

## Máquinas de Corriente Continua

Las denominamos en forma genérica como **máquinas**, por cuanto las mismas, cumplen con la doble función de generadores o motores, según sea la forma de energía suministrada para su funcionamiento. Si este dispositivo rotatorio es accionado por un medio mecánico, produce energía eléctrica en forma de una corriente continua (generador) y viceversa, al ser alimentado por una corriente continua produce energía mecánica (motor).

Constructivamente, en ambos casos, es exactamente lo mismo.

### Forma constructiva:

Posee una parte móvil: rotor o inducido (A) - Fig.1 - formado por chapas magnéticas apiladas de un espesor aproximado de 0.5 mm, ranuradas en su parte exterior. Sobre uno de los extremos del eje, se encuentra un cilindro menor llamado "colector" (B) constituido por sectores de cobre aislados entre sí y respecto al eje, denominadas "delgas" (C). Sobre el colector asientan las escobillas (D), piezas prismáticas conformadas con polvos metálicos y de carbón.

En las ranuras del inducido se encuentran alojados los conductores del "arrollamiento de inducido" (E) que van conectados a las delgas.

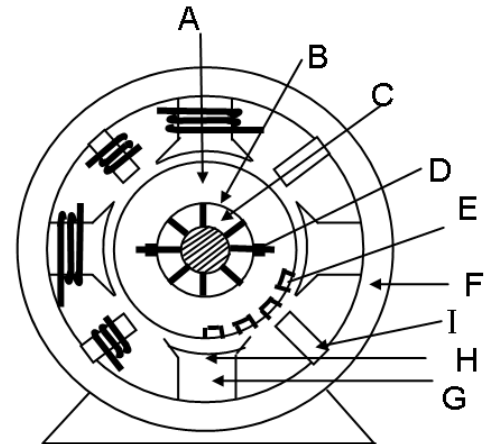


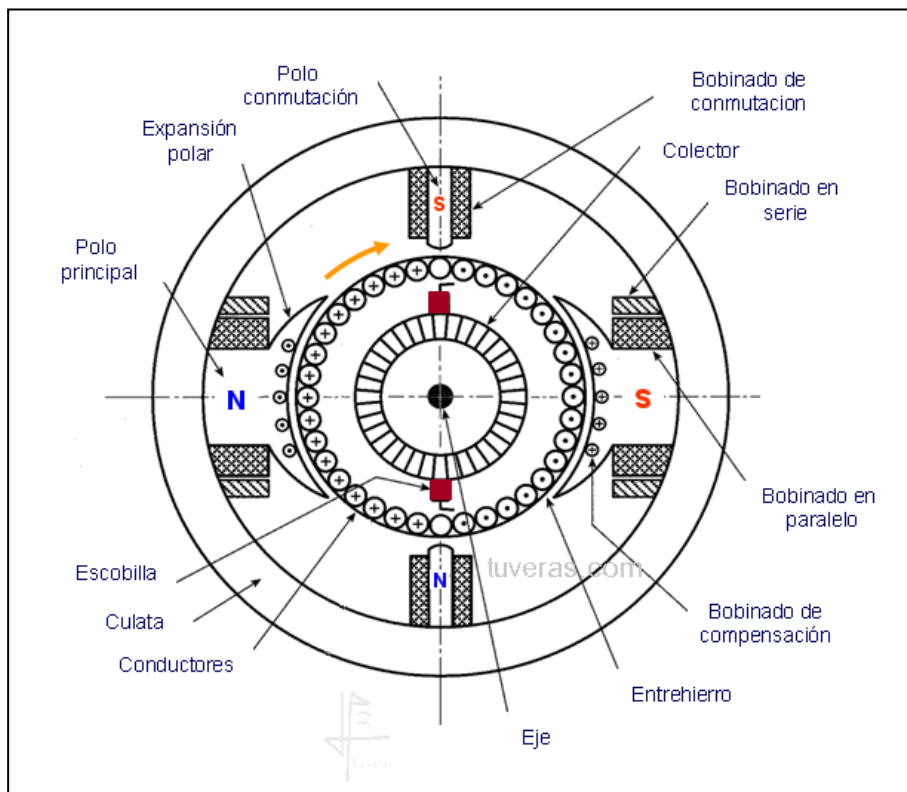
Figura 1

La parte fija, estator, está compuesta por la "corona del estator" (F) a la que están fijados un cierto número de "polos inductores" con sus partes: el "núcleo polar" (G) y la "expansión polar" (H), además de unos polos más pequeños llamados "polos de conmutación" (I), polos auxiliares o interpolos.

Alrededor del núcleo polar se halla el "devanado de excitación" y alrededor de los polos de conmutación el "arrollamiento de conmutación".

Las máquinas se definen por su potencia en kW, tensión, velocidad, forma de conexión y número de polos inductores.

Ejemplo: Subterráneo Línea E, Bs. As.: motores tetra polares, 93 kW, 750V, 139 A, 1410 rpm., 4 motores.



### PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

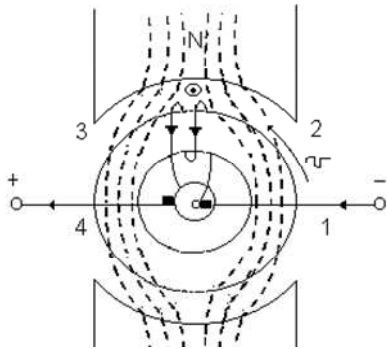
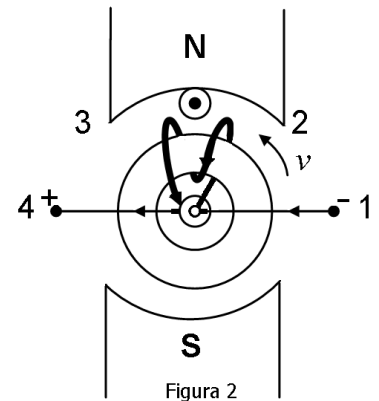
#### Generación de la Fem.

Por simplicidad, representaremos a una máquina bipolar, con un inducido del tipo de la máquina de Gramme (cilindro hueco alrededor de cuya camisa están arrolladas

## Máquinas de Corriente Continua

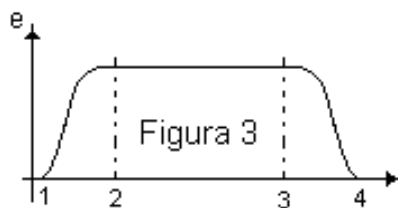
las bobinas), pero mostramos una sola bobina, cuyos extremos se conectan a dos anillos rozantes, según Fig.2 y consideramos que gira en sentido antihorario, accionado por un motor, es decir lo analizaremos como generador.

La bobina, al desplazarse desde el punto 1 al 4, corta al campo magnético generado por polos N y S. En su desplazamiento de 1 a 2, corta cada vez más líneas de campo, crece B y por consiguiente la Fem  $e = B \cdot l \cdot v$  generada en los costados de bobina ubicados en el entrehierro, entre el rotor y los polos, (ya que el cilindro de material permeable conduce las líneas de inducción a través de él impidiendo que en el cilindro interior, donde también hay costados de bobina hayan líneas de campo B) :



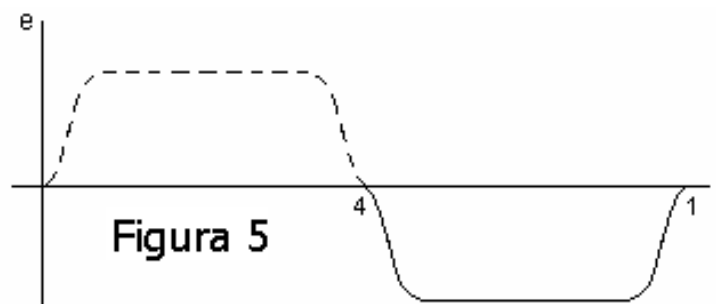
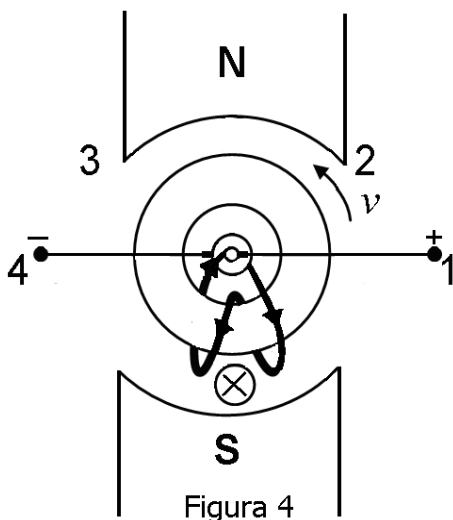
Cuando se desplaza de 2 a 3, lo hace en el espacio de aire entre el polo y el inducido, denominado "entre hierro"; por construcción, éste se hace constante, por tanto, en esta zona de recorrido  $B = \text{cte.}$

Y por último, al desplazarse de 3 a 4, comienzan a disminuir las líneas de campo y disminuye B. Al circular la espira en las zonas 1 y 4, se observa que esta se desplaza en forma paralela a las líneas de campo, no corta a éstos, por tanto no se genera fem alguna.

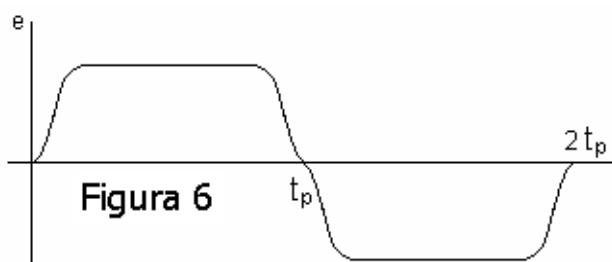


A esta zona, líneas entre 1 y 4, se la denomina, "zona neutra"; graficando lo dicho anteriormente se obtiene la curva de la Fig.3. El mismo razonamiento se puede hacer para cuando la espira circula bajo el polo S, pero ahora las corrientes circulan en sentido contrario, Fig.4 y la onda generada será según la Fig.5.

Se denomina "paso polar"  $t_p$ , a la distancia entre dos zonas neutras o entre líneas medias polares, medida sobre el perímetro del



inducido, su expresión es: 
$$t_p = \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot p} \quad (1)$$



Llamamos con  $2p$  al número de polos, o  $p$  al número de pares de polos. Por último, con cada vuelta del inducido, en una máquina bipolar se genera una onda como en la Fig.6. Generalizando, en una máquina multipolar, la bobina generará un ciclo cada vez que pase bajo un par de polos.

## Máquinas de Corriente Continua

Por convención se determina que el borne por el cual sale la corriente, se lo designa como (+), en los generadores. El otro será el (-).

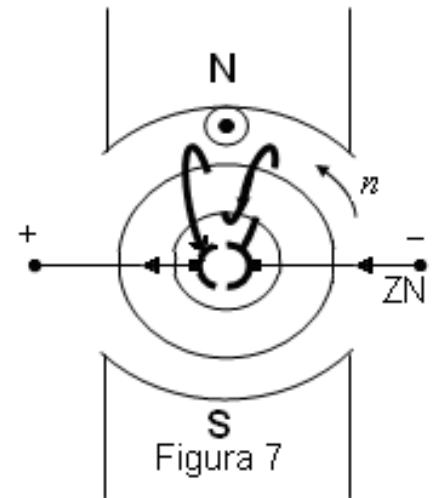
**Conclusión:** Dado que los bornes cambian de polaridad en el ejemplo estudiado, concluimos que las bobinas del inducido generan corrientes alternas, no senoidales.

Esto explica el porqué el inducido se construye con chapas aleadas de pequeño espesor, 0,5 mm, para reducir las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

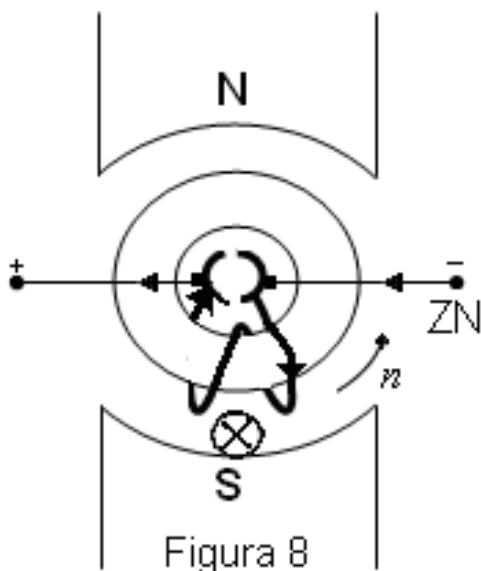
Como el objeto de esta máquina es generar corriente continua, se debe "rectificar" la onda así obtenida, para ello se dispone del colector, que no es más que un rectificador mecánico.

En la Fig.7 se han conectado los extremos de la bobina a dos delgas del colector. Se observa que cuando circula bajo el polo N, genera la corriente en un sentido Figura 7 y cuando circula bajo el S, mantiene el mismo sentido Fig.8.

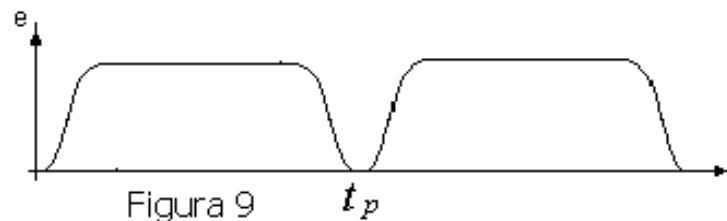
Por consiguiente ahora la onda es según Fig.9. Se observa que cuando la bobina circula por la zona neutra (ZN), que es cuando no genera, no hay corriente, se produce la



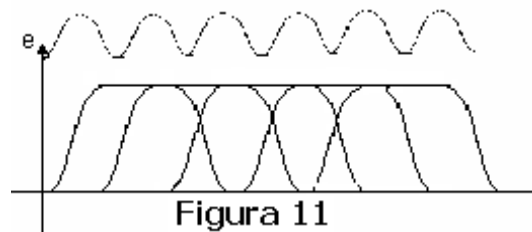
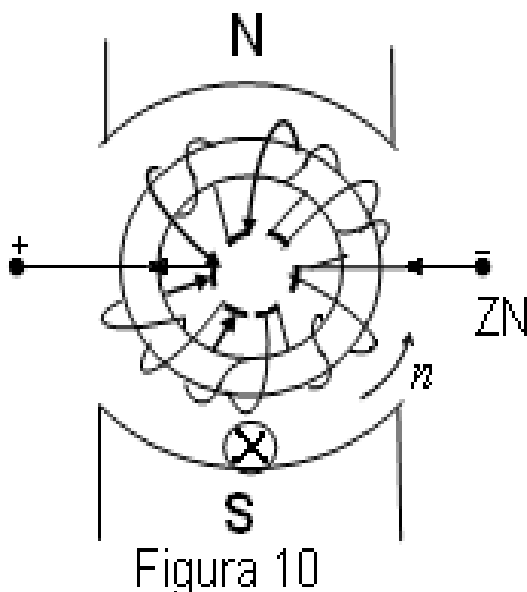
inversión en las conexiones, lo que evita que se produzcan chispas.



Para reducir las oscilaciones y tender a obtener la onda lo más continua posible, se colocan muchas bobinas en serie, respetando siempre que el principio y fin de cada bobina, estén conectadas a una delga, siendo el fin de una bobina, principio de la siguiente en la misma delga.



En la Fig.10, se ha representado un inducido con 6 bobinas de 2 espiras c/u.



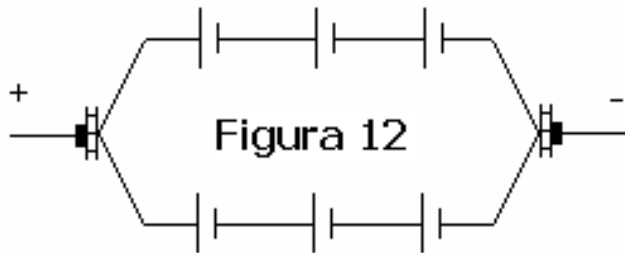
Como el fin de una es el principio de la siguiente en una delga, tiene 6 delgas.

Las bobinas están desfasadas en  $60^\circ$  entre sí, y como c/u de ellas genera una onda según Fig.9, se generan tres ondas desfasadas  $60^\circ$  y como están en serie, se suman, por consiguiente la onda obtenida es más constante y mayor Fig.11.-

## Máquinas de Corriente Continua

Se concluye que, para tener una onda lo más continua posible, **conviene** disponer de **muchas bobinas** en el inducido.

Considerando que cada bobina genera una cierta tensión, se podría representar, como circuito equivalente del inducido de la Fig.10, al de la Fig.12 en el que, las tres bobinas bajo el polo N, están en serie entre sí, y en paralelo con las tres bajo el polo S.



### Ejemplo:

Si suponemos que cada conductor genera 1V, tenemos 2 conductores por bobina, 2 V por bobina, el circuito equivalente será: Figura 12

Este circuito tiene 2 ramas en paralelo, el n° de ramas en paralelo lo designaremos como: 2a siendo "a" el n° de pares de ramas. En este caso: 2a = 2. Al n° de conductor es activos del inducido, lo designaremos con: N en este caso: N = 12. La tensión generada entre las escobillas, por estar los conductores en serie-paralelo, será N/2 a veces la de un conductor. En este caso:  $N/2a = 12/2 = 6\text{ V}$

### Expresión del valor medio de la Fem. Continua

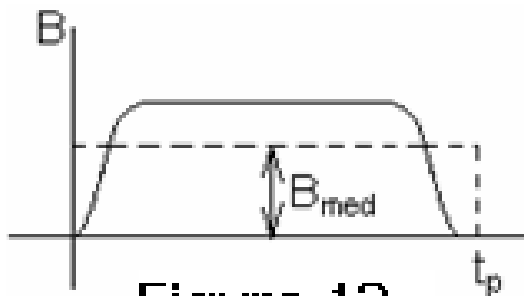


Figura 13

Sea la curva del campo magnético, creada por los A.vta de excitación en los polos principales, la de Fig.13.

Siendo "l" la longitud el inducido Fig.14 El flujo total, será proporcional a la superficie formada por la curva del campo y el perímetro  $t_p$  o sea:

$$\Phi = B_{med} \cdot t_p \cdot l \quad (2) \text{ Luego } (3)$$

el valor medio de la Fem inducida en un conductor

$$\text{será: } e_{med} = B_{med} \cdot l \cdot v \quad (4)$$

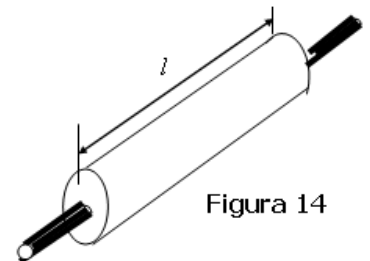
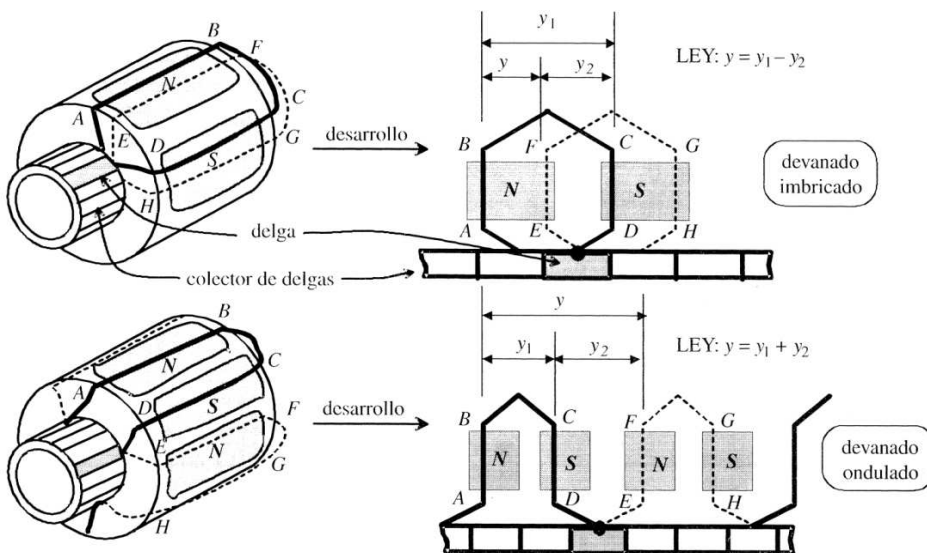


Figura 14



Devanados imbricado y ondulado.

## Máquinas de Corriente Continua

Que para el total de conductores N será:  $E = \frac{N}{2a} \cdot e_{med}$

$$E = \frac{N}{2a} \cdot B_{med} \cdot l \cdot v \quad (5) \quad \text{Siendo el paso polar: } t_p [m] = \frac{\pi \cdot d}{2p} \quad (1)$$

Y la velocidad tangencial en función de la velocidad angular n [rpm]  $v [m/s] = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60}$  (6)

Introduciendo (3), (1) y (6) en (5) queda:  $E [V] = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi [Wb] \cdot n [rpm] = K_E \cdot \Phi \cdot n$  (7)

### CONSIDERACIONES:

1) Si se desplazan las escobillas de las zonas neutras, disminuye el  $\Phi$  entre escobillas, luego disminuye la Fem inducida. Desplazándolas hasta la línea media de los polos será  $E = 0$ , por consiguiente, la fórmula es válida solo para escobillas situadas en las zonas neutras.

2) Para una máquina construida N, p y a son parámetros constantes, por consiguiente será:

$$E = K_E \cdot \Phi \cdot n \quad (8) \quad \text{con } K_E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} = \text{Constante de fem} \quad (9), \text{ de donde se}$$

deduce que: para variar la tensión, hay que variar el  $\Phi$ , ó lo que es lo mismo, la corriente de excitación, porque  $\Phi = \Lambda \cdot N \cdot I_{ex}$  (10)

- la máquina tiene que girar a velocidad constante, porque si no la tensión sufrirá oscilaciones, directamente proporcionales a la variación de velocidad.

3) El número de ramas en paralelo 2a, depende del tipo de bobinado del inducido, existen dos formas principales, la denominada paralelo o **imbicado**, en que  $2a = 2p$  y el serie u **ondulado**, en que  $2a = 2$ . Entonces, la Fem inducida también depende del tipo de arrollamiento del inducido.

### EXCITACIÓN DEL CAMPO INDUCTOR

Analizaremos como se producen los campos magnéticos en los polos principales.

Ellos se pueden obtener por:

a) Imanes permanentes: tienen el inconveniente de ser débiles, es decir solo se pueden utilizar para pequeñas potencias; no son regulables, lo que nos impide variar el flujo y sus consecuencias: velocidad, tensión, etc. Se usan en pequeños motores para juguetes, levanta cristales de automóviles, magnetos de instrumentos (meggometros)

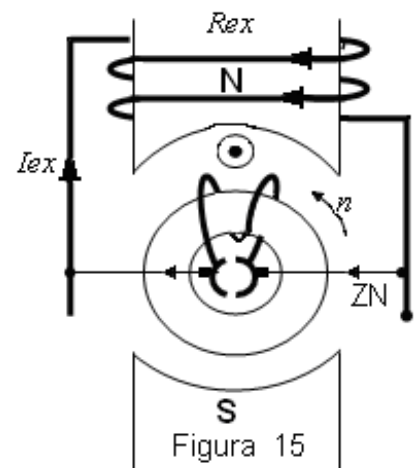
b) Electroimanes: son los de uso general y no tienen los inconvenientes de los anteriores.

La alimentación de los polos principales, para obtener el  $\Phi$  necesario, se puede realizar de distintas maneras, lo que da origen a distintas máquinas en cuanto a su funcionamiento, ya que no a su forma constructiva, que es igual para todos.

Entonces, según sea la forma de excitarlas las clasificaremos en:

- Máquinas de excitación independiente
- Máquinas de excitación propia
- Máquinas auto excitadas (serie, derivación y compuesta)

Antes de analizar cada una de ellas, veamos en qué consiste el "principio de Auto excitación" o "principio dinamoeléctrico".



# Máquinas de Corriente Continua

## PRINCIPIO DE AUTOEXCITACIÓN

Consideremos una máquina en derivación conectada como en Fig.15 a la que hacemos girar en sentido antihorario.

Supongamos los polos principales, magnetizados previamente con la polaridad indicados N - S; es decir, tienen un magnetismo remanente considerable.

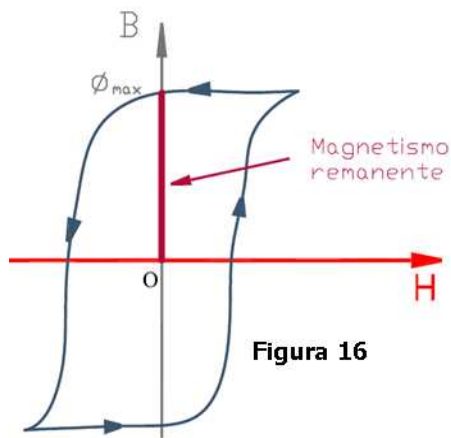


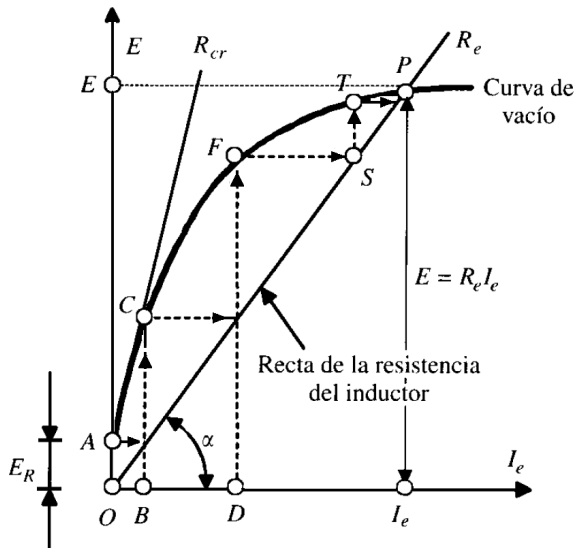
Figura 16

Para que esto ocurra, se han construido con un material que tiene un ciclo de histéresis muy ancho, como por ejemplo el hierro dulce (Fig.16).

Los conductores del inducido, al pasar bajo el magnetismo remanente del polo N, generan una corriente saliente, que circula por el devanado del polo principal, que tiene un sentido tal que refuerza el campo remanente existente.

Ambos conductores cortan ahora un campo más intenso, generan más corriente, vuelven a reforzar el campo principal y así sucesivamente, hasta que se establece el equilibrio:  $E = R_{ex} \cdot I_{ex}$  (11)

La máquina genera por sí sola, al obligar a girar el inducido, debido al magnetismo remanente preexistente, y éste es el principio por el cual se auto excita, "principio dinamoeléctrico".



También podemos explicar el principio de auto excitación mediante la figura en la que se muestra la curva de Vacío del Generador y la Recta de Tensión del inductor en paralelo.

Considerando una resistencia total del circuito inductor  $R_e$  la recta  $U = R_e \cdot I_e$  representa la ecuación del bobinado inductor y su pendiente es la  $tg \alpha = R_e$ .

En vacío, toda la corriente de inducido pasa a través del devanado inductor, por lo que  $I_i = I_e$ , además, en esta condición la corriente común anterior es de pequeño valor, por lo que puede considerarse despreciable la caída de tensión en la resistencia del inducido y la propia reacción del inducido; de esta forma, la ddp. entre bornes de la máquina coincide con la Fem generada. Si se considera la  $R_e$  como la resistencia total del bobinado inductor  $R_d$  y del reóstato de campo  $R_r$  y  $L_e$  la inductancia del bobinado inductor, por el

2º Lema de Kirchoff se tiene:

$$E = R_e \cdot I_e + L \cdot \frac{dI_e}{dt} \quad (12)$$

Inicialmente la  $I_e = 0$  por lo que la Fem generada  $E_R$  se debe al magnetismo remanente de los polos y corresponde al segmento OA en el gráfico, de modo que, en ese momento y de acuerdo a

$$\text{la ecuación se cumple } E_R = L \cdot \frac{dI_e}{dt}$$

Por ser  $E_R$  un valor positivo resulta la  $\frac{dI_e}{dt} > 0$  y la corriente  $I_e$  comienza a aumentar hasta valer OB, lo que, a su vez, hace que la Fem aumente hasta el valor BC.

De este modo y teniendo en cuenta que:  $E - R_e \cdot I_e = L \cdot \frac{dI_e}{dt}$  (13) el primer miembro de la

ecuación anterior representa la diferencia entre la curva de variación y la recta de la resistencia del inductor, que siempre da un valor positivo, ya que la curva de vacío está por encima de la

recta de tensión, lo que hace que la  $\frac{dI_e}{dt} > 0$ , por lo que la corriente  $I_e$  va aumentando en todo

momento. En nuestro caso la corriente alcanzará el valor OD, que producirá la fem FD y así sucesivamente (el recorrido que sigue la máquina está señalado por la línea quebrada de trazos).

## Máquinas de Corriente Continua

Cuando la Fem alcance el valor dado por la intersección de la recta de campo en derivación con la curva de vacío (Punto P en la figura), de acuerdo con (13) el término  $L \cdot \frac{dI_e}{dt}$  será cero, por lo que no puede haber ningún aumento posterior de la corriente  $I_e$ , la fem  $E$  deja de aumentar y el punto P determina los valores finales de equilibrio entre la tensión en vacío (fem) y de la corriente de excitación, cumpliéndose en ese punto la condición  $E = R_e \cdot I_e$

### CONSIDERACIONES

1° Existe auto excitación si concuerdan el sentido del flujo del arrollamiento excitador con el del magnetismo remanente.

2° Debe haber concordancia entre el magnetismo remanente, el sentido de giro y el sentido del arrollamiento de los polos inductores.

3° Las causas por las cuales puede no excitarse una máquina son:

- a) Falta de magnetismo remanente
- b) Falta de concordancia entre los elementos mencionados en el punto 2°
- c) En algunas conexiones (derivación) por cortocircuito exterior.
- d) Poca presión en los resortes de escobillas (falso contacto)

### FORMA DE CONEXIÓN

Según sea la forma de conectar entre sí, la excitación y el inducido, da origen a distintas máquinas en cuanto a su funcionamiento, ya que constructivamente, son prácticamente iguales.

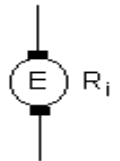
A los efectos de representar la máquina por medio de un circuito equivalente determinaremos el inducido por el símbolo caracterizado por su resistencia  $R_i$  y la Fem.  $E$  que genera.

Los polos de conmutación quedan definidos por su resistencia  $R_c$  (en corriente continua una bobina tiene solo resistencia)

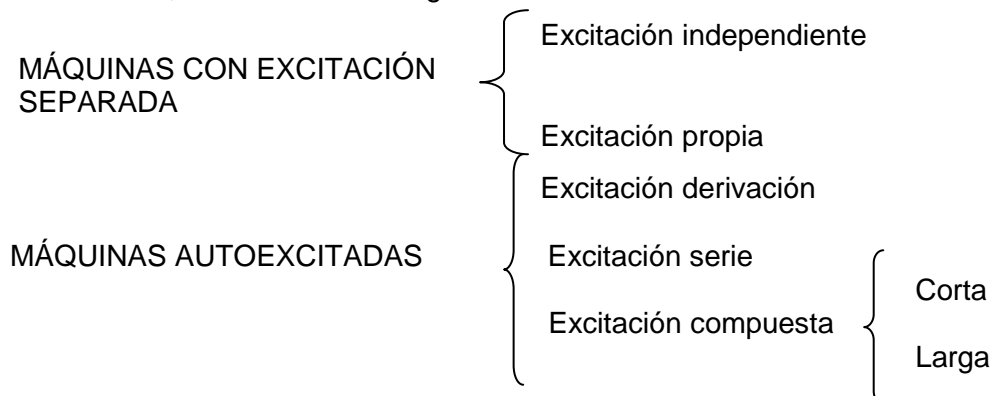
Los polos principales también se determinan por su resistencia:  $R_{ex}$  o bien si están conectadas en derivación  $R_d$  o en serie  $R_s$ .

La denominación normalizada de terminales es:

- Terminales del Inducido:            A – B    con A (+)
- Excitación derivación:            C – D    con C (+)
- Excitación Serie:                    E – F    con E (+)
- Polos Auxiliares:                    Ga – Ha    con Ga (+)
- Arrollamiento Compensador:    Gc – Hc    con Gc (+)
- Excitación independiente        I – K    con I (+)



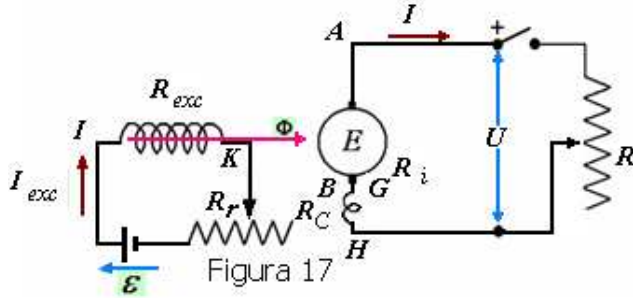
En resumen, establecemos la siguiente clasificación:



Las posibilidades de conexión, con la nomenclatura de bornes normalizada correspondiente son:

# Máquinas de Corriente Continua

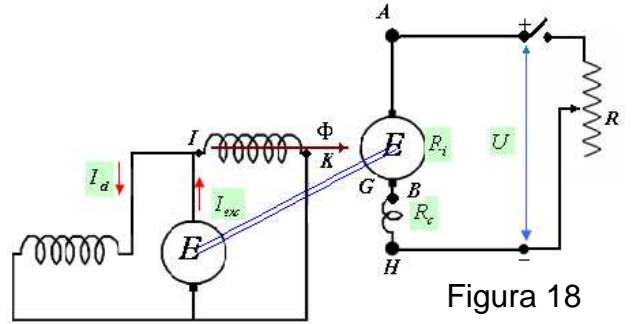
## Excitación Independiente



$$E = U + (R_i + R_c)I$$

Los polos principales se alimentan por medio de una fuente externa.-

## Excitación Propia



$$E = U + (R_i + R_c)I$$

Los polos son alimentados por un generador independiente, acoplado al mismo eje, denominado excitatriz. Cuando la excitatriz es muy grande, suele necesitar ser alimentada a su vez, por otra máquina pequeña, llamada excitatriz piloto

## Excitación Derivación

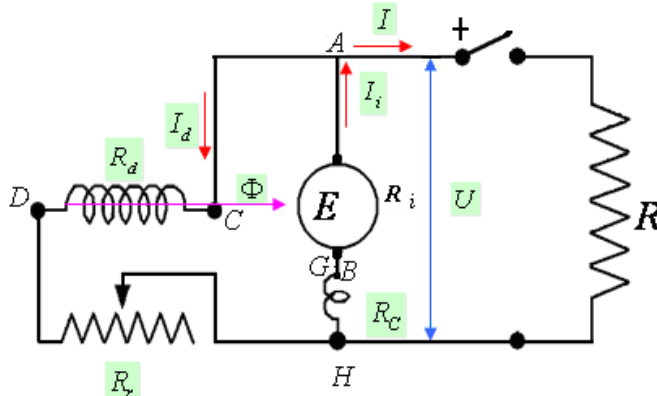
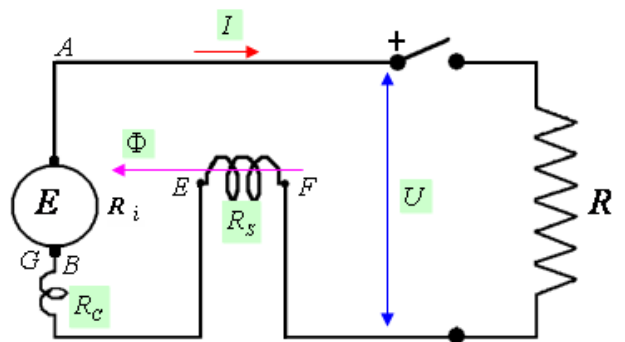


Figura 19 - Bobinado en paralelo de muchas vueltas de alambre fino.-  $E = U + (R_i + R_c)I_i$  ;  
 $I_i = I_d + I$  ;  $U = (R_d + R_r)I_d$

## Excitación Serie



$$E = U + (R_c + R_i + R_s)I$$

Bobinado de campo alambre grueso y pocas vts.

## Excitación Compuesta Corta

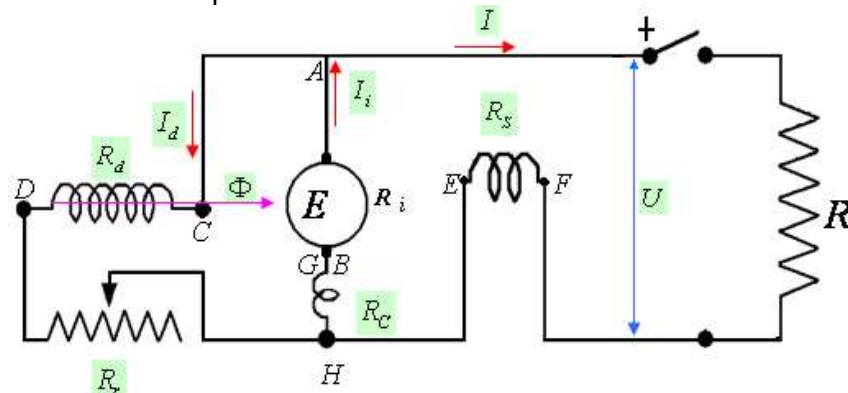
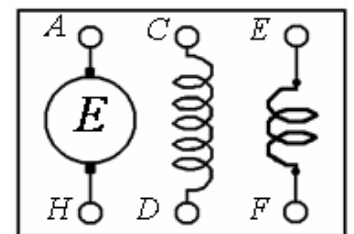


Figura 21

$$E = U + R_s I + (R_c + R_i)I_i$$

$$(R_d + R_r)I_d = U + R_s I$$

## Bornera Tipo



$$I_i = I + I_d$$



## Máquinas de Corriente Continua

Excitación Compuesta Larga

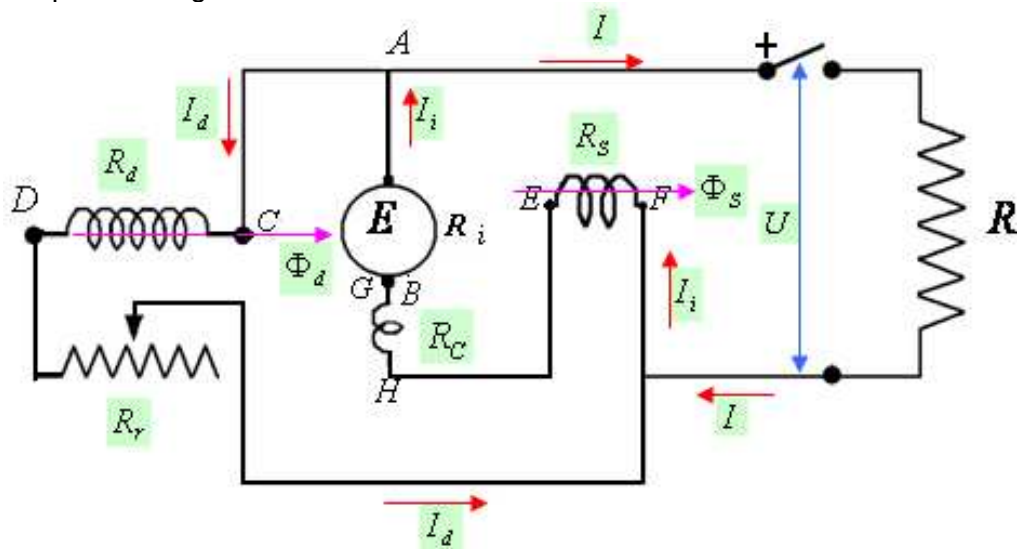


Figura 22 -  $E = U + (R_s + R_c + R_i)I_i$  ;  $I_i = I + I_d$  ;  $U = (R_d + R_r)I_d$