

## INTRODUCCIÓN A MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

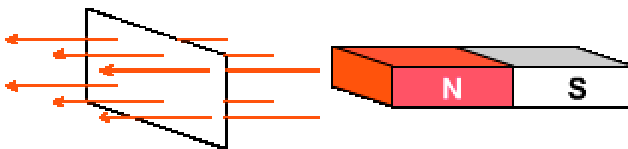
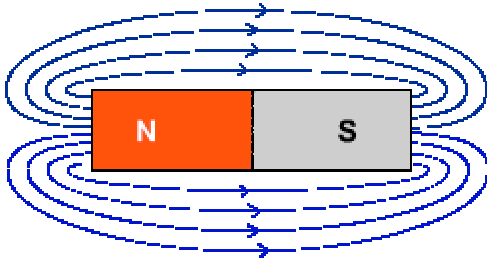
### ◆ PRINCIPIO DE GENERACIÓN DE UNA FEM

Para comenzar viendo el funcionamiento de los generadores y motores de corriente continua, veremos primero los principios de generación de una FEM.

### FLUJO MAGNÉTICO ( $\phi$ )

Es el número total de líneas de campo magnético que cruzan una superficie. Se mide en Webers (Wb).

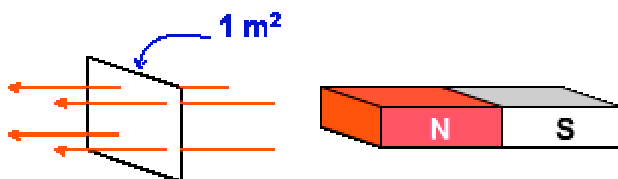
Se define como sentido de las líneas de fuerza el de norte a sur por el exterior del imán (la que señalaría el norte de una brújula puesta sobre la línea).



**Flujo**

### INDUCCIÓN MAGNÉTICA ( $\beta$ )

Es la cantidad de líneas de campo magnético por unidad de superficie, representando la densidad de flujo magnético. Se mide en Teslas ( $T = Wb/m^2$ )



**Inducción**

El flujo es una magnitud escalar mientras que la inducción es una magnitud vectorial.

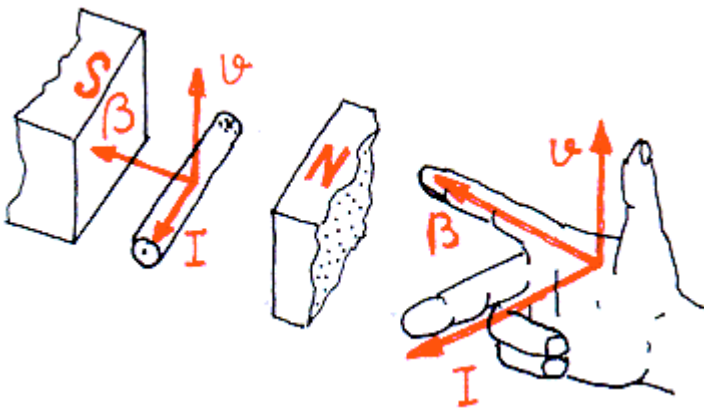
Para una superficie donde la inducción es constante y perpendicular a la superficie:

$$\Phi = \beta S$$

### Fuerza electromotriz inducida

Cuando un conductor de longitud  $L$  se mueve con una velocidad  $v$  en un campo magnético de inducción  $\beta$ . En el conductor se induce una fuerza electromotriz.

$$e = L \cdot v \cdot \beta \cdot \text{sen } \theta$$



La polaridad del conductor viene definida como positiva en el lado por el que tendería a salir la intensidad del conductor (como en los generadores o pilas). Esta intensidad seguiría la dirección de un sacacorchos que gira de  $v$  a  $\beta$  por el ángulo más corto.

La ecuación anterior puede deducirse de la **Ley de Faraday**:

*La tensión inducida es proporcional a la variación de flujo por unidad de tiempo.*

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

En una bobina con  $N$  espiras:

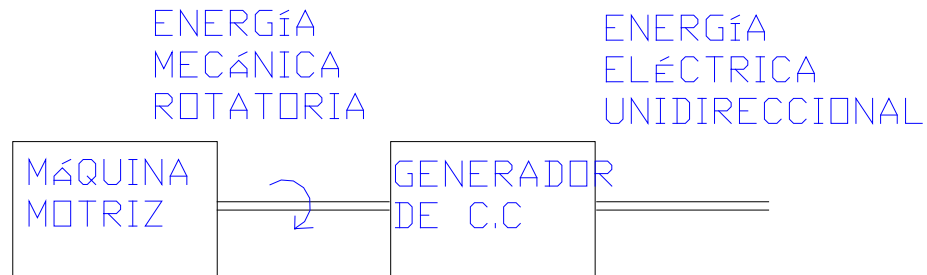
$$e = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

## GENERADORES Y MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

## GENERADOR

El generador de corriente continua es una máquina que convierte energía mecánica en forma de movimiento rotatorio unidireccional, en una corriente que no varía su sentido de circulación.

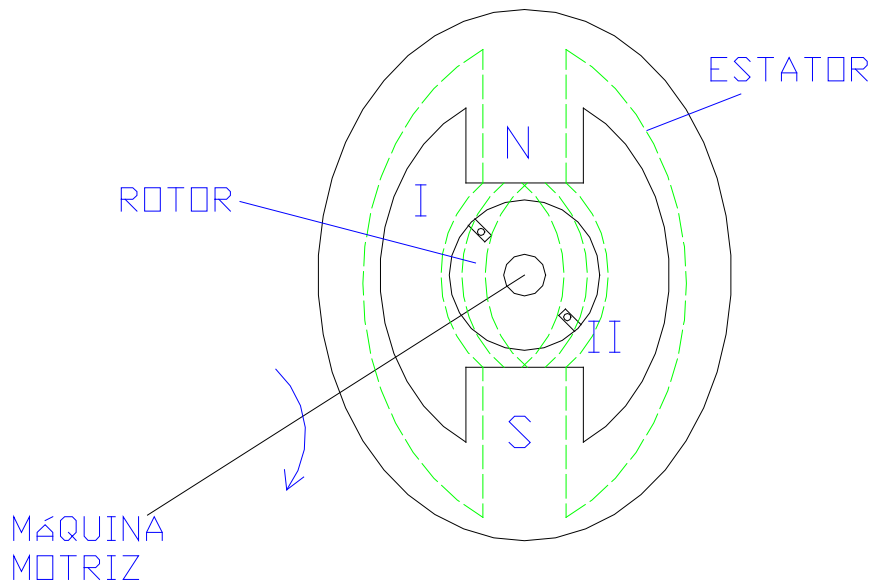
El generador de CC es una máquina reversible, esto es que puede funcionar indistintamente como motor o como generador.



La máquina motriz puede ser:

- Motores de combustión
- Turbina hidráulica
- Turbina eólica, etc.

Básicamente un generador de CC consiste en un rotor en el cual se alojan las bobinas de inducido y un estator en el cual se ubican los campos o polos que están rodeados por el arrollamiento de excitación. Una estructura muy sencilla sería esta:

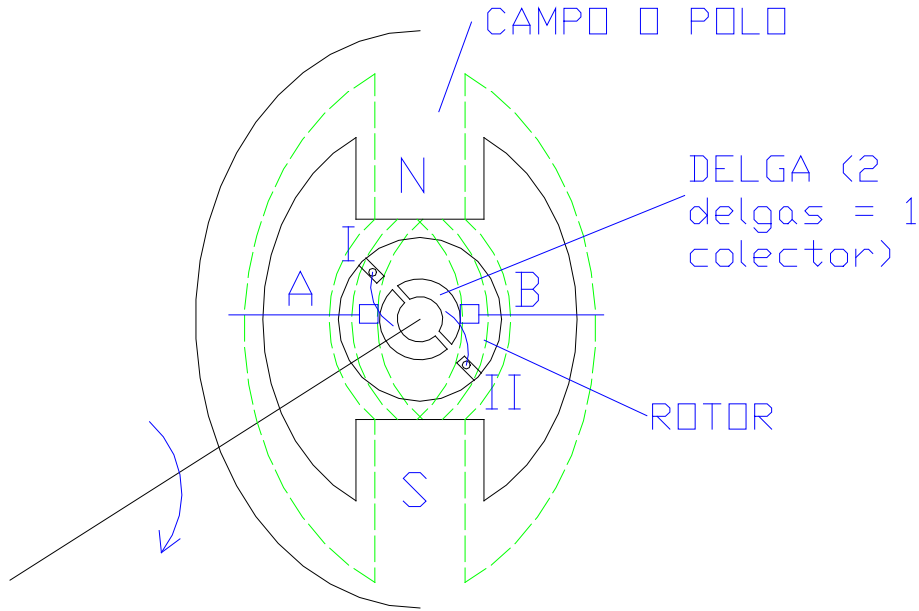


Como las líneas de campo magnético son cerradas debo ofrecerle circuitos magnéticos cerrados (las líneas salen del norte pasan por el sur y vuelven al norte)

La estructura anterior así como está es un generador de corriente alterna (CA).

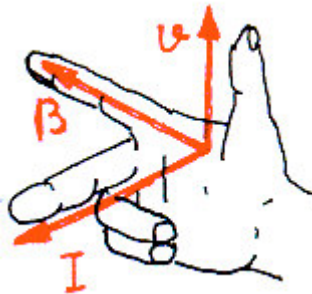
Para poder extraer la FEM del generador necesito un sistema de anillos rozantes, los cuales están sujetos al eje, pero eléctricamente aislado del mismo. Luego con unas escobillas, poniéndolas en contacto con los anillos, extraigo la FEM generada por las bobinas en movimiento, comunes al eje de la máquina.

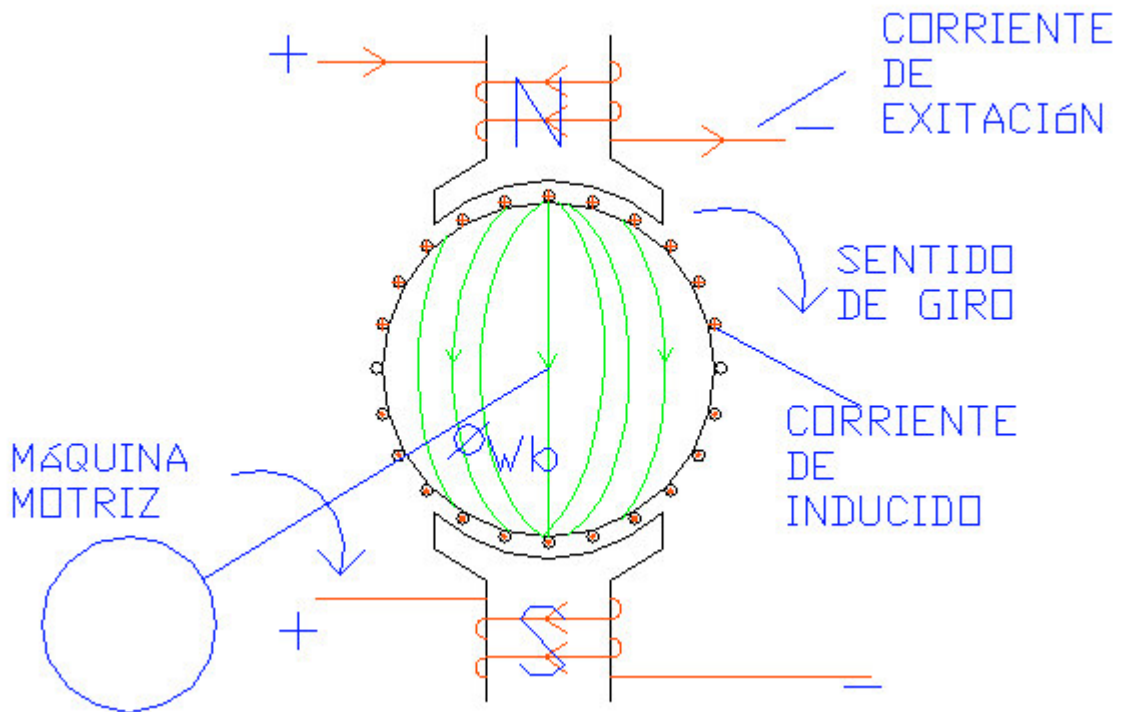
### **FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA**



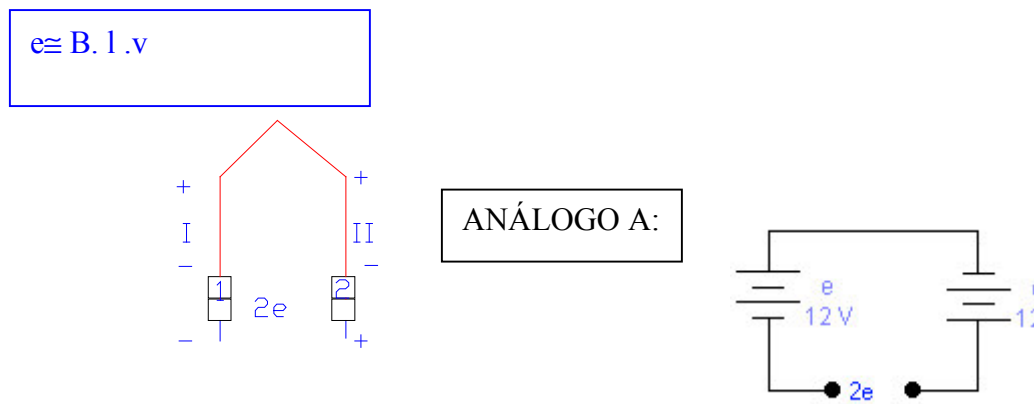
Sobre la superficie rotórica, (que es un cilindro de chapas apiladas) se practican 2 ranuras opuestas en las que se colocan los 2 lados que conforman la bobina (I; II). La bobina comienza en la delga 1 (que en ese momento está en contacto con la escobilla A), pasa por el lado de bobina I, por la parte posterior del rotor, gira hasta entrar por la otra ranura conformando el lado de bobina II y terminando finalmente en la delga 2, la cual está en contacto con la escobilla B.

Aplicando un movimiento rotatorio desde la máquina motriz, el lado de I de bobina corta las líneas de campo que emergen del polo norte y bajo estas circunstancias se engendra una FEM que tiene el sentido que deriva de la aplicación de la regla de la mano derecha.

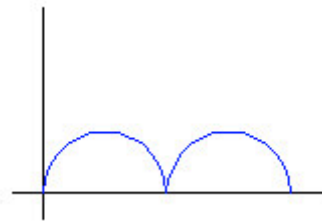
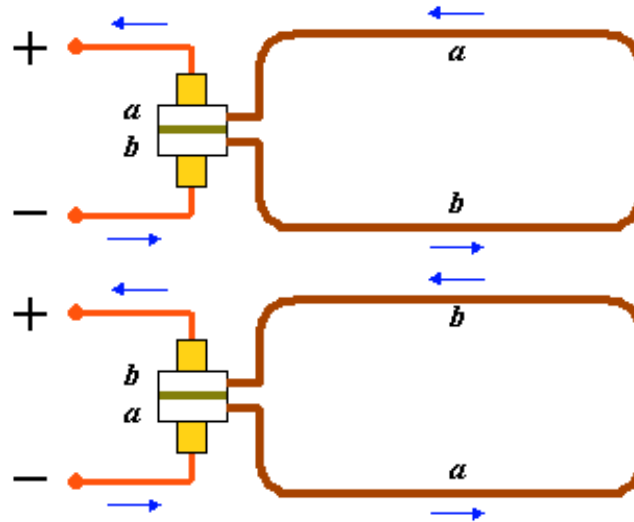




El sentido de la FEM inducida es entrante a la hoja en el lado de bobina I. El sentido de la FEM, es saliente en el lado de bobina II.

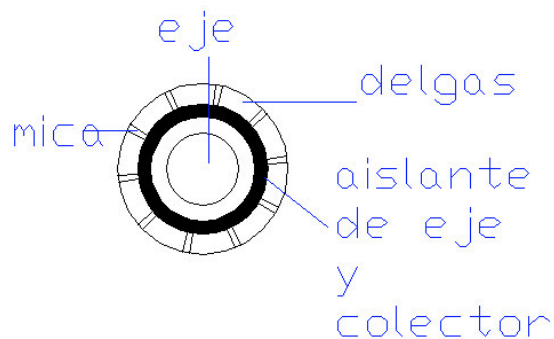


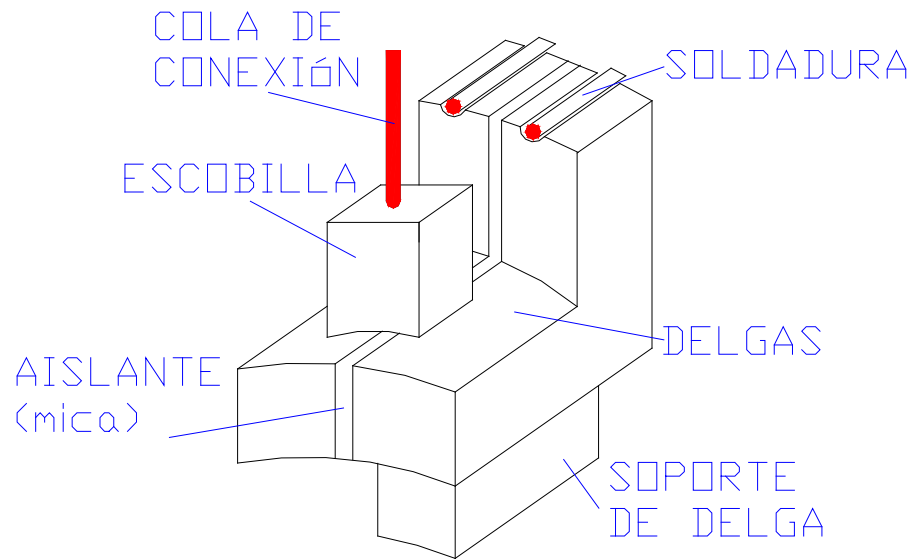
Corriente de salida:



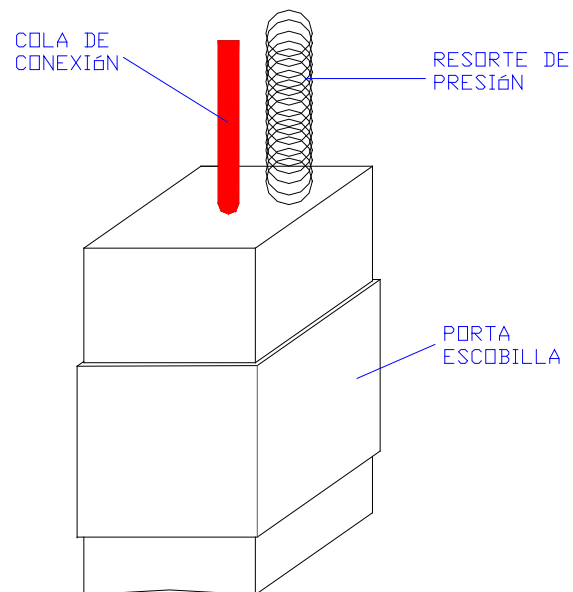
Si el rotor da media vuelta observamos que la FEM producida impulsa corriente en el mismo sentido que el esquema anterior. Esto se debe a la rectificación mecánica que realizamos, la cual se obtiene con el sistema de anillos rozantes, con las características especiales que detallaremos a continuación:

Consiste en una pieza llamada colector, la cual es un sistemas de anillos conductores, comunes al eje pero aislados eléctricamente de él. Los anillos son segmentados, cada uno de esos segmentos están aislados eléctricamente entre sí por un material dieléctrico, el cual generalmente es mica. Estas divisiones se denominan delgas.





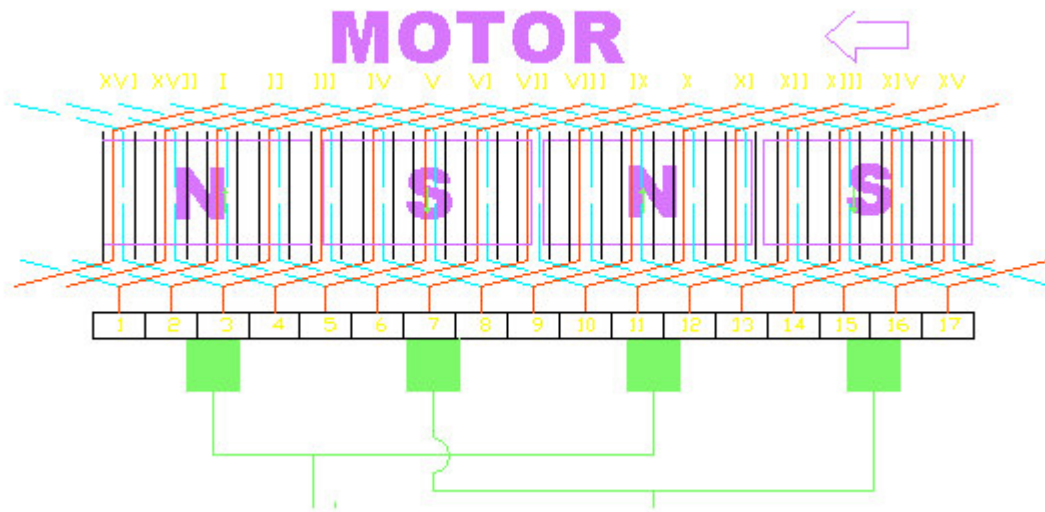
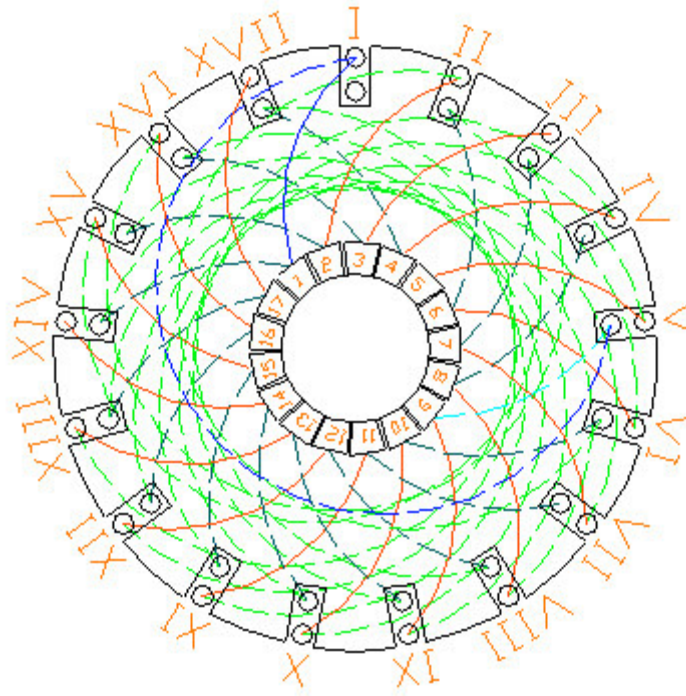
Como ya habíamos comentado, la FEM se extrae por medio de escobillas las cuales están en contacto con las delgas.



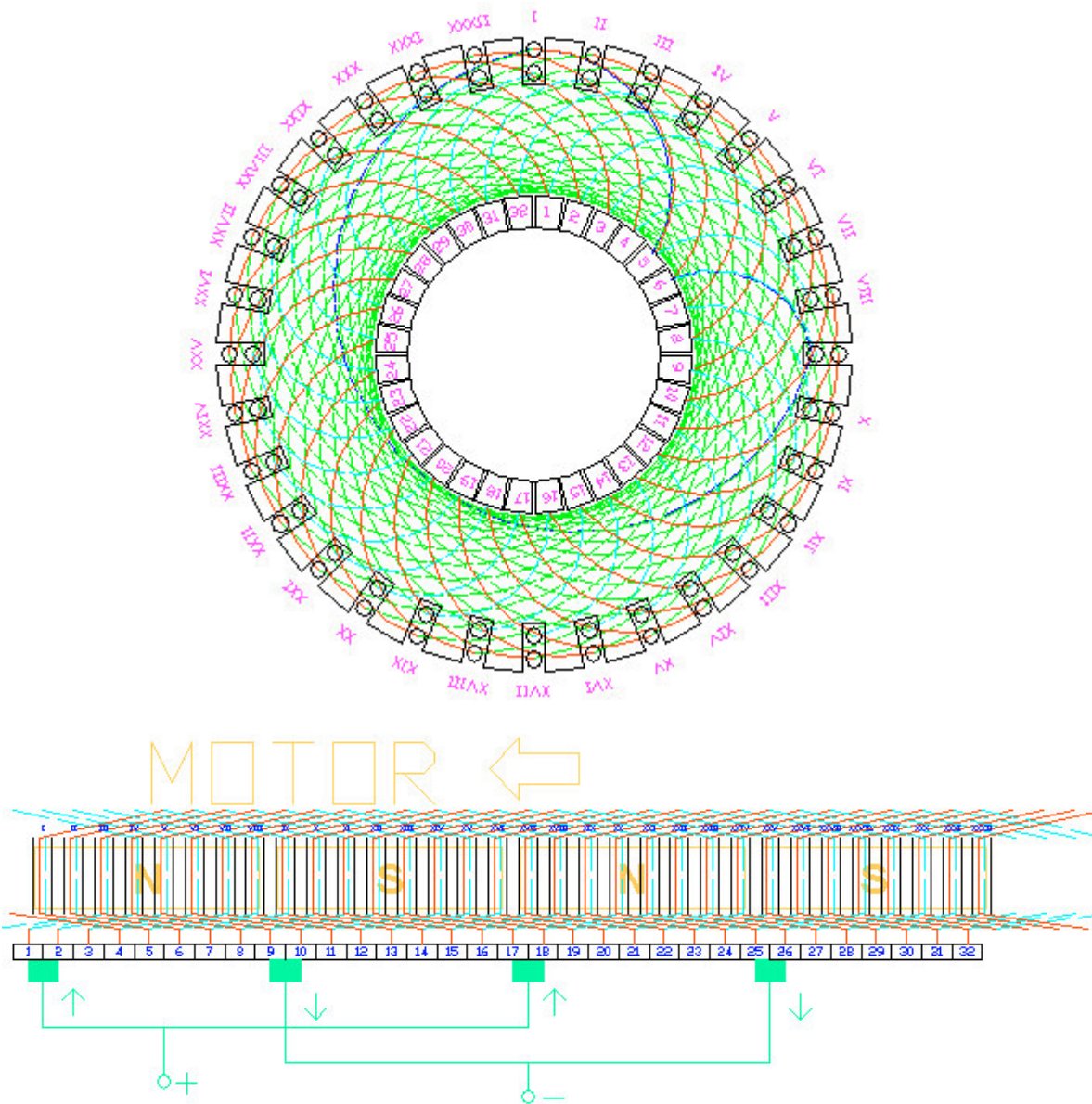
## Bobinados

Existen dos tipos de bobinados los imbricados, serie o de patas cerradas y los ondulados, paralelos o de patas abiertas. En el primero se parte de una delga se pasa por la ranura correspondiente, se vuelve por la opuesta y se regresa a la delga adyacente. En el segundo se hace en forma progresiva, es decir, es parte de una delga, se pasa por la ranura correspondiente y se lleva a otra delga, que no es adyacente a la primera sino que está x cantidad de delgas más allá. Mostraremos los bobinados a continuación:

### Ondulado:



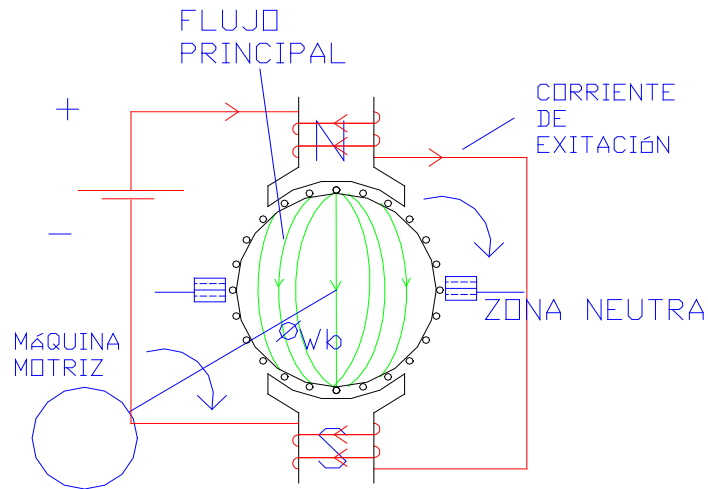
**Imbricado:**



## REACCIÓN DE INDUCIDO O ARMADURA

Si un generador de corriente continua está funcionando en vacío (no tiene carga), lo único que aprecio es una diferencia de potencial en sus bornes. Pero ¿cómo mido esa diferencia de potencial?: la mido colocando un voltímetro, aunque cuando lo colocó le estoy significando una carga, de muy alta impedancia, la cual podemos considerar nula o bien casi nula, ya que exige un muy pequeño consumo de corriente. Cuando la máquina está en vacío no circula corriente por el bobinado inducido pero sí deberá haber excitación en los polos.

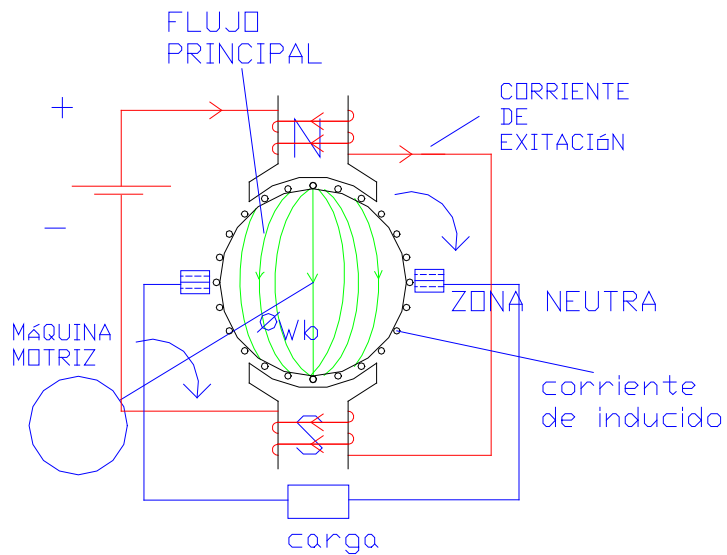
**MÁQUINA EN VACÍO:  $I=0$**



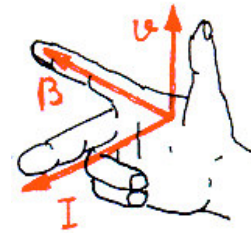
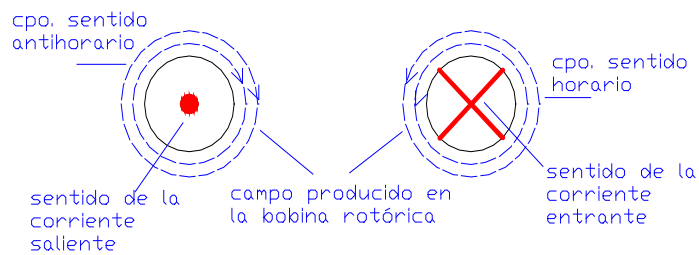
En las condiciones en que estamos hablando (en vacío), el campo tiene una única dirección que desde el polo norte al polo sur.

Cuando a la máquina se la carga (se le conecta un consumo), comienza a circular por el bobinado inducido una corriente (corriente que le pide la carga)

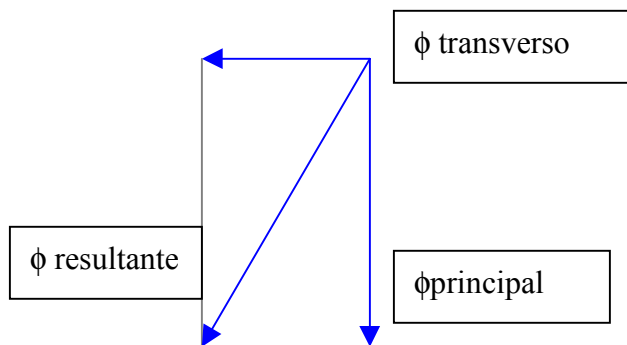
**MÁQUINA CON CARGA:  $I \neq 0$**



Cuando por un conductor circula corriente, alrededor del mismo se establece un campo magnético cuyas líneas de campo son concéntricas con el conductor.



El flujo producido por las bobinas de inducido (producto de la corriente de carga) se denomina flujo transverso.



La circulación de corrientes por el inducido, causa la aparición de un campo magnético, el cual es perpendicular al campo principal, aumentando su valor a medida que aumente la corriente de carga en el generador (corriente de inducido)

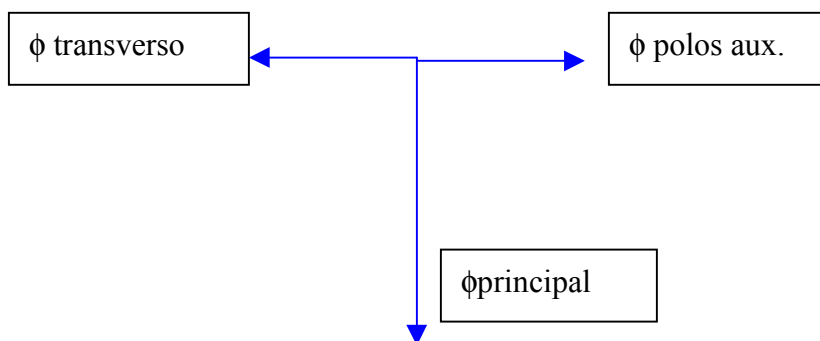
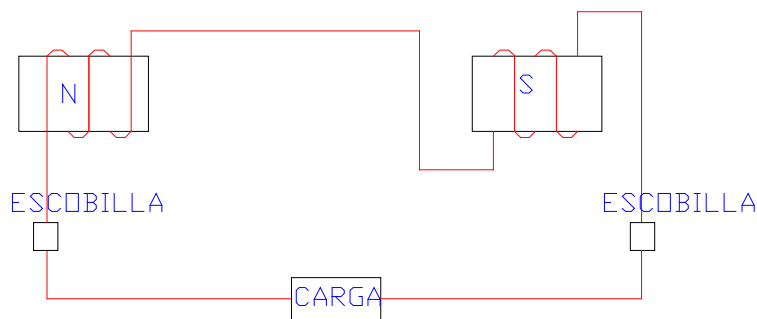
Sobre la máquina actúan un flujo resultante, que es la composición geométrica de los 2 anteriores (flujo principal y transverso), como ya se mostró anteriormente. Vale decir que se produce una deformación del campo original. Este efecto es el llamado efecto de la reacción de inducido, el cual produce el desfasaje de la zona neutra un cierto ángulo  $\alpha$ , en el sentido de giro de la máquina. Este ángulo es mayor cuanto mayor es la corriente de carga del generador. Las escobillas es conveniente que estén en la zona neutra, porque cuando éstos cortocircuitan delgas, y si no estuvieran éstas ubicadas en esta zona, cortocircuitarían bobinas con tensión, lo que generaría corrientes de pérdida en la máquina.

En la zona neutra las bobinas no tienen excitación de los polos por lo tanto no tienen tensión.

### Corrección de la reacción de inducido

La corrección de la reacción de inducido se realiza con la construcción o bien inclusión de polos auxiliares (norte auxiliar y sur auxiliar. Estos son polos que se colocan en la zona neutra de tal forma que cuando circule corriente por el inducido, circule la misma por la excitación de estos polos, creando así un flujo opuesto al transverso. La corriente que alimenta la bobina de excitación de estos polos es la misma que la corriente de carga y por lo tanto la misma corriente que la que circula por el bobinado de inducido, de modo que si la corriente de carga aumenta, aumenta el flujo transverso, pero también aumenta el flujo producido por los polos auxiliares, anulándose entre sí, y quedando en todo momento la circulando el flujo principal y por ende la zona neutra siempre en el mismo lugar. De no existir los polos auxiliares habría que decalar mecánicamente las escobillas, buscando la zona neutra siguiendo el defasaje de la misma.

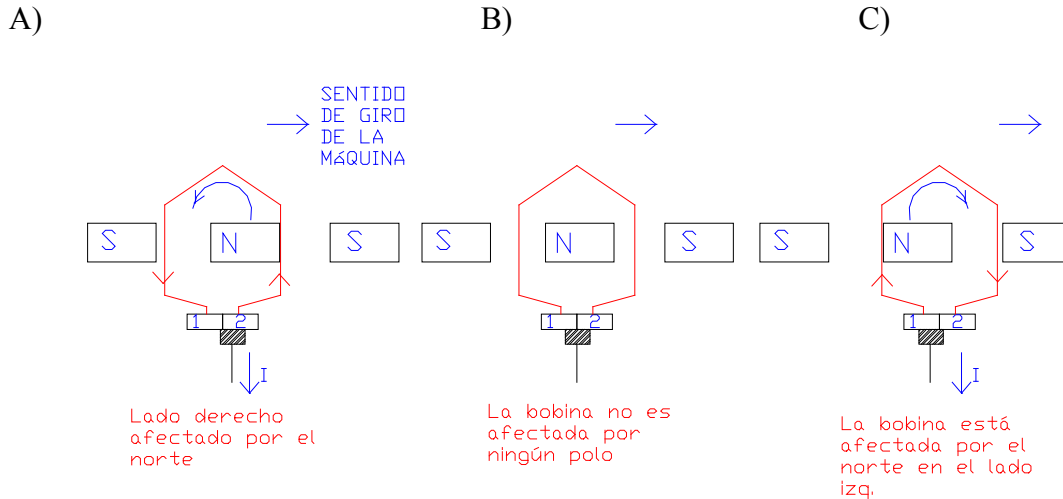
Los polos auxiliares se conectan en serie con la carga.



En máquinas muy grandes es necesario compensar el flujo bajo los polos, para eso se agujerean los polos y se hace un arrollamiento de compensación.

**Conmutación:**

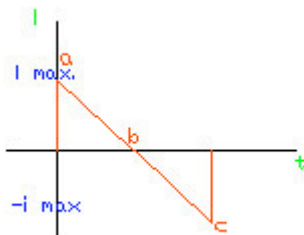
La conmutación es el proceso en el cual se produce la entrada de una nueva delga sobre la escobilla.



En la posición a) del dibujo la escobilla está entrando en la delga 1 desde la delga 2, los dos lados de bobina quedan cortocircuitados por la escobilla. El lado derecho de la bobina está ligeramente influenciado por el polo norte y dado que el bobinado se desplaza hacia la derecha, aplicando la regla de la mano derecha al lado derecho de bobina se verifica que se induce una FEM inducida, cuyo sentido está dado por la flecha. En el lado de bobina izquierdo la polaridad es contraria, debido a que esta diferencia de potencial estará sobre una bobina en cortocircuito, circulando una corriente en sentido contrario que disminuirá a medida que la escobilla se adentre más a la delga 1. Esta corriente es interna de la máquina y solo produce pérdidas en ella.

En la posición b) del dibujo, la escobilla está en medio de las delgas 1 y 2, sobre los lados de bobina no actúan los polos (zona neutra) y por lo tanto, no circula ninguna corriente.

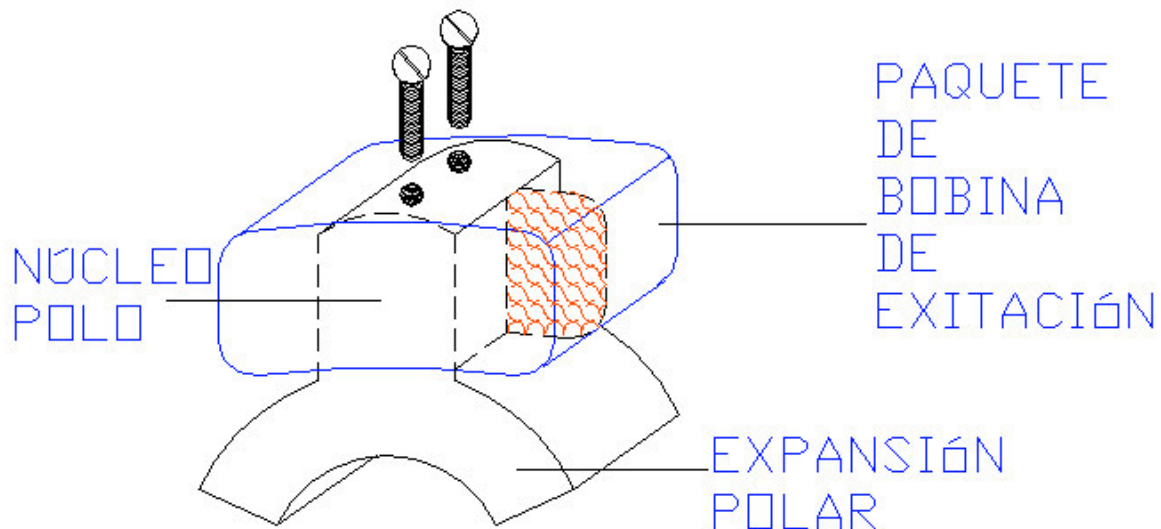
En la posición c) del dibujo la escobilla va dejando la delga 2, sobre el lado de bobina izquierdo, la influencia más grande es la del polo norte y entonces la corriente cambia su sentido de circulación respecto de la posición a).



La corriente va disminuyendo y luego aumentando en sentido contrario hasta que llega a cero.

### EXITACIÓN EL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA:

Todas las máquinas de corriente continua tienen  $p$  pares de polos que no son otra cosa que electroimanes, excitados por un arrollamiento que rodea su núcleo y que necesita ser alimentado por una corriente continua.



Para que circule corriente por el arrollamiento excitador, es necesario que alguna fuente externa le provea la diferencia de potencial necesaria. También existe otra alternativa, esta es que sea el mismo generador quien provea de esa tensión continua, que pueda alimentar el arrollamiento de excitación.

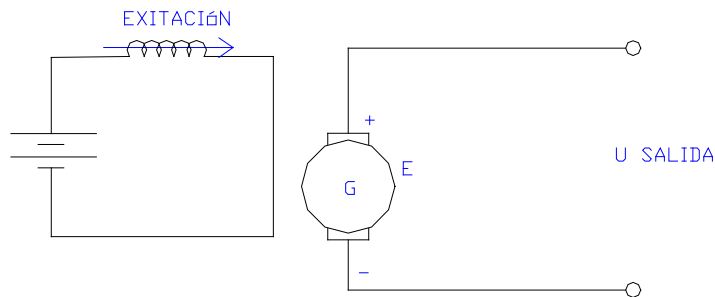
En base a esto distinguimos 3 tipos de excitación y éstos son:

- Independiente
- Propia
- Autoexcitada

#### Excitación independiente:

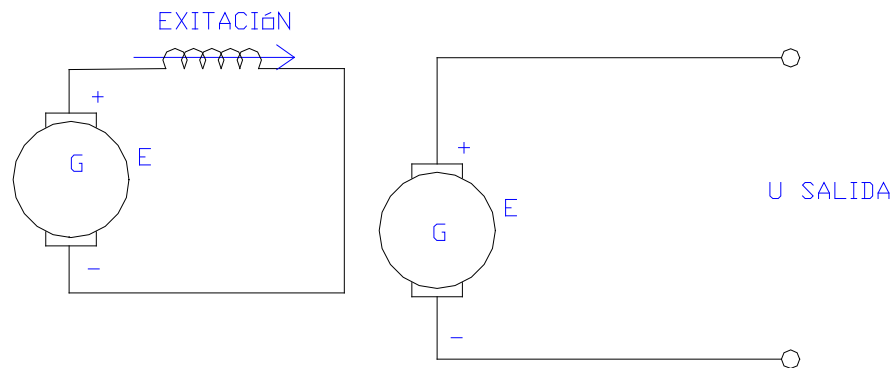
En esta el bobinado de excitación se alimenta desde una fuente de corriente continua, la cual puede ser una batería, vale decir que la máquina debe tener 4 terminales, 2 de salida de la energía generada y 2 para la alimentación de los polos.

La siguiente es la forma de excitación de la máquina:



### Excitación propia:

En este tipo de excitación, la alimentación del generador proviene de otro generador de corriente continua llamado excitatriz y que normalmente está acoplado al mismo eje del generador.

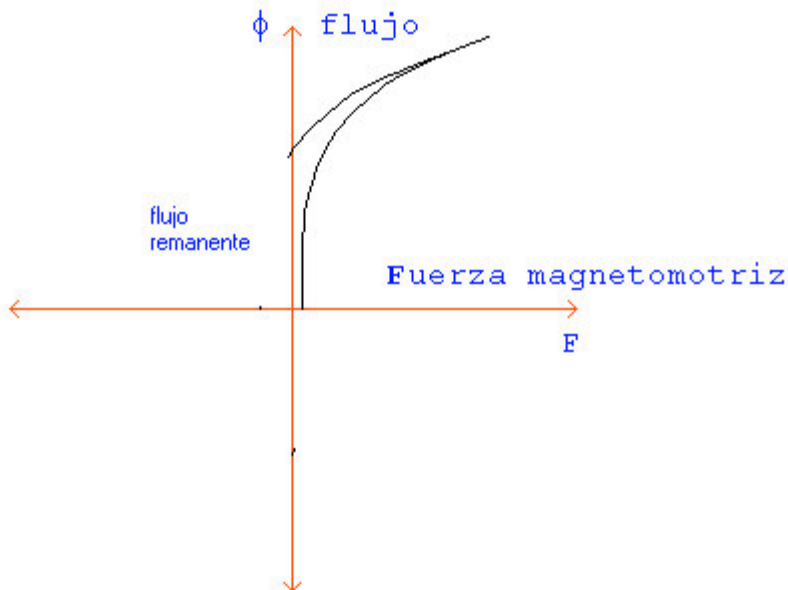


Este tipo de excitación es usual en las plantas generadoras de corriente continua. Esto se debe a que por su potencia elevada necesitaría baterías de muy alta prestación, para alimentar al arrollamiento excitador.

La potencia del generador que actúa como excitatriz normalmente tiene una potencia de entre el 1 y el 5% de la potencia del generador principal.

### Autoexcitación:

Esta se basa en obtener de la misma máquina la tensión necesaria para alimentar el arrollamiento excitador de los polos. Esto es posible debido al magnetismo remanente que queda en la máquina después de funcionar o que siendo nueva se induce desde fábrica.



Esto se puede lograr aplicando al núcleo de los polos una corriente en un solo sentido, o sea continua, esta induce un flujo en él, el cual aumenta a medida que aumenta el valor de la corriente, hasta que el hierro o material ferromagnético llegue a su punto de saturación y por más que aumente la corriente el flujo no aumenta. Si yo dejo de aplicar esa corriente la inducción no vuelve a cero sino que queda con un magnetismo o flujo remanente.

Al haber quedado el núcleo magnetizado con el pequeño campo remanente que se creó, es suficiente para que los conductores del bobinado inducido corten líneas de fuerza induciéndose a los bornes del generador una pequeña tensión continua, esa tensión impulsa corriente por el bobinado excitador, lo que crea un campo que se sumará al remanente, esto lleva a inducir una tensión mayor en los bornes del generador e incrementándose sucesivamente hasta su valor nominal, debido a que también aumenta la corriente de excitación y junto con ella el campo excitador.

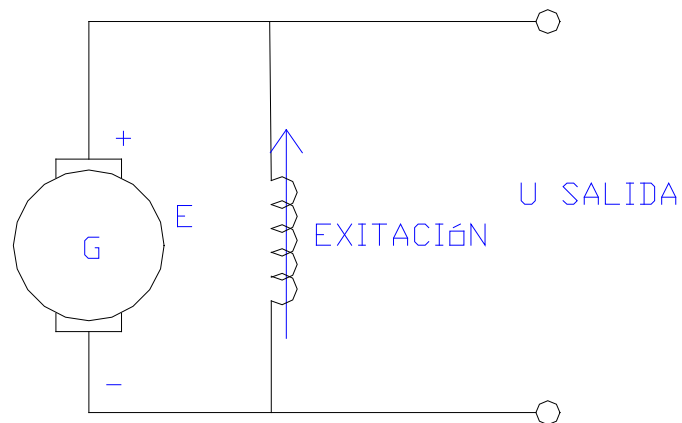
Si el flujo remanente desapareció porque la máquina estuvo mucho tiempo en desuso, se debe proceder a reactivar ese flujo y lo que se hace es conectar una fuente y alimentar con una corriente los polos hasta que reaparezca este campo remanente. Otra forma de perder la remanencia es si por esas casualidades hacemos girar la máquina motriz en sentido contrario.

## TIPOS DE AUTOEXCITACIÓN

### Paralelo, derivación o Shunt:

El bobinado excitador se conecta en paralelo con la carga, entonces a medida que aumenta la corriente de carga se produce un aumento de la corriente de excitación por derivación. En serie con el arrollamiento excitador se coloca un reóstato, éste es para disminuir o aumentar la corriente de excitación y compensar las caídas de tensión, ya que si el valor resistivo es bajo la corriente es alta y la tensión en bornes aumenta el valor de la tensión en bornes, ocurre lo contrario si el valor resistivo de éste es alto.

Esta conexión es una de las más aplicadas, se usa en casi todos los generadores.

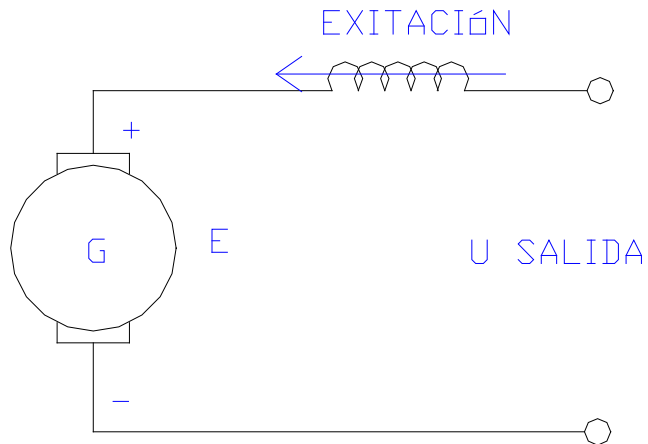


### **Excitación serie:**

En la excitación serie la bobina excitadora se conecta en serie con el inducido, de modo que la corriente que atravesará la excitación será la misma que la corriente de carga y la de inducido.

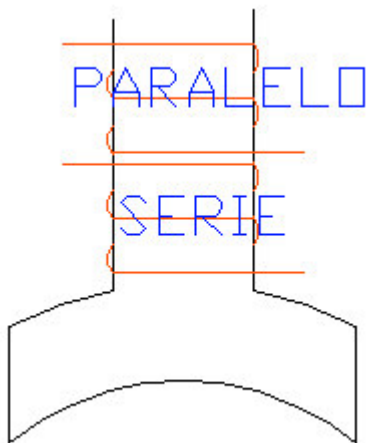
La tensión de salida varía con la carga, si aumenta la carga aumenta la excitación de los polos y por lo tanto la tensión en los bornes del generador.

Este tipo de conexión es utilizado para motores en los cuales se necesita hacer mucha fuerza.

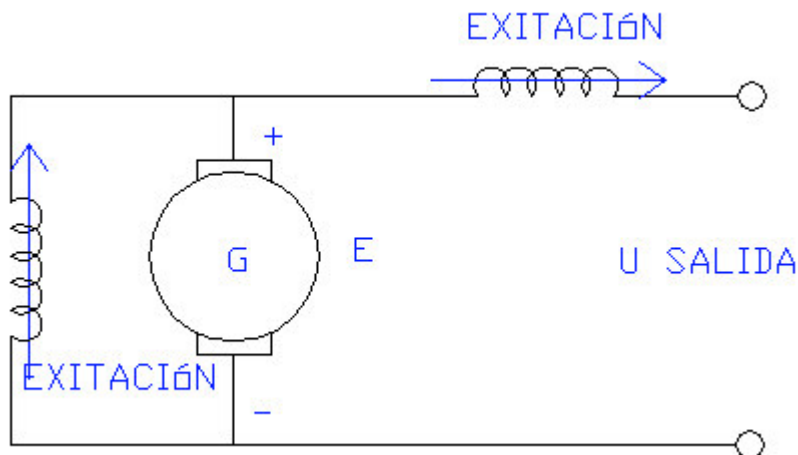


**Excitación compound o compuesta:**

Esta excitación es una combinación de la serie y la paralelo. Cada polo en este caso lleva 2 bobinados, uno de los cuales se conecta en serie y el otro en paralelo. Ambos bobinados se construyen sobre el mismo núcleo de cada polo.



El bobinado serie lleva muy pocas vueltas respecto del paralelo y el alambre es más grueso debido a que por él circulará la misma corriente que la de carga, en cambio el paralelo llevará más vueltas y alambre más fino, ya que la corriente es la de derivación.



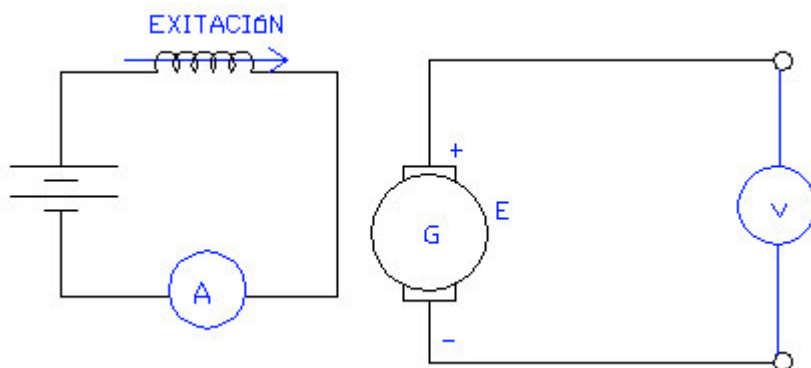
El flujo producido por el bobinado serie y el producido por el paralelo se pueden sumar o restar según sea la corriente que circule por ellos.

Si los flujos se suman se llama compound adicional y si se restan se llama diferencial. El adicional tiene un campo de aplicaciones más amplio que el diferencial, ya que este puede usarse como generador para alimentar viviendas, ya que en cierta forma compensaría las caídas de tensión, en cambio el otro no ya que al aumentar la carga bajaría la tensión. El generador diferencial es aplicable en soldadoras de corriente continua, ya que las soldaduras se producen con corrientes de cortocircuito, o sea altas corrientes, es decir, el sistema trabaja en cortocircuito llevando la corriente a valores altos y la tensión a cero.

### CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO:

#### Curvas características en vacío:

Para obtener estas curvas se procede al siguiente montaje:



En este ensayo el amperímetro mide la corriente de excitación que circula por el bobinado excitador y el voltímetro mide la tensión en los bornes del generador, este último posee una

alta impedancia representando una carga prácticamente nula para la máquina, de ahí que a este ensayo se lo denomina en vacío.

Se coloca también un reóstato en serie con el bobinado de los polos, y regulando la posición del mismo se logra que la corriente en el circuito excitador varíe de valores pequeños a valores altos.

Cuando es grande la corriente excitadora es más intenso el campo de los polos principales y por lo tanto mayor la FEM inducida en el generador.

El mismo montaje se puede realizar con un generador autoexcitado paralelo. Esto no se podría hacer con un autoexcitado serie, ya que la bobina de excitación se alimenta con la corriente de carga del generador y como está en vacío, no se puede excitar.

Para generadores compound si es posible realizar el ensayo, debido a que una parte del bobinado excitador está en paralelo.

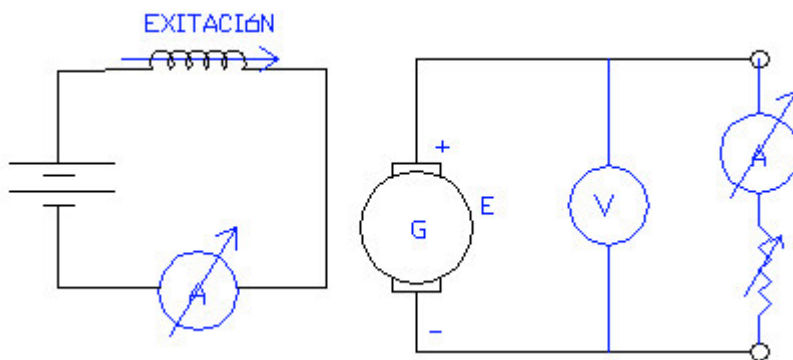
### **CURVAS CARACTERÍSTICAS CON CARGA:**

Una de las necesidades más importantes que tenemos en un generador es conocer cómo varía su tensión en bornes con distintos grados de carga.

Es evidente que cuando la carga conectada al generador aumenta, se produce una disminución de la tensión medida en los bornes del generador.

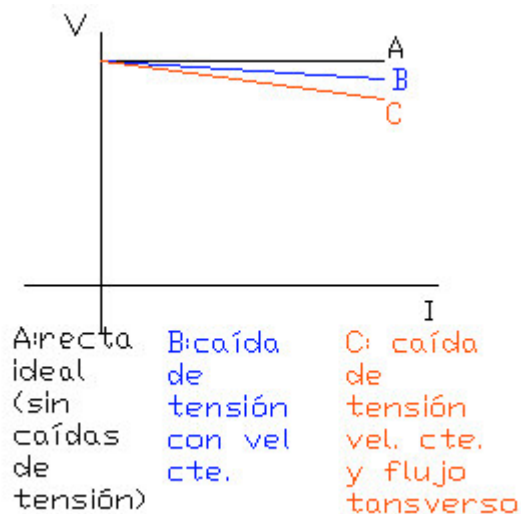
Para determinar esta relación entre corriente de carga y tensión en bornes, se procede a implementar los siguientes montajes:

#### **Excitación independiente:**



Se coloca un amperímetro y un reóstato en serie con el bobinado excitador, el primero mide la corriente de excitación y el segundo limita la misma para poder mantenerla constante. Luego colocamos un voltímetro en paralelo con una resistencia variable (carga) y su respectivo amperímetro, la cual variaremos mostrando distintos valores de carga.

Con la conexión ya realizada estamos en condiciones de realizar el ensayo y para ello necesitamos hacer girar la máquina motriz a una velocidad constante (independizando la variación de tensión respecto de la variación de velocidad), y con el reóstato del bobinado de excitación mantenemos la corriente de excitación constante y así la tensión no depende de la variación de flujo, luego variando la carga (resistencia variable) tomamos o hacemos lectura de los valores de tensión en bornes y de la corriente de carga, y de esta manera vamos construyendo una tabla de valores la cual será después representada gráficamente, y quedará algo así:



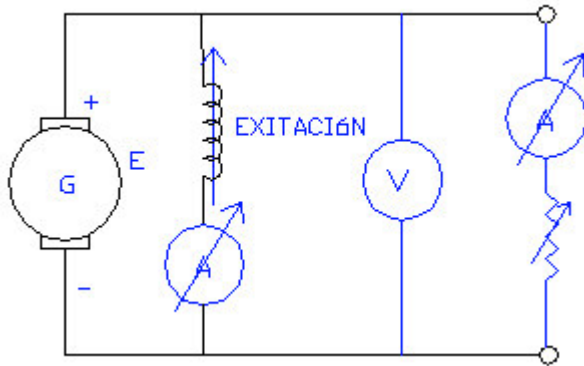
Si el generador fuese una máquina ideal, su tensión en bornes no debería disminuir, bajo cualquier condición de corriente de carga. Por lo tanto la curva correspondiente sería la A, sin embargo el inducido del generador tiene una resistencia de inducido  $R_1$  y tiene una resistencia en los polos auxiliares ( $R_{paux}$ ), al igual que la resistencia de contacto entre las escobillas y el colector, y hasta las propias resistencias de las últimas zonas donde circulará la corriente de carga, dando como consecuencia una caída de tensión en bornes, dada por la relación de la ley de Ohm  $R \cdot I = \Delta V$ , que hace que la  $U$  de salida disminuya ese valor. Entonces tenemos que:

$$U = U_b - R \cdot I$$

Sin embargo esta no es la única fuente de disminución de la tensión en bornes, existe otra que la debida a la reacción de inducido (curva C).

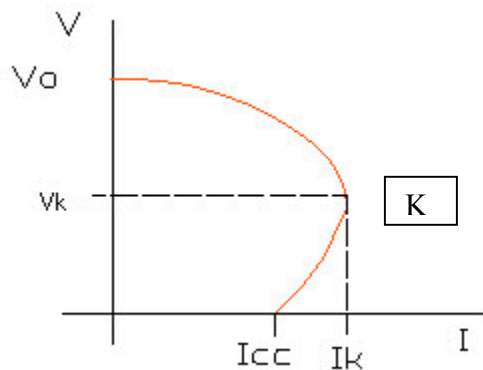
### Generador derivación, paralelo o Shunt:

Para analizar su comportamiento se plantea el siguiente ensayo:



El montaje consiste de las mismas partes que el anterior, o bien las partes cumplen la misma función que antes.

Si hacemos la misma prueba que en el circuito anterior observamos una curva de esta manera:

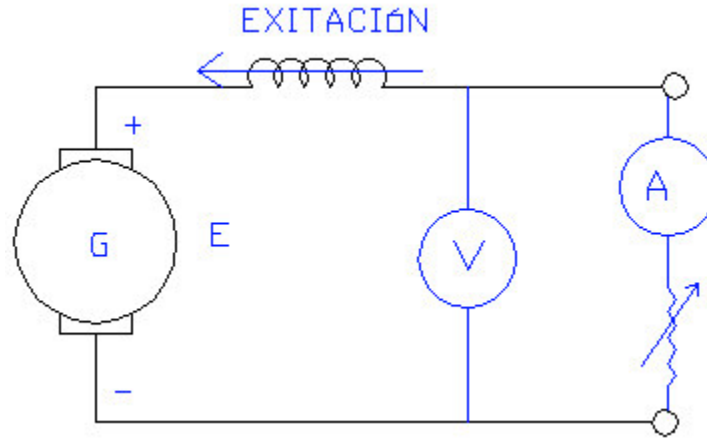


La caída de tensión que nosotros observamos se produce por fenómenos ya conocidos, y a medida que la corriente de carga es mayor, mayor es la caída de tensión, pero en este caso a diferencia del anterior, también se alimenta con menos tensión la bobina de excitación, con la cual se acentuaría mucho más el proceso, siguiendo el camino  $V_o$ ,  $k$  y  $I_{cc}$ .

$K$ = punto crítico;  $V_o$ = tensión de vacío;  $I_{cc}$ = corriente de vacío;  $I_k$ = corriente crítica;  $V_k$ = tensión crítica.

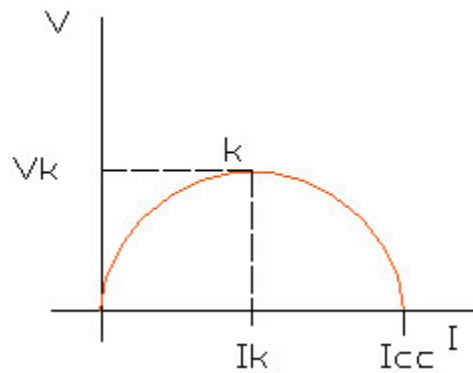
Cuando la caída de tensión es muy grande, llegando a la tensión en bornes crítica ( $V_k$ ), correspondiente a una corriente crítica ( $I_k$ ), el generador pasa a entregar una tensión de valor cero (0) en sus bornes con una corriente interna  $I_{cc}$ , que es bastante menor que  $I_k$  y que puede ser tolerada por la máquina sin problemas, de modo tal que la situación del generador derivación ante altos valores de corriente de carga (superan la nominal) es de autoprotección.

**Generador serie:**



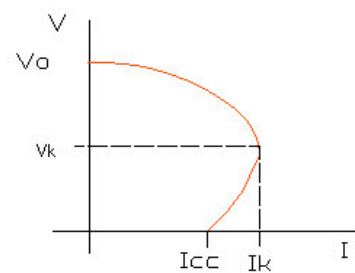
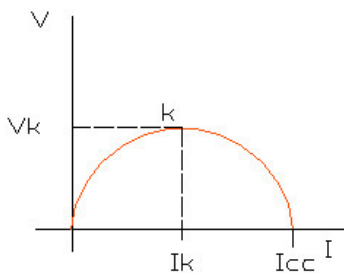
Las caídas de tensión se producen por la desmagnetización de los núcleos debido a la reacción de inducido, la cual se hace más fuerte cuando más grande es la corriente de carga, a tal punto que llegado a un cierto valor crítico llamado  $I_k$ , la tensión va cayendo a partir de allí a una tensión en bornes cero, describiendo un arco de curva que se mostrará luego. Una vez alcanzado el cortocircuito (a partir de ese punto el sistema actúa como si estuviera en cortocircuito), la corriente que queda circulando es mucho mayor que la  $I_k$  y la máquina no puede soportarlo por mucho tiempo.

La curva que describe es la siguiente:

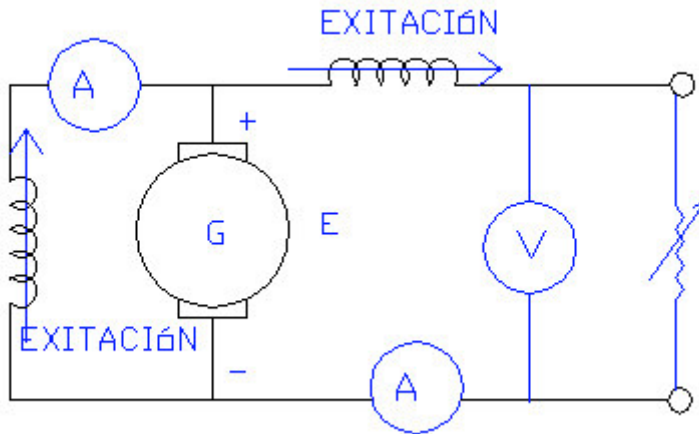


**Generador compound:**

Recordemos las reacciones de los otros generadores ante las caídas de tensión:

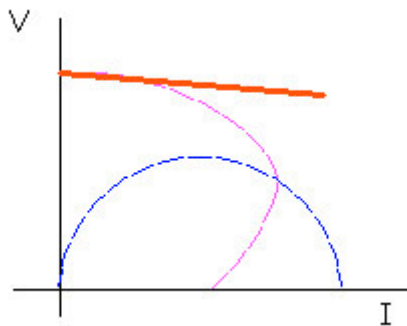


En el compound sucede lo siguiente:



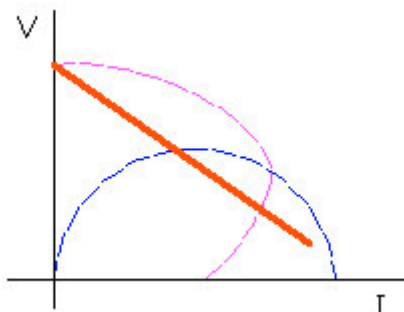
Habíamos visto que el flujo producido por la bobina serie, podría tener el mismo sentido o sentido contrario a la bobina derivación. Al primer caso lo llamábamos adicional y al segundo caso diferencial, por lo tanto para determinar la curva característica lo que se hace es sumar o restar curvas.

#### Adicional:



Con este montaje se logra que la tensión de salida del generador sea prácticamente constante, para todos los valores de corriente de carga usuales, por lo tanto es como si hubiese un control automático de tensión.

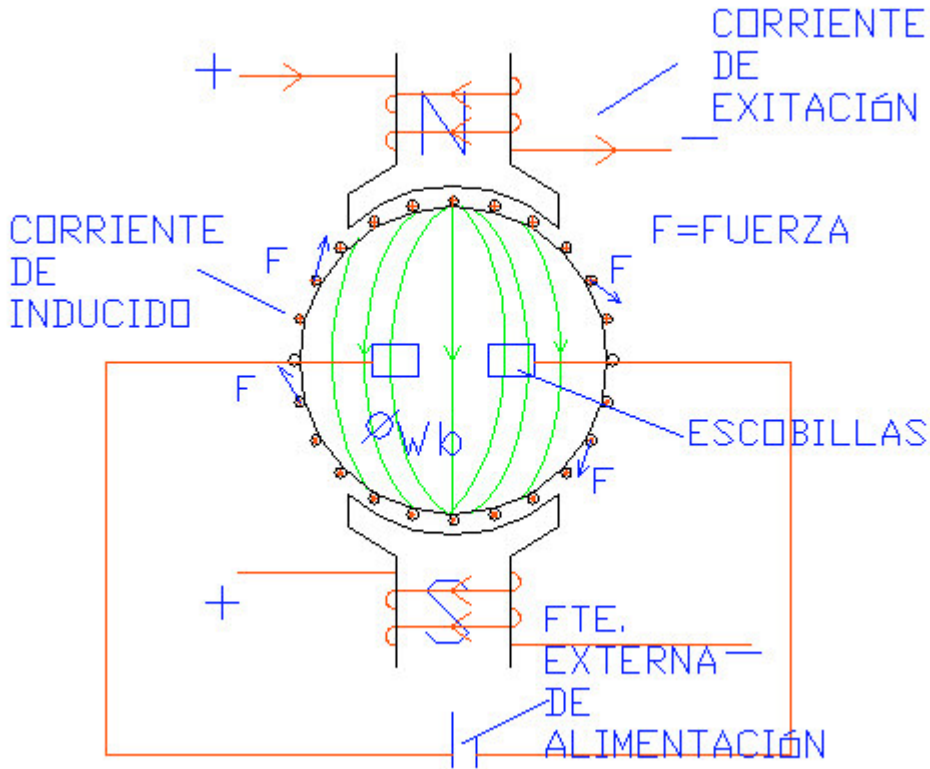
#### Diferencial:



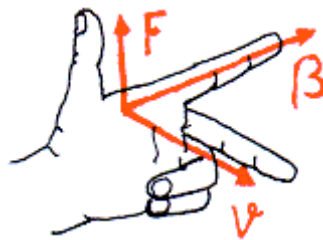
Con este montaje la corriente aumenta considerablemente y la tensión cae a cero, (como en los cortocircuitos), este sistema es muy utilizado en las soldadoras, ya que estas trabajan con corrientes de cortocircuito.

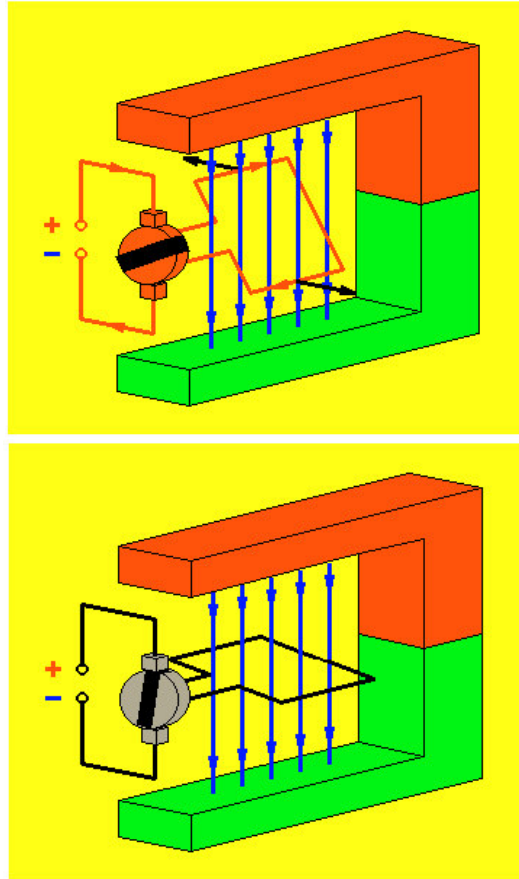
### MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

La máquina de corriente continua, es reversible, es decir puede trabajar indistintamente como motor o como generador, por lo tanto, si en vez de acoplar una máquina motriz, al inducido se le coloca una tensión externa en sus escobillas aparecerá en él una cupla mecánica que lo hará girar.



El sentido de giro de la máquina está dado por la regla de la mano izquierda:





En el gráfico se puede observar que en todo instante aparece una cupla motora, que tiende a hacer girar el motor en sentido antihorario, sin embargo se puede observar que las corrientes del bobinado de inducido, cambian de sentido cada medio giro ( corriente alterna). Si se cambiara la polaridad de alimentación del motor, cambiará el sentido de giro.

### **Fuerza contraelectromotriz:**

Cuando se alimenta a un motor de corriente continua a través de las escobillas desde una fuente externa, el inducido comienza girar, debido a la aparición de una cupla en sus conductores, cuyo sentido está dado por la regla de la mano izquierda.

Sin embargo cuando los conductores del inducido giran están cortando líneas de fuerza del campo producido por los polos, por lo tanto se está produciendo una FEM que está dada por la regla de la mano derecha.

La FEM inducida se opone a la corriente que circula por el inducido, de ahí el nombre de contra fuerza electromotriz y no hace más que responder al principio de acción y reacción de la física. En los generadores también está presente este efecto, y se da de la siguiente manera:

En el generador la máquina motriz impulsa al bobinado de inducido, haciendo que los conductores de éste corten líneas de campo e induciéndose en ellos una FEM cuyo sentido está dado por la regla de la mano derecha. Si el generador está cargado, circulará una corriente, cuyo sentido es el mismo que el de la FEM.

Dado que esos conductores por donde circula la corriente están inmersos en el campo producido por los polos, aparecerá sobre ellos una fuerza cuyo sentido estará dado por la regla de la mano izquierda.

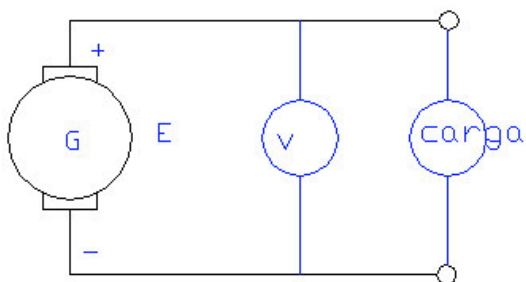
Se puede apreciar que esta fuerza promueve una cupla de sentido contrario a la que imprime la máquina motriz, poniéndose en manifiesto el principio de acción y reacción de la física.

Esto se puede visualizar cuando, a un generador se le aumenta la carga se produce un efecto de achanchamiento por así llamarlo.

**Ecuación fundamental del motor:**

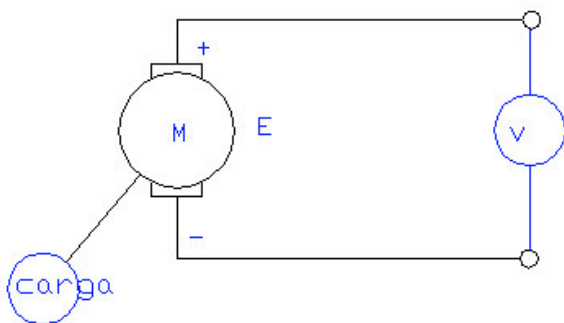
Cuando vimos el generador de corriente continua, distinguíamos la FEM inducida en el arrollamiento rotórico y la llamamos E, a diferencia de la tensión en bornes que era U.

En los generadores, no toda la FEM, que se induce en el inducido aparece en los bornes del mismo, sino que hay caídas de tensión que reducen el valor de la U, de tal modo que queda reducida respecto de E.



**E – FEM inducida**

En el motor ocurre lo contrario, yo aplico una tensión en los bornes y cuando la máquina comience a girar se va a producir una contra fuerza electromotriz E.



**Ecuación general:**  
**V = E + I . Ri**

Si en la ecuación general se multiplican ambos miembros por  $I$  tenemos que:

$E \cdot I + I^2 \cdot R_i = V \cdot I$ , donde  $V \cdot I$ , es la potencia absorbida,  $E \cdot I$ , es la potencia cedida e  $I^2 \cdot R_i$ , es la potencia de pérdida.

### EXPRESIÓN DE LA CUPLA DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA:

La cupla es proporcional al producto de la corriente por el flujo:

$$C = K \cdot I \cdot \phi \quad I = \text{corriente}; \phi = \text{flujo}; K = \text{constante de proporcionalidad}$$

$$C = C_i - C_r \quad C_i = \text{cupla interna}; C_r = \text{cupla rozamiento.}$$

Por otro lado, se puede decir que la contra fuerza electromotriz es proporcional al flujo ( $\phi$ ) multiplicado la velocidad de rotación ( $n$ ), expresada en rev/min = 1/s.

$$E = K \cdot \phi \cdot n \quad (1)$$

Una cupla se puede medir con una, máquina llamada freno y uno de los más comunes es el freno de Prony.

En la base de lo visto, si recordamos la ecuación fundamental del motor  $V = E + I R_i$ , donde  $E$  = fuerza contra electromotriz,  $R_i$  = resistencia interna de la máquina e  $I$  = corriente de carga.

Despejando la corriente tenemos que:

$$V - E = I \cdot R_i \Rightarrow I = \frac{V - E}{R_i}$$

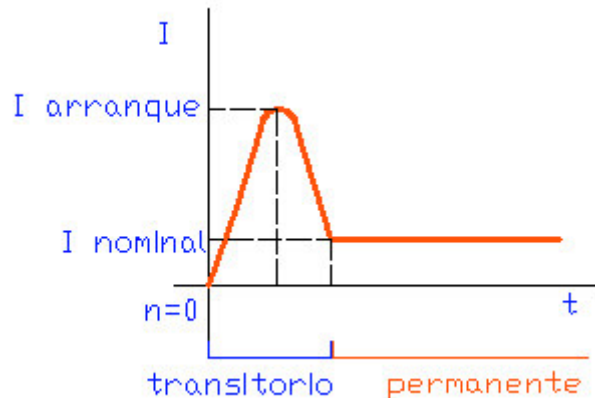
**Esta expresión permite calcular la corriente de carga en todo instante.**

Hay una situación que tiene que ver con el instante de arranque (ecuación 1)

Bajo estas circunstancias  $n$  vale cero (rotor detenido), por lo tanto la corriente de arranque vale  **$I_{arr.} = V / R_i$** . Dado que  $R_i$  es un valor bastante pequeño, el valor de esta corriente será muy elevado, pudiendo oscilar entre 10 a 50 veces la corriente nominal.

Este fenómeno es transitorio y podrá ser soportado por el motor.

Lo que sucede al momento del arranque se simbolizará en el siguiente cuadro:



Sin embargo una demanda tan elevada de corriente a la red, le hace producir una caída de tensión que puede ser inconveniente para otros dispositivos conectados a la misma línea. Por ejemplo: una computadora podría resetearse, otra máquina, tal como un motor se podría bloquear.

Como la corriente en el arranque es elevada, también es grande la cupla motora y cuando esta es muy elevada podría quebrar o romper su eje, si tiene acoplada una carga.

Una vez que la máquina arrancó, los conductores del inducido comienzan a cortar líneas de campo, que inducen la fuerza contraelectromotriz, y en esta nueva situación la corriente vale:

$$I = \frac{V - E}{R_i}$$

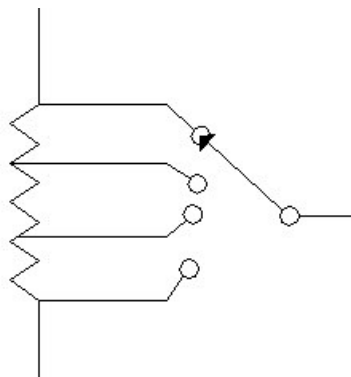
La fuerza electromotriz, hace caer a la corriente a su valor nominal, cuando la velocidad de la máquina es también la nominal.

La fuerza contraelectromotriz, es un fenómeno limitador de la corriente y es natural de la máquina.

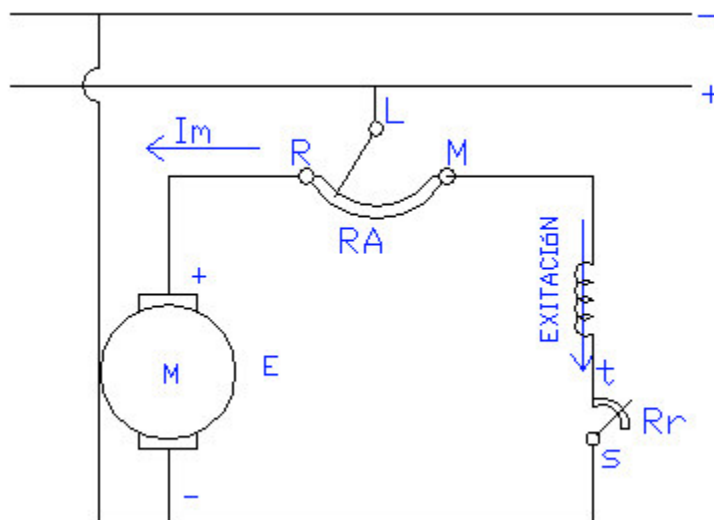
Para solucionar el problema en el transitorio (caída de tensión en la línea), se agrega en el momento de arranque una resistencia en serie con el inducido, de modo que la corriente de arranque nos quede:

$$I_{arr} = \frac{V}{R_i + R_a}$$

Esta resistencia es de valor bajo y en muchas ocasiones está inmersa en aceite para evitar calentamiento.



En el siguiente esquema mostraremos el motor conectado a la red a través de una resistencia variable  $R_a$  (resistencia entre el punto R y L).



Lo adecuado en el momento del arranque sería que el selector, estuviese conectado en el punto M (máximo), de modo tal que estaría intercalando la mayor resistencia en ese instante de funcionamiento. Una vez que la máquina arrancó se va desintercalando la resistencia hasta llegar al punto R, en el cual no hay resistencia intercalada (modo de funcionamiento normal).

Se puede observar que en la medida que se va desintercalando, resistencia en el circuito de inducido, se va intercalando resistencia en el circuito de excitación, a tal punto que en el funcionamiento normal la resistencia que se suma en el circuito es  $R_A$ .

Normalmente  $R_A$  es mucho más pequeña que  $R_r$ , por esta circunstancia y dado que sobre  $R_A$  se disipa más potencia, se construye por saltos, en cambio el reóstato  $R_r$ , es de más alto valor resistivo, maneja mucho menos potencia y por lo tanto se lo construye en forma continua y su verdadera función es regular la corriente de excitación, que será la que producirá el flujo de los polos inductores y que como veremos termina regulando la velocidad del motor.

$$\mathbf{RA \ll Rr}$$
$$\mathbf{R_{ext.} = R1 + Rr \approx Rr}$$

Retomando la ecuación fundamental del motor  $V = E + I \cdot R$

$$\mathbf{V = E + IRi}$$
$$\mathbf{V = K \cdot n \cdot \phi + IRi}$$
$$\mathbf{V - IRi = K \cdot n \cdot \phi}$$

$$\mathbf{n = \frac{V - IRi}{K \cdot \phi}}$$

De esta formula deducimos que la velocidad del motor se puede variar de varias maneras:

- 1- Variando la tensión de alimentación. Si aumenta la tensión aumenta la velocidad, si baja ésta disminuye la velocidad (potenciómetro)
- 2- Variando la resistencia de inducido, conectando una R en serie con el inducido.
- 3- Variando el flujo. El flujo se aumenta o disminuye variando la resistencia Rr. Si aumento el flujo disminuye la velocidad, de lo contrario sucede lo inverso.

### **¿Qué ocurriría si por alguna causa se abriera el circuito de excitación?**

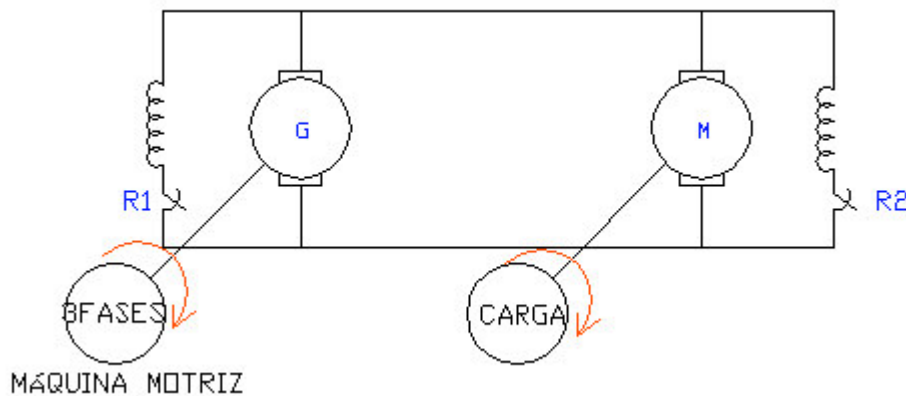
Este fenómeno se denomina embalamiento y puede destruir al motor, si este está sin carga.

Sucede:  $i = 0$        $\phi \approx 0$

Si se corta la alimentación de la excitación, el flujo es casi 0 (ya que hay flujo remanente), la velocidad tiende a  $\infty$  y si la máquina no está cargada se rompe, ya que la fuerza centrífuga descolocaría las bobinas de inducido, se romperían los rodamientos o bujes y la máquina recalentaría la máquina, (esto sucede si la máquina está en vacío). También al disminuir el flujo a casi 0, la cupla motora es casi 0 y si le coloco una carga la cupla resistente es mayor que ésta y la máquina se frena.

La RA también colabora en la descarga de la energía almacenada en la bobina de excitación cuando el motor se apaga.

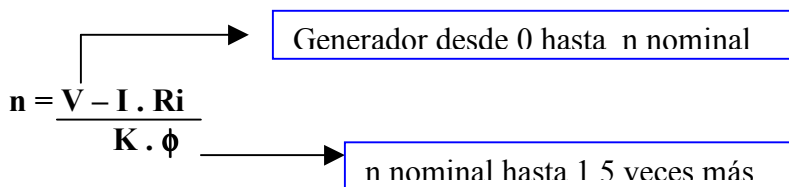
Vamos a ver un sistema de control de velocidad de valores muy amplios, que es el sistema Ward- Leonard.



El sistema consta de tres máquinas: un motor asíncrono trifásico, un generador y motor de corriente continua.

La meta es variar la velocidad del motor en un rango tan amplio como desde 0 hasta  $1 \frac{1}{2}$  la velocidad nominal del motor. El motor asíncrono trifásico actúa como máquina motriz (impulsa el generador de corriente continua) y ésta a través de su reóstato R1 puede variar su tensión en bornes desde 0 hasta su valor nominal.

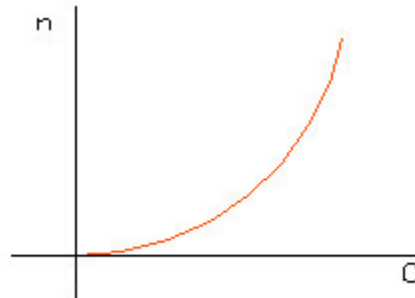
El motor de corriente continua se alimenta de esta tensión y también puede variar su velocidad, a través del reóstato R2, de modo que con el generador puedo variar la velocidad desde 0 hasta la velocidad nominal, y a su vez desde el motor manejando la excitación puedo llevar la velocidad desde la nominal, hasta 1.5 veces más.



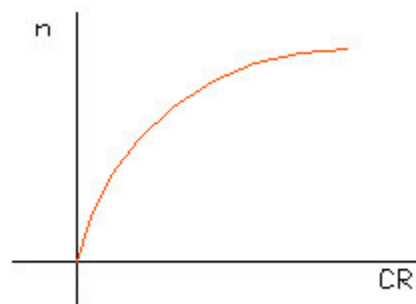
### Curvas características de los motores.

Cuando se vio el generador eléctrico y las curvas características, se analizaba, la tensión vs. la corriente, ya que la tensión era el producto (lo que sacamos), y la corriente determinaba la carga agregada al generador, de modo tal que las curvas nos entregaban los valores de tensión para cada valor de carga.

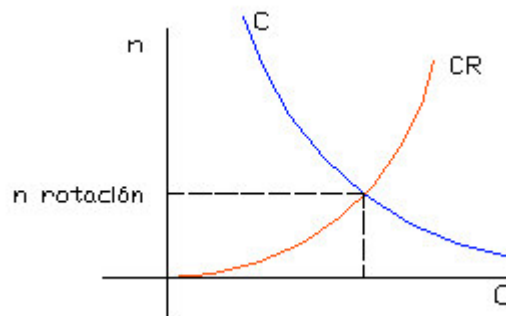
En los motores el producto de salida es una potencia mecánica, lo cual se pone de manifiesto, en forma de cupla y será de interés conocer el valor de esa cupla contra los valores de la velocidad de giro de la máquina.



Además los motores se construyen para operar sobre una carga. Como se tiene una característica motora, también se tiene una característica de cupla resistente (carga).



Tanto la cupla motora, como la cupla resistente se pueden representar en el mismo gráfico.



Por lo que se percibe en el último gráfico, en el caso de la cupla resistente, aumenta con el aumento de velocidad, esto es típico en varios modos de carga, tales como los ventiladores y las bombas centrífugas (a medida que crece la velocidad más pesado es para la máquina).

El motor quedará siempre funcionando a la velocidad, que se obtiene en el punto de intersección, y esta será la velocidad a la que quedará rotando la máquina, es decir:

$$CM = CR \quad n = \text{cte.}$$

$$C = CR$$

Si la cupla motora fuera mayor que la CR, la velocidad aumentaría.

$$C > CR = \text{aumento de } n \text{ (acelera)}$$

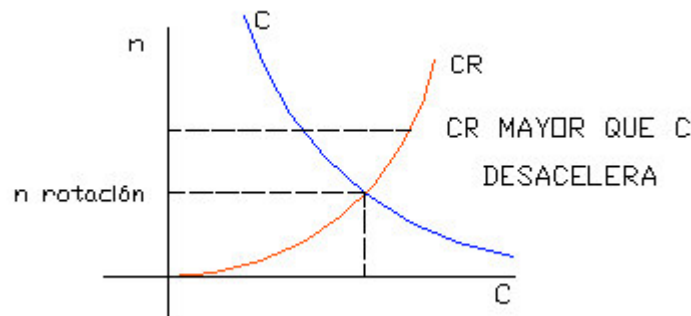
$$\text{Si } C < CR = \text{disminución de } n \text{ (desacelera)}$$

Si la cupla en el arranque ( $n = 0$ ), es menor que la cupla resistente, la máquina no arranca (se bloquea) y se podría quemar por dos razones:

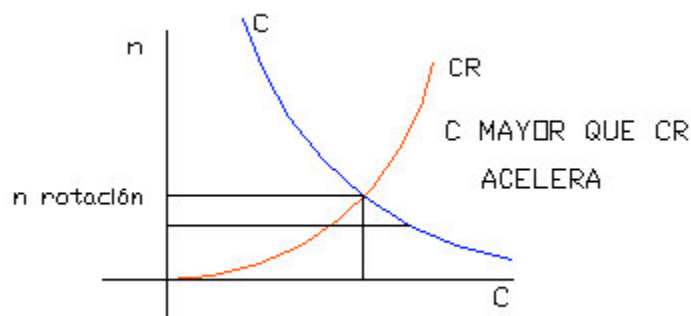
- 1- la corriente de arranque permanece en valores altos porque no aparece la contrafem.
- 2- Como todas las máquinas tienen acoplado un ventilador, al no girar no disipará calor.

Ahora resta saber si el punto de intersección es estable o inestable.

Supongamos que por cualquier causa la carga se alivió, ello traería aparejado un aumento de la velocidad, entonces  $CR > C$ .

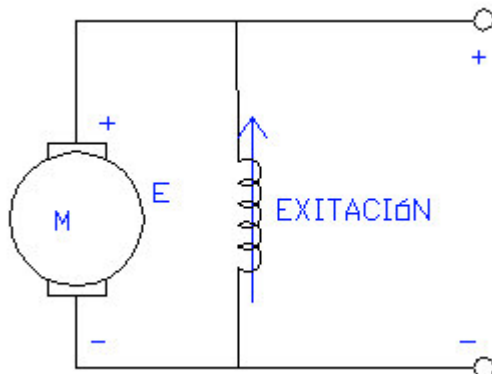


Si por alguna otra causa sucede lo contrario, es decir, la máquina se carga un poco más, la velocidad disminuye, llegando a esta situación:  $C > CR$  (acelera).



Observamos así que la máquina tiende a estabilizarse en el punto de intersección, aunque los valores de carga sean distintos.

**Motor derivación**



En base a lo visto anteriormente, la cupla ejercida por el motor es proporcional al producto del flujo por la corriente ( $C = K \phi I$ ), pero en este tipo de conexión, el flujo solo depende de la tensión de alimentación, la cual es constante, o sea, el flujo es constante (un reóstato regula la corriente de excitación), por lo tanto la cupla va a ser proporcional a la corriente de carga. Por otro lado:

$$V = E + I R_i = n + I R_i$$

$$N = \frac{V - I R_i}{K \phi} = \frac{V}{K \phi} - \frac{I R_i}{K \phi}$$

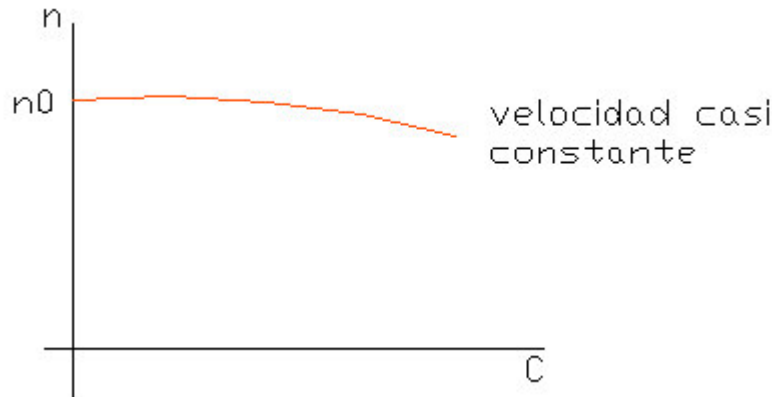
$n_0 = cte$

Por otro lado:

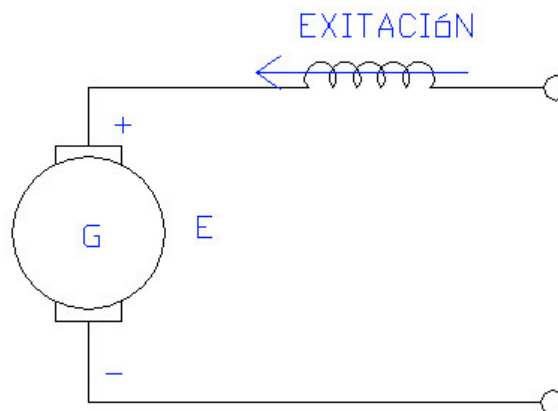
$$\frac{I R_i}{K \phi} = K C$$

$$R_i / K \phi = cte, \text{ por lo tanto } n = n_0 - K C$$





### MOTOR SERIE:



Los motores con conexión serie, son utilizados generalmente en máquinas que necesitan hacer mucha fuerza, pero tienen, la desventaja de las altas caídas de tensión que se produce en ellos.

### PÉRDIDAS EN LAS MÁQUINAS DE C.C.

Las máquinas de corriente continua no son estáticas por lo que su rendimiento no supera normalmente el 85%, esto quiere decir que poseen pérdidas las cuales se calculan:

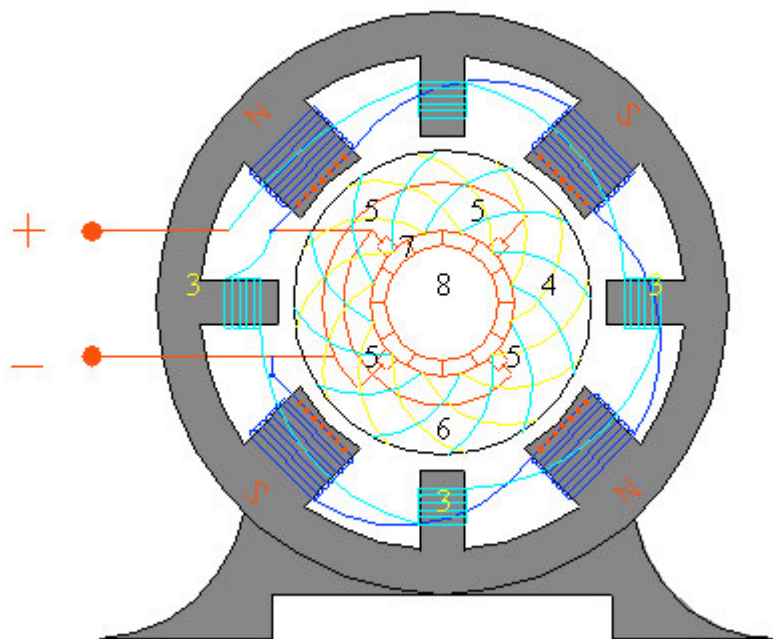
+**Pérdidas en el cobre**  $P_{Cu} = 2,14 J^2 G_{cu}$  [W] donde J es la densidad de corriente y G el peso del cobre. Se deben al calentamiento generado por la resistencia del cobre.

+**Pérdidas en el hierro**  $P_{Fe} = P_h + P_F = B_M^2 \cdot G \cdot P_0$  donde  $P_h$  son las pérdidas por histéresis dadas por la remanencia magnética y  $P_F$  las pérdidas por corrientes de Foucault (dadas por las corrientes que circulan por el hierro por lo que se hace laminado y aislado),  $B_M$  es la inducción máxima, G es el peso del hierro y  $P_0$  es el coeficiente de pérdida para un kg de hierro.

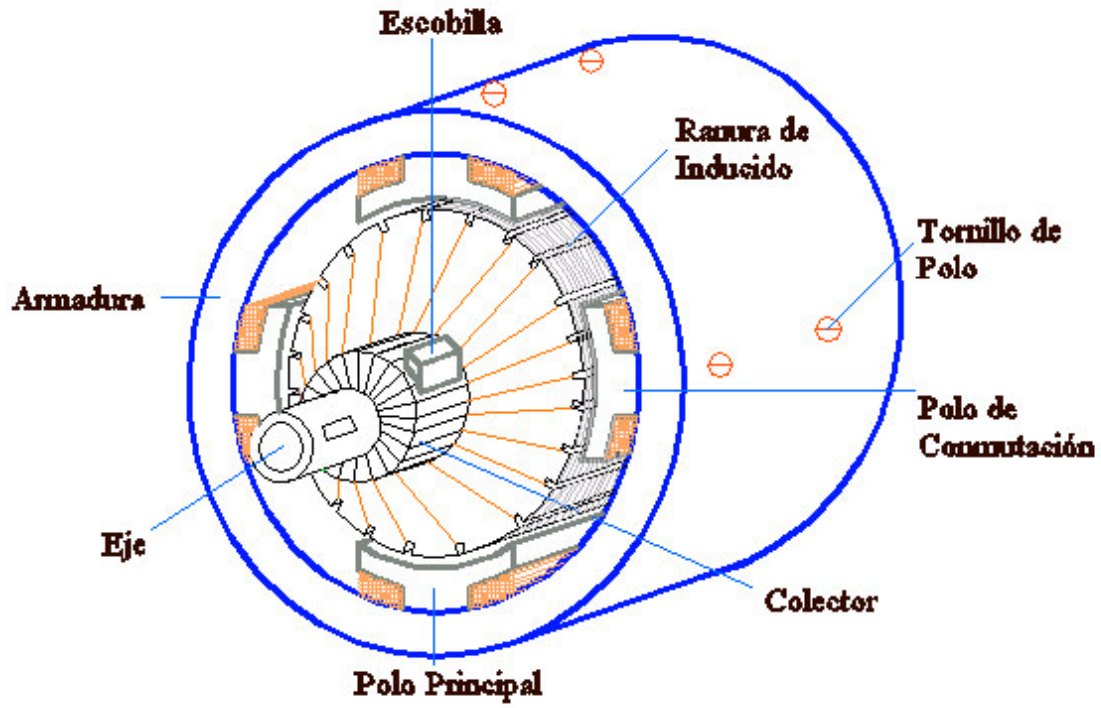
+**Pérdidas mecánicas** en su mayoría se dan por el rozamiento con el aire o de las mismas piezas del motor entre sí y por la potencia absorbida por el sistema de ventilación. Son constantes.

+**Pérdidas adicionales** son pérdidas que se producen por fenómenos no especificados y que van entre el 0,5 y el 1%.

### MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA EN CORTES



1. **Carcaza:**
2. **Polos principales:**
3. **Polos auxiliares:**
4. **Inducido:**
5. **Escobillas:**
6. **Sustento de inducido:**
7. **Colector:**
8. **Eje:**



Bobinado de la máquina:

