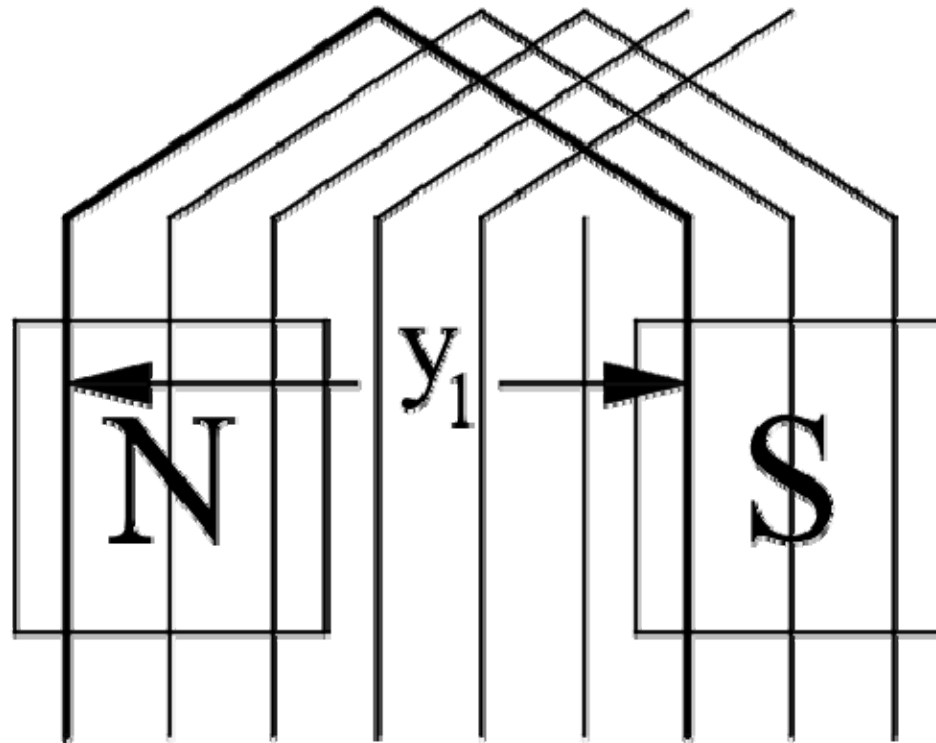
Numeración de ranuras y de secciones inducidas: Podemos establecer dos reglas:

Para numerar las ranuras de la armadura se da a una cualquiera de ellas el número 1 y a las siguientes los números sucesivos, hasta recorrer la periferia completa de la armadura.

Para numerar las secciones inducidas, se empieza por dar el número 1 a la que está situada más a la izquierda en la ranura 1, luego se van dando los números sucesivos a las siguientes secciones, siguiendo la periferia de la armadura en el mismo sentido que se siguió al numerar las ranuras.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido



Ancho de sección: Se le da el nombre a la distancia, medida en secciones inducidas, existente entre los dos haces activos de una misma sección. El ancho de sección tiene que tener, forzosamente, un valor entero y se representa por " Y_1 ".

Se calcula el ancho de sección, después de elegido el paso de ranura " Y_k ".

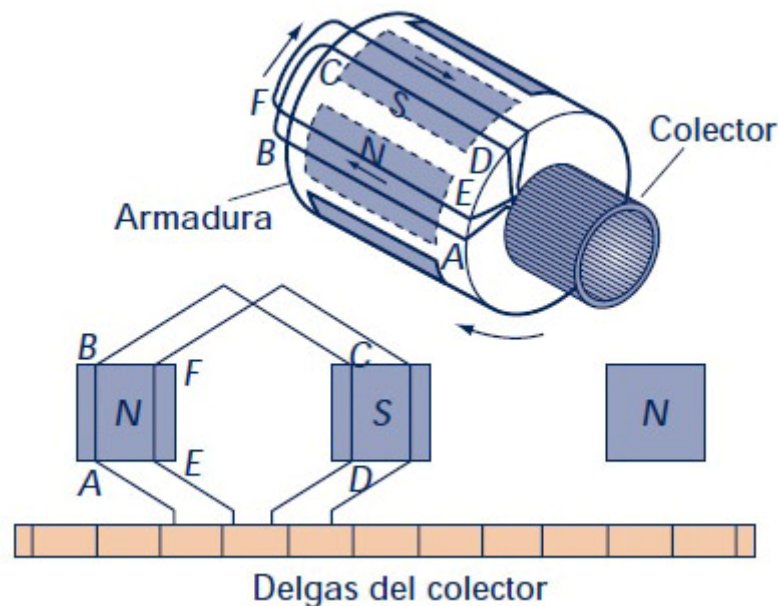
Así, siendo " U " el número de secciones inducidas por bobina, resulta que el ancho de sección tendrá por valor:

$$Y_1 = Y_k \cdot U$$

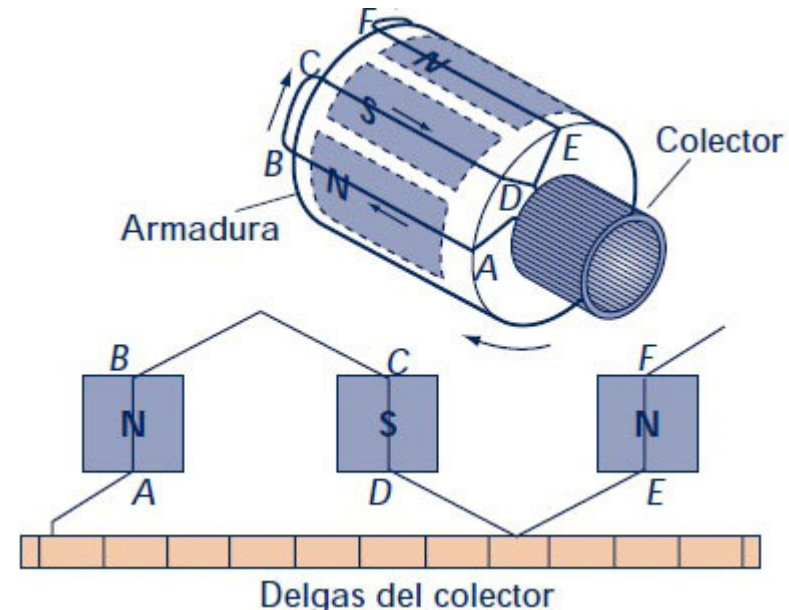
Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido

Bobinados imbricados y ondulados: En un bobinado de corriente continua, la conexión entre secciones sucesivas, en máquinas multipolares, puede ser efectuada de dos formas diferentes:



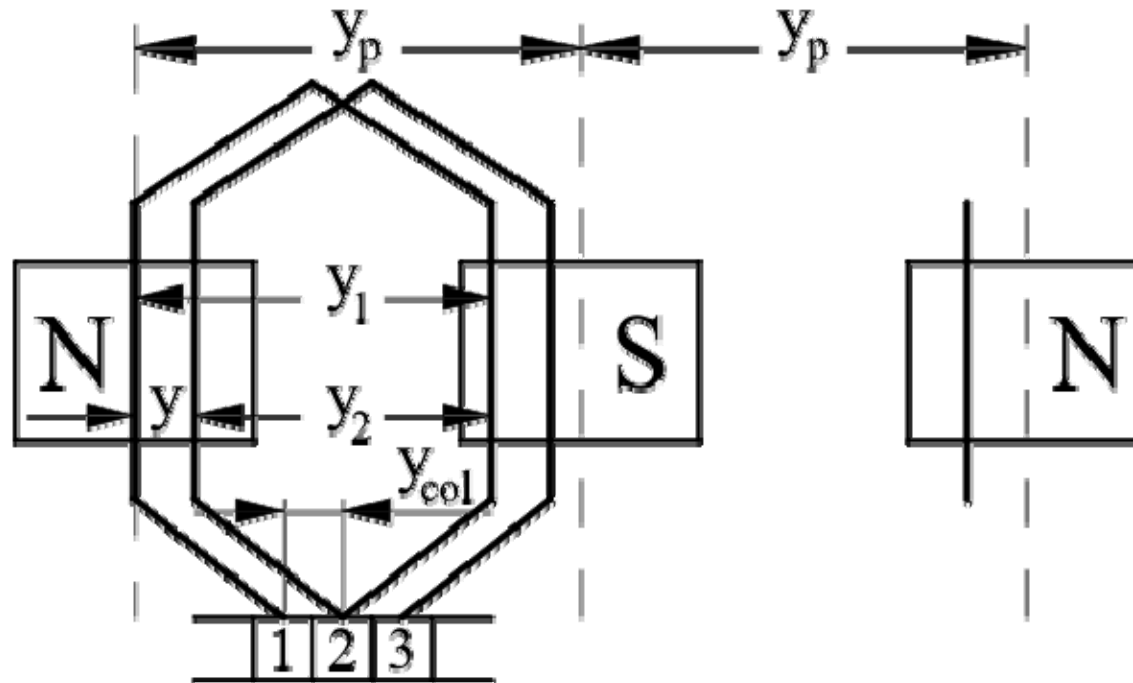
Devanado imbricado



Devanado ondulado

Máquinas de corriente continua

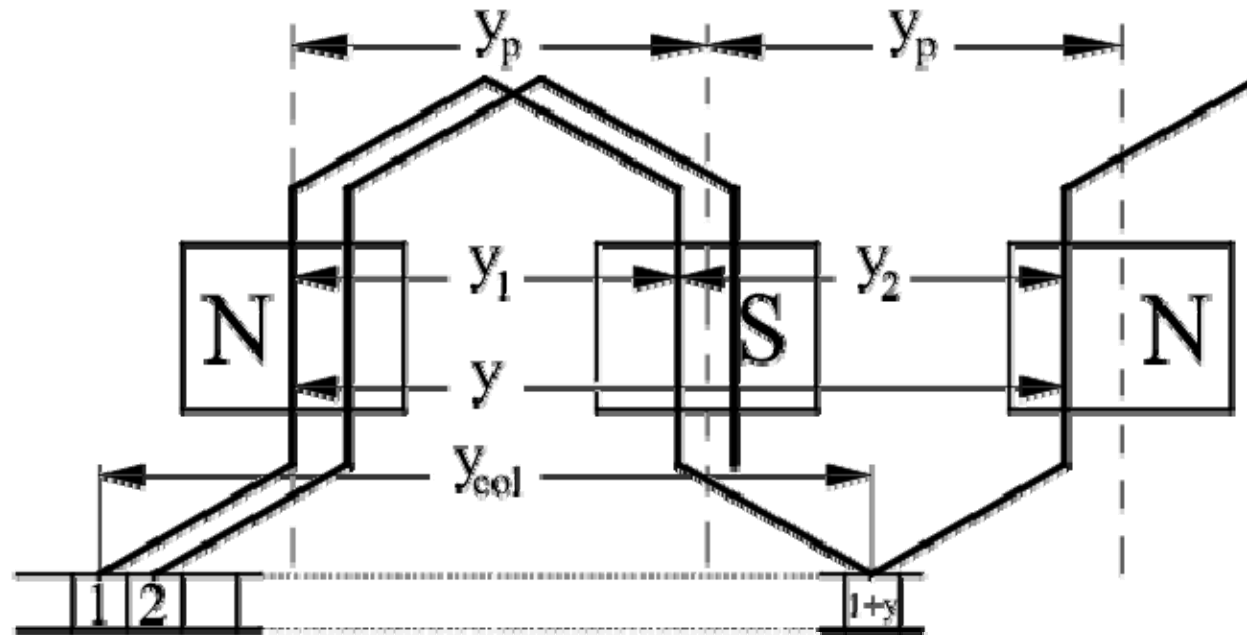
Devanados del inducido



Bobinado imbricado. Después de haber recorrido la sección 1 se retrocede por la parte anterior para buscar el principio de la sección inmediata, es decir la 2. Este tipo de bobinado se distingue porque el bobinado avanza por su cara posterior y retrocede por la anterior.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido



Bobinado ondulado. Después de haber recorrido la sección 1, se avanza por la cara anterior para buscar el principio de la otra sección inducida que se halle colocada bajo el campo magnético del siguiente polo, aunque con posición similar a la sección 2. Este tipo de bobinado avanza en la periferia del inducido tanto por la cara posterior como por la anterior.

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido

Paso de conexión: Recibe el nombre de paso de conexión la distancia, medida en secciones inducidas, existente entre el haz activo que constituye el final de una sección y el haz activo principio de la siguiente, siguiendo el curso del bobinado. Se designa por “ Y_2 ”. Una vez calculado si el signo del resultado es negativo, el bobinado será imbricado, mientras que si es positivo, el bobinado será ondulado.

$$Y_2 = Y_1 - Y_{col} \quad \text{Si el devanado es imbricado}$$

$$Y_2 = Y_{col} - Y_1 \quad \text{Si el devanado es ondulado}$$

Paso resultante: Es la distancia medida en secciones inducidas, existente entre los haces activos superiores o principios de dos secciones consecutivas siguiendo el curso del bobinado. Se designa por “ Y ”.

$$Y = Y_1 - Y_2 \quad \text{Si el devanado es imbricado}$$

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad \text{Si el devanado es ondulado}$$

Máquinas de corriente continua

Devanados del inducido

Paso de colector: Recibe el nombre de paso de colector el número de delgas que es necesario saltar para ir desde la delga de partida de una sección hasta la delga de partida de la sección siguiente, recorriendo el bobinado. Se designa por " Y_{col} ".

El paso de colector tiene el mismo valor que el paso resultante. $Y_{col} = Y$

Simetría de los devanados de c.c. Un devanado de corriente continua se dice que es simétrico cuando las ramas en paralelo, en que se subdivide, son geométrica y eléctricamente iguales, es decir contienen el mismo número de bobinas en serie (igual resistencia eléctrica) y son asiento de iguales fems, cualquiera que sea la posición del inducido respecto al campo magnético.

Condiciones de simetría

$$\frac{B}{c} = \frac{D}{c} = \text{Número entero}$$



Número de bobinas que comprenderá cada par de ramas

$$\frac{k}{c} = \text{Número entero}$$



Número de ranuras por par de ramas

$$\frac{2p}{c} = \text{Número entero}$$



Pares de ramas emplazadas idénticamente en el campo magnético

18/11/2021

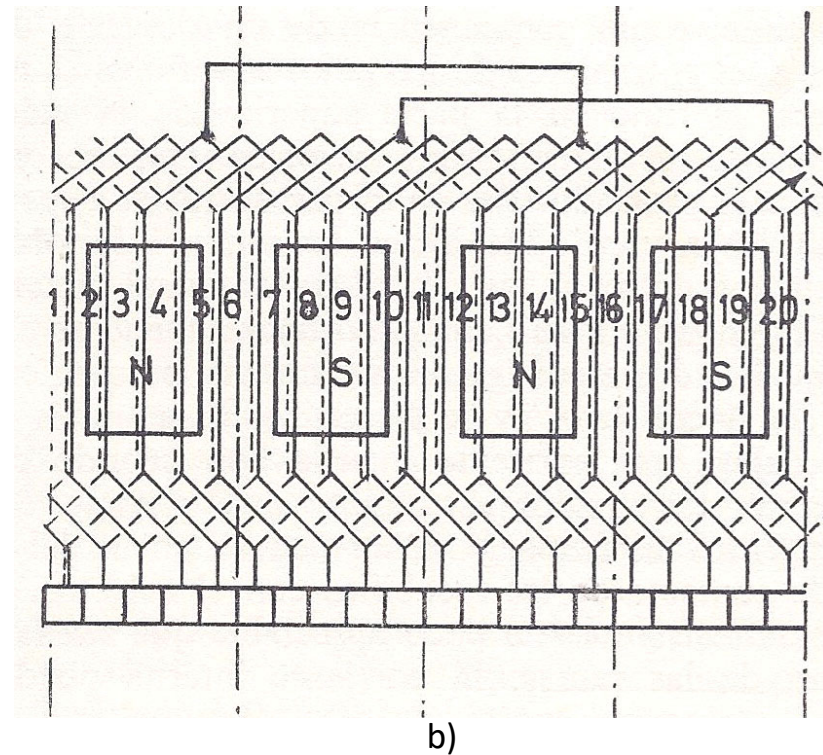
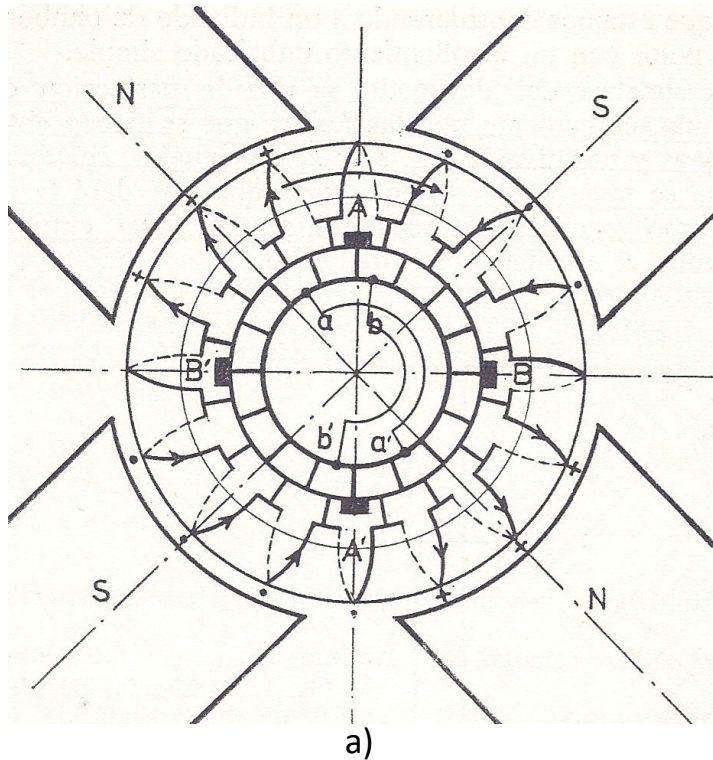
38

B= Número de bobinas; D=Número de delgas del colector; c= Número de ramas (vías) en paralelo; k=Nº de ranuras

Máquinas de corriente continua

Medidas para mejorar la conmutación

Conexiones compensadora o equipotenciales



Conexiones compensadoras en una máquina de cuatro polos. a) En el lado del colector, b) en las cabezas de bobina

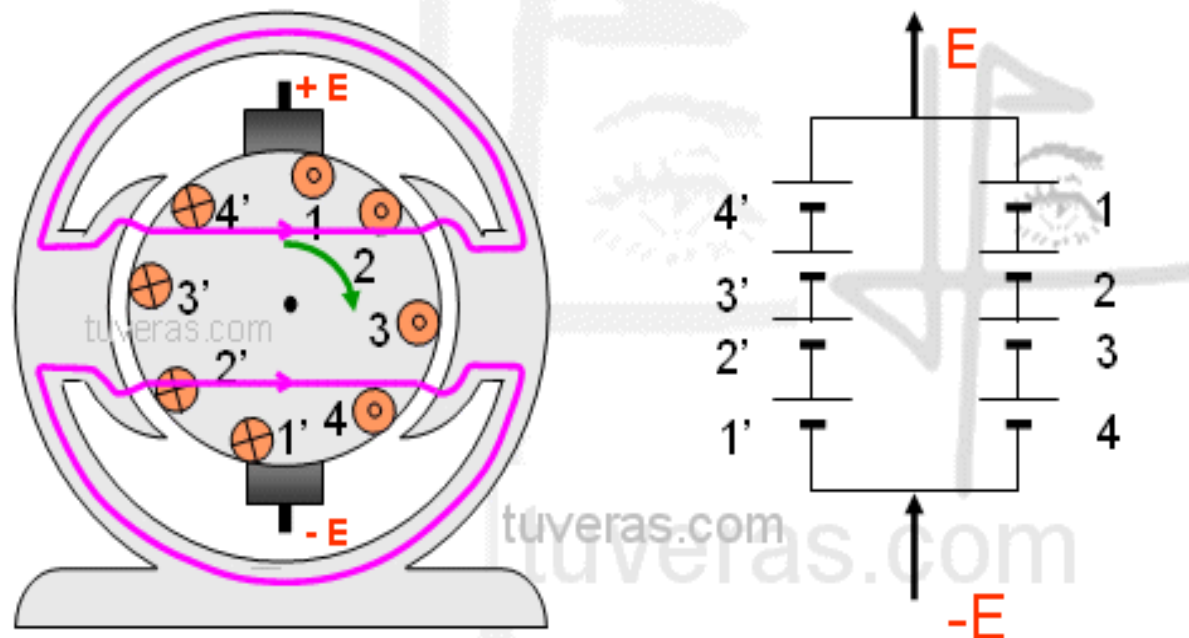
Aun cuando un devanado cumpla las condiciones de simetría, la práctica ha puesto de manifiesto que, debido a ligeras irregularidades constructivas, se manifiestan pequeñas desigualdades entre las fems inducidas en cada rama del devanado inducido.

Máquinas de corriente continua

Principio de funcionamiento

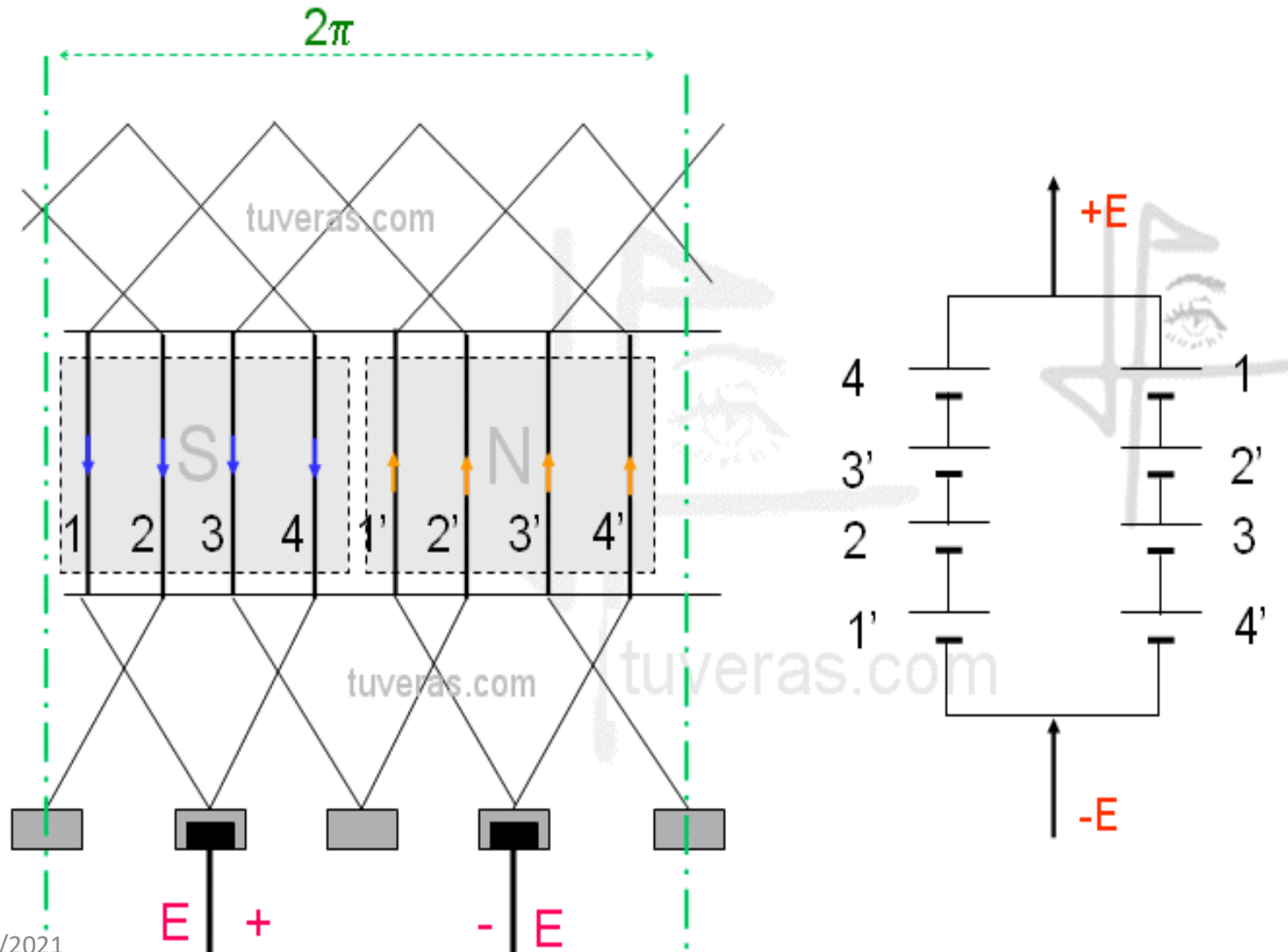
Fuerza Electromotriz Generada

Partimos de una dinamo de dos polos ($p = 1$) y dos ramas en paralelo o vías ($c = 2$) cuyo es quema representamos en la figura que aparece debajo. Vamos a obtener la fórmula de la fem generada en función de los diversos parámetros de la máquina.



Máquinas de corriente continua

Principio de funcionamiento



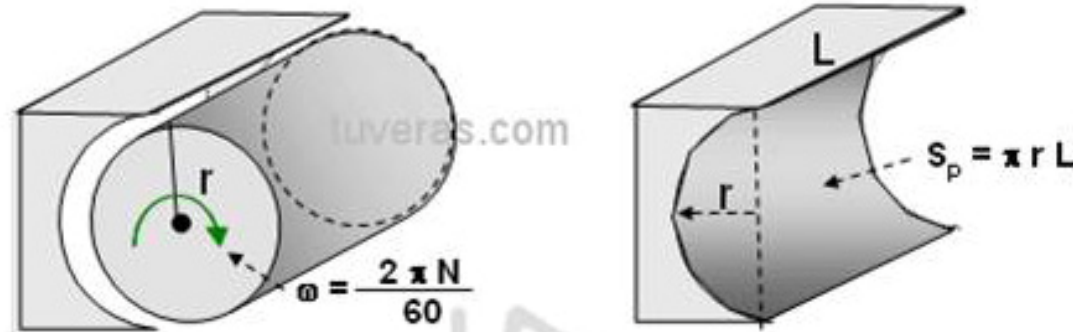
Máquinas de corriente continua

Expresiones generales

La fem E de la máquina será igual a la suma de las fem e generadas por cada conductor;

fem en cada conductor: $e = B L v$

fem en $\frac{n}{2}$ conductores en serie: $E = \frac{n}{2} B L v$



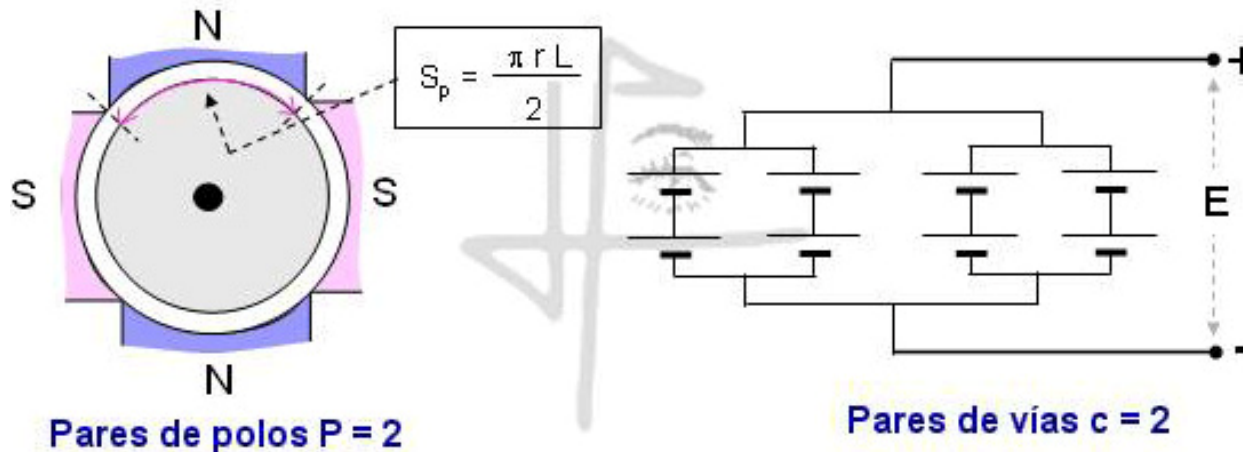
$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi N}{60} \\ S_p &= \pi r L \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} E &= \frac{n}{2} B L \omega r \\ E &= \frac{n}{2} B L \frac{2\pi N}{60} r = n B S_p \frac{N}{60} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_p &= B S_p \end{aligned} \right\} \quad \boxed{E = \frac{N}{60} n \Phi_p}$$

Máquinas de corriente continua

Expresiones generales

De una manera general si la máquina tiene p pares de polos y c pares de vías:



Fem de $\frac{n}{2c}$ conductores en serie: $E = \frac{n}{2c} B L v$

$$\left. \begin{aligned} S_p &= \frac{\pi r L}{p} \\ \omega &= \frac{2 \pi N}{60} \\ \Phi_p &= B S_p \end{aligned} \right\} \begin{aligned} E &= \frac{n}{2c} B L \omega r = \frac{n}{2c} B l \omega r \\ E &= \frac{n}{2c} B L \frac{2 \pi N}{60} r = \frac{n}{2c} B 2 S_p p \frac{N}{60} \\ E &= \frac{p}{c} n \frac{N}{60} \Phi_p \end{aligned}$$

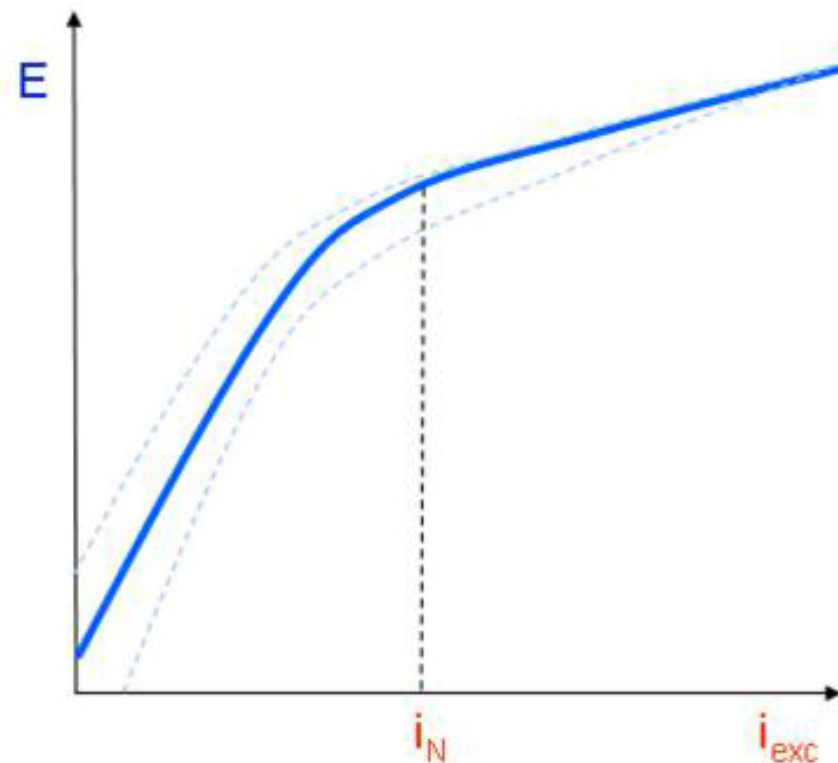
$E = \frac{p}{c} n \frac{N}{60} \Phi_p$
 $E = K N \Phi_p$

Máquinas de corriente continua

Característica de vacío

Si trazamos la **característica en vacío** de la máquina $E f(i_{\text{excitación}})$ para una N constante, obtenemos una curva como la de la figura, $E = K N \Phi = K i_{\text{ex}}$

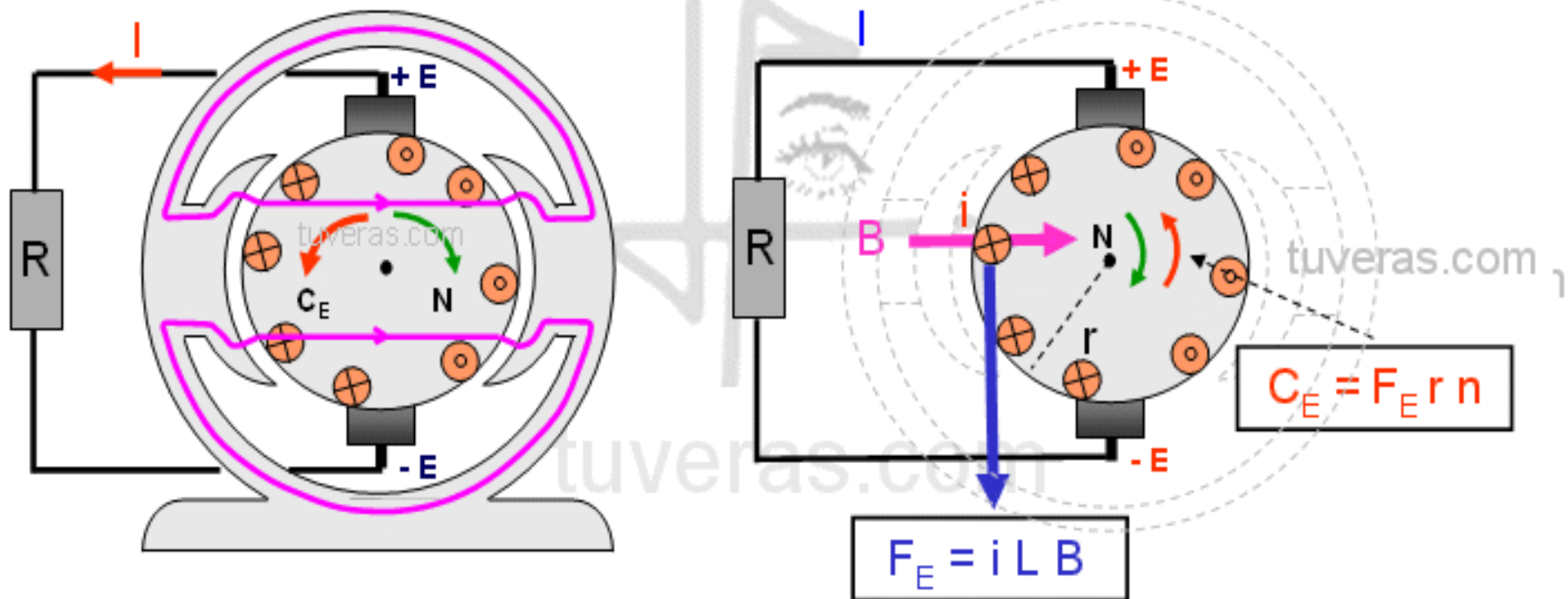
La curva es aproximadamente rectilínea hasta que comienza la saturación. Esta curva se corresponde con la curva de magnetización de la máquina, y al igual que esta, está afectada por la histéresis, de tal manera que la curva que se toma es la de ordenadas medias entre las registradas con excitación creciente y decreciente.



Máquinas de corriente continua

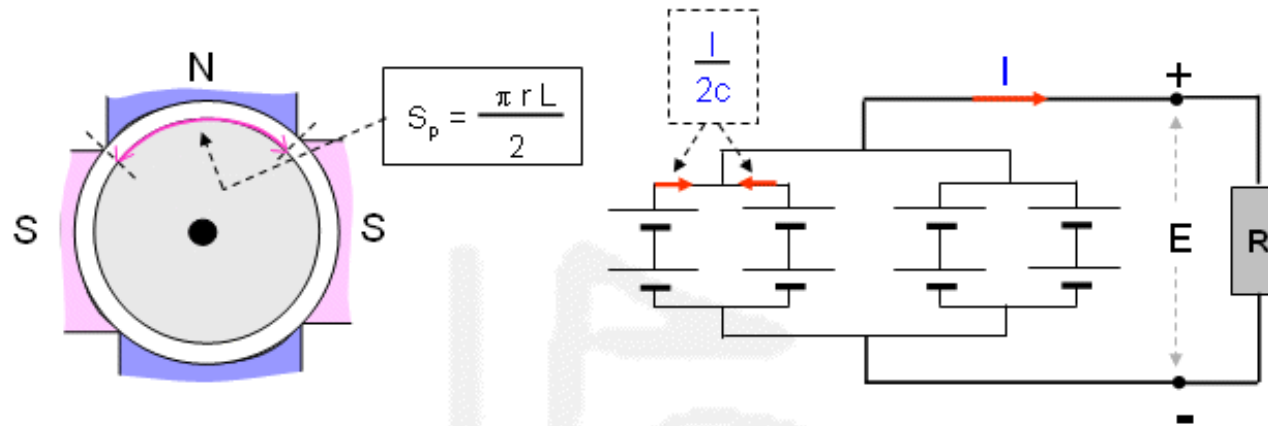
Par Electromagnético Generado

Sea una dinamo de p pares de polos y c pares de ramas, o vías, en paralelo. Al circular una corriente i por cada conductor, aparece una fuerza electromagnética F_E que da lugar a un par C_E que se opone al giro de la máquina.



Máquinas de corriente continua

Expresiones generales



Pares de polos $P = 2$

Pares de vías $c = 2$

Corriente por conductor: $i = \frac{I}{2c} \Rightarrow$ Fuerza por conductor: $F_E = \frac{I}{2c} L B$

Par por conductor: $c_e = F_E r \Rightarrow$ Par total: $C_E = c_e n = F_E r n$

$$\left. \begin{aligned} S_p &= \frac{\pi r L}{p} \\ \Phi_p &= B S_p \end{aligned} \right\} \quad C_E = \frac{I}{2c} L B r n \Rightarrow C_E = \frac{I}{2c} B \frac{S_p p}{\pi r} r n$$

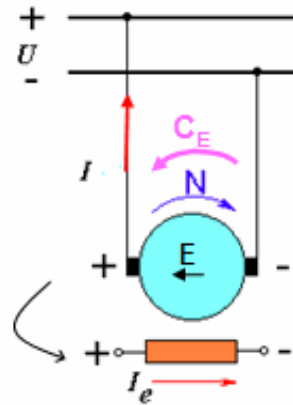
$$C_E = \frac{I}{2c} \frac{\Phi_p p}{\pi r} r n$$

$$C_E = \frac{n}{c} \frac{p}{2\pi} \Phi_p I$$

$$C_E = K \Phi_p I$$

Máquinas de corriente continua

Fuerza Electromotriz, Par y Rendimiento



$$E = U + I R + V_{\text{escobillas}}$$

$$E I = U I + I^2 R + P_{\text{escobillas}}$$

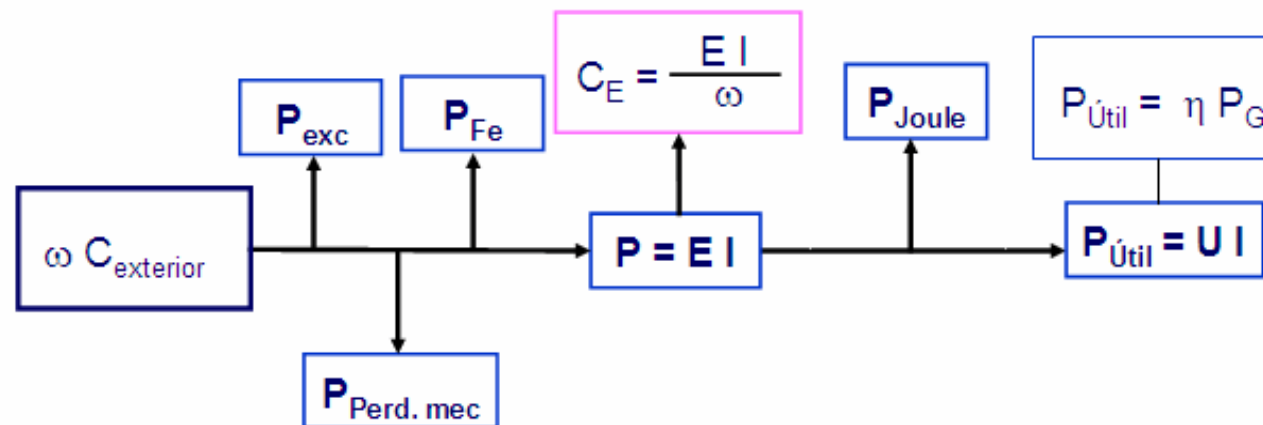
$$E I = U I + P_{\text{Joule}}$$

Si $P_G = P$ de la Dinamo

$$P_G = U I + P_{\text{Joule}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{perd. mec}} + P_{\text{excitación}}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{Útil}}}{P_G} \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{U I}{U I + P_{\text{Joule}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{perd. mec}} + P_{\text{excitación}}}$$



Máquinas de corriente continua

Reacción del Inducido

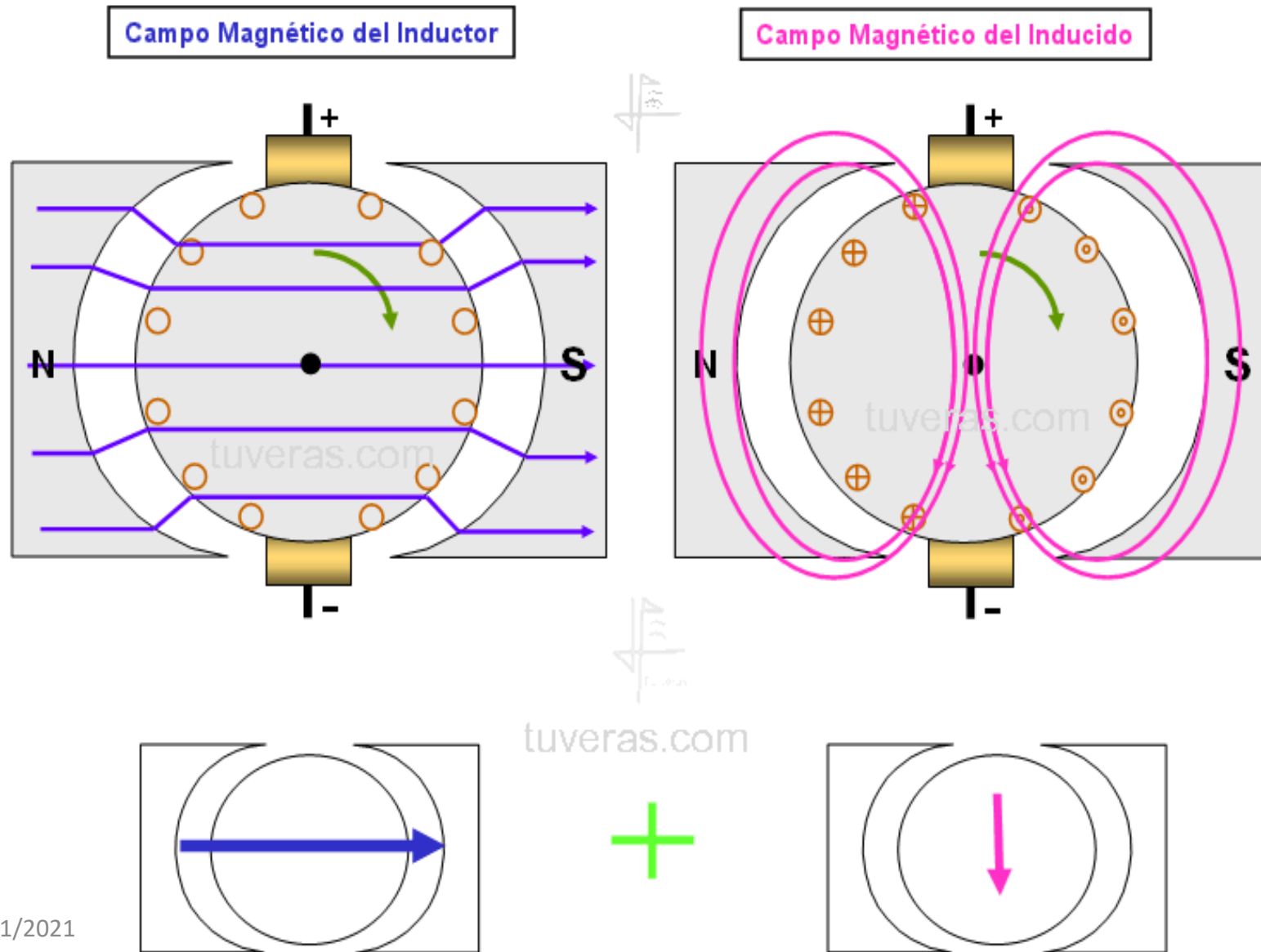
Cuando la dinamo está en carga el flujo del inductor se distorsiona debido al flujo magnético creado por la corriente del inducido, el cual es perpendicular al flujo magnético principal creado por los polos inductores Φ_p

Aunque aparentemente el flujo principal Φ_p no varía, pues se reduce en los cuernos de entrada pero aumenta en los cuernos de salida, en realidad el flujo principal disminuye pues la distorsión de del mismo aumenta su recorrido, es decir su **reluctancia magnética**, se crea saturación de los cuernos polares y además aumentan las fugas magnéticas, coadyuvando todo ello en la disminución de Φ_p y disminuyendo por tanto la fem en carga E_c respecto a la fem en vacío E_v . Este fenómeno se conoce con el nombre de **reacción magnética del inducido**.

$$\varepsilon = E_v - E_c = K N (\Phi_v - \Phi_c)$$

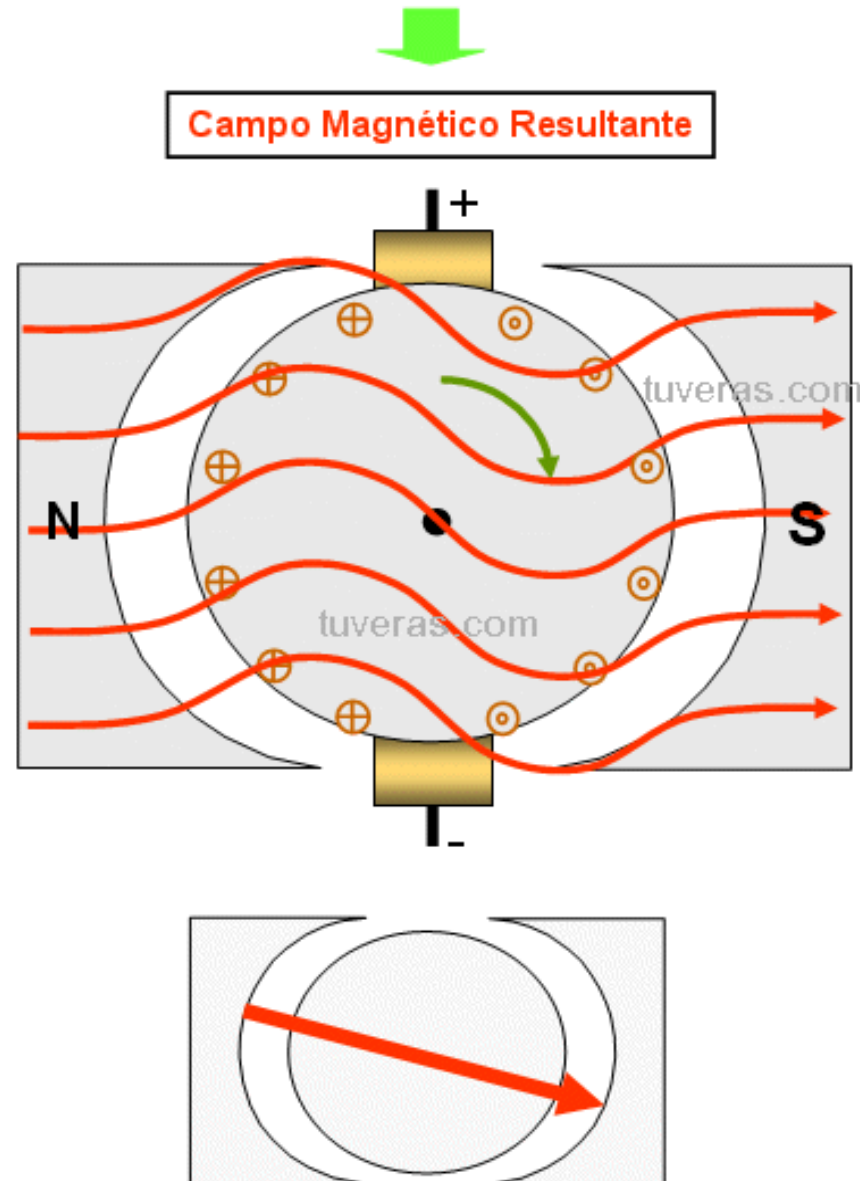
Máquinas de corriente continua

Reacción de inducido



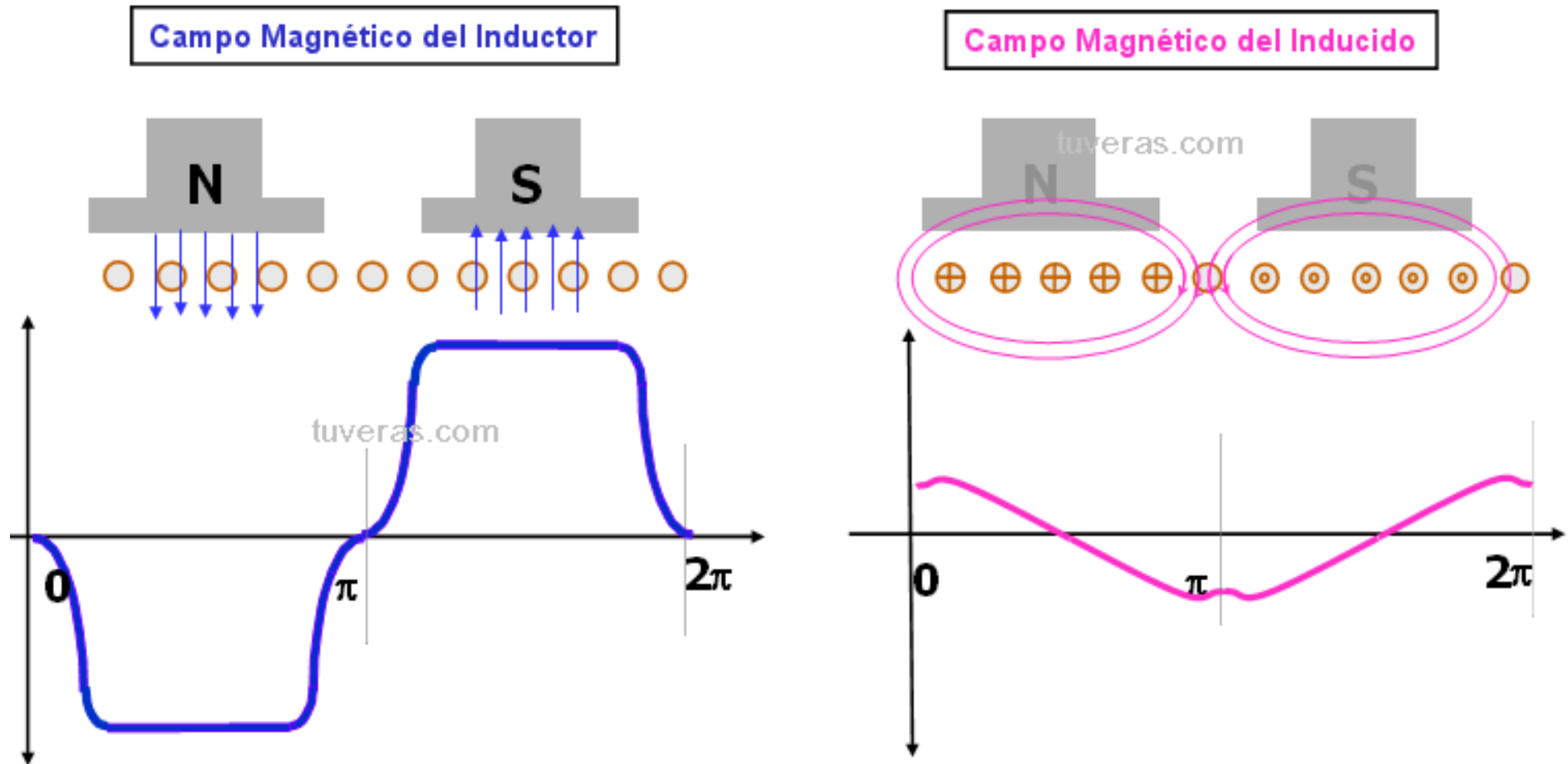
Máquinas de corriente continua

Reacción de inducido



Máquinas de corriente continua

Reacción de inducido

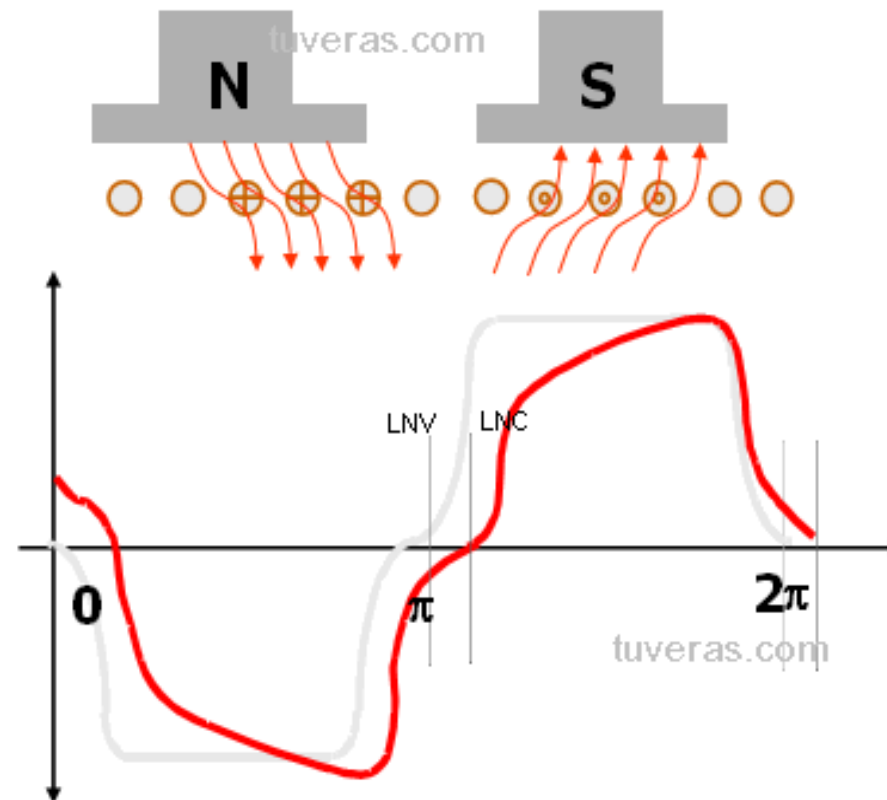


Máquinas de corriente continua

Reacción de inducido

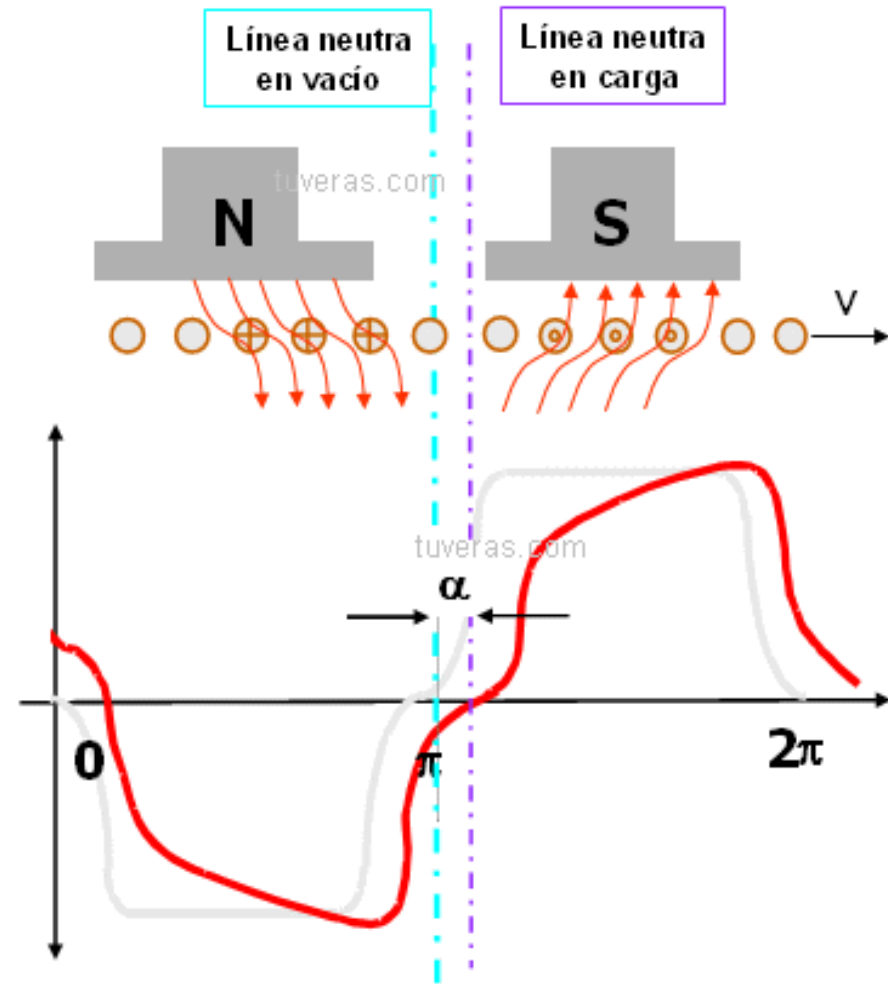
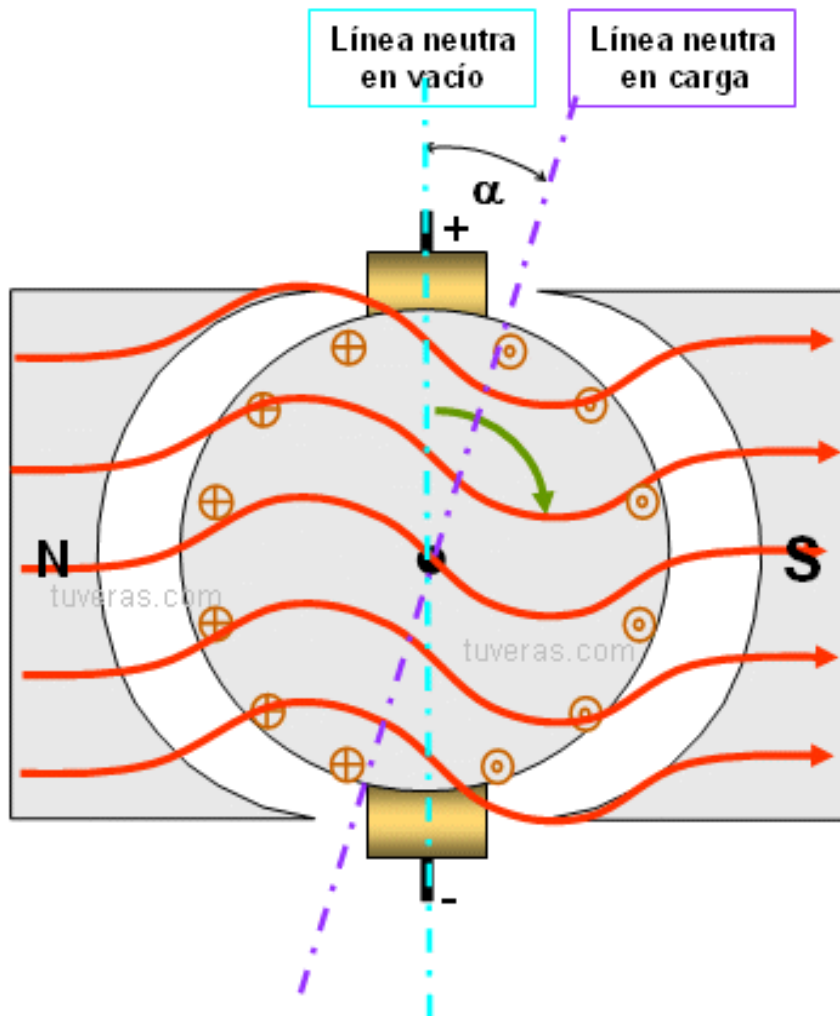


Campo Magnético Resultante



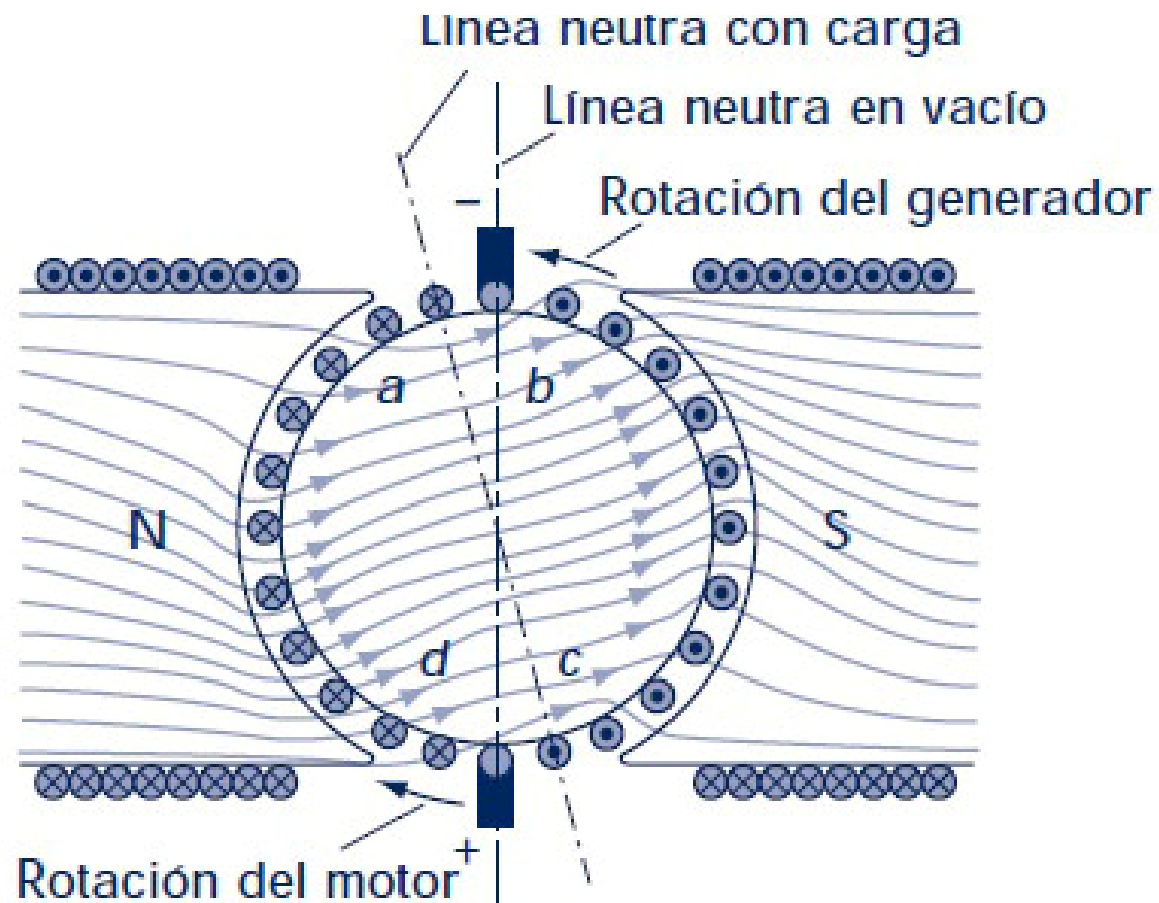
Máquinas de corriente continua

Reacción de inducido



Máquinas de corriente continua

Reacción de inducido



Posición de la línea neutra en vacío y en carga

Máquinas de corriente continua

Reacción de inducido

Inconvenientes de la Reacción del Inducido

Inconvenientes

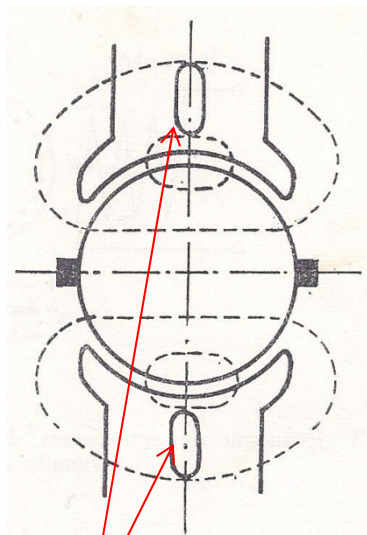
- Disminuye de la fem en carga E_c
- Disminuye indirectamente el rendimiento (pues se ha de aumentar la corriente de excitación para compensar el efecto anterior $\Rightarrow$ aumenta las P_j estator $\Rightarrow$ disminuye el rendimiento)
- Crea peligro de chispas en el colector
- Aumenta las dificultades para realizar una buena conmutación

Máquinas de corriente continua

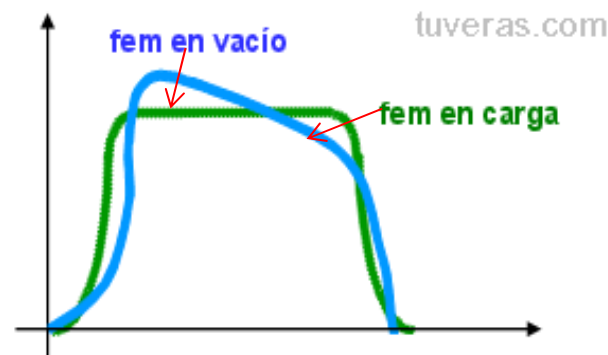
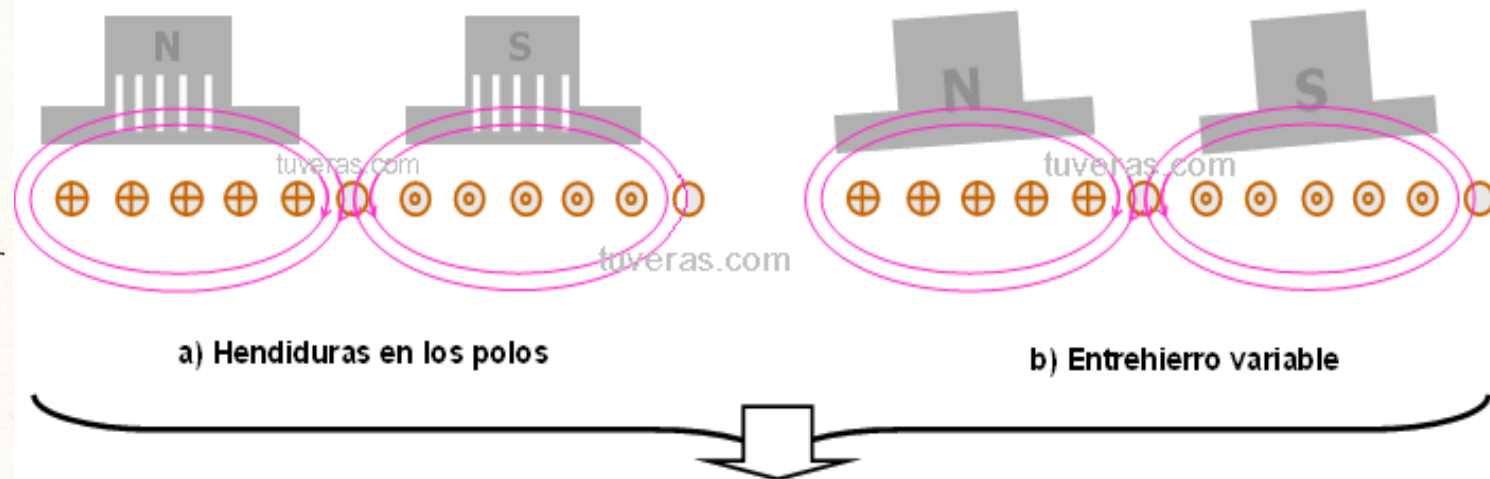
Disminución de la Reacción del Inducido

Por todo lo anterior es conveniente minimizar la reacción del inducido, a través de:

1º) Reducir la deformación de la curva de inducción en el entrehierro. Mediante, por ejemplo:



Entalladuras en los polos principales normales a la trayectoria del flujo transversal para incrementar la reluctancia de su circuito magnético sin apenas afectar a la reluctancia del circuito magnético correspondiente al flujo principal

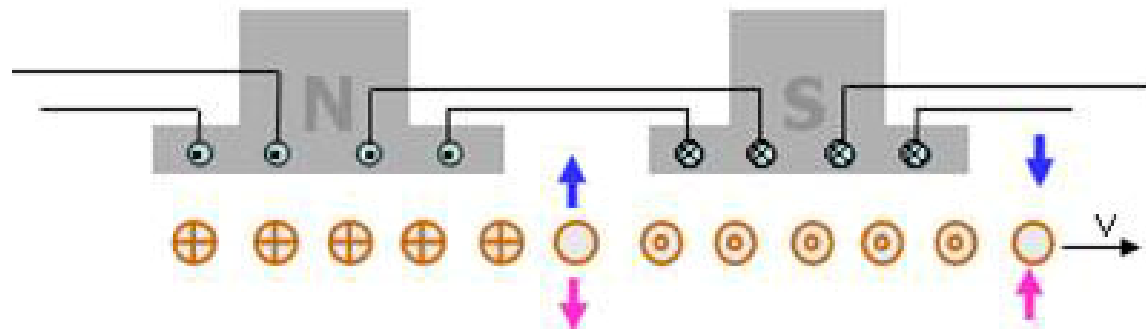
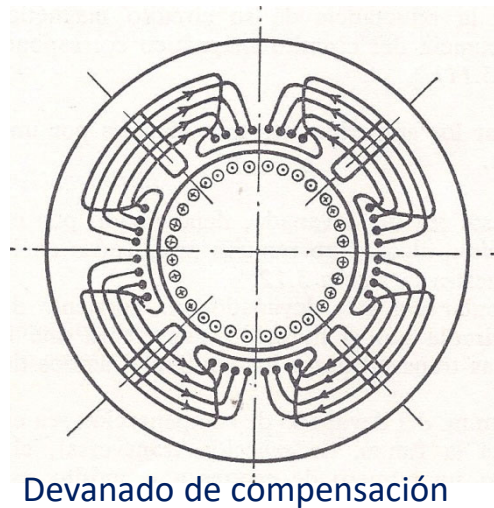


Máquinas de corriente continua

Disminución de la reacción de inducido

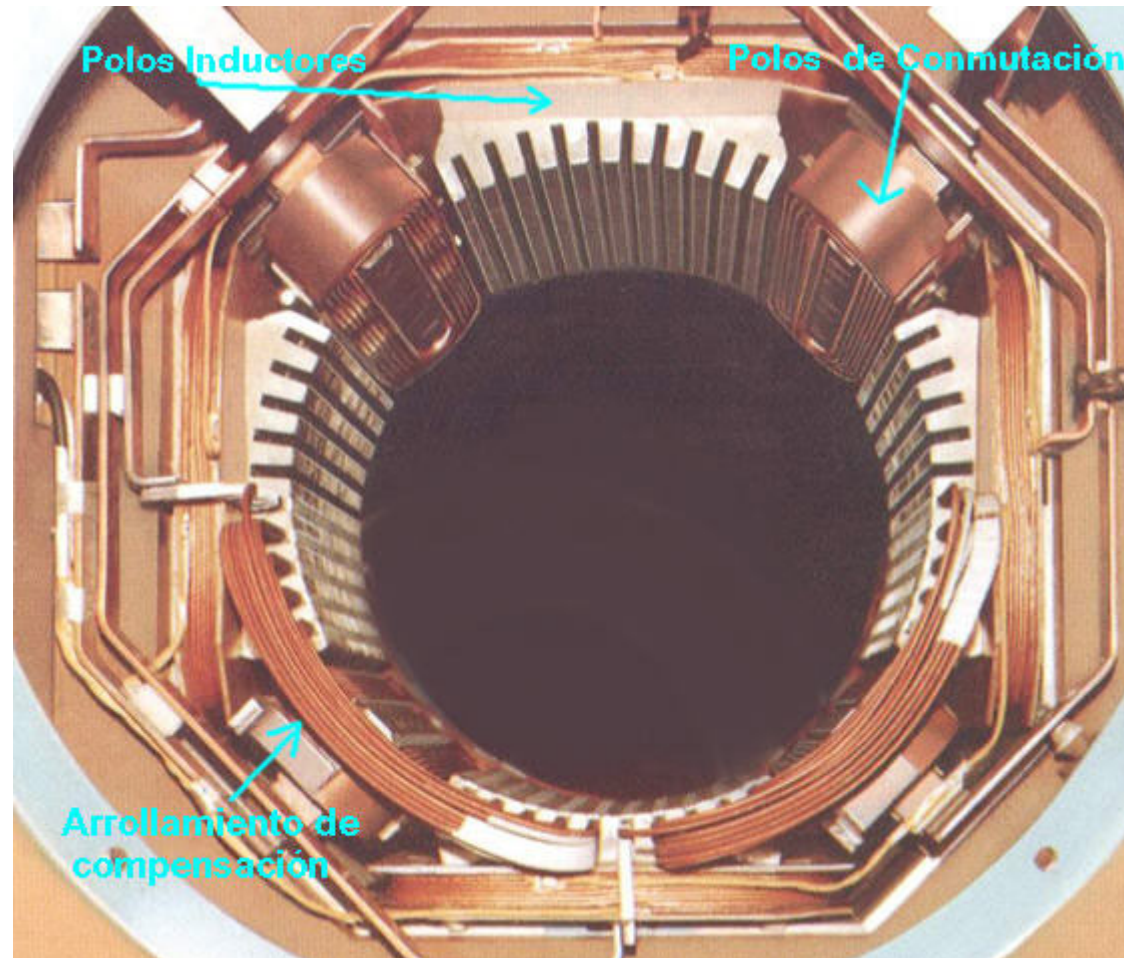
Devanado de compensación

Se trata de compensar los amperivuelta transversales por una f.m.m. Igual y opuesta. Se utiliza para este fin un devanado, denominado, por esta razón **de compensación** alojado en las ranuras practicadas en las expansiones polares y conectado en serie opuesta con el devanado inducido



Máquinas de corriente continua

Constitución



Máquinas de corriente continua

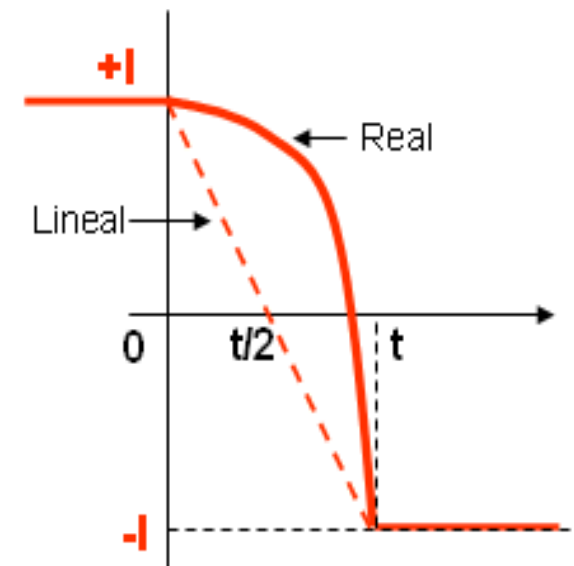
Conmutación

La conmutación es el conjunto de fenómenos que acompañan a la inversión del sentido de la corriente en la sección cortocircuitada por una escobilla.

Durante el tiempo t en que la sección está cortocircuitada, es decir, mientras sus conductores activos franquean la línea neutra, en dicha sección se crean dos fem:

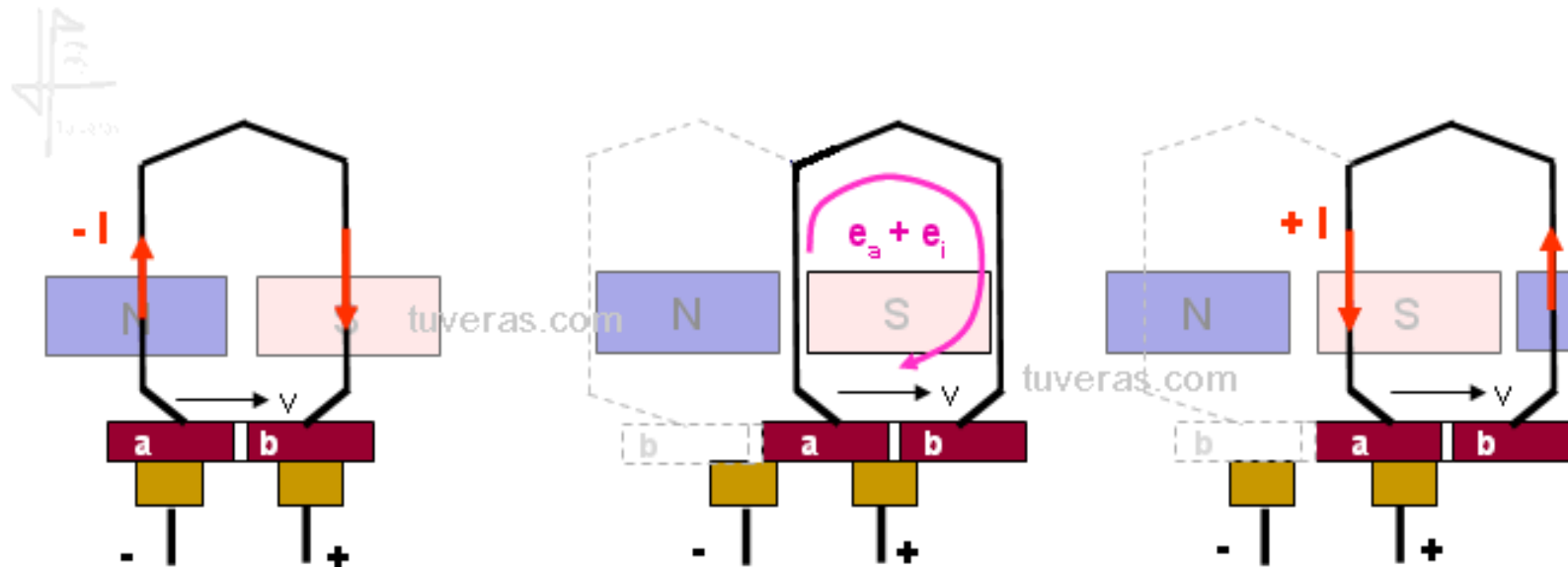
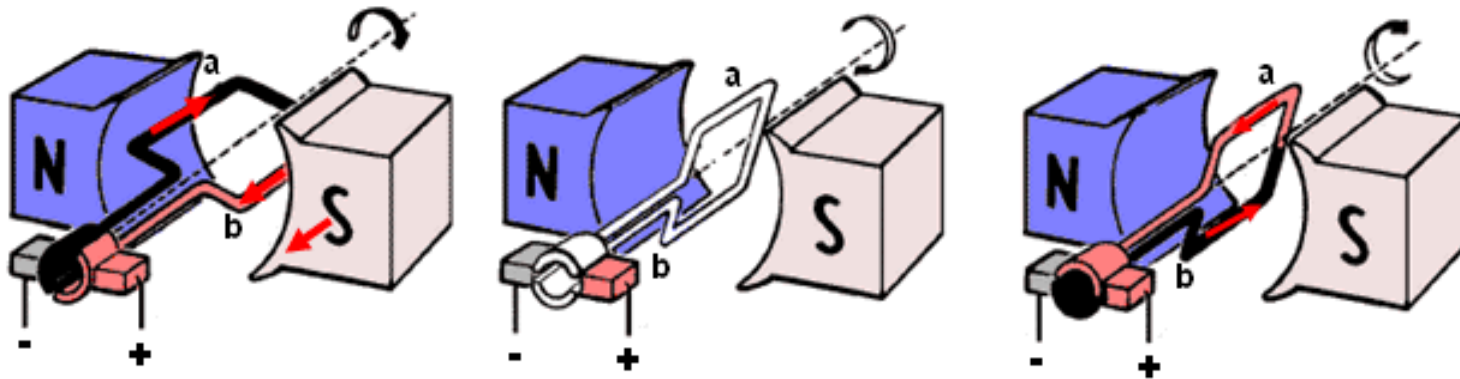
- a) Una fem de autoinducción $e_a = L \, di/dt$ variando la corriente i en el tiempo t , del valor I a $-I$
- b) Una fem de inducción $e_i = d\Phi_a/dt$ donde Φ_a es el flujo transversal del inducido cortado por los conductores activos en el tiempo t . Esta fem se suma a la anterior pues el sentido del flujo transversal es el mismo que el del polo del que procede el conductor como hemos visto anteriormente.

Estas dos fem tienen un efecto desfavorable. Sin ellas, el reparto de las corrientes i_a e i_b que circulan entre las delgas correspondientes y las escobillas, se realizaría según las conductancias de las derivaciones, de forma lineal, pero debido a estas dos fem, el reparto no es lineal, generando chispas.



Máquinas de corriente continua

Conmutación



Máquinas de corriente continua

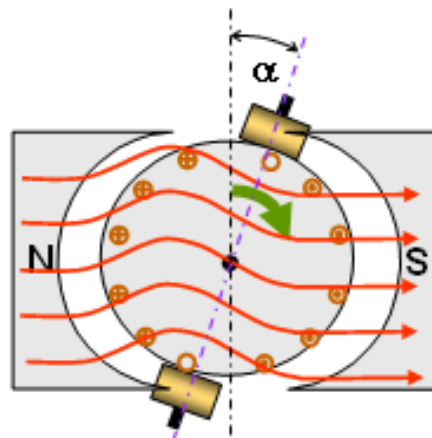
Medidas para Mejorar la Conmutación

La conmutación se aproximará tanto más a la ideal (reparto lineal de las corrientes en *a-escobilla* y *b-escobilla* según las conductancias) cuanto más reducida sea la corriente j producida por las fem e_a y e_b . Para ello se aplican los principios siguientes:

- ✦ Hacer las fem e_a y e_b lo más **pequeña** posible
 - Aumentando el número de delgas del colector.
 - Aumentando el número de escobillas
 - Disminuyendo el flujo transversal, por los métodos vistos para disminuir la reacción del inducido.
- ✦ **Aumentar la resistencia** que se opone a la corriente j

La resistencia del circuito de la corriente j consta de la resistencia de la sección en conmutación, de la resistencia de las escobillas y de las resistencias de contacto a-escobilla y b-escobilla.

- ✦ **Crear, en la sección de conmutación, una fem opuesta a $e_a + e_b$**
 - **Desplazamiento de las escobillas** un adelanto suplementario (en el sentido de rotación) al correspondiente al de la línea neutra en carga, tal que, se produzca en la sección en conmutación una fem de sentido opuesto a la suma de e_a y e_b

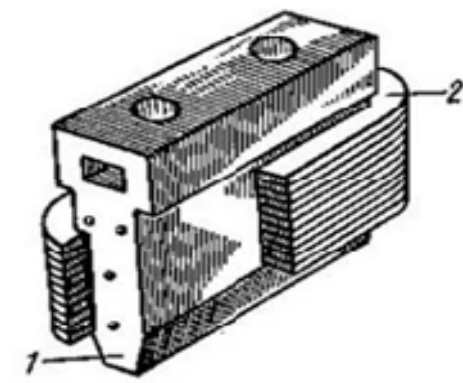


Máquinas de corriente continua

Medidas para mejorar la conmutación

- **Polos de conmutación o auxiliares** que: anulan el flujo transversal sobre la línea neutra teórica y además producen en la sección de conmutación una **fem opuesta** a e_a

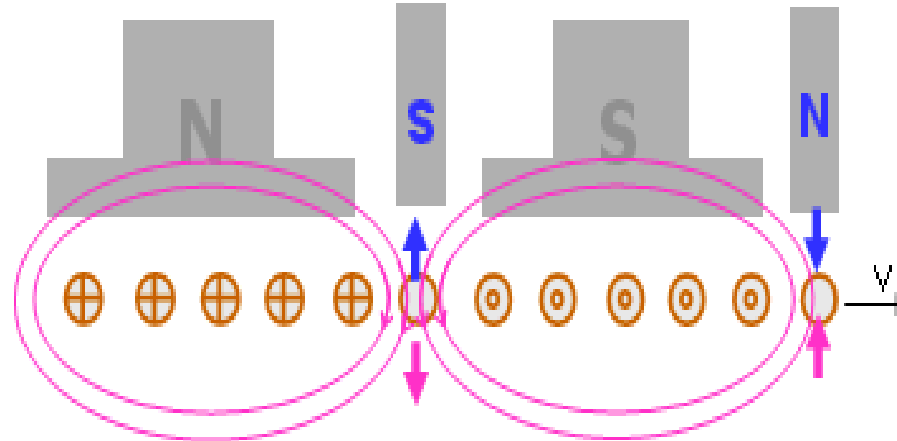
De estos dos métodos, excepto para tensiones y potencias muy bajas ($< \approx 3\text{KW}$) se emplea exclusivamente los polos de conmutación.



Polo auxiliar

1- Núcleo

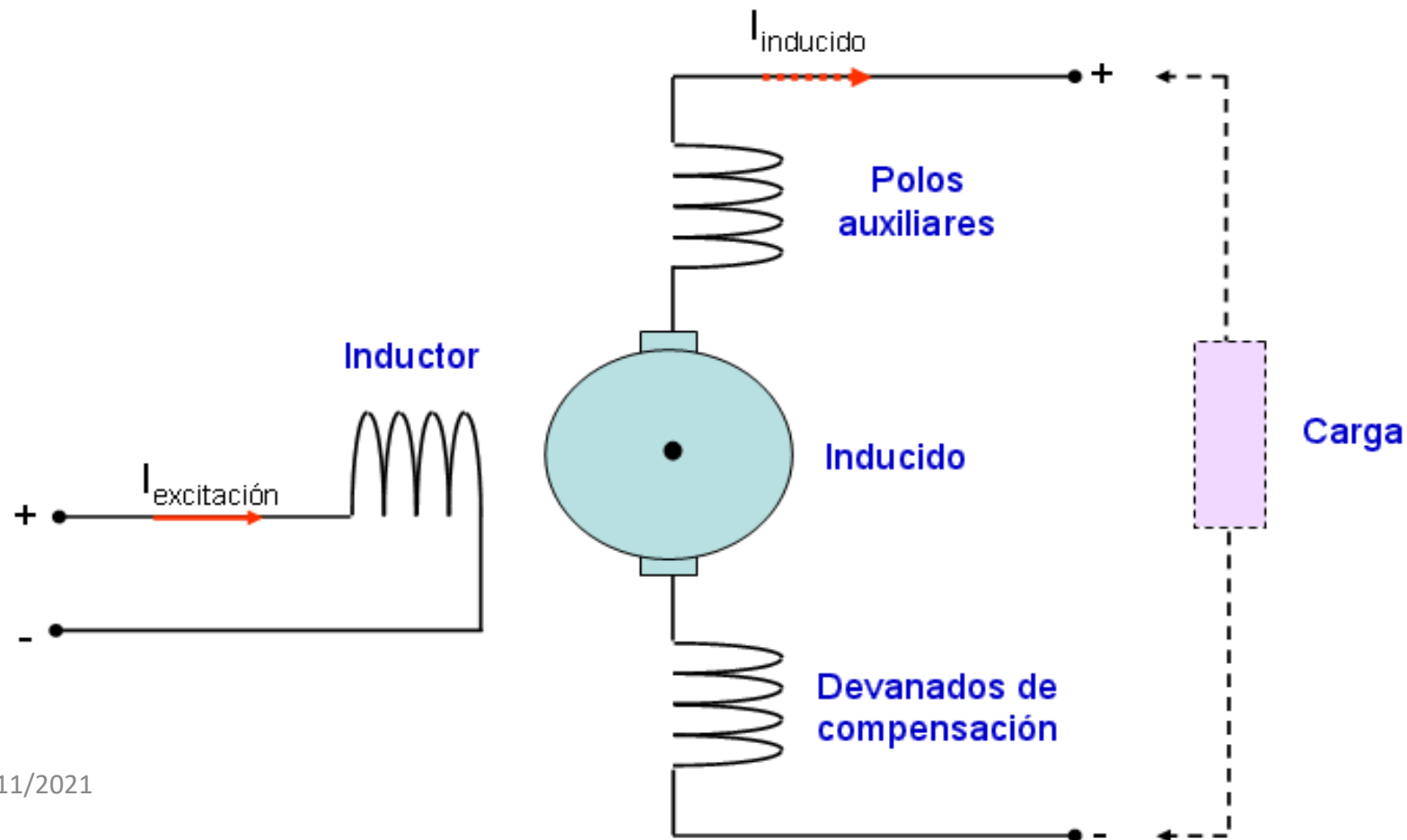
2- Bobina polar



Máquinas de corriente continua

Medidas para mejorar la conmutación

Si bien con unos polos auxiliares bien calculados se alcanza una conmutación correcta en todo el campo de funcionamiento normal de la máquina, ellos sin embargo no evitan la distorsión de la curva de inducción bajo los polos principales con su secuela de los inconvenientes, el mas grave de los cuales puede ser arco entre escobilla cuando la máquina está sujeta bruscas sobrecargas o trabajos muy duros. En estos casos es obligado recurrir, además de los polos auxiliares, al devanado de compensación.



Máquinas de corriente continua

Curvas características

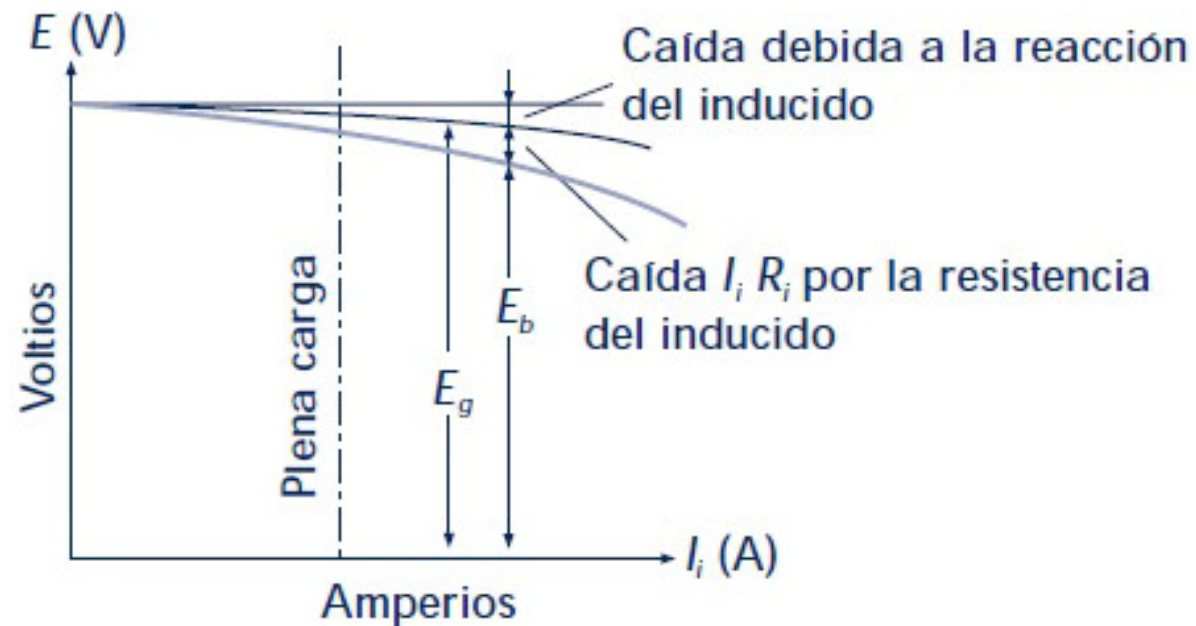
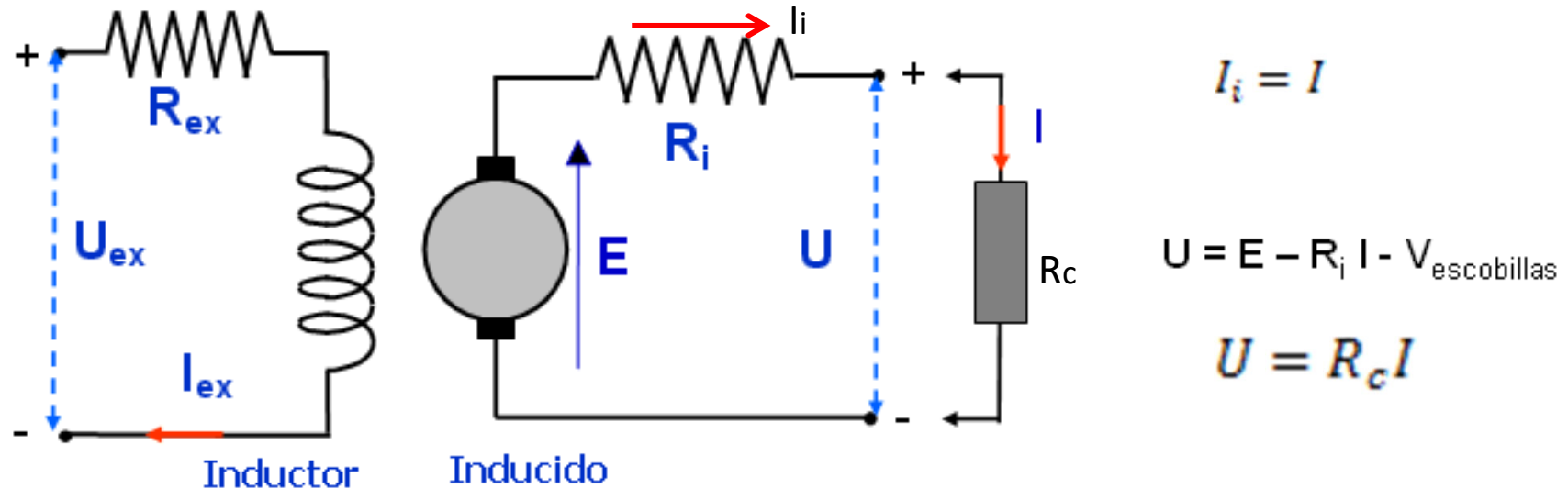
El funcionamiento de una máquina de cc depende de cuatro variables: *la velocidad N , La corriente de excitación i , la tensión en bornes U y la corriente I del inducido*. Si se toma una de las magnitudes como *constante*, otra como *parámetro*, otra como *variable* y otra como *función*, se obtiene una familia de curvas. Las características usuales de una dinamo se obtienen a partir de tomar:

Característica	Función	Variable	Parámetro	Constante
de excitación constante $U(I)$: característica externa	U	I	i	
a tensión constante $i(I)$: curva de regulación	i	I	U	N
de corriente constante $U(i)$: característica en carga	U	i	I	

De todas ellas merece especial atención la característica externa.

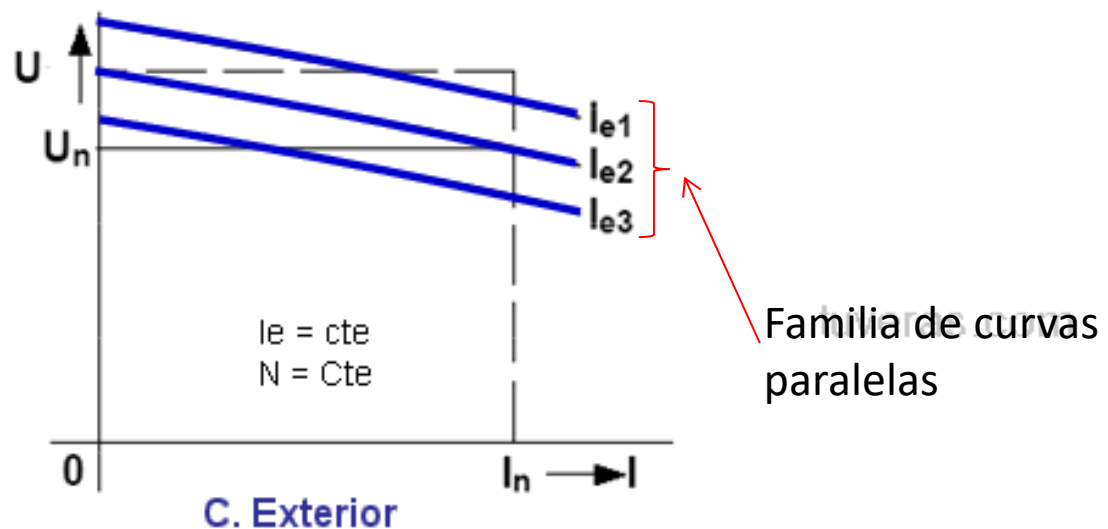
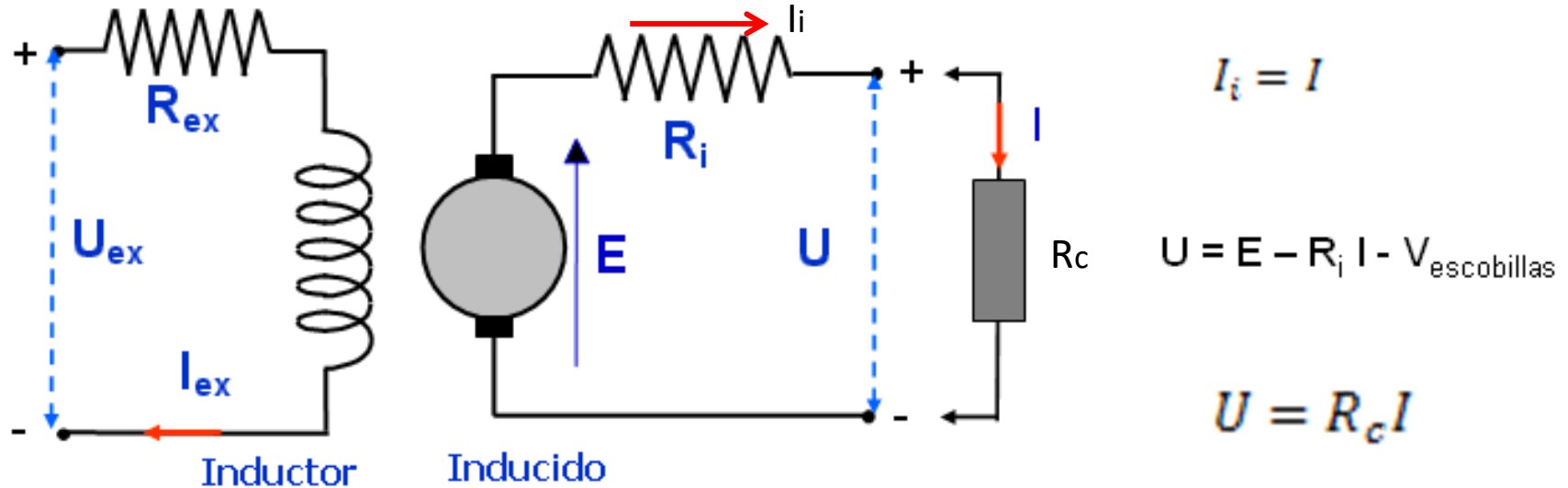
Máquinas de corriente continua

Dinamo de excitación independiente



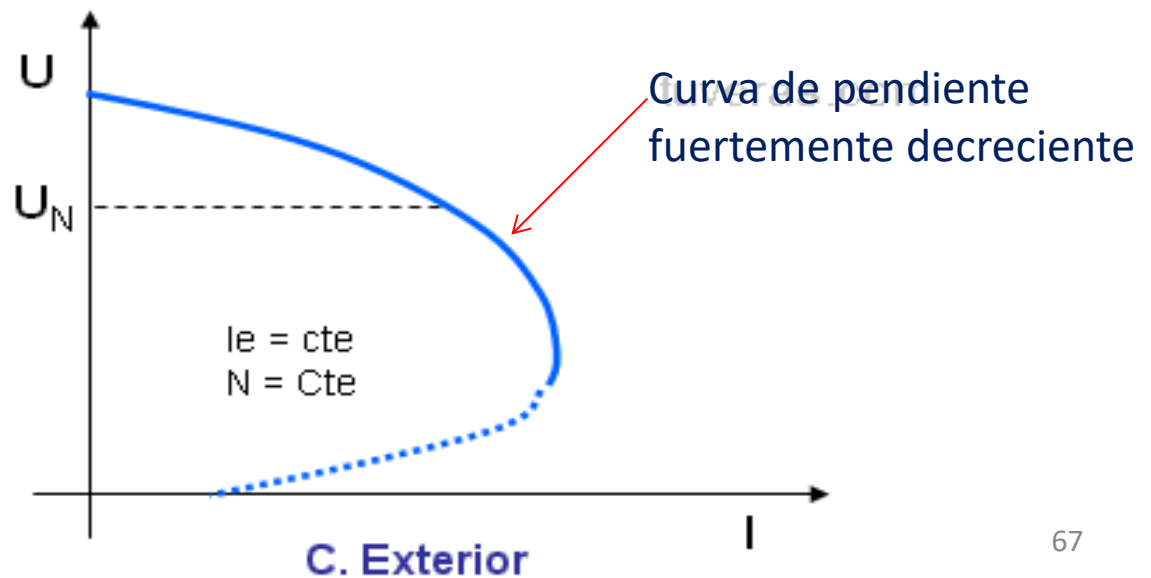
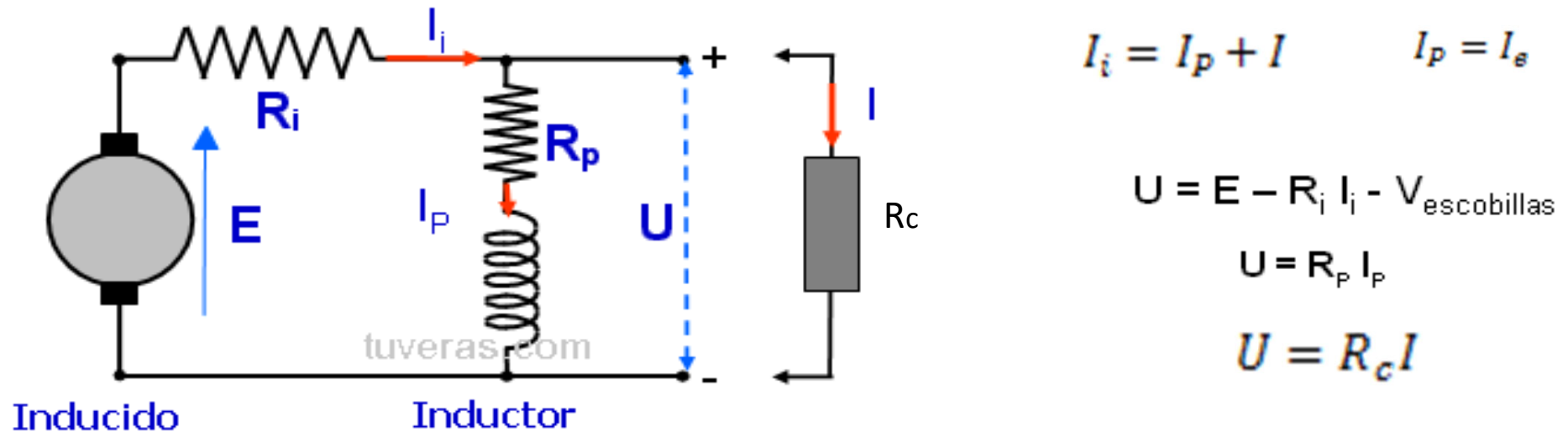
Máquinas de corriente continua

Dinamo de excitación independiente



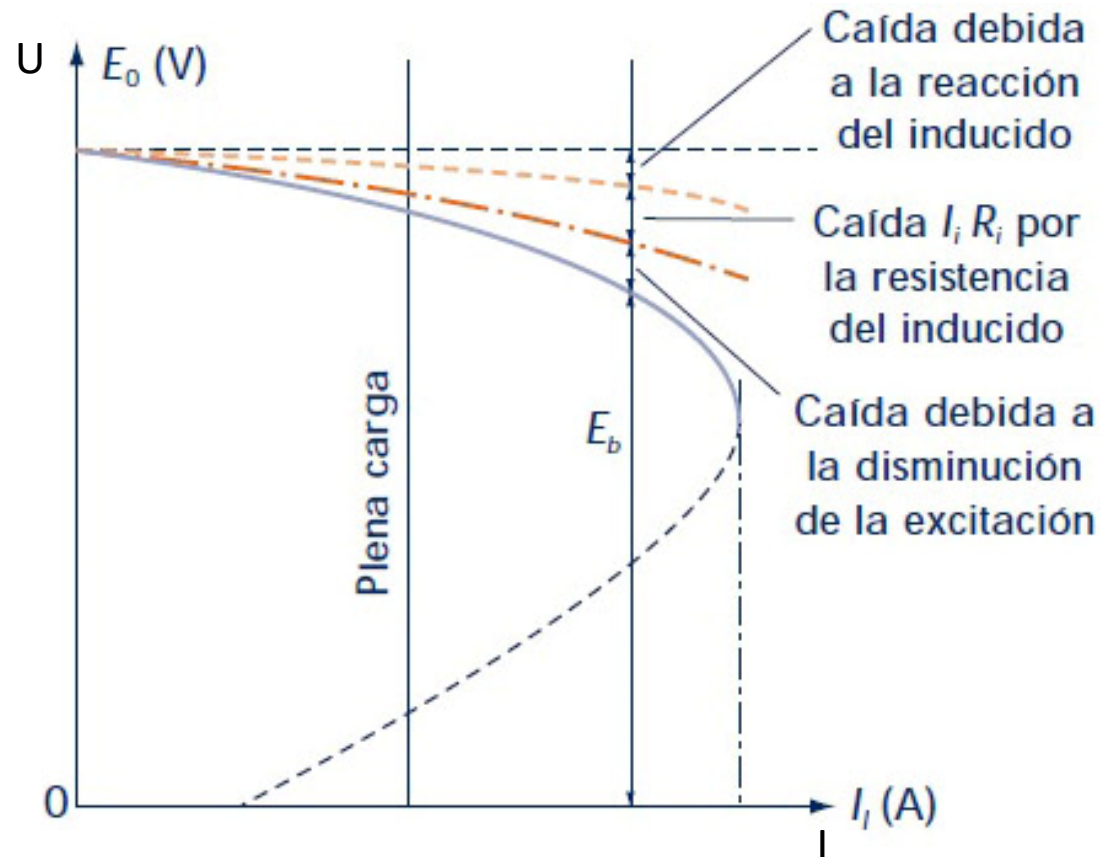
Máquinas de corriente continua

Dinamo de excitación derivación



Máquinas de corriente continua

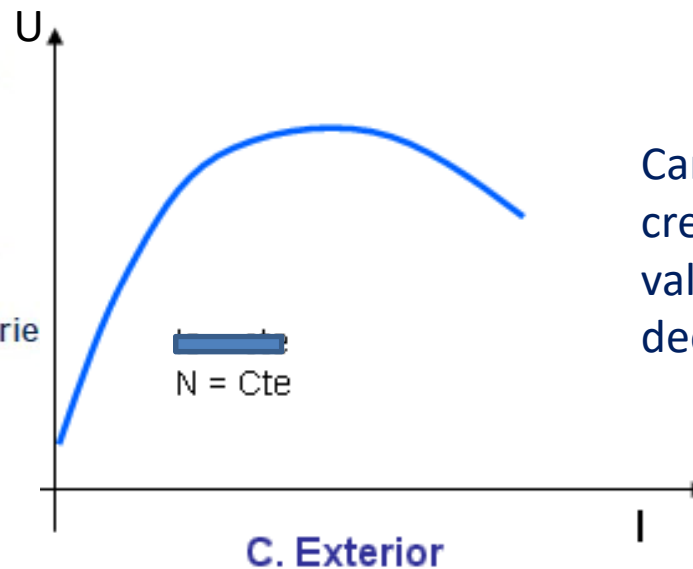
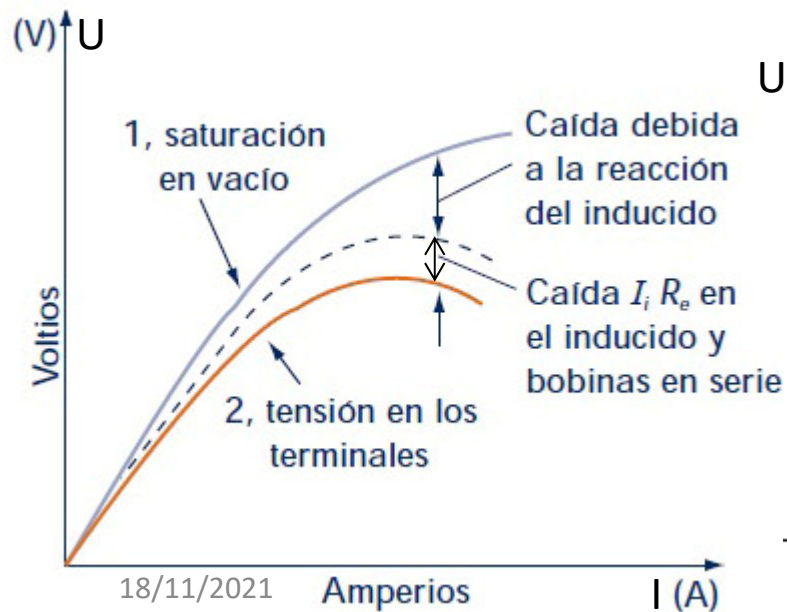
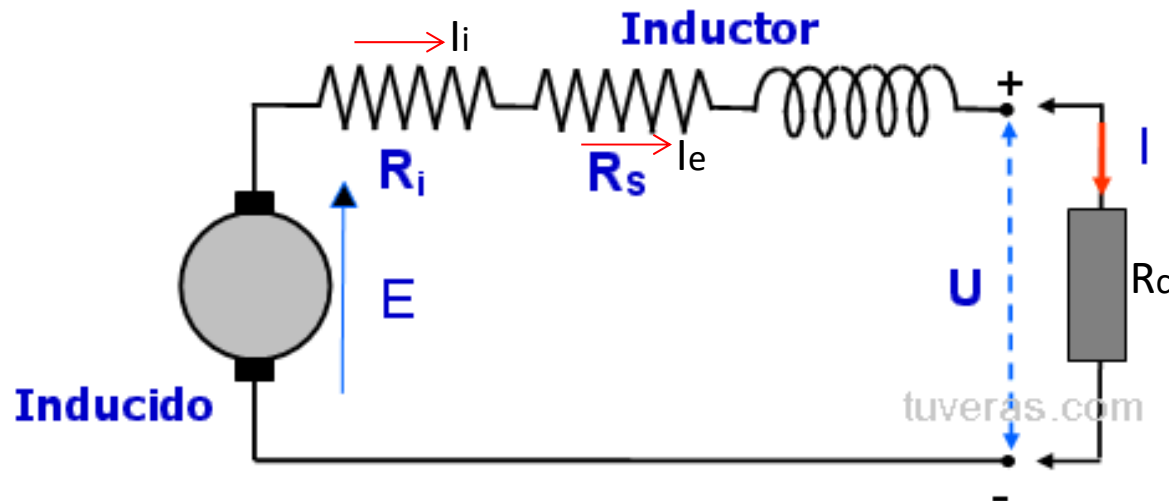
Dinamo de excitación derivación



Característica exterior de una dinamo de excitación derivación

Máquinas de corriente continua

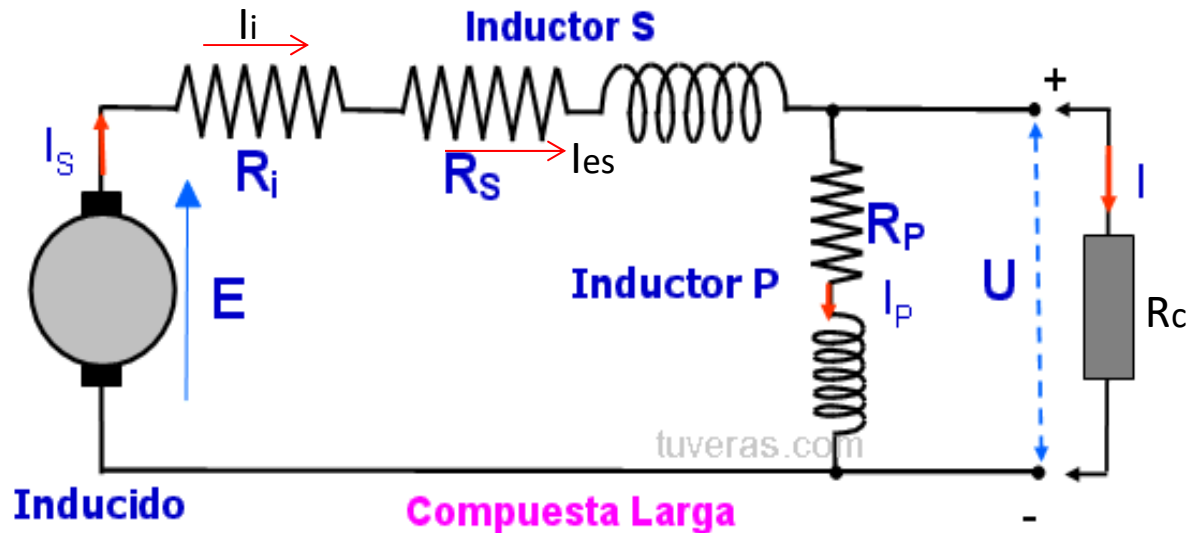
Dinamo de excitación serie



Característica exterior creciente hasta llegar a un valor máximo y luego decrece

Máquinas de corriente continua

Dinamo de excitación compuesta

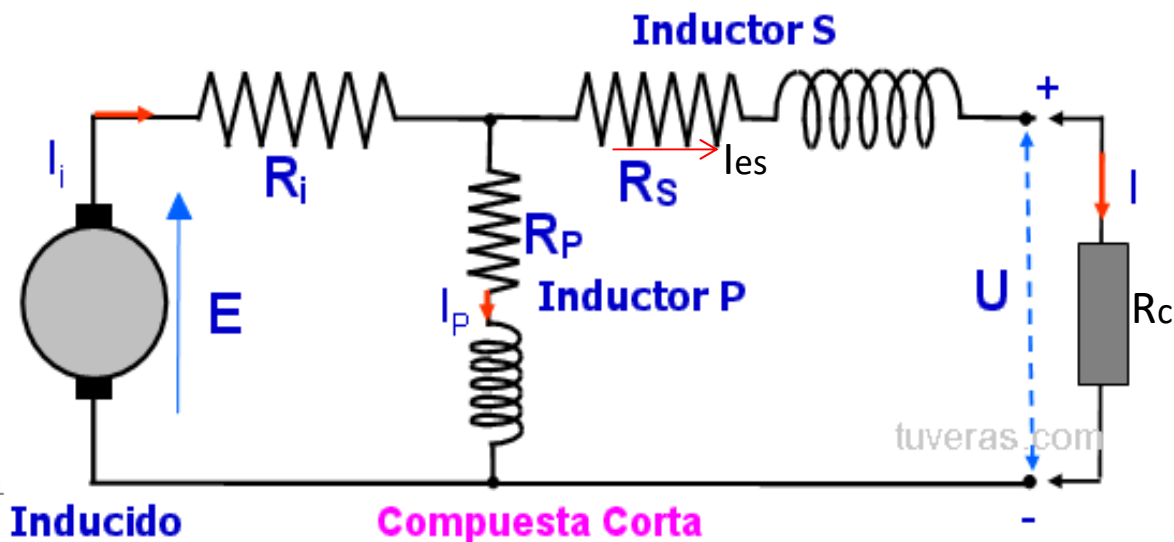


$$I_s = I_i = I_{es} = I_p + I$$

$$U = E - (R_i + R_s) I_s - V_{\text{escobillas}}$$

$$U = R_p I_p$$

$$U = R_c I$$



$$I_i = I_p + I_{es} \quad I = I_{es}$$

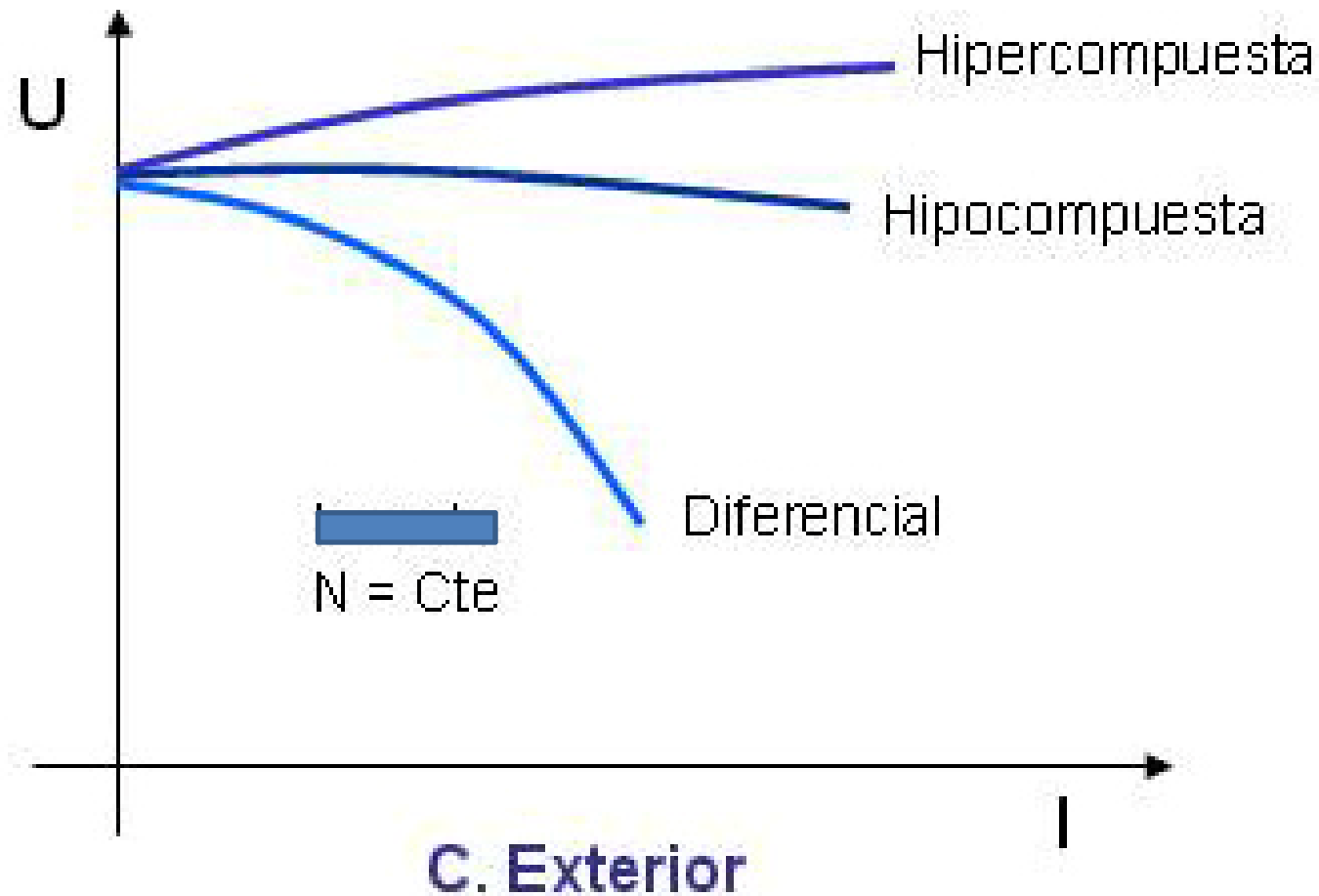
$$U = E - R_i I_i - R_s I - V_{\text{escobillas}}$$

$$U = R_p I_p - R_s I$$

$$U = R_c I$$

Máquinas de corriente continua

Dinamo de excitación compuesta

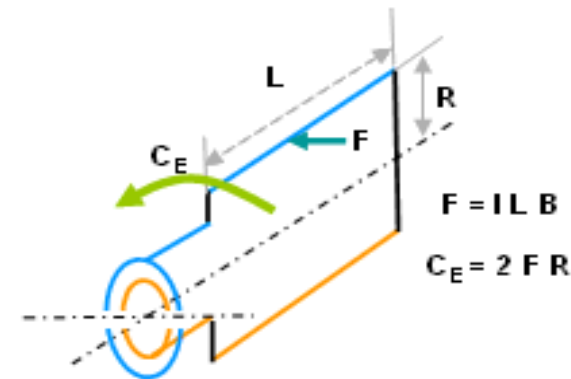
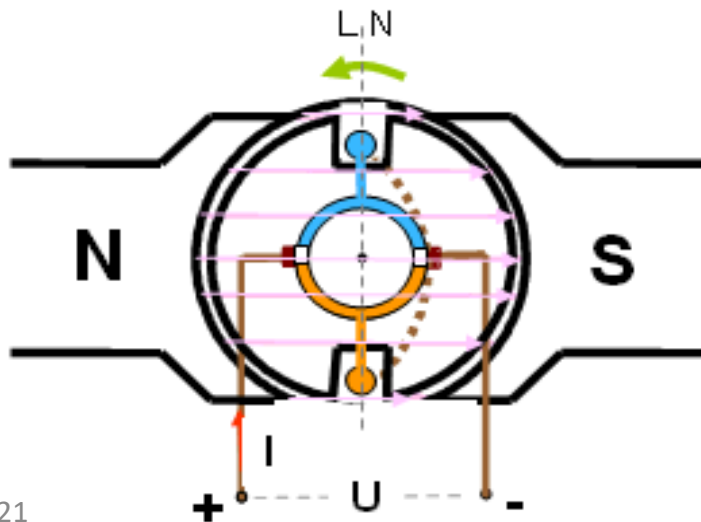


Máquinas de corriente continua

Motor de Corriente Continua

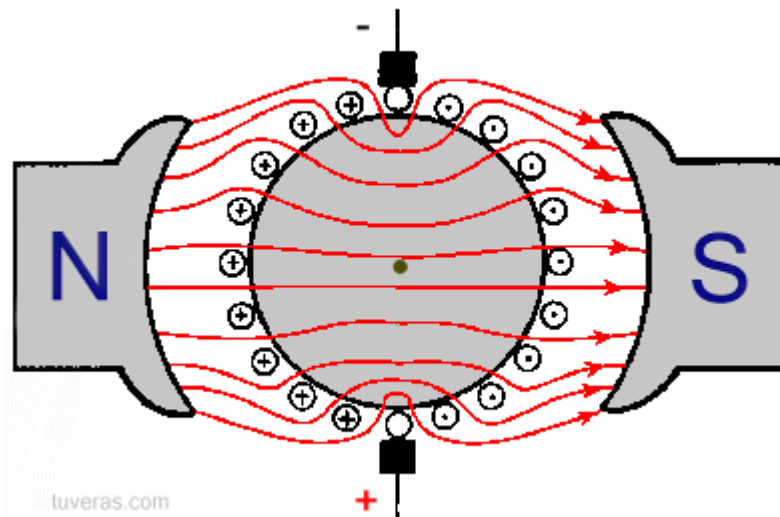
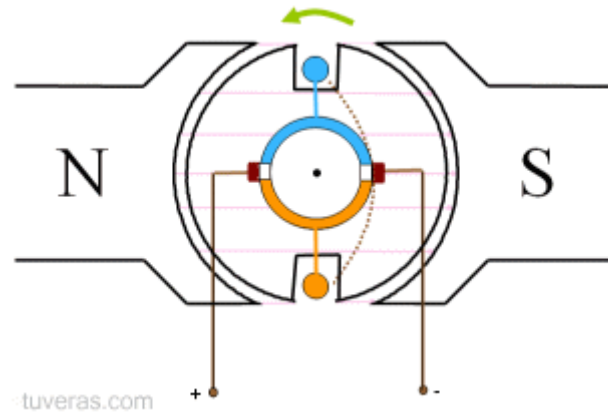
Un motor de corriente continua consiste esencialmente en una dinamo trabajando en régimen inverso, es decir, se conecta a una tensión U que da lugar al paso de una intensidad I por el inducido y como consecuencia un par electromagnético C_E que hace girar la dinamo, cuyo giro produce a su vez una fce_m E opuesta a la tensión U .

El sentido de la corriente en la espira se ha de invertir en cada semiperiodo, al cruzar el conductor activo la línea neutra. Esto se consigue mediante el cambio de escobilla en contacto con el colector tal como indica la figura.



Máquinas de corriente continua

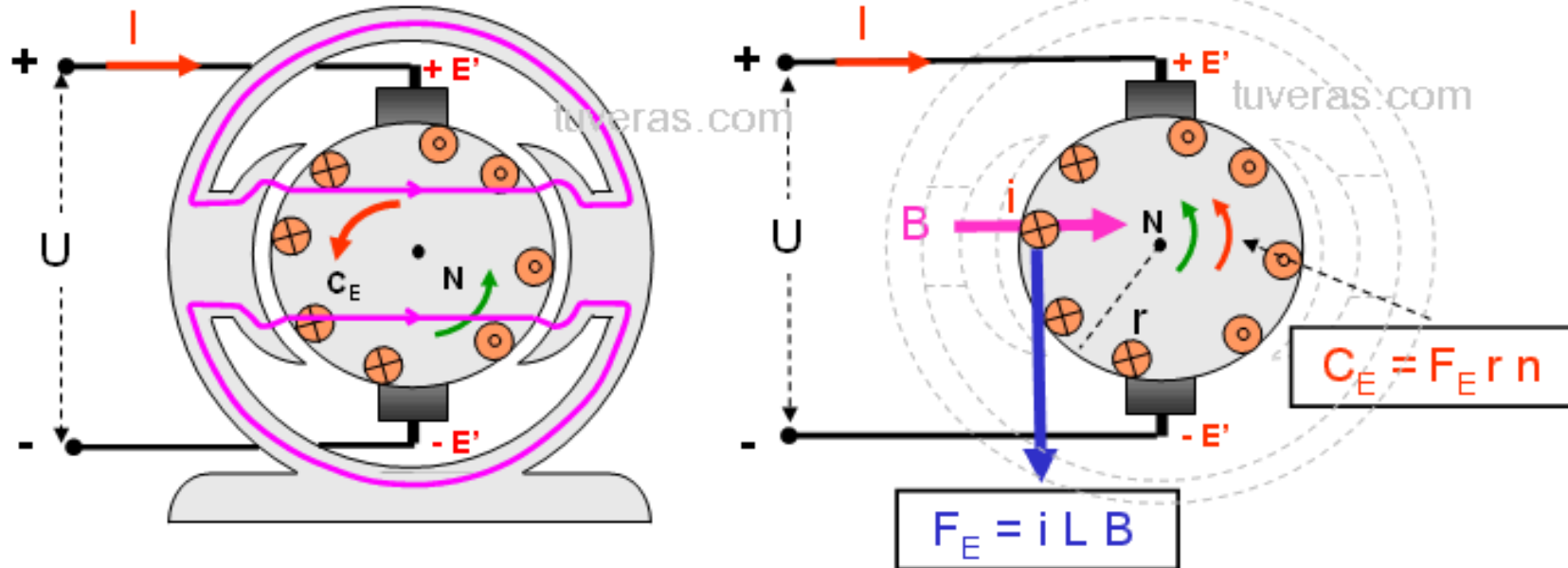
Motor de corriente continua



Máquinas de corriente continua

Par Electromagnético

Sea un motor de p pares de polos y c pares de ramas o vías en paralelo, n conductores activos y Φ_p flujo por polo. Al circular una corriente i por cada conductor aparece una fuerza electromagnética F_E que da lugar a un par C_E que hace girar el inducido (rotor) del motor, y cuyo valor se obtiene de forma análoga que para el caso de la dinamo, con la diferencia que ahora el par C_E y la rotación del motor tienen el mismo sentido.



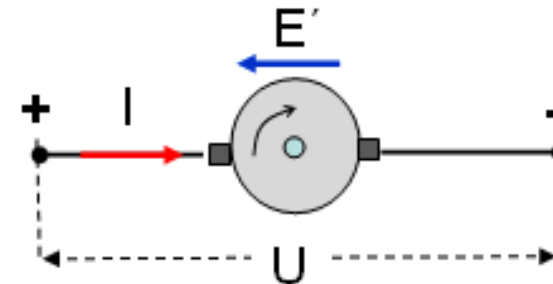
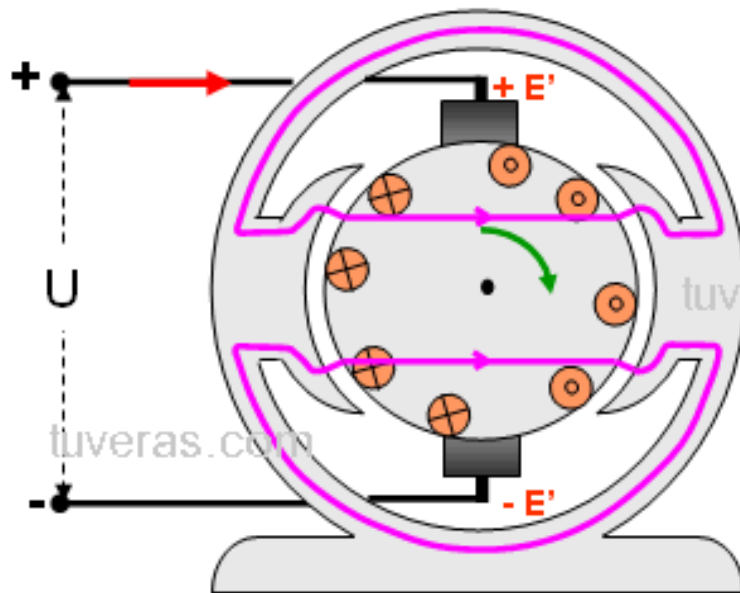
$$C_E = \frac{n}{c} \frac{p}{2\pi} \Phi_p I$$

$$C_E = K \Phi_p I$$

Máquinas de corriente continua

Fuerza Contraelectromotriz

En un motor de p pares de polos, c ramas en paralelo o vías, n conductores activos, que gira a N rpm, siendo su flujo polar Φ_p se genera una **fem**, cuyo valor se obtiene de forma análoga a la fem de la dinamo, con la diferencia que ahora su sentido es de oposición a la corriente, por lo que se le llama **fcem**.

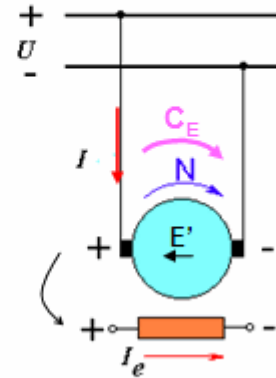


$$E' = \frac{p}{c} n \frac{N}{60} \Phi_p$$

$$E' = K N \Phi_p$$

Máquinas de corriente continua

Fcem, Par y Rendimiento



$$U = E' + IR + V_{\text{escobillas}}$$

$$UI = E'I + I^2 R + P_{\text{escobillas}}$$

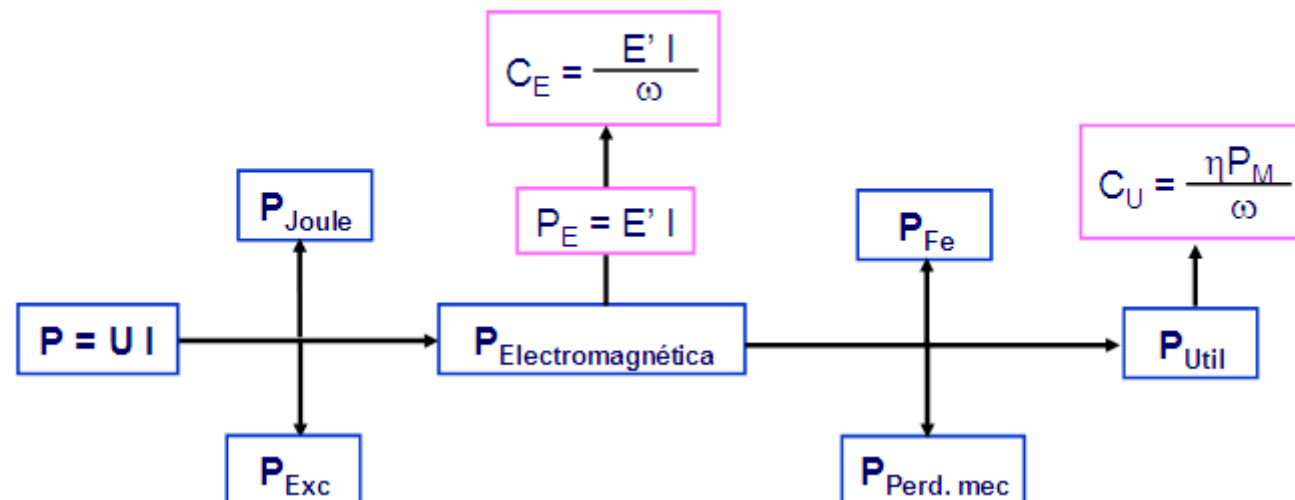
$$UI = E'I + P_{\text{Joule}}$$

Si $P_M = P$ del motor

$$P_M = UI$$

$$\eta = \frac{P_{\text{Útil}}}{P_M}$$

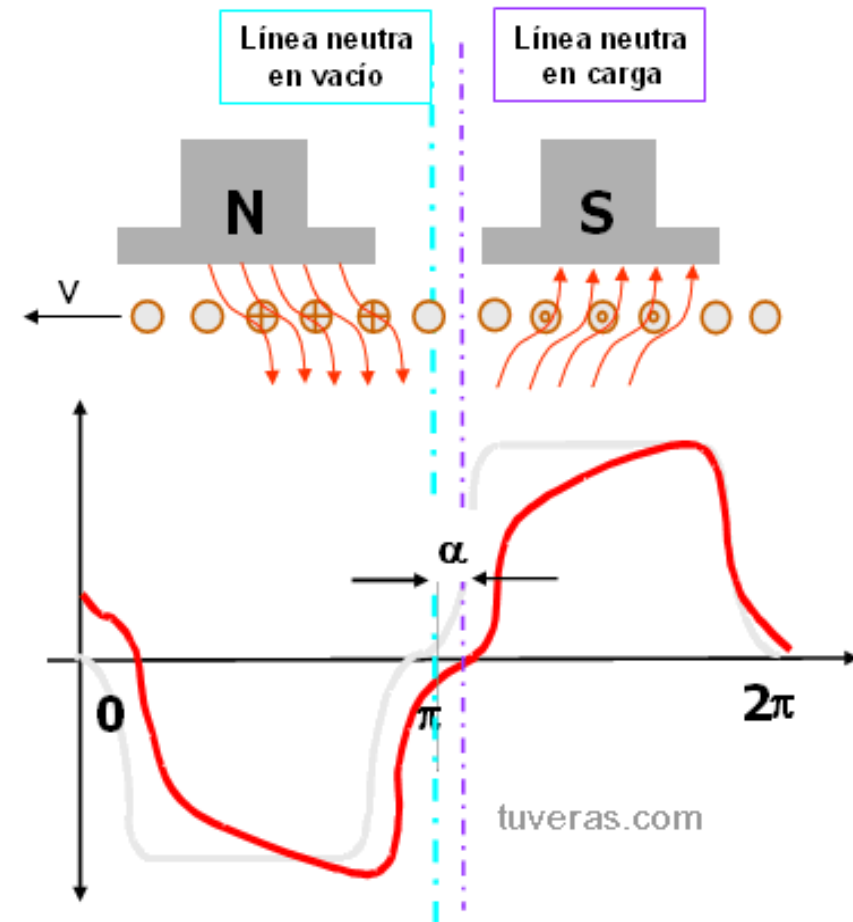
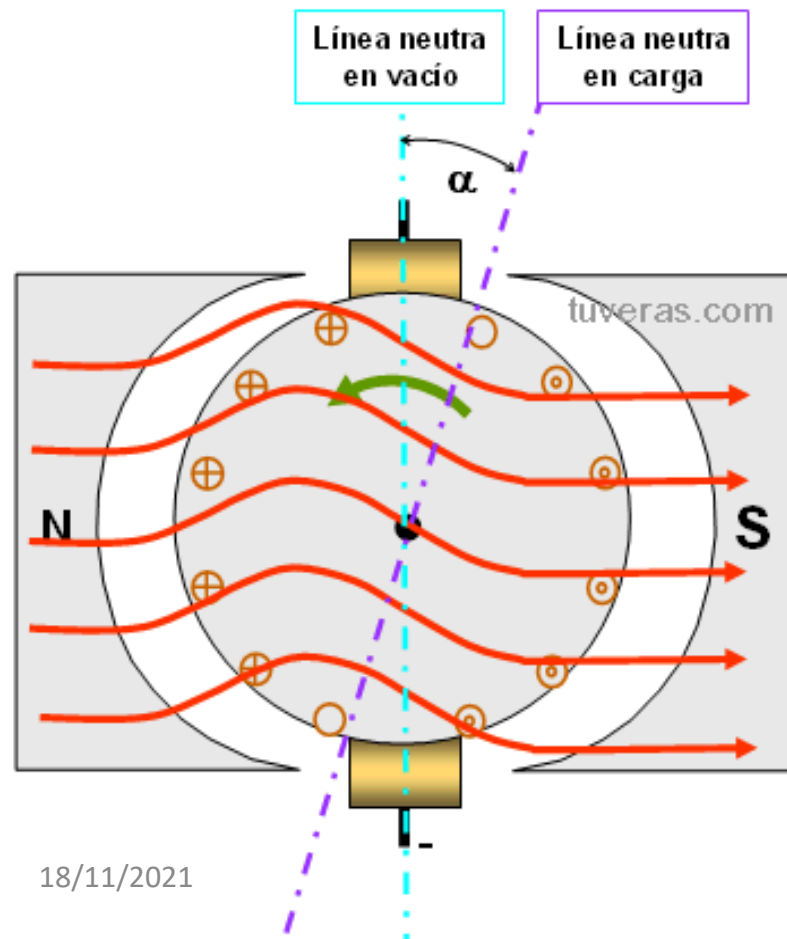
$$\eta = \frac{UI - P_{\text{Joule}} - P_{\text{Exc}} - P_{\text{Fe}} - P_{\text{Perd Mec}}}{UI}$$



Máquinas de corriente continua

Reacción del Inducido

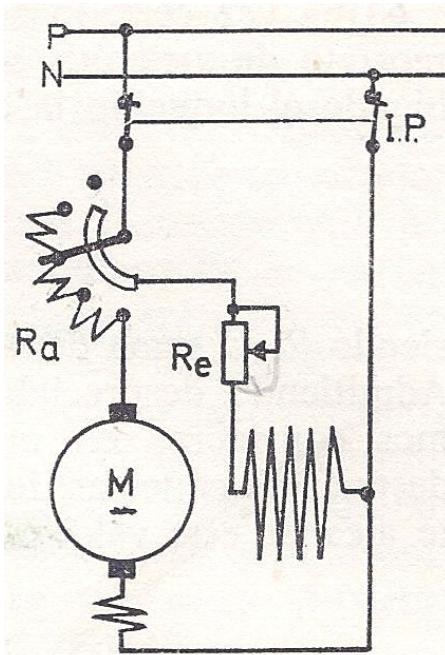
En el motor el flujo del inductor se distorsiona debido al flujo magnético creado por la corriente del inducido, el cual es perpendicular al flujo magnético principal creado por los polos inductores Φ_p y se origina un fenómeno análogo al caso de la dinamo, **la reacción del inducido**, con la particularidad de que ahora la **línea neutra retrasa respecto del sentido de giro**, tal como indica el gráfico adjunto.



Máquinas de corriente continua

Motor de corriente continua

Arranque



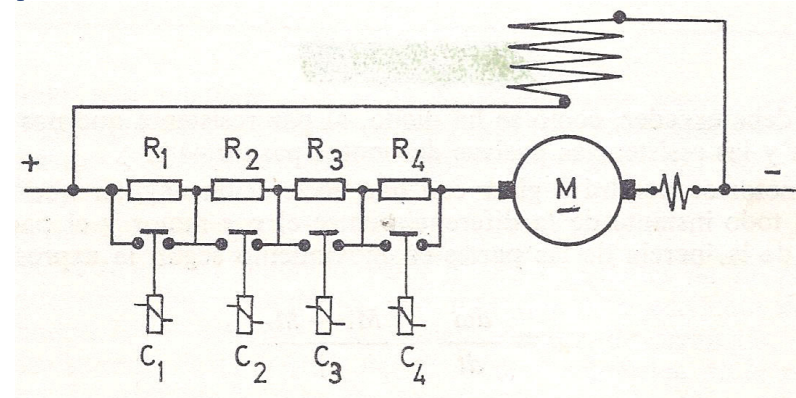
Esquema de conexiones de un motor de c.c. excitación derivación con reostato de arranque Ra

$$I_{ia} = \frac{U}{R_i + R_a}$$

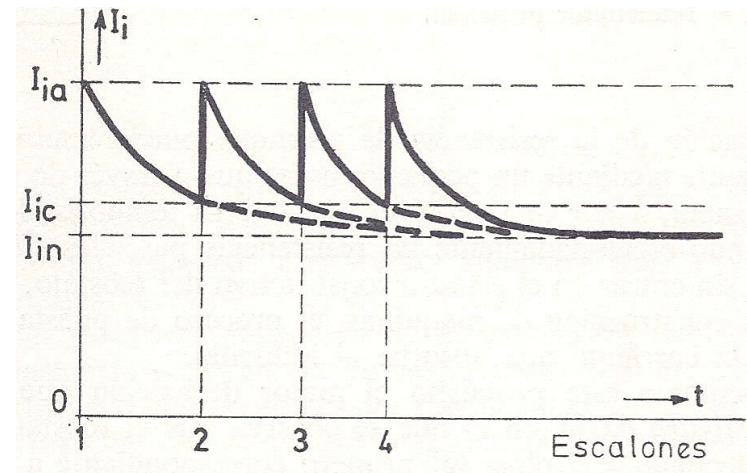
$$M_{ia} = C_2 \cdot I_{ia} \cdot \Phi$$

$$a = \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_i - M_r}{J}$$

a= aceleración
J= inercia de las partes en movimiento



Arranque automático de un motor de c.c. derivación mediante contactores temporizados



Gráfica intensidad-tiempo durante el proceso de arranque de un motor de c.c. por resistencias escalonadas

Potencia del motor	Constante máxima de proporcionalidad Iia/Iin
De 0,75 a 1,5 kW	2,5
De 1,5 a 5 kW	2
De más de 5 kW	1,5

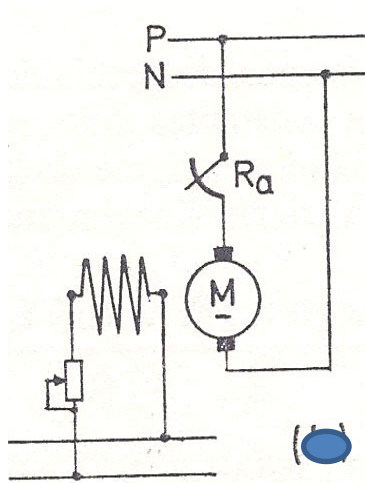
Máquinas de corriente continua

Curvas características del motor de CC

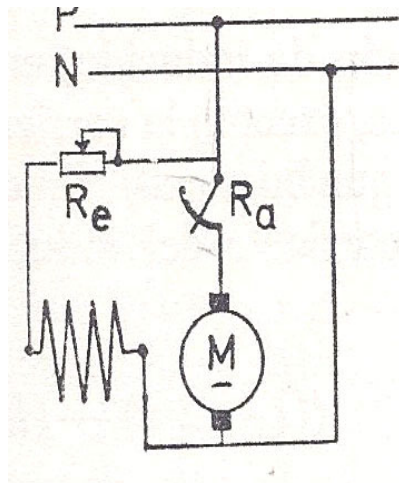
Son el conjunto de curvas que representa las relaciones existentes entre las distintas variables de explotación de los motores. Las más usuales son:

Característica	Función	Variable	Parámetro	Constante
de Velocidad: $N(I)$	N	I	C	
de Par: $C(I)$	C	I	N	U, i
Mecánica $C(N)$	C	N	I	

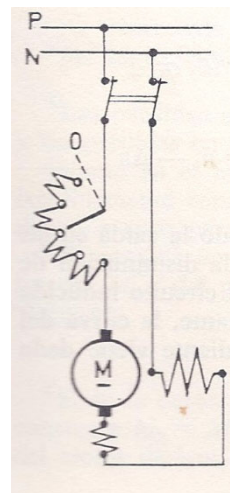
Las características de funcionamiento del motor de corriente continua dependen del tipo de excitación.



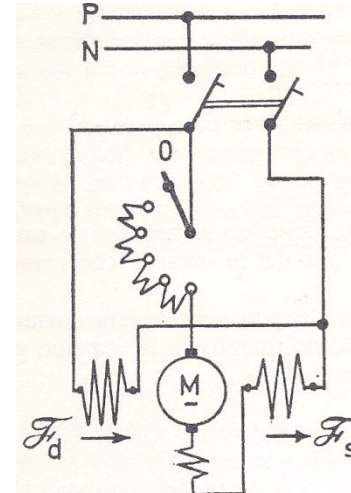
Exc. independiente



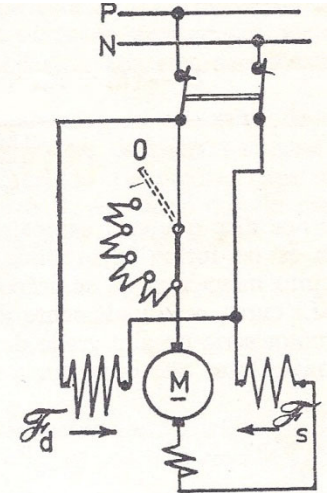
Exc. derivación



Exc. serie

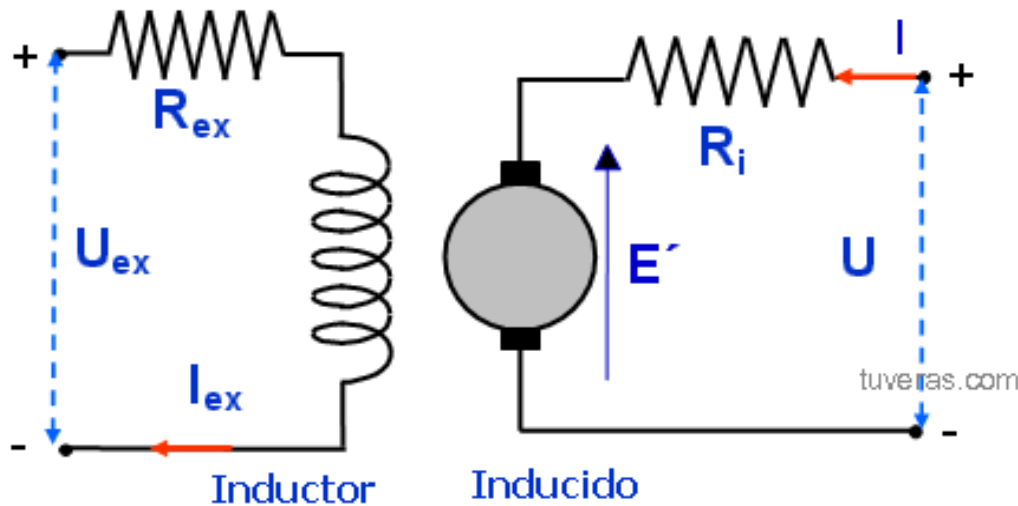


Exc. compuesta



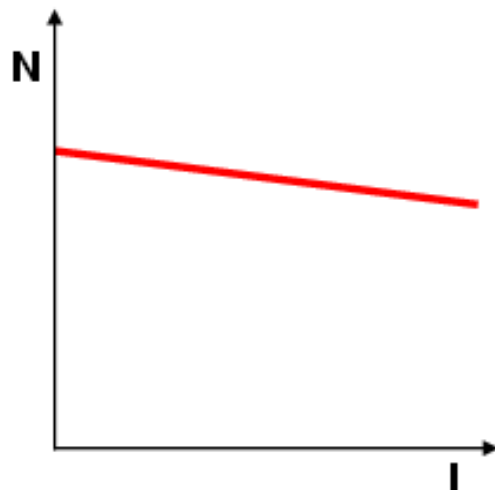
Máquinas de corriente continua

Motor de excitación independiente

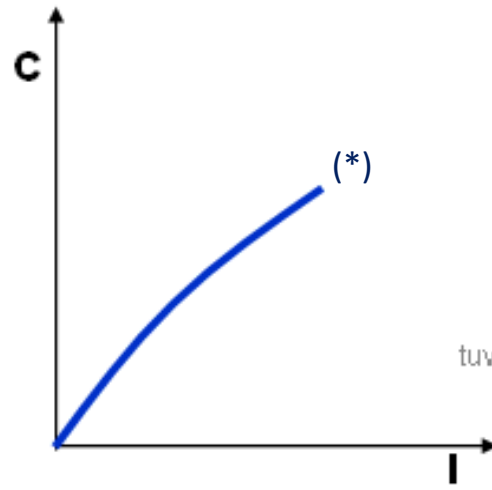


$$U = E' + R_i I + V_{\text{escobillas}}$$

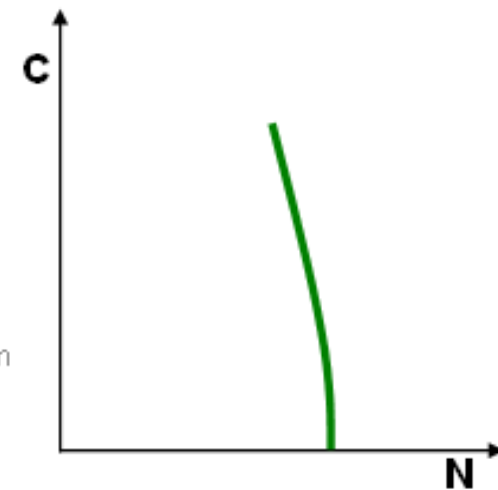
$$U_{\text{ex}} = R_{\text{ex}} I_{\text{ex}}$$



18/11/2021 Característica de Velocidad



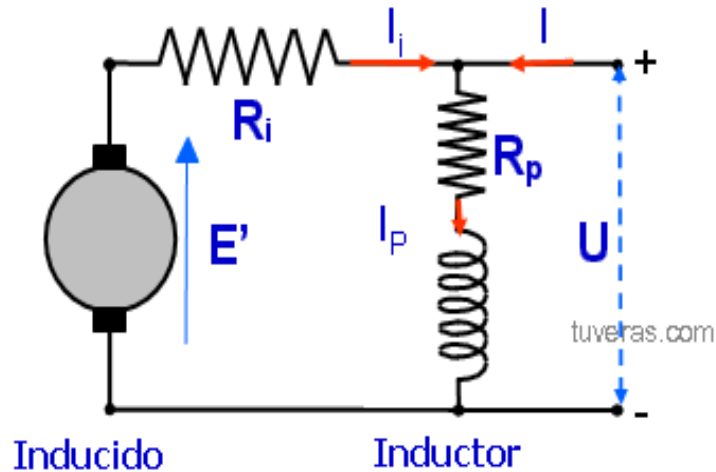
Característica de Par



Característica Mecánica

Máquinas de corriente continua

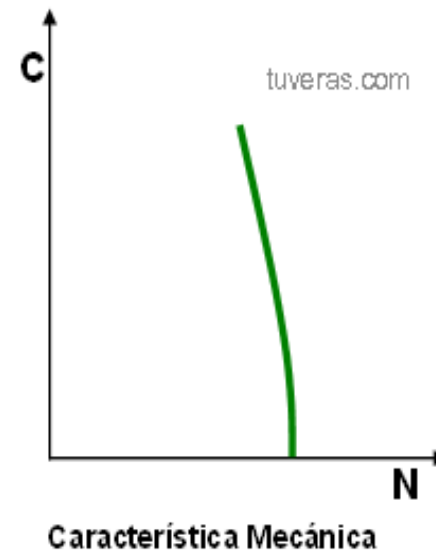
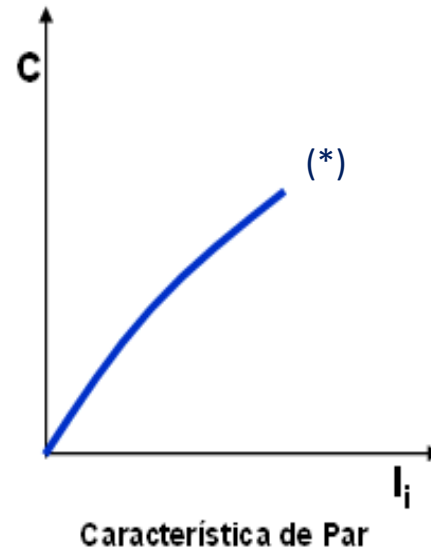
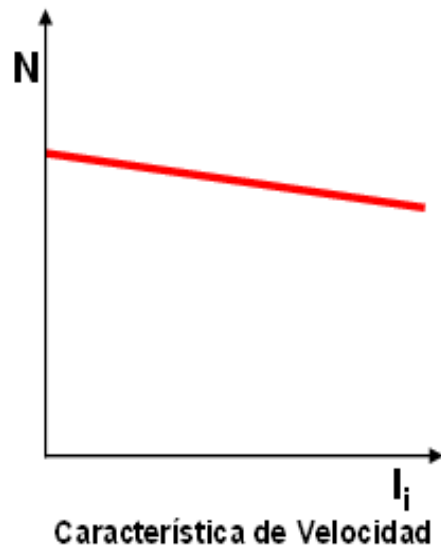
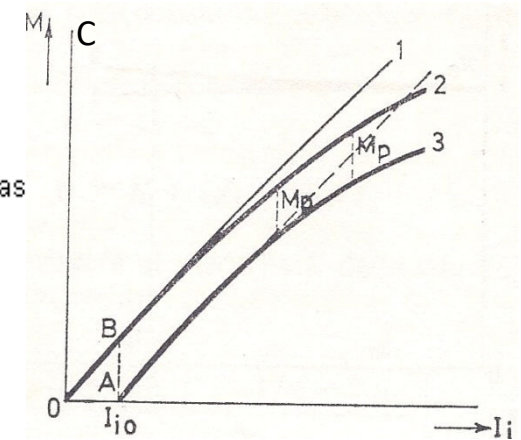
Motor de excitación derivación



$$U = E' + R_i I_i + V_{\text{escobillas}}$$

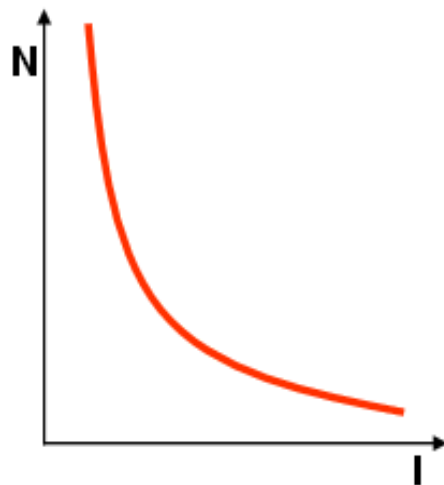
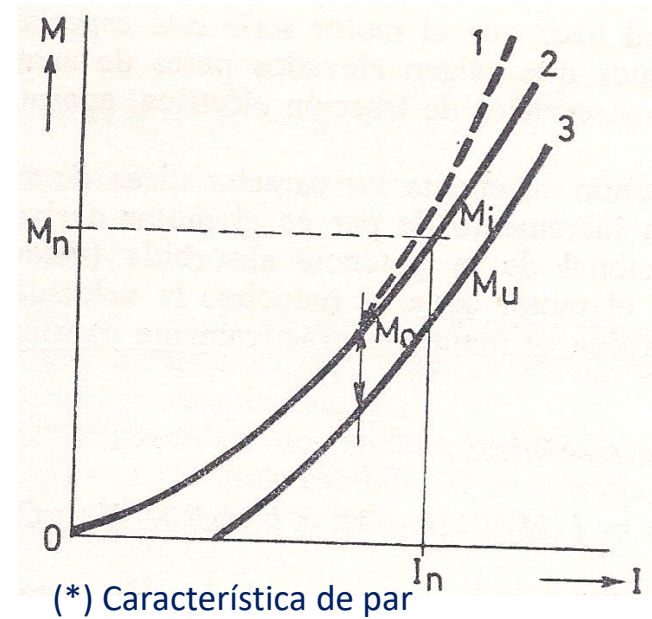
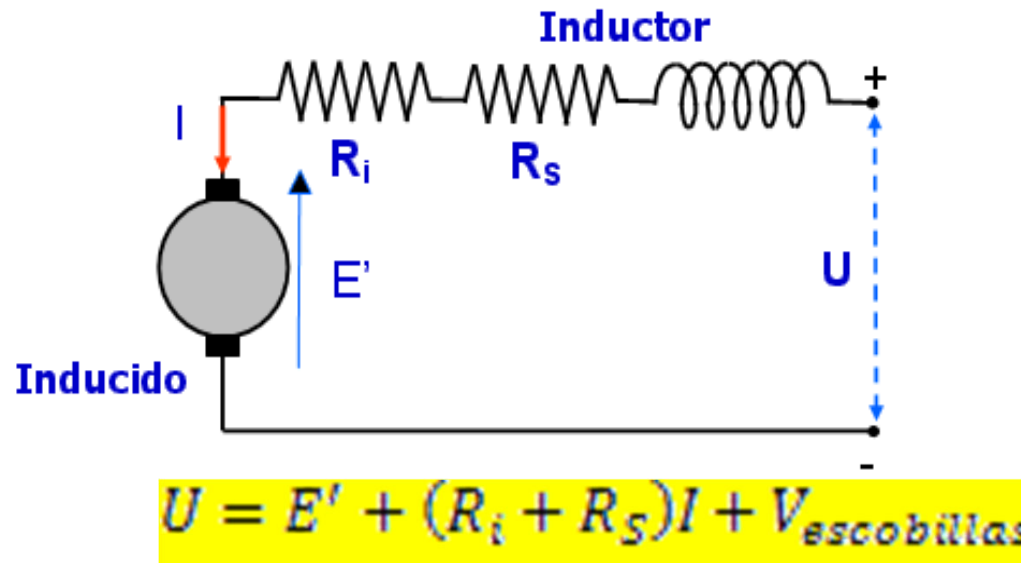
$$U = R_p I_p$$

(Las características del motor excitación independiente y paralelo son equivalentes)

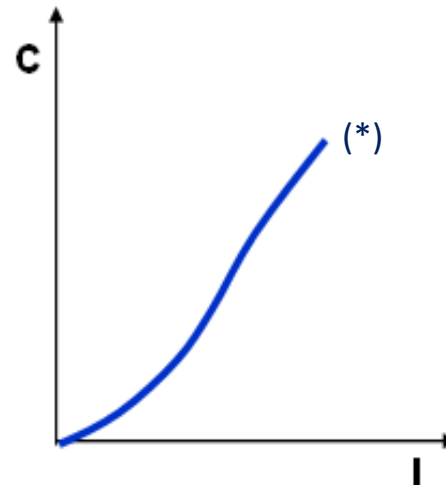


Máquinas de corriente continua

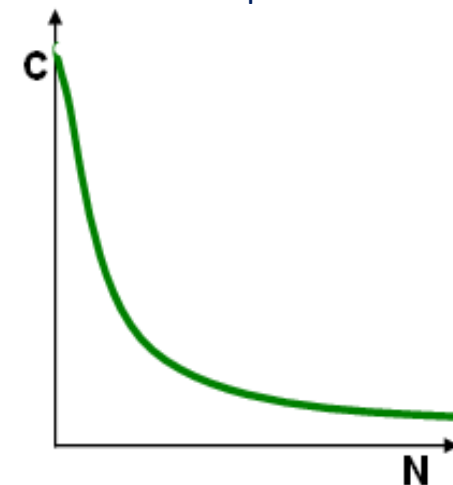
Motor de excitación serie



Característica de Velocidad



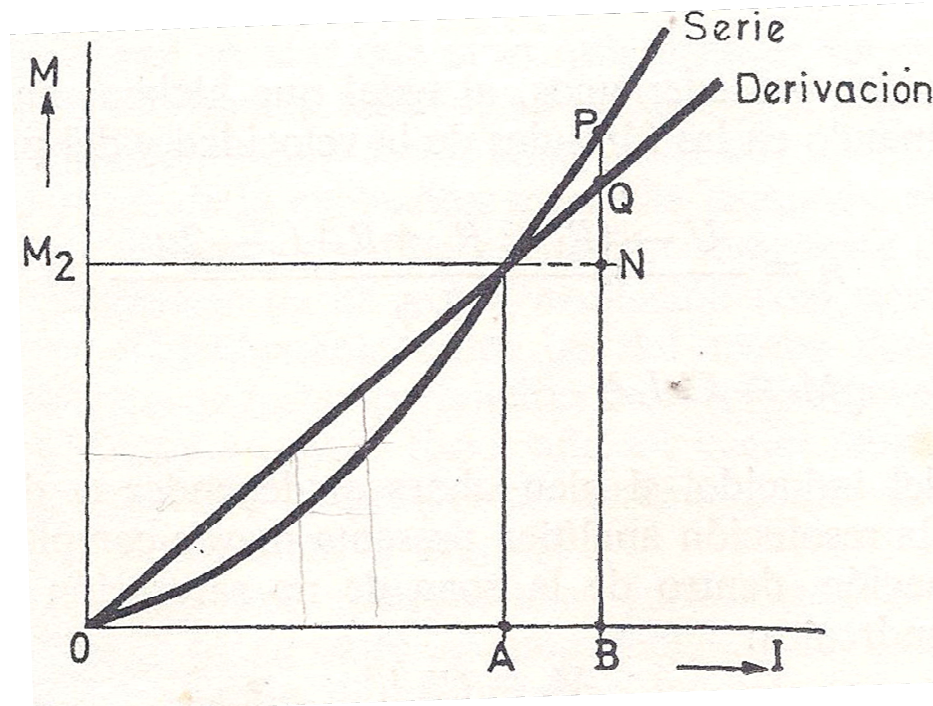
Característica de Par



Característica Mecánica

Máquinas de corriente continua

Comparación del par motor serie – motor derivación



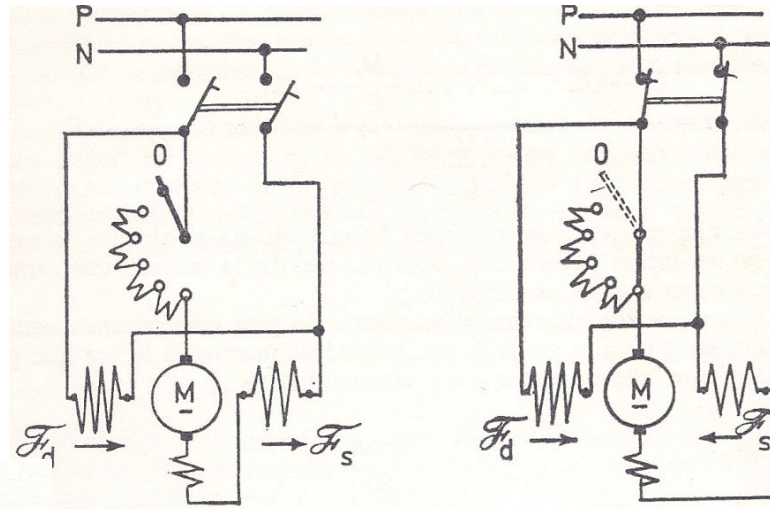
Característica de par del motor serie y del motor derivación de idéntico par nominal M_n

La característica de par, prácticamente parabólica que presenta el motor serie, comunica a éste la propiedad de desarrollar pares motores superiores a los que proporciona el motor derivación del mismo par nominal.

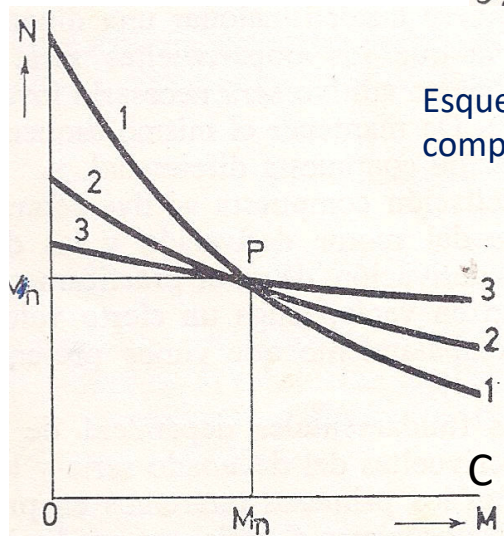
En la figura se puede ver que un incremento $\Delta I_i = AB$ de la corriente de plena carga, en el caso del motor derivación se traduce en un incremento NQ del par moto, en tanto que en el motor serie este incremento es NP , siendo $NP > NQ$

Máquinas de corriente continua

Motor de excitación compuesta



Esquema de conexiones del motor de c.c. excitación compuesta. a) Aditiva; b) diferencial

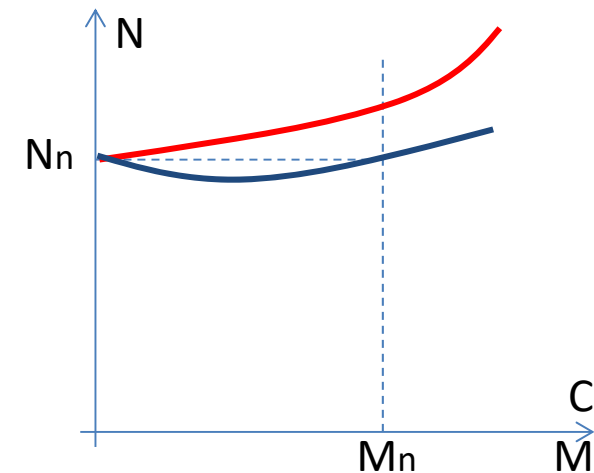


- ← Predomina la excitación derivación
- ← Equilibrado Exc.serie=Exc.Derivación
- ← Predomina la excitación serie

Características mecánica del motor de excitación compuesta aditiva

18/11/2021

En el motor de excitación compuesta diferencial el flujo útil vendrá determinado por la diferencia de las excitaciones.

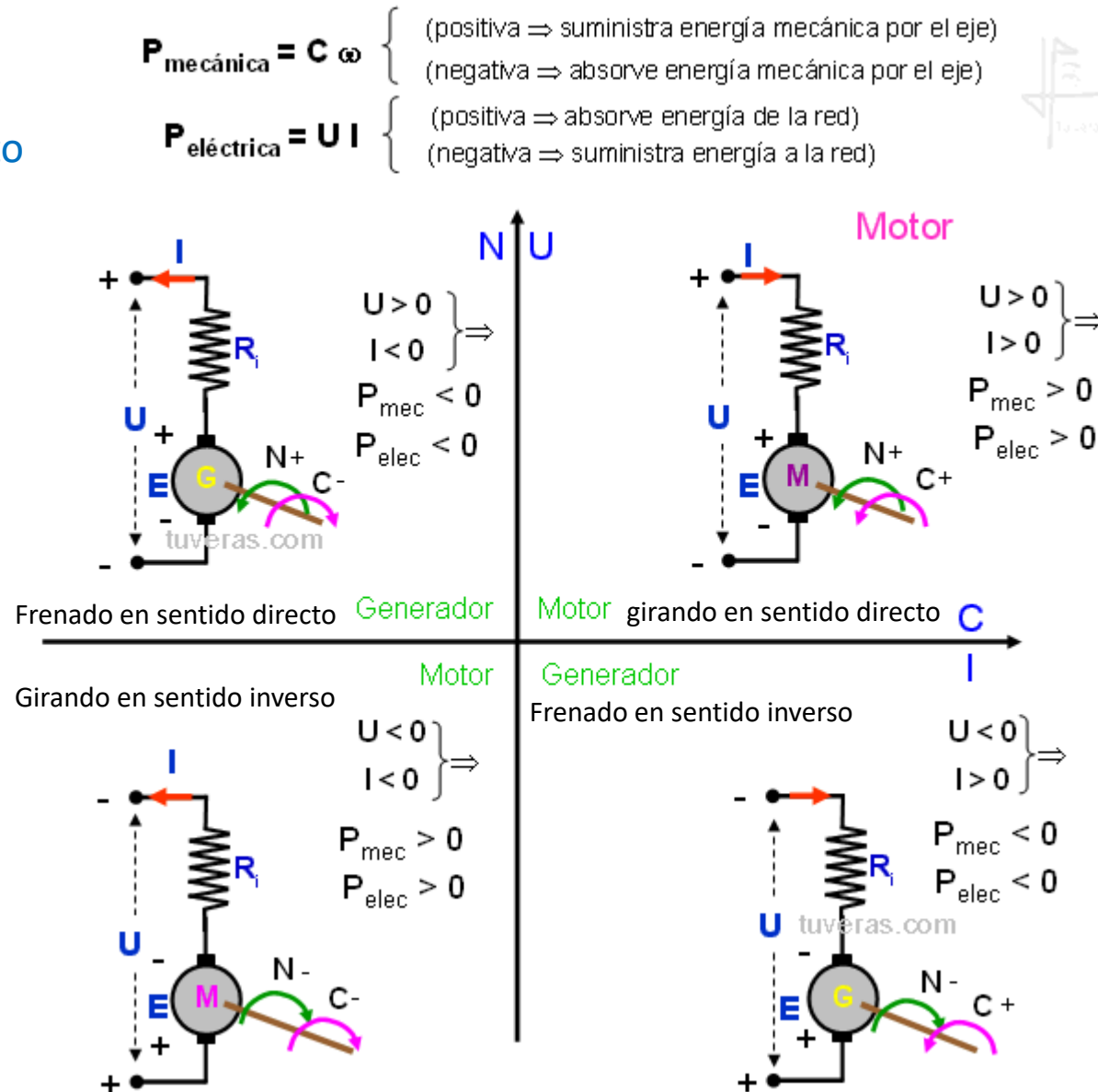


Características mecánica del motor de excitación compuesta diferencial

Máquinas de corriente continua

Modos de funcionamiento del motor de CC

Funcionamiento
en cuatro
cuadrantes



Máquinas de corriente continua

Modos de funcionamiento del motor de CC

Para describir los modos de funcionamiento de una máquina de c. c. Como motor se utiliza la representación en cuatro cuadrantes que aparece en la figura de la transparencia anterior. En el eje de abscisas se representa el par electromagnético C que también sirve para representar la corriente del inducido I ($C = K F I$). En el eje de ordenadas se representa la velocidad N , que también sirve para representar la fem/fcem E ($E = K N F$) y también, aproximadamente, la tensión U ($U = E \pm R_i I$)