ANALISIS ELECTROMECANICO DE DE LAS MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

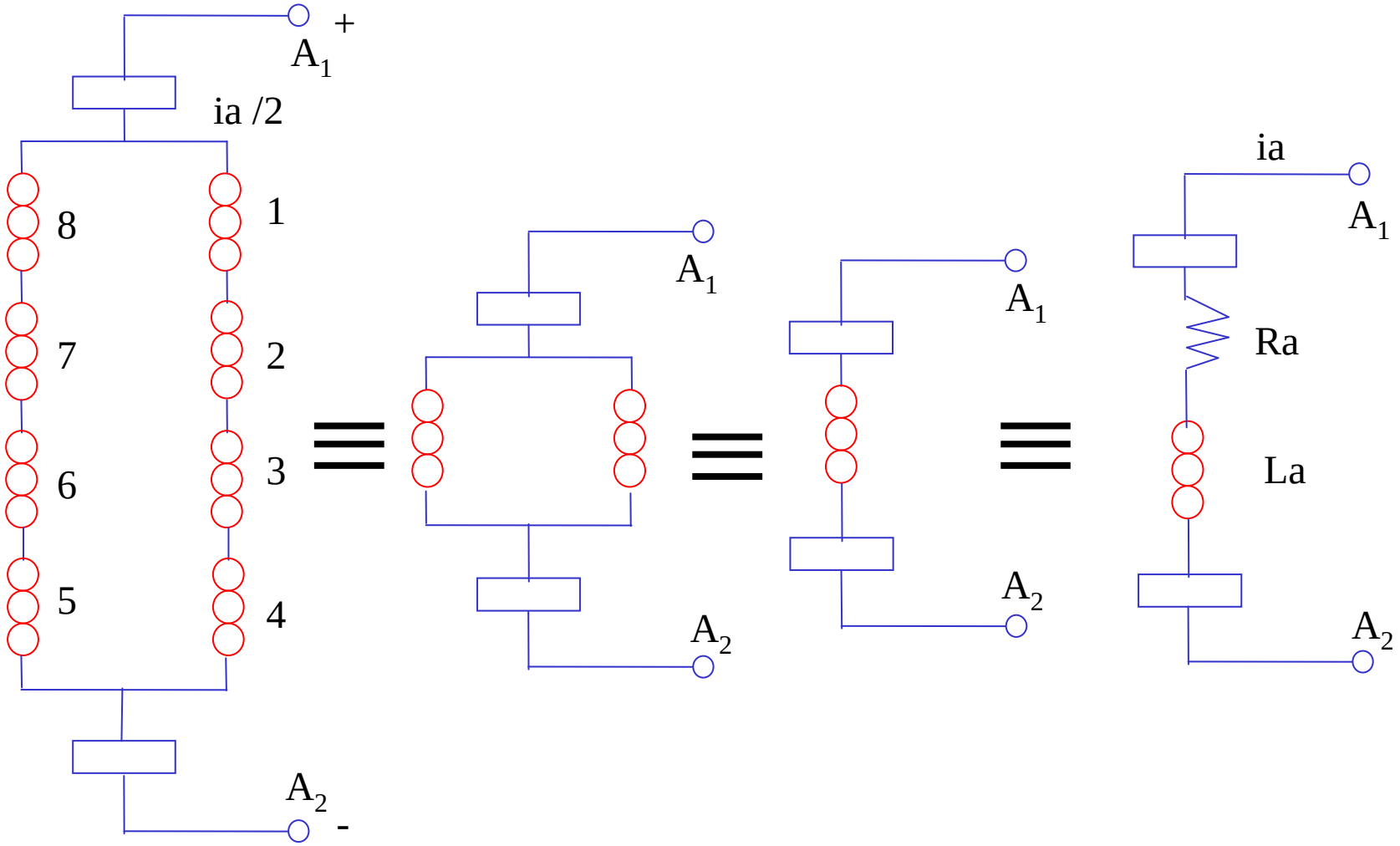
- CONTROL
- PERDIDAS
- EFICIENCIA

EXPOSOTOR :

HUBER MURILLO M

ING. MSC .ESPECIALISTA EN MAQUINAS ELECTRICAS

1. CORRIENTE DE ARMADURA



2. RESISTENCIA DE LOS ARROLLAMIENTOS DEL INDUCIDO

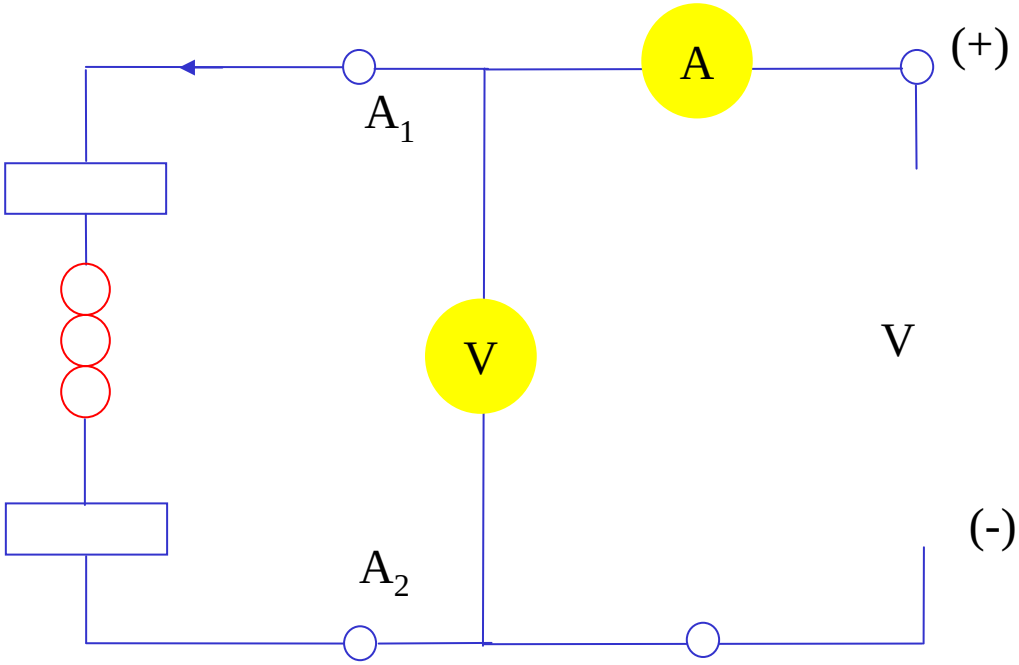
$$Ra = \frac{V}{I}\ \Omega$$

a Tº ambiente = 20ºC

La máquina está en reposo.

Ra (trab) = Ra [1 + α (Ttrabaj – Tamb)]

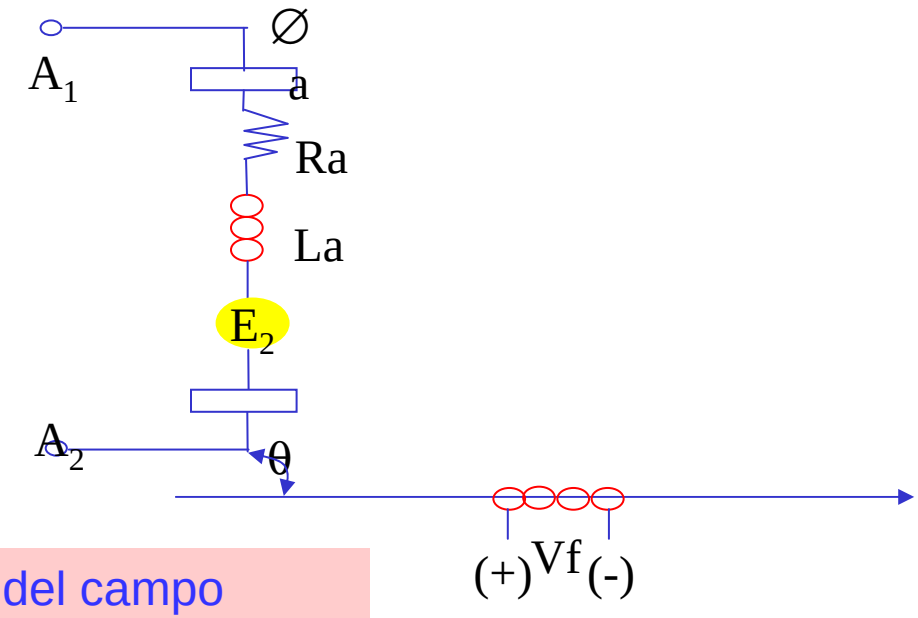
La norma VDE 530 estipula que la T trabajo = 75ºC



NO EXISTE If

3.- FUERZA ELECTROMOTRIZ DEL INDUCIDO
(ó TENSIÓN INDUCIDA INTERNA EA)

$$Ea = Gaf \cdot Wm \cdot if$$



Gaf = Inductancia rotacional (Hr)

Wm = Velocidad mecánica (rad/seg)

If = Corriente de campo.

1. La Ea depende del ángulo de posición del campo y eje magnético del inducido.
2. Cuando $\theta = 90^o$ entonces Ea es máxima puesta que $Ea = Wm \cdot if \cdot Gaf \cdot Sen\ \theta$
3. Para que exista Ea la máquina tiene que estar en movimiento debe existir Wm.
4. Debe existir if

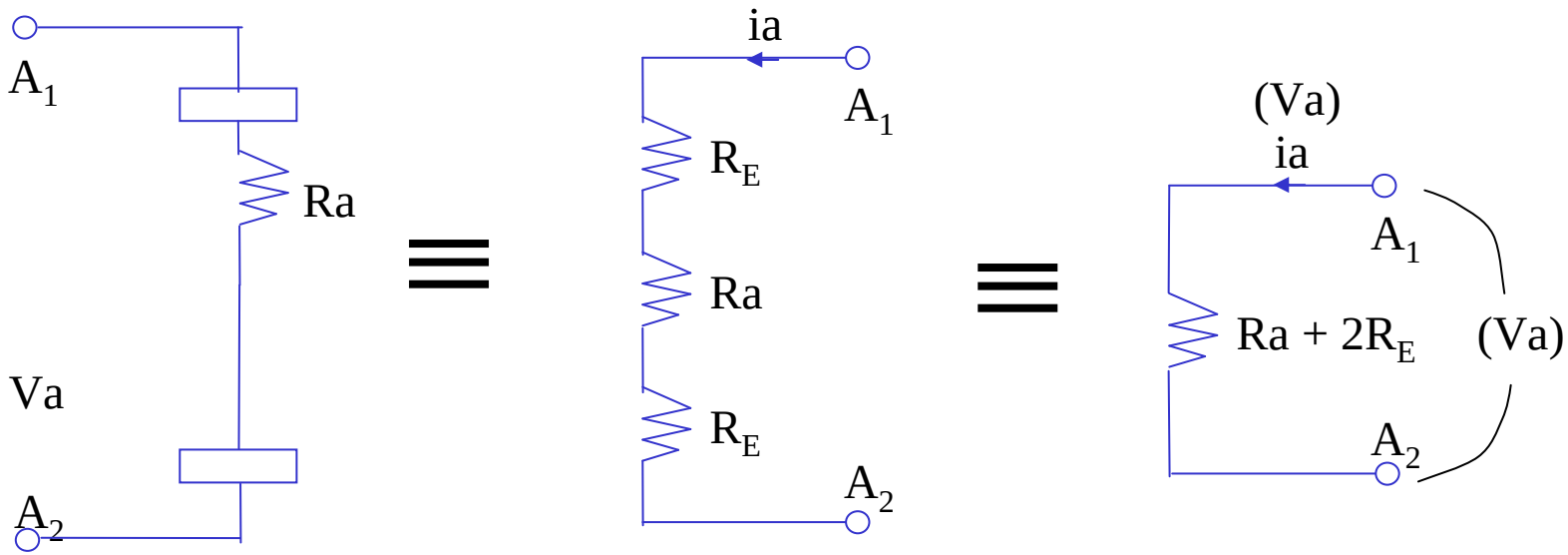
4. CAÍDA DE TENSIÓN EN LA MÁQUINA DE CORRIENTE C.C.

Estando la máquina en reposo y no existiendo if.

$$Va = (Ra + 2R_E)\ ia = \underbrace{Ra \times ia}_{\text{CAIDA EN LOS ARROLLAMIENTOS}} + \underbrace{2R_E ia}_{\text{CAIDA EN LAS ESCOBILLAS}}$$

La caída de tensión en las escobillas producen las pérdidas en las mismas.

Para el cálculo de las pérdidas por contacto entre el colector y las escobillas, las normas VDE indican los valores medios aplicables de $Re \cdot ia = V_E$



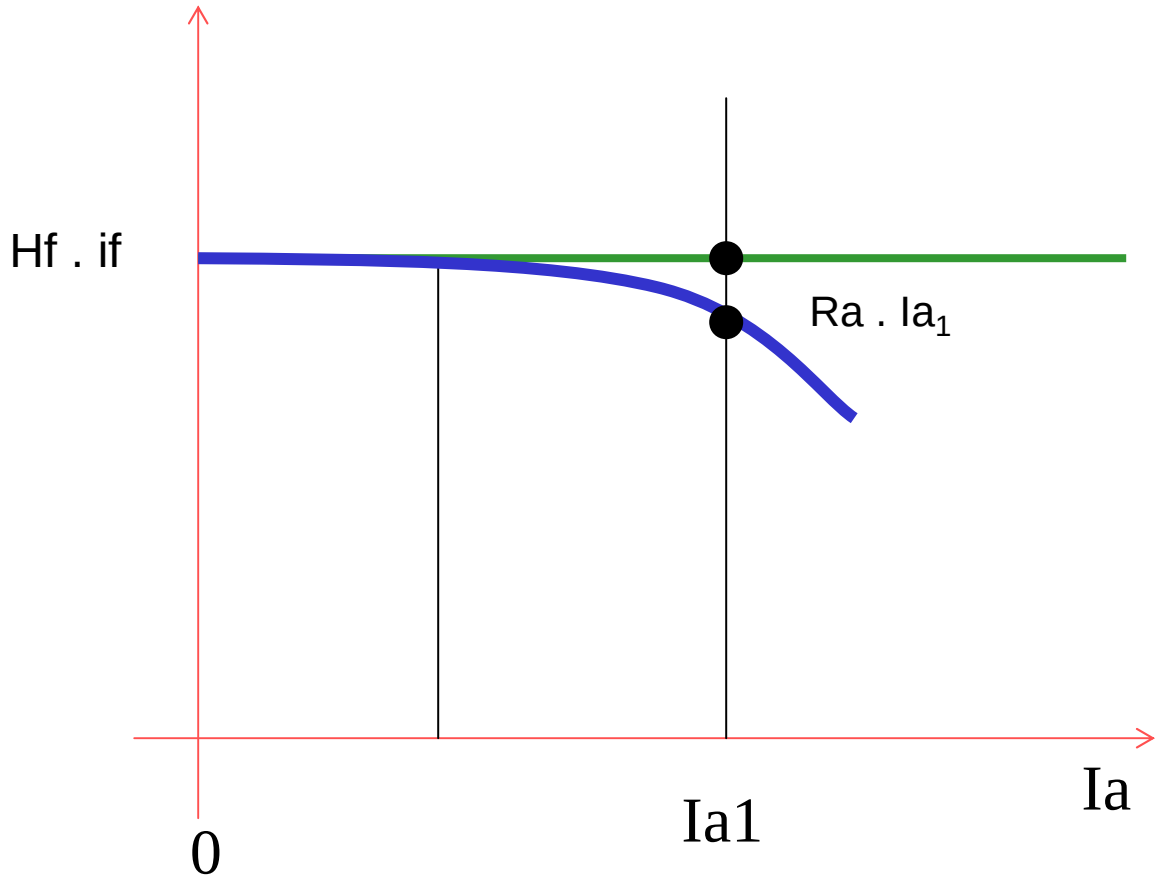
$$Va = Ra \cdot ia + 2VE$$

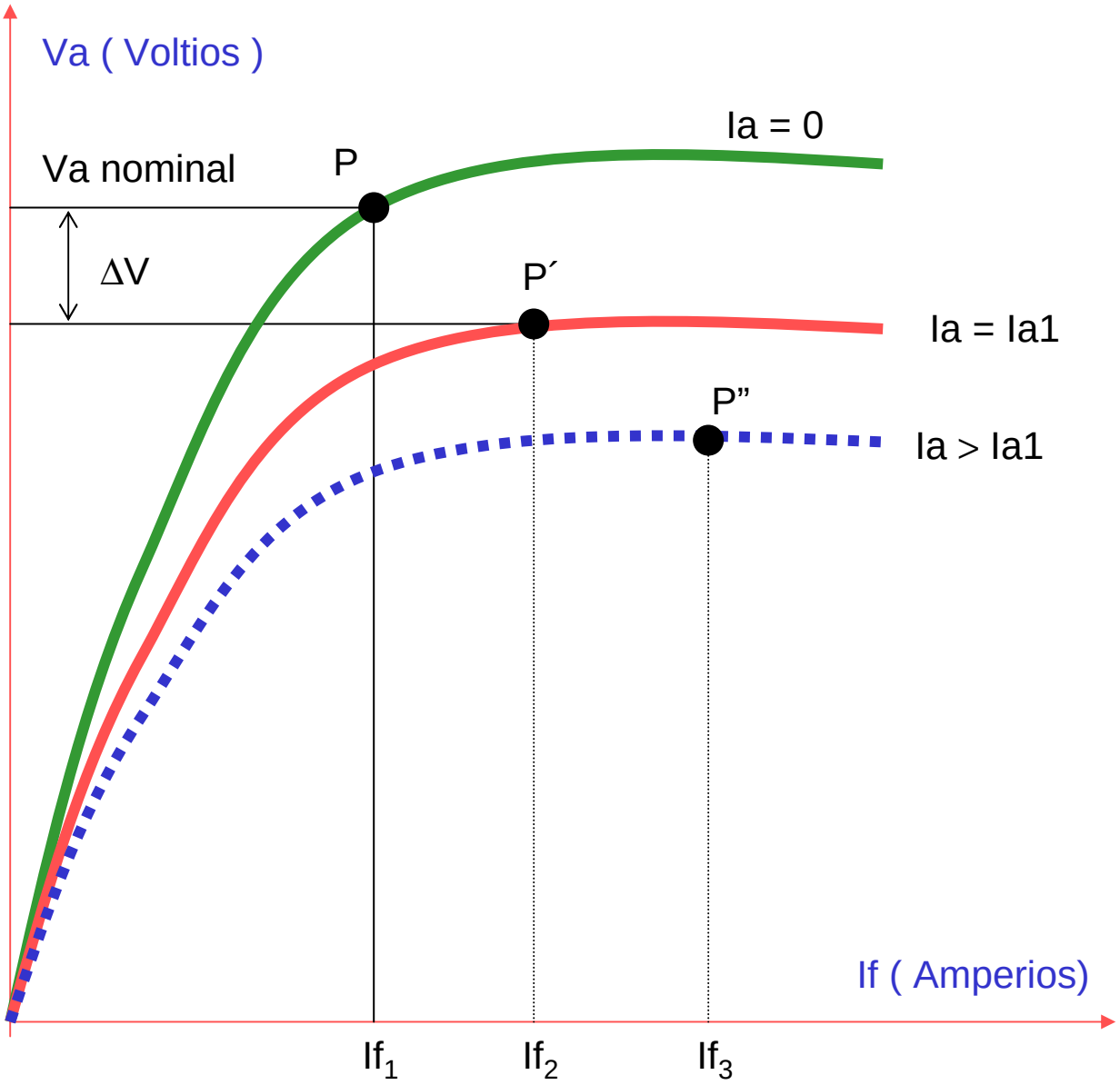
CAIDA DE TENSIÓN "µE" EN LAS ESCOBILLAS SEGÚN LAS NORMAS POR VDE	
TIPO DE ESCOBILLAS	VE
ESCOBILALS DE CARBÓN O ELECTROGRAFÍTICAS	1V
ESCOBILLAS CON CONTENIDO METÁLICO (METALO - GRÁFICAS DE GRAFITO CON BRONCE O COBRE)	0 – 3V

MATERIAL	ρcu (RESISTIVIDAD R – mm²/m)	COEFICIENTE DE TEMPERATURA EN $^{o}C^{-1}$
COBRE	0.017	0.0039
ALUMINIO	0.028	0.0039
FIERRO	0.1	0.005
PLATA	0.016	0.0038
TUSTENO	0.056	0.0045

REACCIÓN DE LA ARMADURA

$$F_{neta} = Ff - Fa = Nf \cdot if - Na \cdot Ia$$




Va (Voltios)
Ia = 0
Va nominal
P
ΔV
P´
Ia = Ia1
P”
Ia > Ia1
If (Amperios)
If1
If2
If3

1. Corriente de arranque de los MCC

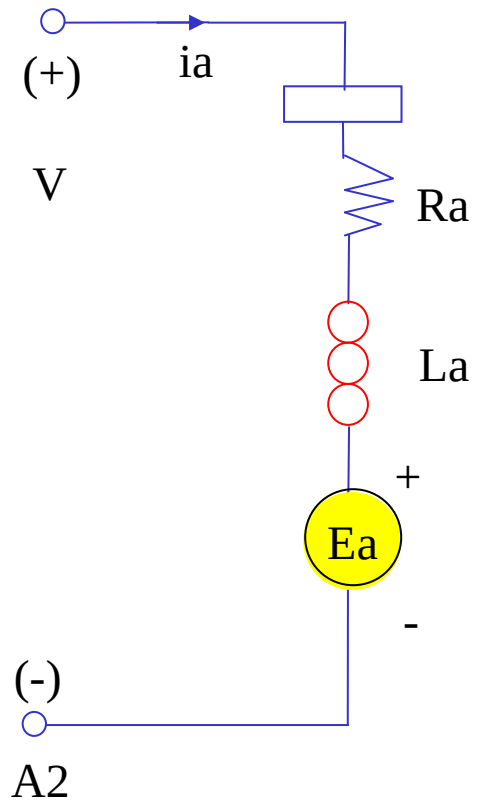
V = Ea + Raia + 2 VE

V = Gaf Wm if + Raia + 2 Ve

$$ia = \frac{V - GafWmif - 2V_E}{Ra}$$

pero en el arranque Wm = 0

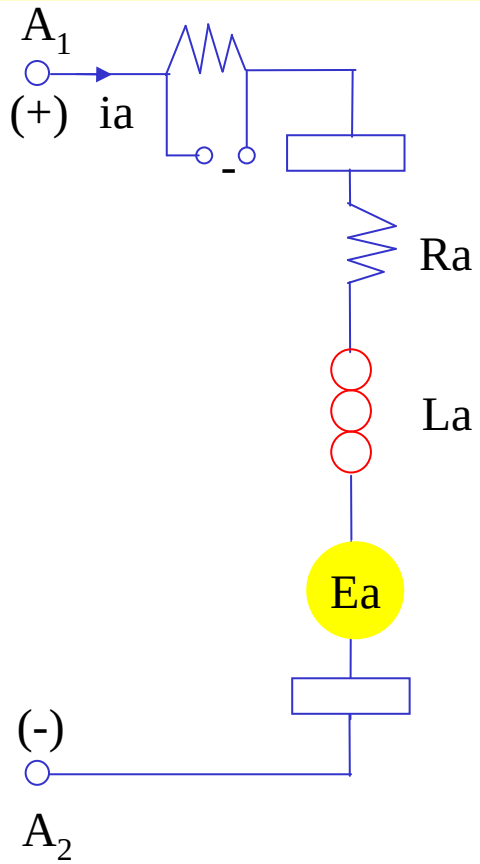
$$ia = \frac{v - 2V_E}{Ra}$$ (muy alta)



2. Banco de resistencias en el circuito de armadura

1. La corriente de arranque debe cumplir con:

Ia = 4 In (como límite)



Consiste en instalar un banco de resistencias (RB) en serie al circuito de armadura que funcionará únicamente en el arranque.

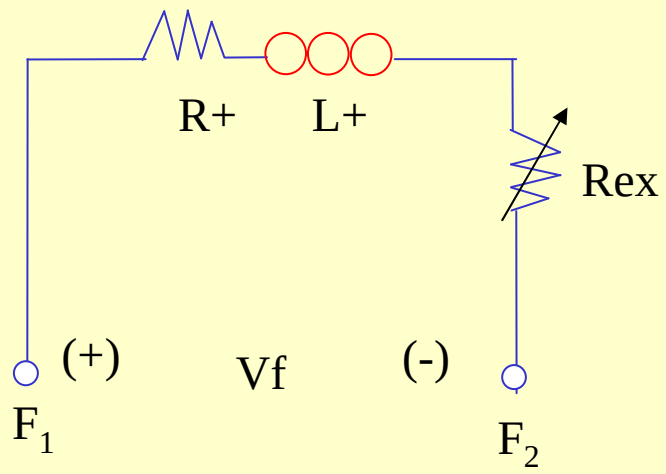
3.- Corriente del circuito de campo (if)

$$V_f = (R_f + L_f\, p)\, i_f$$

En estado estacionario

$$V_f = R_f\, i_f$$

$$R_f = \frac{V_f}{i_f}$$



1.- Variando la corriente del campo (Variaciones pequeñas).

Va = Ea + RaIa + Ve

Gaf Wm if = Va – RaIa - Ve

$$Wm = \frac{Va - RaIa - Ve}{Gaf \quad if}$$

Wm varía inversamente proporcional a la if

Aumentando if la velocidad se reduce y disminuyendo if aumenta la velocidad.

2.- Variando la resistencia de armadura

$$Wm = \frac{Va - V}{Gaf \quad if} - \frac{(Ra + \mathrm{Re} \quad xt)\, Ia}{Gaf \quad if}$$

Wm varia inversamente proporcional a Ra + Rext

$$\downarrow \mathrm{Wm} \uparrow = \frac{\mathrm{Va} - \mathrm{V}}{\mathrm{Gaf} \quad \mathrm{if}} - \frac{\downarrow \mathrm{R}_{\mathrm{T}} \uparrow \mathrm{Ia}}{\mathrm{Gaf} \quad \mathrm{if}}$$

3. Usando Va (se utiliza un conversor CA / DC variable)

$$Wm = \frac{Va \uparrow - RaIa - V}{Gaf \quad if}$$

$$\downarrow Wm \uparrow = \frac{\uparrow Va \downarrow - \Delta V}{Gaf \quad if}$$

Wm varía directamente proporcional a la tensión en bornes

B. VARIACIÓN DEL TORQUE

1. Variando If

Putil = Ea x Ia Watios

= Gaf if Wm Ia

Putil = Te x Wm

= Gaf if Ia Wm $\rightarrow$ Te $\downarrow$ = Gaf if $\uparrow$ Ia $\uparrow$. N. m

2. Variando Wm, Ra + Rext, Va

Va = Ea – (Ra + Rext) Ia – Vesc

(Ra + Rext) Ia = Va – Gaf . if . Wm – Vesc

$$Ia = \frac{Va - Gaf\ if\ Wm - Vesc}{Ra + Rext}$$

$$Te = Gaf\ if \left\{ \frac{Va - Gaf\ \ if\ \ Wm - Vesc}{Ra + Re\,xt} \right\}$$

$$Te = \frac{Gaf\ if\ \ Va - (Gaf\ \ if)^2\, Wm - Gaf\ \ if\ Vesc}{Ra + Re\,xt}$$

Te varía inversamente proporcional a Ra + Rext

Te varía inversamente proporcional a Wm

Te varía directa proporcionalmente a Va

3.- Ecuación. Mecánica

$Ta = Te - T_L = J\,p\,Wm + D\,Wm$

$Te = TL + J\,p\,Wm + D\,Wm$

Teniendo Te Cte:

- Si T_L aumenta Ta $\downarrow$ $\rightarrow$ Wm $\downarrow$
- Si T_L disminuye Ta $\uparrow$ $\rightarrow$ Wm $\uparrow$

$Ta = Te - TL = J \,.\, \alpha + D\,Wm.$ Si Te es Cte:

J y D son parámetros de las máquinas que se hallan diseñados en función de los Kw nominal, Wm y TL.

J y D varían direct. Proporc a Ta $\rightarrow$ Te

PROBLEMAS

1.- Un motor Shunt de 5HP, 120V, 41 Amperios, 1800 RPM, tiene los siguientes parámetros : Ra = 0.54Ω y Rf = 120Ω a $T_{ambiente}$ = 20ºC además se sabe que utiliza escobillas electrografíticas, Ves = 1 V. se le solicita hallar :

a) Irranq y Gaf.
b) Ea (plena carga).
c) I_L nominal
d) if (t) = ?
e) η = ?
f) Te (t) = ?

2.- Un motor Shunt de 10 KW, 250Voltios , 900 RPM, tiene los siguientes parámetros : Ra = 0.25Ω y Rf = 1205 a $T_{ambiente}$ = 20ºC además se sabe que utiliza escobillas electrografíticas, se le solicita hallar :

a) Irranq y Gaf.
b) Ea (plena carga).
c) I_L nominal
d) if (t) = ?
e) η = ?
f) Te (t) = ?

Solución N° 1:

$$Wm = 1800 \times \frac{\pi}{30} = 188.5 \text{ Rad/seg}$$

Ra = 0.54 {1 + 0.0039 (75-20)} = 0.54 x **1.2145** = 0.66 Ω

Rf = 120 x **1.2145** = 145.74Ω

Vf = Rf x if = 120 = 145.74 x if → if = 0.82 A (1)

Va = 120 = Raia + Ea + 2Ve

a) Pero

P = Ea x ia

5 x 746 = Ea x 41

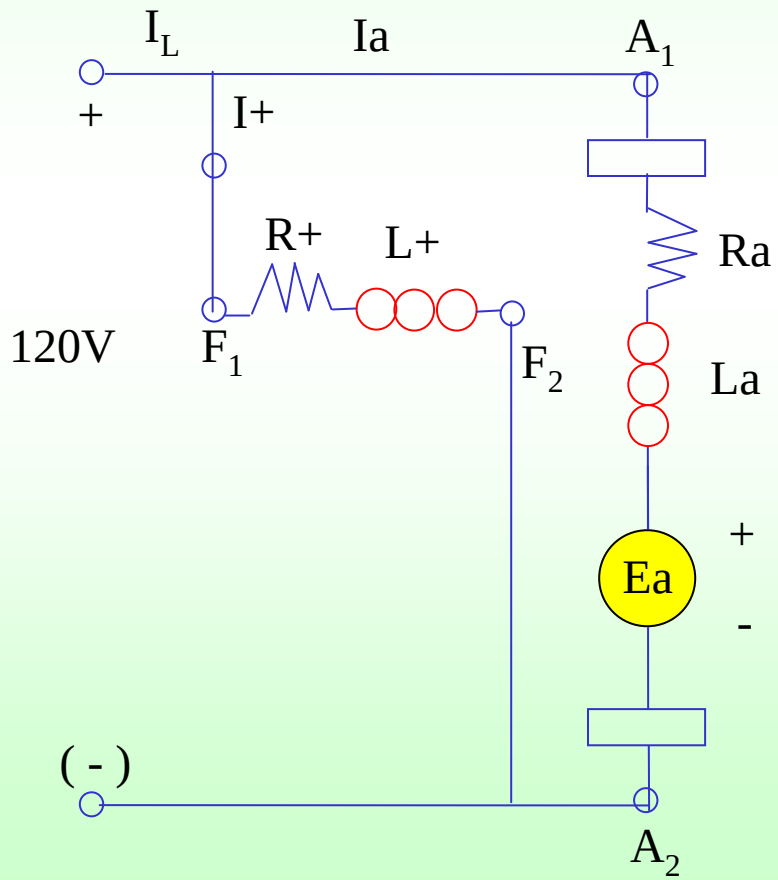
Ea = 91 Volt. = 6af . if . Wm

91 = **6af** x 0.82 x 188.5

Gaf = 0.59 Hy

Siendo Gaf un parámetro en estado estacionario e ia = 41A

Gaf = 24.13 / 41 = 0.59 Hr



a) $120 = 0.66 \times Iarr + Gaf \times if \times Wm + 2$

$120 - 2 = 0.66\ Iarr \rightarrow \qquad Iarrr = 178.8\ A$

$Iarr = K\ In$

$K = Iarr / In = 178.8 / 41 = 4.36$

b) $120 = Ra\ ia + Ea + 2V$

$120 = 0.66 \times 41 + 2 + Ea \rightarrow Ea = 90.94$ Volt. (plena carga)

c) $I_L = Ia + If = 41 + 0.82$

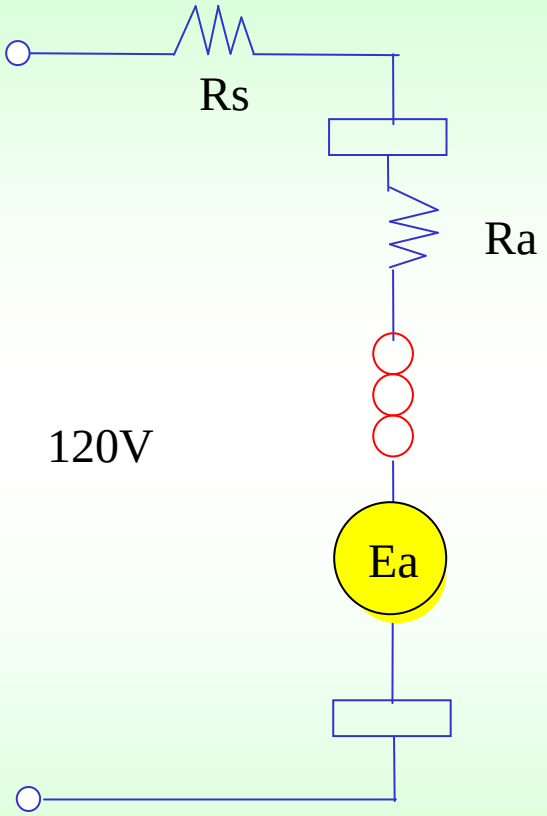
$I_L = 41.82$

$$\eta = \frac{Putil}{Pin} = \frac{5 \times 746}{120 \times 41.82} = 0.7433$$

$Te = Gaf . if . ia = 0.59 \times 0.82 \times 41 = 18.84\ N\text{-}m = 2.02\ kg - m$

Que resistencia debe instalar en serie para que la corriente sea 3In → K = 3

Iarr = 3 x 41 = 123 A , Ea = 0 Voltios.



120V = (Rs + Ra) ia + Ea + 2

$$\frac{118}{123} = Rs + Ra$$

Rs + Ra = 0.9756

Rs = 9756 – 0.66 = 0.3156 Ω

$$Rs / K\ Tamb = \frac{0.3156}{1.2145}$$

Rs = 0.2597 Ω a Tamb. Resistencia comercial.

PERDIDAS EN MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

GENERALIDADES

En el proceso de la transformación de potencia **mecánica en eléctrica**, o viceversa, se desarrolla **calor** en los distintos elementos y/o partes de toda máquina eléctrica. Este calor producido es inconveniente y su producción supone un consumo de energía del sistema.

A ésta potencia se le denomina **perdidas de la máquina**.

Cuando dichas pérdidas exceden los límites permisibles pueden originar un calentamiento excesivo en los distintos órganos, dando lugar a averías.

Este calentamiento limita la capacidad de la máquina, por cuanto en sus diferentes elementos la temperatura no debe rebasar ciertos limites previstos en las normas Internacionales en las cuales debe sujetarse la máquina.

CLASIFICACION DE LAS PERDIDAS

1 PERDIDAS EN VACIO

1.1.- PERDIDAS POR ROCE EN LOS COJINETES, EN EL AIRE Y LAS ESCOBILLAS.

1.2.- PERDIDAS DEBIDO A LA POTENCIA CONSUMIDA POR EL VENTILADOR.

1.3.- PERDIDAS EN EL HIERRO.

2 PERDIDAS POR EXCITACIÓN

2.1.- PERDIDAS DESARROLLADAS POR LA CORRIENTE (EFECTO JOULE) EN LOS CIRCUITOS DE EXCITACIÓN EN DERIVACION E INDEPENDIENTE.

3 PERDIDAS POR LA CORRIENTE DE CARGA

3.1.- PERDIDAS POR EFECTO JOULE EN EL AROLLAMIENTO DEL INDUCIDO, INCLUIDAS LAS PERDIDAS ADICIONALES.

3.2.- PERDIDAS POR EFECTO JOULE EN LOS ARROLLAMIENTOS EN SERIE.

3.3.- PERDIDAS POR CONTACTO EN EL COLECTOR.

CALCULO

DE LAS

PERDIDAS

1.- PERDIDAS EN VACIO

1.1 PERDIDAS POR ROCE EN LOS COJINETES, EN EL AIRE Y LAS ESCOBILLAS

Al girar el inducido de una máquina de c.c., se produce un rozamiento de los muñones del eje con sus cojinetes, así como la superficie del inducido y del colector con el aire que los envuelve.

La fórmula para perdidas por rozamiento en los cojinetes es:

$$P_{RC} = \mu F v_g \ (\ kgm / s\ ) = 9.8\ \mu F v_g \ (\ vatios\ )$$

Donde:

F	Presión entre un gorrón o muñón y su cojinete (kg)
v_g	Velocidad periférica del gorrón (m/s)
μ	Coeficiente de rozamiento
dg y lg	Diámetro y longitud del gorrón (cm)
p = F/dg.lg	Presión especifica del gorrón (kg/cm^2)
t	Temperatura del cojinete
P_{RC}	Potencia consumida por el rozamiento de un cojinete.

Mediciones efectuadas para determinar el coeficiente de rozamiento han dado como resultado que μ no es constante, depende de la presión especifica, de la temperatura y de la velocidad del muñón, pudiéndose calcular con suficiente aproximación por la formula:

$$\mu = 2.65 \frac{\sqrt{v_g}}{pt}$$

Asignando a t un valor constante de 50ºC, obtenemos con esta expresión de μ y con F = p.dg.lg las perdidas por rozamiento de un cojinete de resbalamiento para máquinas pequeñas y medianas:

$$\mathbf{P'_{RC} = 0.52\ d_g\ l_g \sqrt{v_g^3}}$$

De esta fórmula se deduce que dichas pérdidas solo dependen de las dimensiones del cojinete y de la velocidad del muñón y no de la presión en el cojinete ni de la tensión de la correa de transmisión de la máquina en carga.

La determinación de d_g, l_g y v_g se hace por las fórmulas:

$d_g = (2{,}6 \ldots 3)(Pm/n)^{1/4}$ (cm)

$l_g = (3 \ldots\ldots 2)d_g$ (cm)

$v_g = \pi \cdot d_g \; n / 6000$ (m/s)

donde:

Pm Potencia mecánica (vatios)

n Numero de vueltas por minuto

Para máquinas grandes y lentas la formula mas adecuada es:

$$\mathbf{P'_{RC} \approx 0.21\, d_g\, l_g \sqrt{p\, v_g^3}} \quad \text{(vatios)}$$

Para grandes máquinas de elevada velocidad, la formula es:

$$\mathbf{P'_{RC} \approx 0.21\, l_g \sqrt{d_g\, p\, v_g^3}} \quad \text{(vatios)}$$

Para máquinas eléctricas con cojinetes de resbalamiento la formula aproximada es:

$$P'_{RC} \approx 45\, d_g^3 \sqrt{n^3}\ .\ 10^{-6} \qquad \text{(vatios)}$$

Y para cojinetes de rodadura (de bolas y rodillos), la formula es:

$$P'_{RC} \approx 150\, d_g^3\, n\ .\ 10^{-6} \qquad \text{(vatios)}$$

De las cuales se desprende que las pérdidas por rozamiento en los cojinetes de rodadura son bastante inferiores a la de los cojinetes de resbalamiento.

El ahorro de perdidas $\propto$, en tanto por ciento de la potencia de rozamiento, que resulta para cojinetes de rodadura es:

$$\propto = (1 - 3/\sqrt{n})\ .\ 100\%$$

Las casas que suministran sus máquinas provistas de cojinetes de resbalamiento desisten del ahorro de potencia perdida por rozamiento en los cojinetes, y, en cambio hacen resaltar las principales ventajas de los cojinetes de resbalamiento, como son: su duración mucho mas larga, su resistencia mecánica contra esfuerzos bruscos y su funcionamiento silencioso.

Las perdidas por rozamiento en las escobillas serán:

$$\mathbf{P_{RE} = 9.81\ \mu_E\ p\ S_E\ v_{col}} \qquad \text{(vatios)}$$

donde:

μ_E Coeficiente de rozamiento de las escobillas sobre el colector, el cual para las de carbón tiene valores entre 0.2 y 0.33

p Presión especifica de las escobillas, igual a 0.1 ... 0.15 kg/cm^2

S_E Superficie de frotamiento de todas las escobillas, en cm^2

v_{col} Velocidad periférica del colector en m/s, que se calcula por la formula:

$$v_{col} = \pi D_{col}\ n / 6000 \qquad \text{(m/s)}$$

donde D_{col} es el diámetro del colector, en cm

1.2.- PERDIDAS DEBIDAS A LA POTENCIA CONSUMIDA POR EL VENTILADOR

La cantidad de aire refrigerante suministrada a una máquina debe estar en proporción con:

. Las perdidas que en la máquina se producen.
. Velocidad de la máquina (2, 4, 6, .. N polos).

Si se le suministre demasiado aire refrigerante, la potencia consumida por la ventilación será excesiva, lo cual reduce su rendimiento.

Si la cantidad de aire impulsada por el ventilador es escasa, la máquina se calentara demasiado y pueden producirse averías.

$$\mathbf{P_v \approx 1.1\ V\ v_v^2} \quad \text{(vatios)}$$

donde: P_v Potencia consumida por la ventilación.
V Volumen de aire refrigerante.
v_v Velocidad periférica del ventilador (m/s).

Además: $v_v = \pi\ D_v\ n / 6000$ (m/s)

donde D_v es el diámetro exterior del ventilador, en cm.

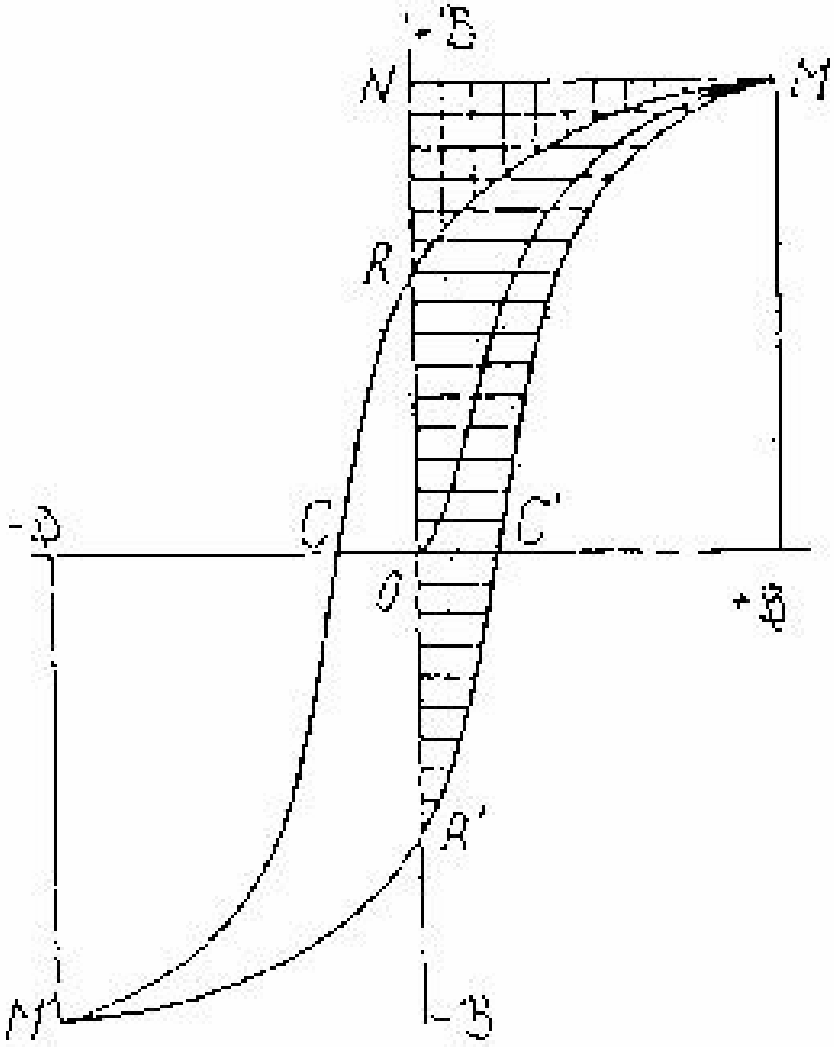
1.3 PERDIDAS EN EL HIERRO

En todas las máquinas eléctricas de inducción se utilizan, en su construcción, materiales ferromagnéticos los mismos que son afectados por las corrientes alternas y continua empleadas.

Toda variación de la inducción en los elementos de las máquinas eléctricas supone un consumo de energía que deberá suministrarse a la máquina, por cuanto, al producirse los cambios magnéticos, los elementos de la máquina afectados se calientan, debido en parte a la histéresis y en otra parte a las corrientes parásitas. Como pérdidas en el hierro entenderemos la cantidad de potencia consumida en el mismo, debido a los efectos magnéticos periódicos.

1.3.1 PERDIDAS POR HISTERESIS

Histéresis significa en griego remanencia, y de acuerdo con tal significado, caracteriza la tendencia del hierro, cuando se imana, a mantener su magnetismo, de modo que aunque cese la causa que lo producía, conservara el hierro parte de su estado magnético. Esta característica del hierro y sus consecuencias se pueden estudiar fácilmente con la ayuda de la curva de magnetismo completada hasta constituir el llamado ciclo de histéresis.



CICLO HISTERISIS

La pérdida de potencia por histéresis equivale al trabajo consumido por los ciclos magnéticos en un segundo. Siendo P_H la pérdida de potencia de una pieza de hierro por histéresis, tendremos:

$$\mathbf{w_H = \varepsilon\,(f / 100)\,(B / 10000)^2} \qquad \text{(vatios/kg)}$$

$$P_H = w_H \,.\, G \qquad \text{(vatios)}$$

donde:

ε Constante en el hierro

w_H Pérdida de potencia para 1 kg de hierro

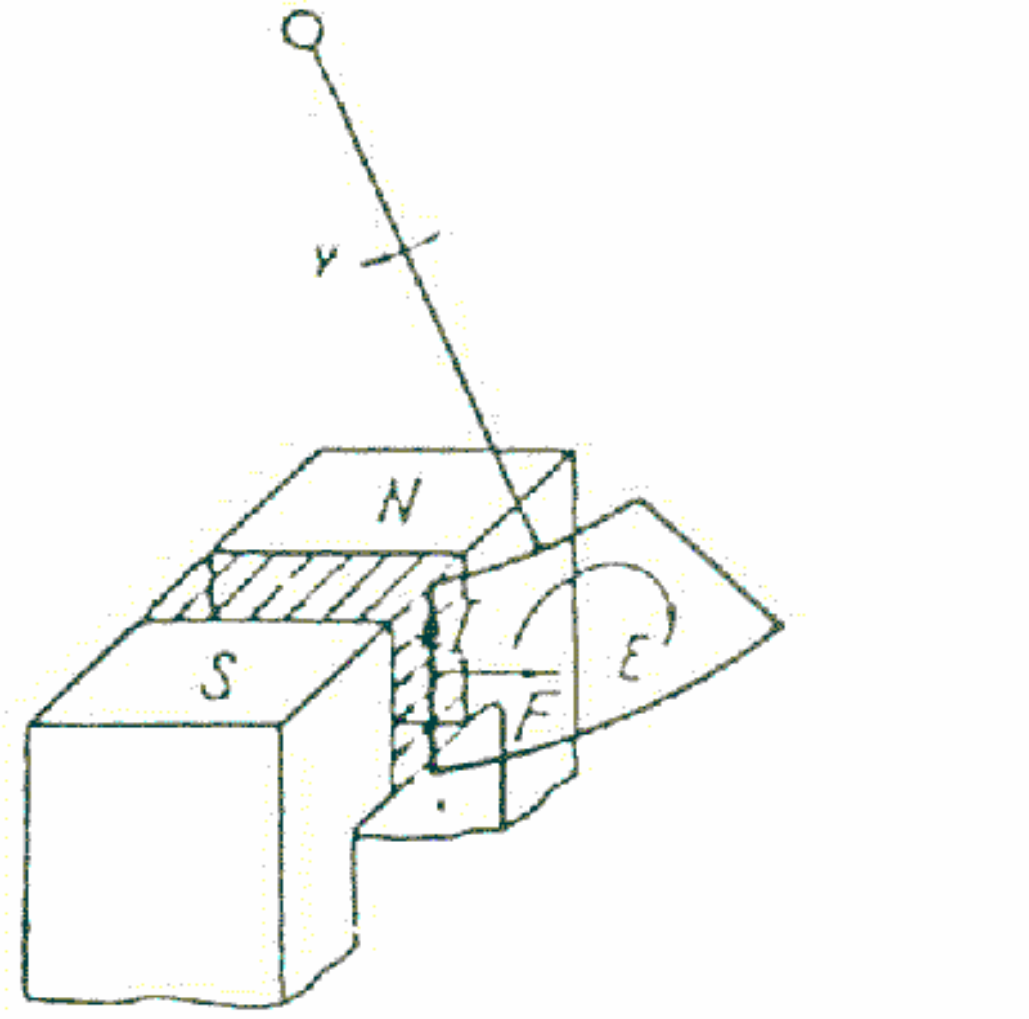
f Frecuencia de las variaciones magnéticas o numero de ciclos que tienen lugar en 1 seg.

G Peso de la pieza de hierro en kg.

B Densidad de flujo magnético en Tesla.

Las pérdidas por histéresis producidas por la imanación giratoria no se conocen exactamente. Para ella se toman valores empíricos del 40 al 80% superiores a los de las pérdidas originadas por los efectos magnéticos alternos.

1.3.2 PERDIDAS POR CORRIENTES PARASITAS



Producción de corrientes parásitas

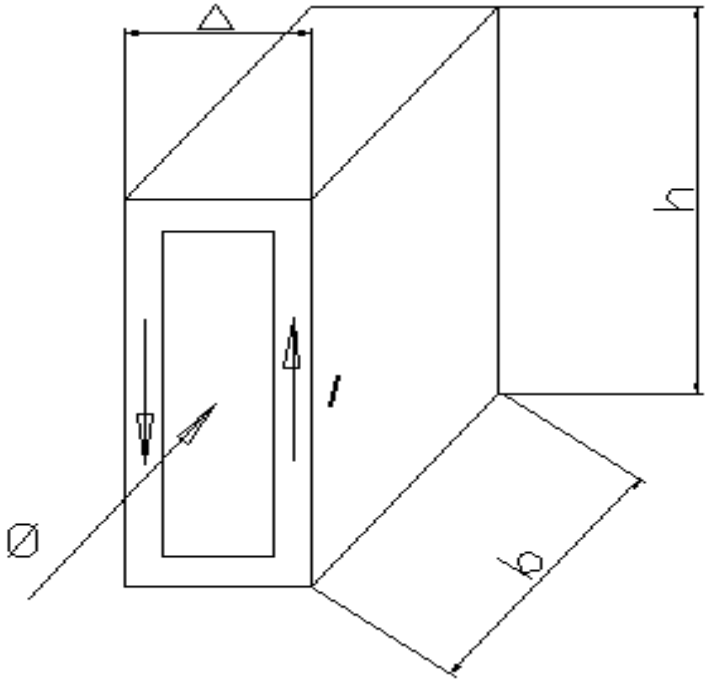
Haciendo oscilar el lazo conductor, entre los polos de un imán, se engendrará en dicho lazo una f.e.m., y por tanto una corriente en el mismo sentido. El campo magnético ejercerá sobre el conductor por el que pasa la corriente una fuerza F, tendiendo a impedir que dicho lazo se mueva. Como consecuencia, éste, por moverse dentro del campo, perderá paulatinamente su energía cinética, en lugar de la cual se manifestará otra, equivalente, en forma de calor desarrollado por la corriente.

Sustituyendo el lazo conductor por una placa maciza, la corriente aumentará, puesto que la resistencia de ésta es menor que la de aquél. Las corrientes que se inducen en la masa de un cuerpo metálico al pasar por un campo magnético, o al sufrir su acción si es variable, se llaman corrientes parásitas, y se cierran por la masa del cuerpo a modo de remolinos. Las corrientes parásitas dificultan el movimiento de los cuerpos metálicos dentro de un campo magnético. Este frenado es inversamente proporcional a la resistencia del trayecto de dichas corrientes parásitas y directamente a la la velocidad con que se mueve la pieza metálica; cesa al quedar ésta en reposo.

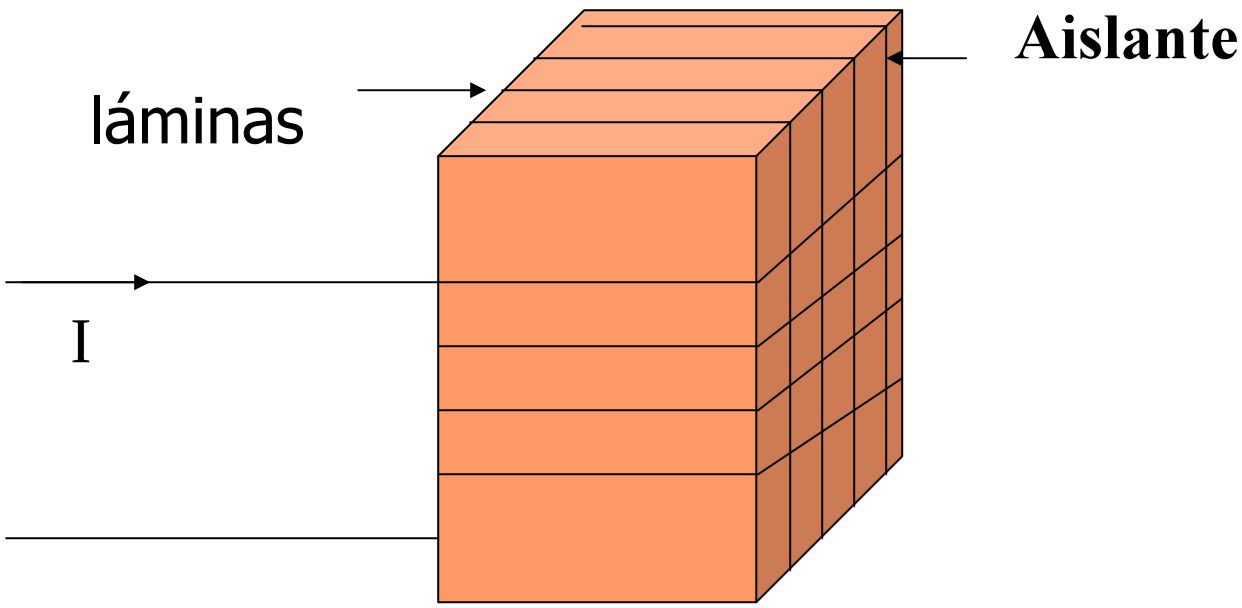
Naturalmente, las corrientes parásitas se producen también cuando el cuerpo metálico está en reposo y el campo magnético se mueve, o cuando en piezas metálicas en reposo varía el flujo de fuerza que las atraviesa.

Revisten especial importancia las corrientes parásitas que se producen en las partes metálicas de cualquier máquina eléctrica sometidas a variaciones periódicas de flujo magnético. En estas partes se produce sin cesar un calentamiento cuyo consumo de potencia constituye las llamadas pérdidas por corrientes parásitas.

Una plancha rectangular de aristas Δ, h y b está sometida a la acción del flujo alterno ∅.



Cuando un nucleo ferromagnetico va estar expuestos a flujos alternos se acostumbra a construirlos con LAMINAS de varias capas delgadas, entre capa y capa se coloca una resina o barniz aislante para que las trayectorias de las corrientes queden limitadas y asi poder reducir al minimo estas perdidas



Núcleo ferromagnetico

Según la ley de Joule, la pérdida de potencia debida a las corrientes parásitas será:

$$P_P = I^2 R = \frac{E^2}{R} = \left(\frac{Bh\Delta.4f}{10^8}\right)^2 . \frac{10^4 b\Delta}{12h\rho}(vatios)$$

En donde βhΔ = V es el volumen de la plancha en centímetros cúbicos y, por tanto:

$$P_P = \frac{4}{3}\frac{V}{\rho}\Delta^2\left(\frac{f}{100}\right)^2\left(\frac{B}{10000}\right)^2(vatios)$$

Donde:

Δ Grosor de la plancha de hierro (cm.)
ρ Resistencia específica de la plancha de hierro.
f Frecuencia de flujo magnético en ciclos por segundo.

La fórmula es exacta solamente para el caso que, el flujo de la fuerza aumente o disminuya uniformemente y la inducción sea constante en toda la sección de la plancha. Estas condiciones previas no se realizan en la práctica y, en consecuencia, las pérdidas por corrientes parásitas son superiores a las que indica la fórmula mencionada.

Por tal razón no emplearemos dicha fórmula, sino simplificada a base de la siguiente consideración:

Ordenando tantas planchas de un determinado grueso Δ y de una determinada resistencia específica ρ, en forma tal que queden aisladas entre sí y que el peso del paquete de planchas sea 1 kg, entonces la expresión $4\,V\,\Delta^2 / 3\,\rho$ podrá resumirse en un factor empírico σ, y la cifra de pérdidas w_P que expresa la cuantía de las mismas por kilogramo de hierro originadas por las corrientes parásitas será:

$$w_P = \sigma \left[\frac{f}{100} \right]^2 . \left(\frac{B}{10000} \right)^2 (vatios \ / \ kg.)$$

El factor σ se determina experimentalmente partiendo de las pérdidas totales medidas en el hierro de que se trate.

Las pérdidas por corrientes parásitas que se producen en un paquete de planchas de G kilogramos será:

$$\mathbf{P_P = w_P\, G} \qquad \text{(vatios)}$$

La cifra de pérdidas w, que indica las pérdidas totales por kilogramo de hierro, se compone de las cifras de pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, es decir:

$$\mathbf{w = w_H + w_P} \qquad \text{(vatios/kg)}$$

2.1 PERDIDAS DESARROLLADAS POR LA CORRIENTE (EFECTO JOULE) EN LOS CIRCUITOS DE EXCITACIÓN EN DERIVACION E INDEPENDIENTE

La energía total cedida al circuito en derivación de una máquina auto excitada o al circuito de excitación de una máquina excitada independientemente, se transforma en calor en el arrollamiento correspondiente y en la parte de la resistencia reguladora intercalada en el circuito.

La pérdida para un circuito en derivación será:

$$P_{cd} = U_b\, I_d \qquad \text{(vatios)}$$

La perdida para un circuito de excitación independiente será:

$$P_{c\,ex} = U_b\, I_{ex} \qquad \text{(vatios)}$$

Al calentamiento de los devanados de excitación contribuye solo aquella parte de la potencia perdida mencionada que se transforma en calor en el mismo devanado.

La perdida en el arrollamiento en derivación será:

$$P_{cd} = I_d^2 R_d^{cal} \qquad \text{(vatios)}$$

La perdida en el arrollamiento de excitación independiente será:

$$P_{ex} = I_{ex}^2 R_{ex}^{cal} \qquad \text{(vatios)}$$

La resistencia del arrollamiento en derivación, en caliente, valdrá:

$$R_d^{cal} = \frac{l_d N_d . 2 p \rho}{s_d} (ohmios)$$

donde:

l_d Longitud media de una espira del arrollamiento en derivación (m)

s_d Sección del conductor

N_d Numero de espiras en un polo

El valor de ρ correspondiente a una temperatura de trabajo de 75ºC, viene a ser:

$$\rho = 0.0215 \frac{\Omega \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$$

3.1.- PERDIDAS POR EFECTO JOULE EN EL ARROLLAMIENTO DEL INDUCIDO Y PERDIDAS ADICIONALES

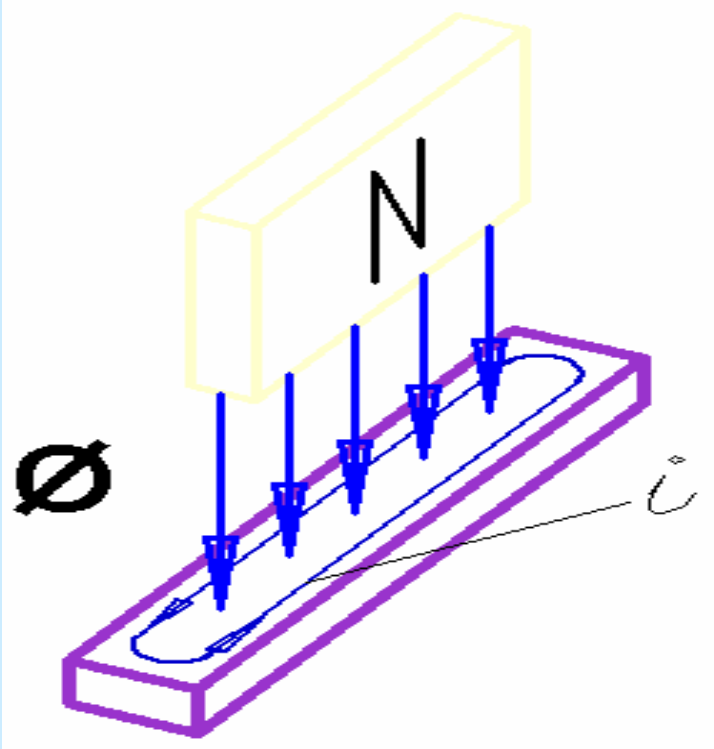
Las perdidas por efecto joule en dicho arrollamiento serán:

$$P_{ai} = I_i^{\,2} R_{ai}^{\,cal} (vatios)$$

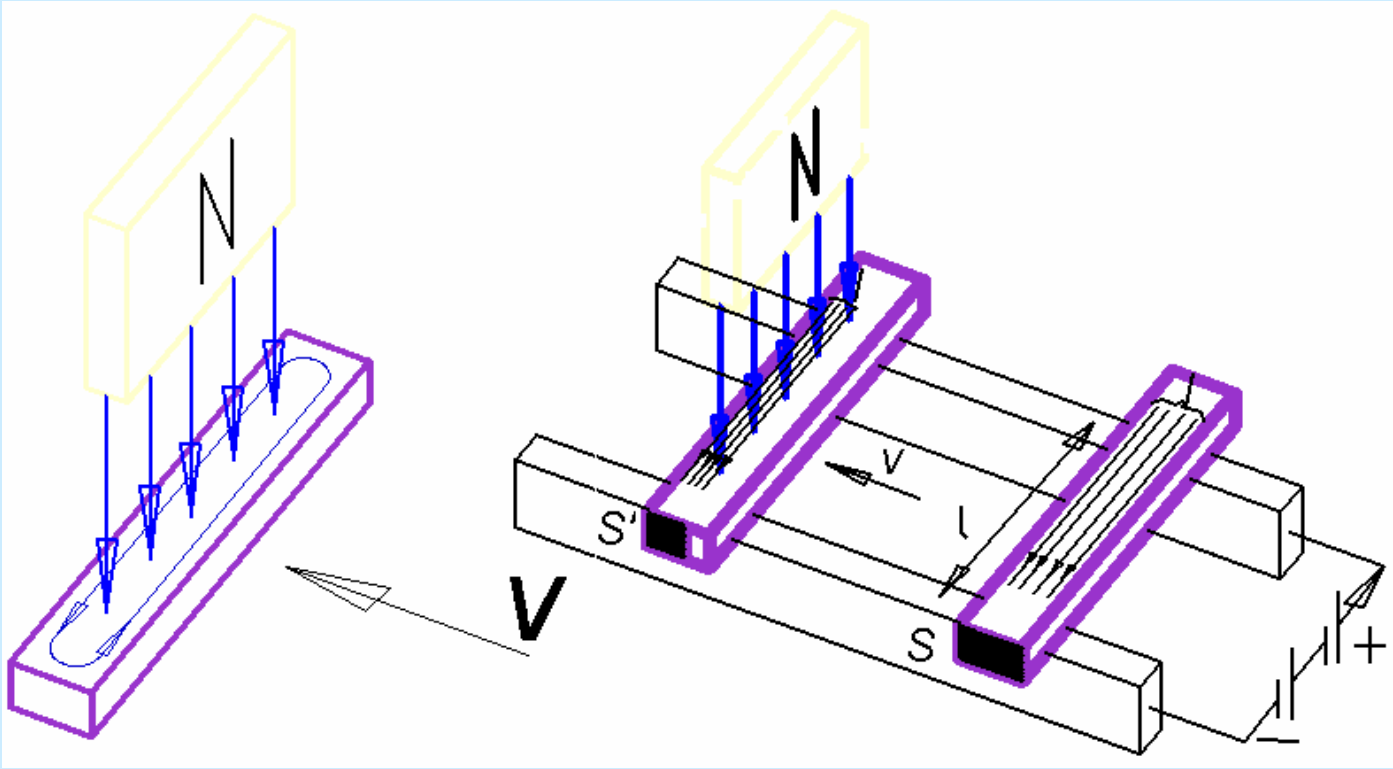
En realidad las perdidas por efecto joule en el arrollamiento del inducido de un maquina de C.C. que trabaje con carga, son superiores a las que se calculan en la formula anterior.

La causa estriba en que se producen corrientes parásitas en los conductores del inducido, cuyo calculo no procede efectuarlo en la forma indicada en el inciso 1.3.

Corrientes parásitas en una barra de cobre al nacer un campo magnético.



Generalizando, diremos que toda variación de flujo de fuerza que penetra en un conductor origina en el corrientes parásitas que lo originan



Desplazamiento de la corriente a causa de las corrientes parásitas.

La corriente I produce en la barra perdidas por efecto Joule que tendrán el valor I^2R, en donde $R = L\,\rho / s$, es la resistencia de la barra.

Designaremos las perdidas por efecto Joule en la barra de cobre debida a las corrientes parásitas por P_{PCu}, y estableciendo la ecuación:

$$\frac{I^2 R + P_{PCu}}{I^2 R} = \frac{R_e}{R} = K'$$

Donde R_e es la resistencia efectiva.

Las pérdidas totales por efecto Joule en la barra, teniendo en cuenta las corrientes parásitas, son:

$$I^2 R + P_{PCu} = I^2 R_e = I^2 R K'$$

El factor k´ depende de la distribución de la inducción de los campos magnéticos que penetran en el conductor durante su desplazamiento, de la velocidad del conductor, y de las dimensiones de la sección del mismo.

Si alrededor de la barra de cobre se encuentran piezas de hierro en donde penetre el campo magnético producido por la corriente de aquella, y esta corriente es de intensidad variable, también en dichas piezas se producirán corrientes parásitas, y perdidas que designaremos por P_{PFe}

Al conjunto de perdidas designadas como P_{PFe} y P_{PCu} se le designara como perdidas adicionales P_{ad} imaginando que son producidas por un aumento de la resistencia R de los conductores del inducido. Este mayor valor resultante para la resistencia de una barra lo designaremos por resistencia activa R_{ac}.

Por tanto, tendremos:

$$\frac{I^2R + P_{ad}}{I^2R} = \frac{R_{ac}}{R} = K$$

y las perdidas por efecto Joule que se producen en la barra de cobre incluidas las perdidas P_{PFe} y P_{PCu} son:

$$I^2R + P_{ad} = I^2R_{ac} = I^2RK$$

Donde el orden de las resistencias será: $R_{ac} > R_e > R$

3.2 PERDIDAS POR EFECTO JOULE EN LOS ARROLLAMIENTOS EN SERIE

Los devanados conectados en serie con la armadura son :

El circuito de excitación en serie.
El circuito de conmutación ó interpolos.
El circuito de compensación.

Por todos éstos circuitos circula la corriente del inducido.

En estos, la corriente se distribuye uniformemente por la sección del conductor, ya que en ellos no se induce corrientes parásitas ni debidas a autoinducción, ni tampoco a campos extraños. Por tanto, sus perdidas por calentamiento son muy fáciles de calcular según la ley de joule I^2R. Si los conductores que se requieren hubieran de resultar excesivamente gruesos, se acude a subdividir la sección de los mismos formando varias ramas en paralelo.

Siendo, para el arrollamiento serie y para el de los polos de conmutación, respectivamente:

l_s o l_c	Longitud media de una espira
s_s o s_c	Sección del conductor.
a_s o a_c	Numero de ramas en paralelo

Entonces la resistencia del arrollamiento en serie valdrá:

$$R_s^{cal} = \frac{l_s N_s 2p\rho}{a_s^2 s_s}$$

y la resistencia del arrollamiento de los polos de conmutación, siendo en numero de estos 2p,

$$R_C^{cal} = \frac{l_C N_C 2p\rho}{a_C^2 s_C}$$

y cuando sólo existen p polos de conmutación,

$$R_C^{cal} = \frac{l_C N_C p\rho}{a_C^2 s_C}$$

se tomará para ρ el valor en caliente, a 75ªC, de 0.0215 $\Omega mm^2/m$

Por tanto, las pérdidas por efecto joule en el arrollamiento en serie valdrán:

$$P_s = I_i^2 R_s^{cal}$$

y las pérdidas por efecto joule en el arrollamiento de los polos de conmutación valdrán:

$$P_C = I_i^2 R_C^{cal}$$

Para conseguir que las máquinas de C.C. trabajen sin que se produzcan chispas en el colector, es preciso en algunos casos montar en derivación con respecto al arrollamiento de los polos de conmutación una resistencia, que conviene se halle bobinada también alrededor de un núcleo de hierro para hacerla inductiva, como los polos mismos de conmutación, a fin de que el ritmo de crecimiento y descenso de la corriente, al variar la carga, sea idéntico en ambas vías.

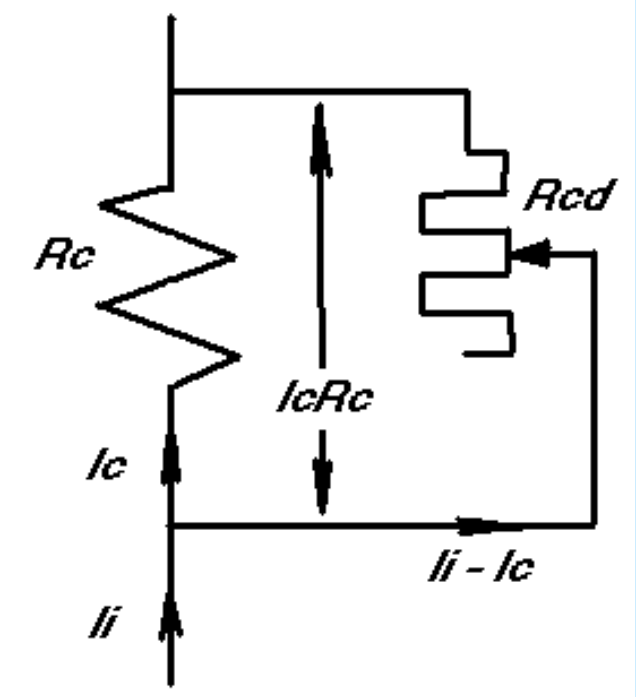
Luego la caída de tensión en el arrollamiento de conmutación valdrá $I_C R_C^{cal}$ y las perdidas totales en el mismo, incluidas las de la rama en derivación, serán:

$$P_{Ct} = I_C^{\,2} R_C^{\,cal} + I_C R_C^{\,cal} (I_i - I_C)$$

$$P_{Ct} = I_i I_C R_C^{\,cal} \ (vatios)$$

La resistencia de la rama en derivación puede calcularse por:

$$R_{Cd} = \frac{I_C R_C}{I_i - I_C} (ohmios)$$



Por regla general, el valor de esta resistencia no se determinara por calculo, sino por ensayos efectuados con la conmutación mas favorable de la corriente de trabajando la máquina con carga.

3.3 PERDIDAS POR CONTACTO EN EL COLECTOR

Las perdidas por contacto en el colector se expresan mediante el producto de la corriente del inducido por la caída de tensión 2 u_E bajo todas las escobillas positivas y negativas; ya dijimos que $u_E \approx 1V$ para escobillas de carbón y electrografíticas, y $u_E \approx 0.3V$ para escobillas de contenido metálico.

Las perdidas serán:

$$P_E = Ia \cdot 2\, u_E$$

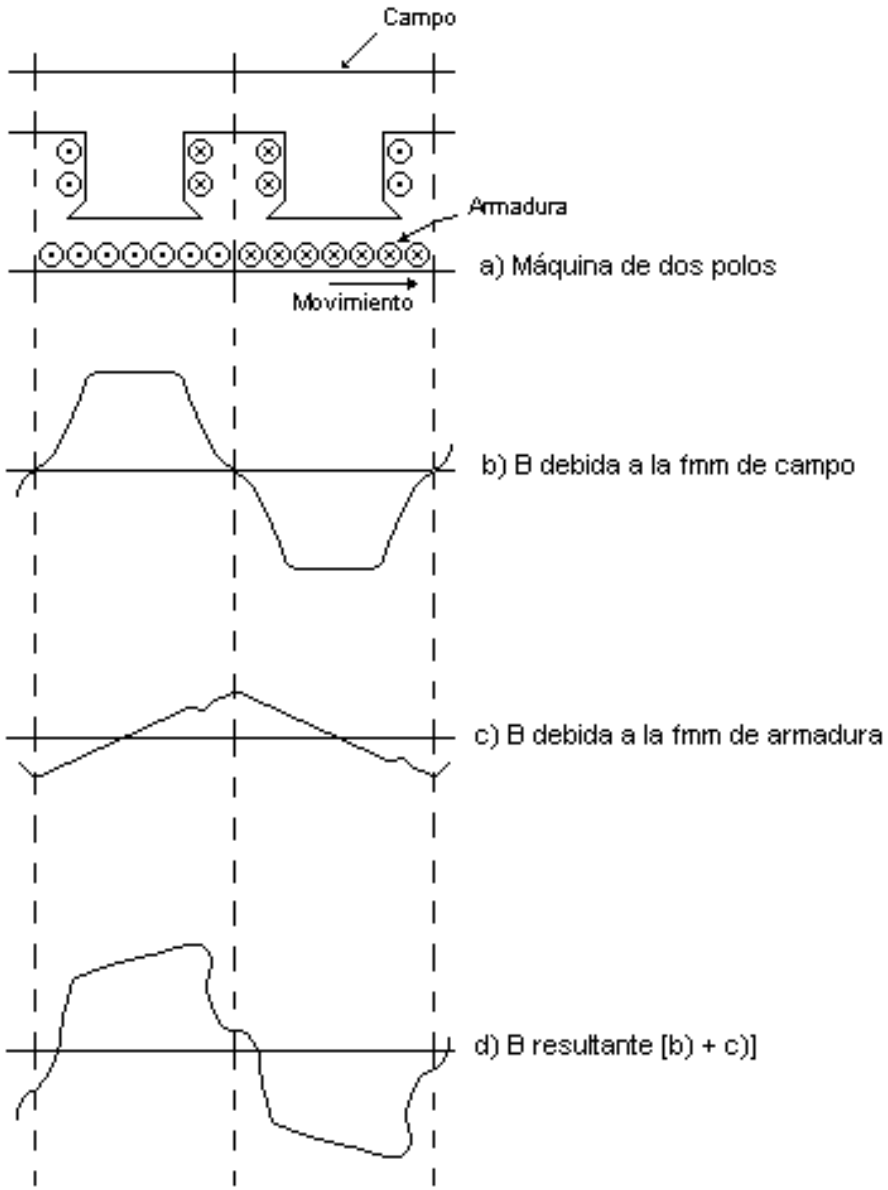
(vatios)

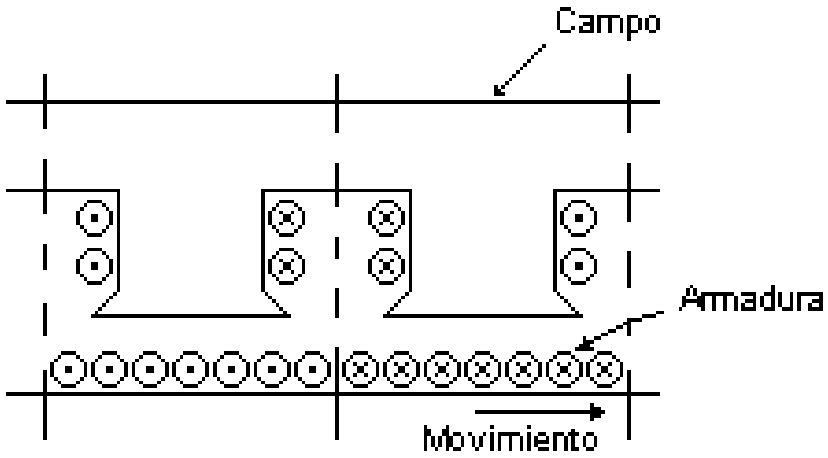
TAREA DOMICILIARIA

A PARTIR DE LAS PERDIDAS CALCULADAS DEDUSCA LA EXPRESION GENERAL PARA EL CALCULO DE LA EFICIENCIA.

REACCION DEL INDUCIDO

REACCION DEL INDUCIDO

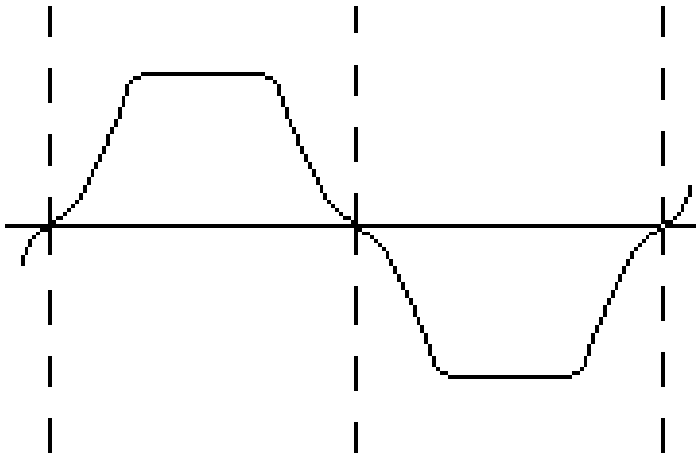




a) Máquina de dos polos

- Consideremos la máquina de dos polos mostrada en la figura

REACCION DEL INDUCIDO



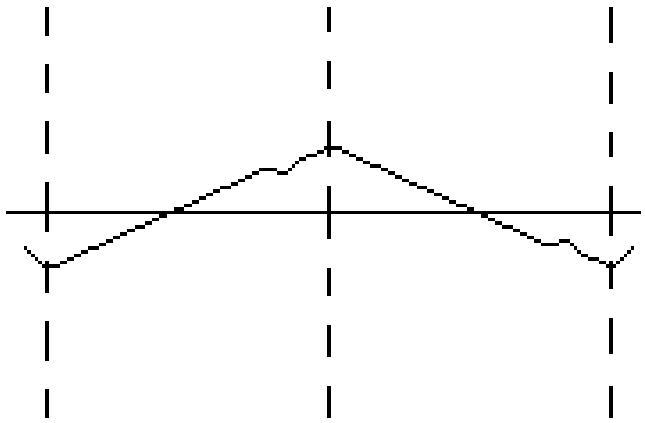
b) B debida a la fmm de campo

- Si la armadura no lleva corriente alguna (o sea, si la máquina está en vació), el campo en entrehierro adopta la forma mostrada en la figura 1-b).

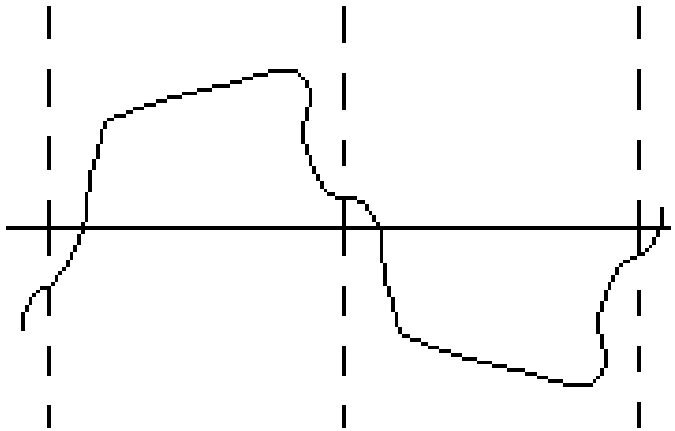
- El plano geométrico neutral y el plano magnético neutral (PGN y PMN, respectivamente), son coincidentes (Nota: las líneas de fuerza magnética intersecan el PMN en ángulos rectos). Las escobillas se localizan en el plano magnético neutral, para un voltaje máximo en las terminales.

REACCION DEL INDUCIDO

Reación debida a la fmm de armadura



c) B debida a la fmm de armadura



d) B resultante [b) + c)]

- El campo resultante en el entrehierro tiene la forma distorsionada que se muestra en la figura 1-d).

- La interacción de los campos debidos a los devanados de campo y de armadura se conoce como ***reacción de armadura***.

REACCION DEL INDUCIDO

Los interpolos son piezas polares de electroimanes especiales colocadas o ubicados entre los circuitos principales de campo.

En su construcción se utiliza alambres esmaltados de gran sección, al ser conectado al circuito de armadura.

ESPACIMIENTO DE LAS ESCOBILLAS

Las escobillas se mantienen en contacto con el conmutador cada 180° eléctricos. Estas escobillas tienen las polaridades positivas y negativas en forma alternada.

Generalmente hay el mismo número de escobillas que polos del campo principal.

Por ejemplo una máquina de 8 polos tendrá 8 escobillas igualmente espaciados alrededor del conmutador.

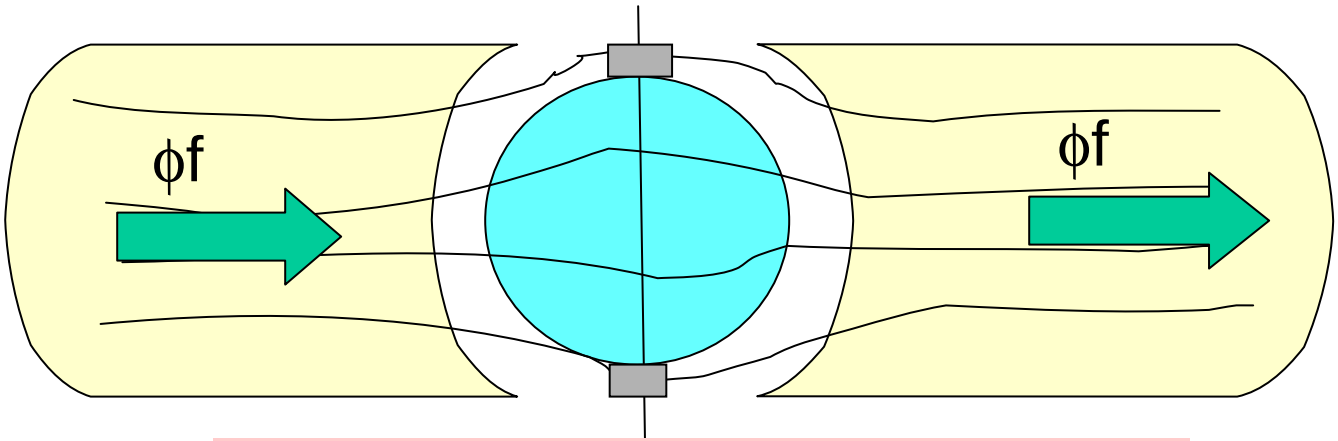
Siempre se debe cumplir que el eje de las escobillas se hallen situados en forma perpendicular al eje de sus correspondientes campos principales.

LA *CONMUTACION*

La conmutación es el proceso por medio del cual se convierten las tensiones y las corrientes de **AC** del circuito de armadura de una maquina de “ CC “, en tensiones y corrientes de **CC,** esto se pueden medir en los sus terminales de la máquina.

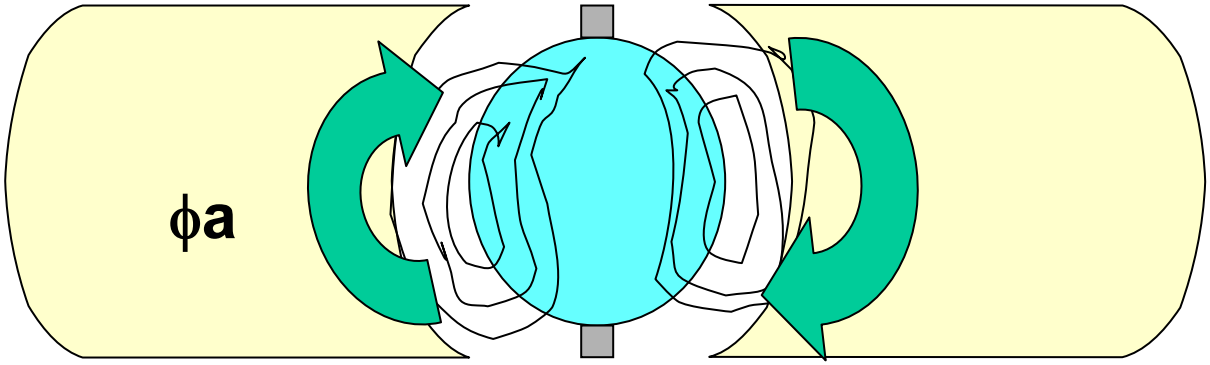
De invertir la polaridad de las conexiones de la armadura de una máquina de CC, hace que el sentido de giro cambie (en el caso del motor) ó cambie la polaridad de la fuente (en el caso del generador).

CUANDO SOLO ACTÚA LA CORRIENTE DE CAMPO (IF).



If $\neq$ 0; Ia = 0; Wm = 0.

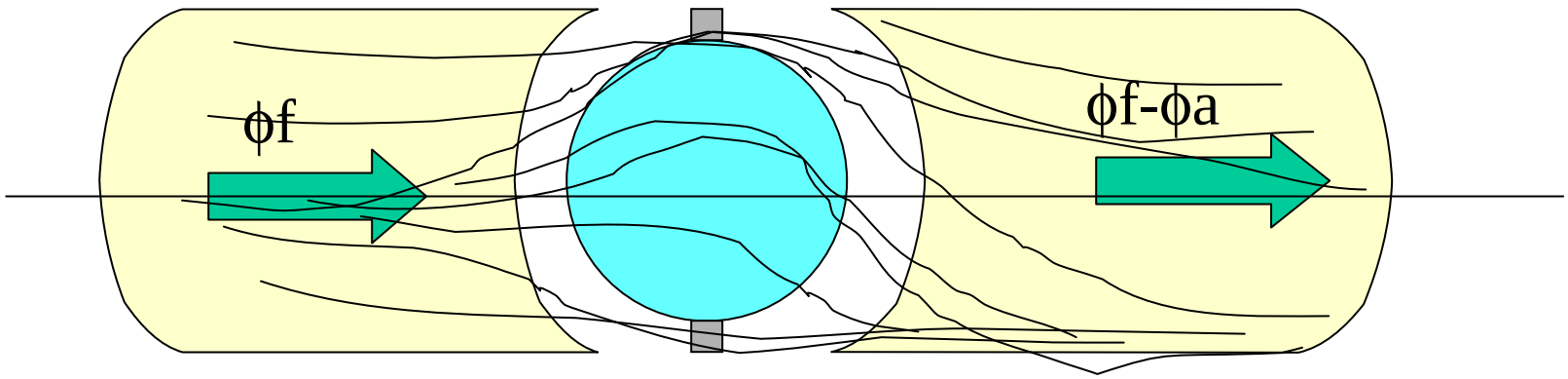
CUANDO SOLO ACTUA LA CORRIENTE DE LA ARMADURA (Ia).



If = 0; Ia $\neq$ 0; Wm $\neq$ 0.

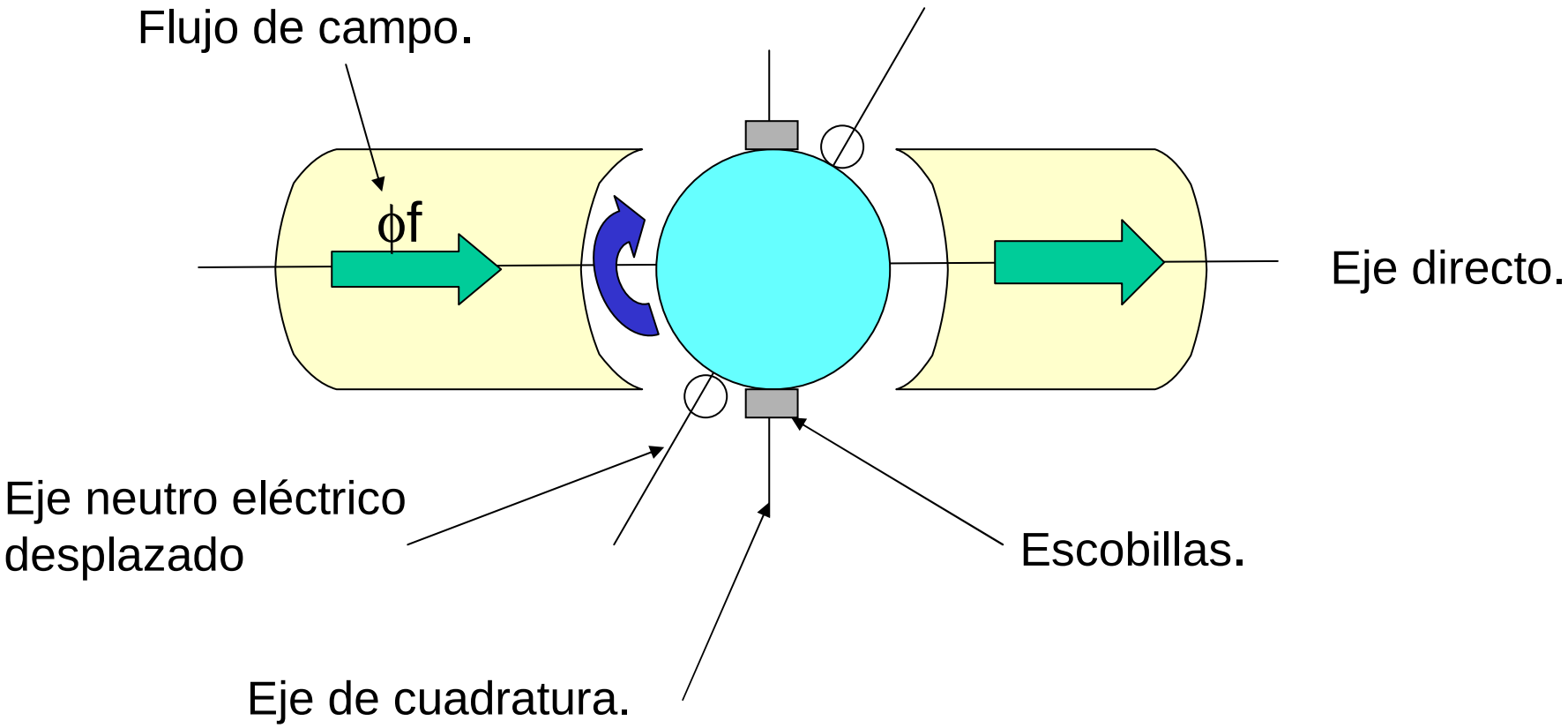
EL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO CUANDO :

LA CORRIENTE DE CAMPO Y LA CORRIENTE DE ARMADURA ACTUA JUNTAS

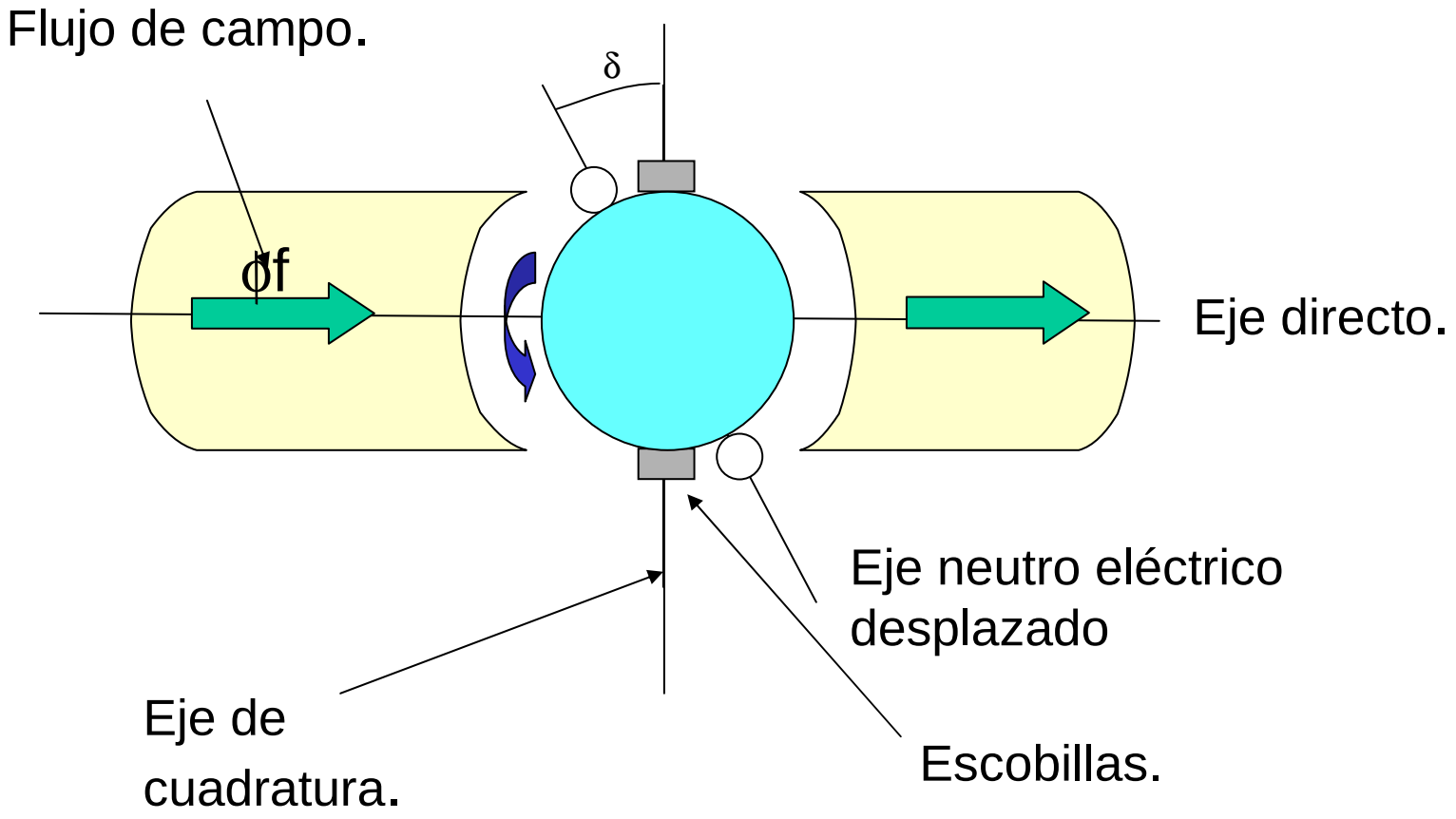


$I_f \neq 0$; $I_a \neq 0$; $W_m \neq 0$.

CASO REAL DE UN GENERADOR



CASO REAL DE UN MOTOR



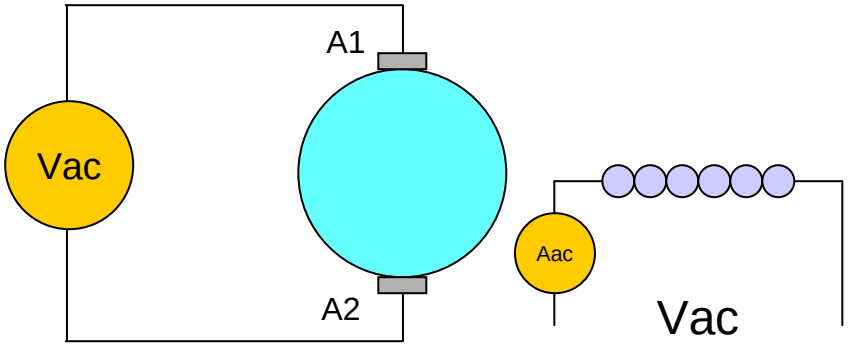
METODOS PARA LA MINIMIZAR EL EFECTO DE LA REACCIÓN DE LA ARMADURA

1. Mover el mecanismo de sujeción de las escobillas a fin de hallar el **EJE NEUTRO ELECTRICO** correcto. A este procedimiento se le denomina DECALAJE DEL JUEGO DE ESCOBILLAS.

   Para lograr este objetivo se recomienda proceder como sigue :

- Utilizando una fuente de corriente alterna, conveniente mente seleccionada, conectada al circuito de campo hacer los ajustes para obtener una lectura CERO en el voltímetro de CA (ver figura). Para lograr este objetivo se recomienda proceder como sigue :
- Utilizando una fuente de corriente continua, convenien-temente seleccionada, conectada al circuito de campo hacer los ajustes para obtener una lectura MAXIMA en el voltímetro de CC (ver figura).

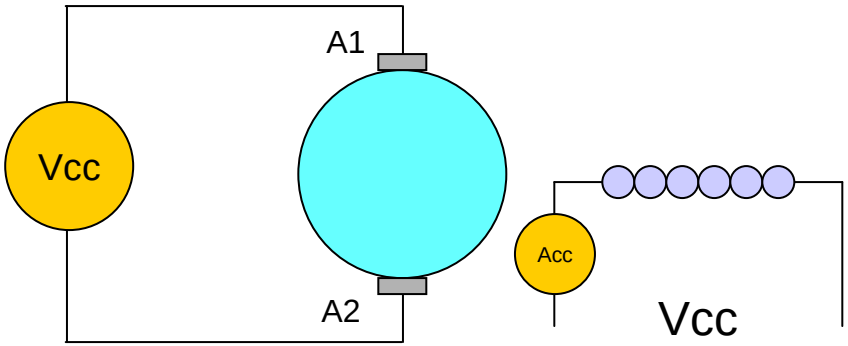
- **Primer caso (muy práctico).**



Condiciones :

. Wm = 0
. Vac = Lectura cero.
. Aac ¼ de la Inominal

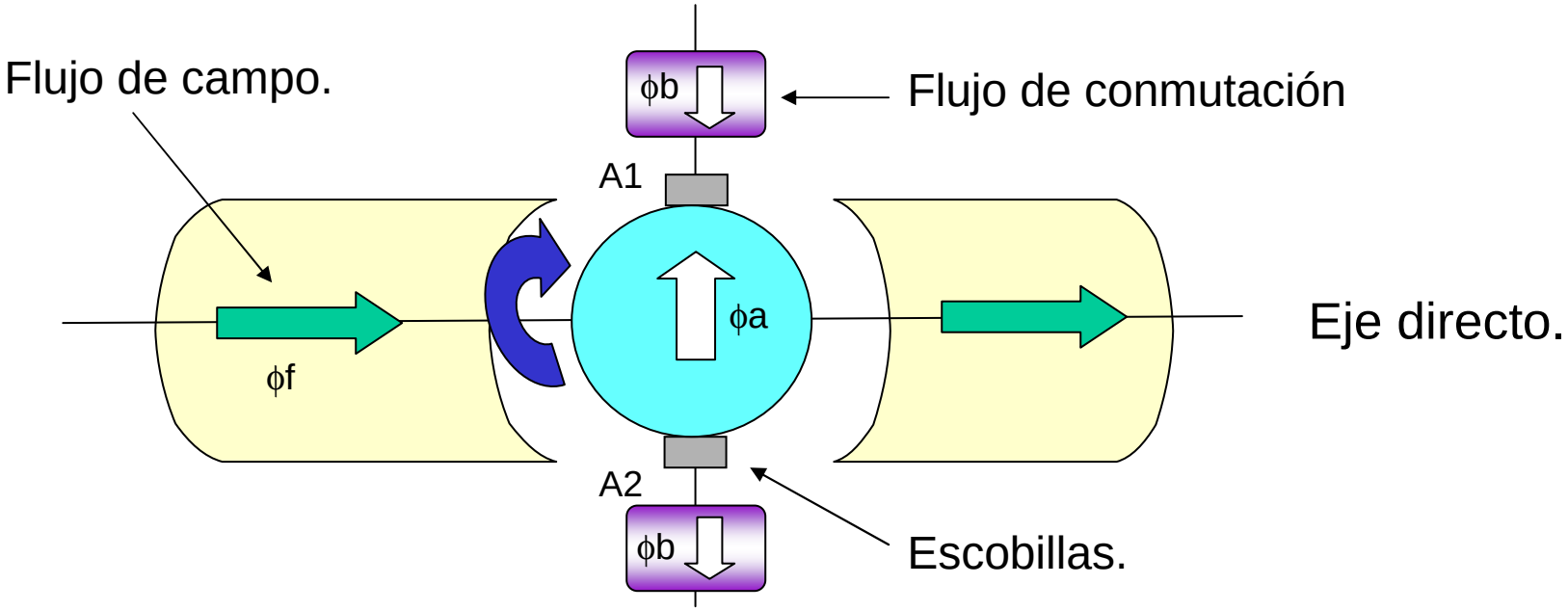
- **Segundo caso**



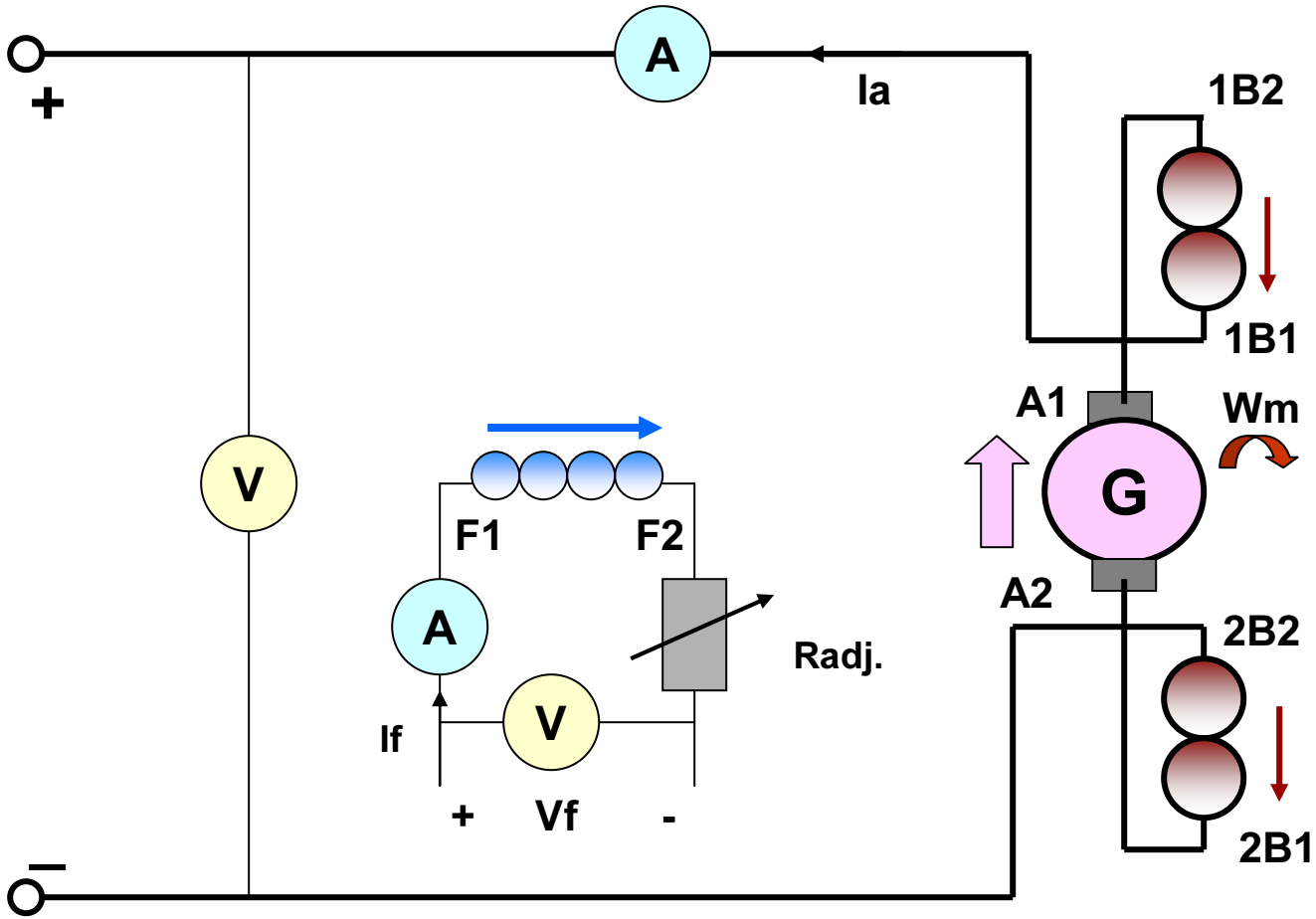
Condiciones :

. Wm = ¼ Wm nominal
. Vcc = Lectura máxima.
. Acc ¼ de la Inominal

2. Para disminuir la reacción de la armadura es necesario que la máquina debe disponer de un circuito de CONMUTACIÓN Ó INTERPOLOS. Este circuito disnimuirá considerablemente la reacción de la armadura. En la actualidad todas las máquinas de CC cuentan con éste circuito.

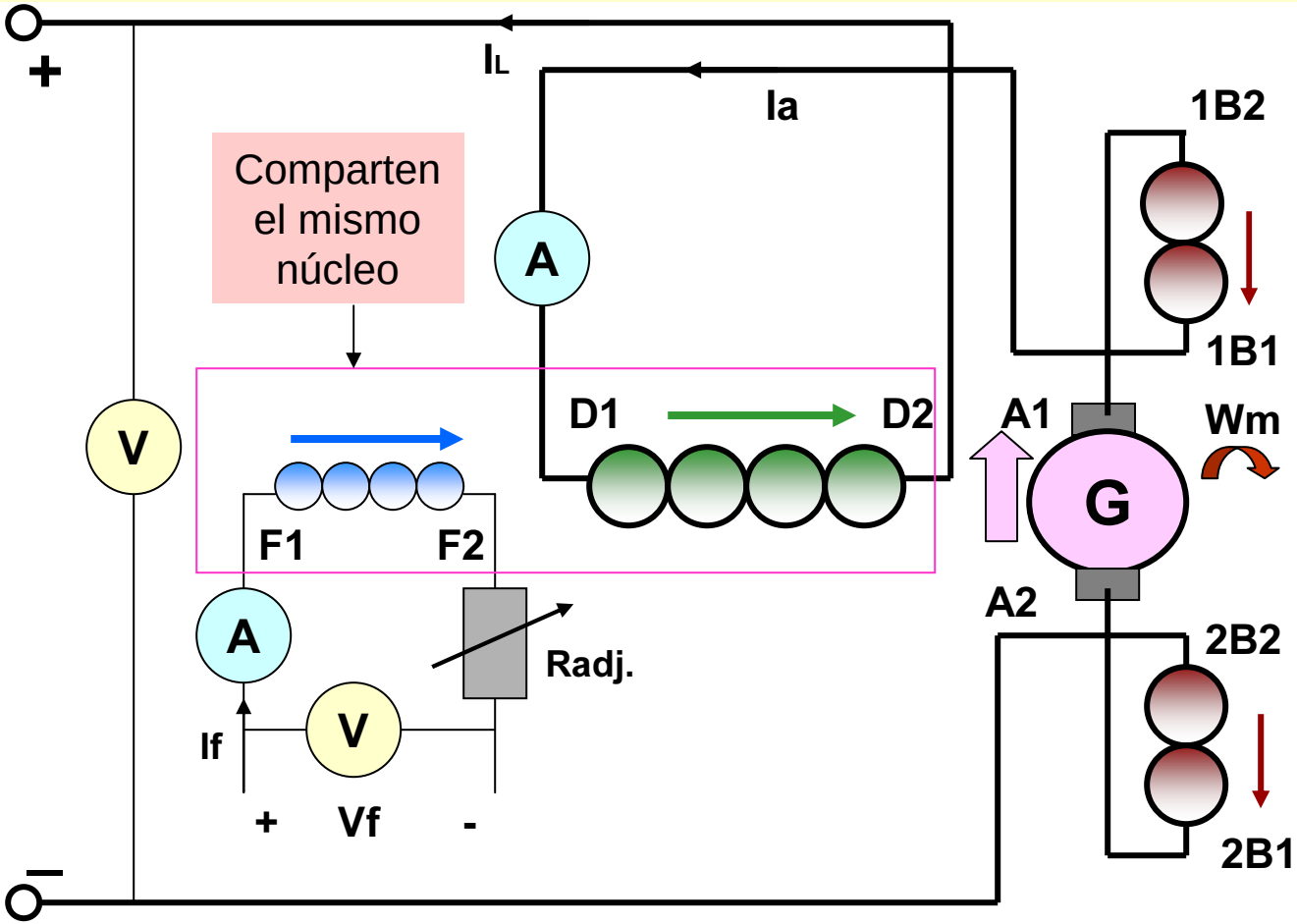


USANDO LOS INTERPOLOS PARA CORREGIR LA REACCION



F1 - F2 CIRCUITO DE CAMPO.
A1 - A2 CIRCUITO DE ARMADURA
1B1 - 1B2 , 2B1- 2B2 CIRCUITO DE INTERPOLOS

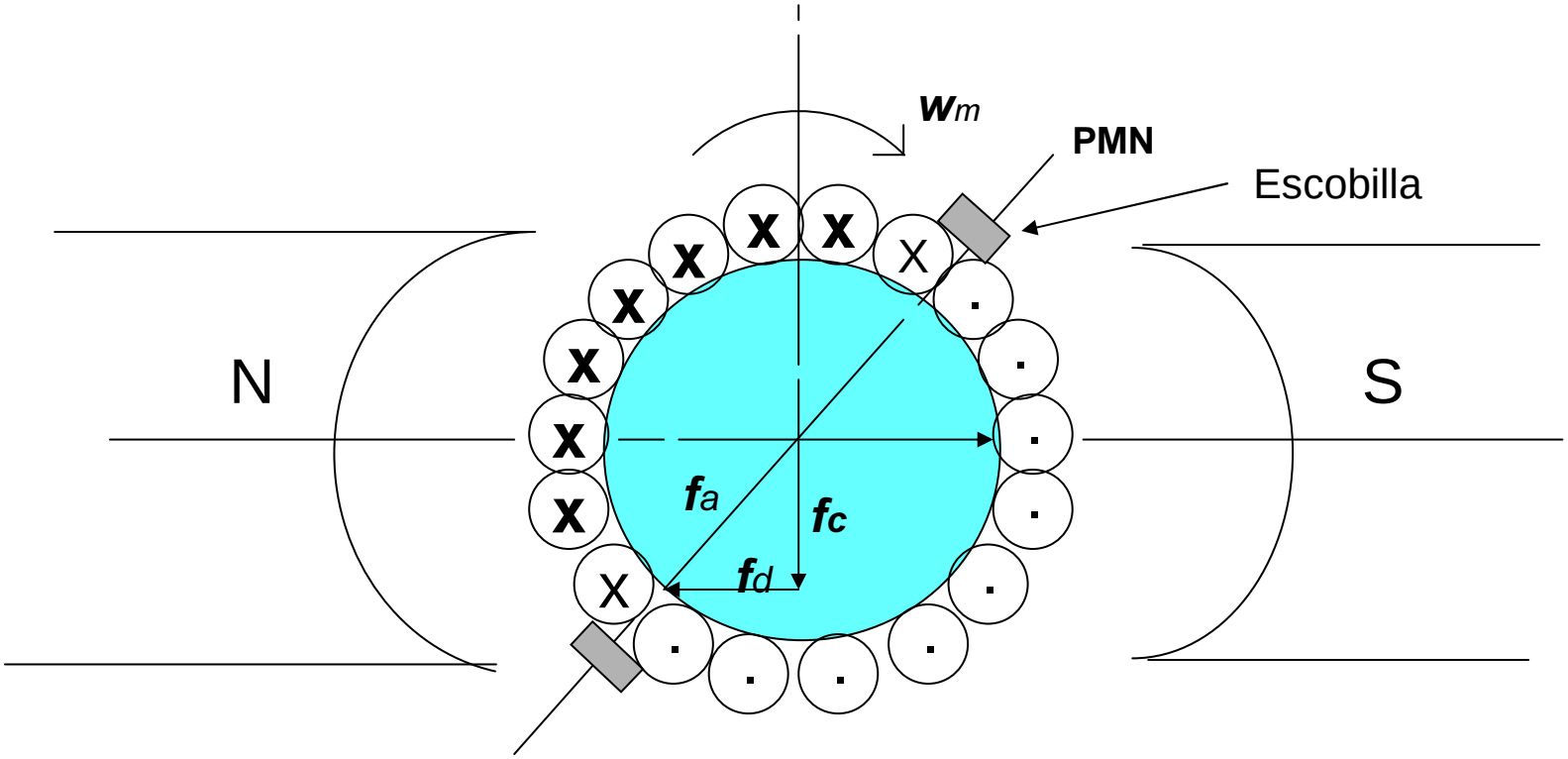
EL USO DE LOS INTERPOLOS Y COMPENSACION PARA TRATAR DE CORREGIR LA RAECCION DE LA ARMADURA



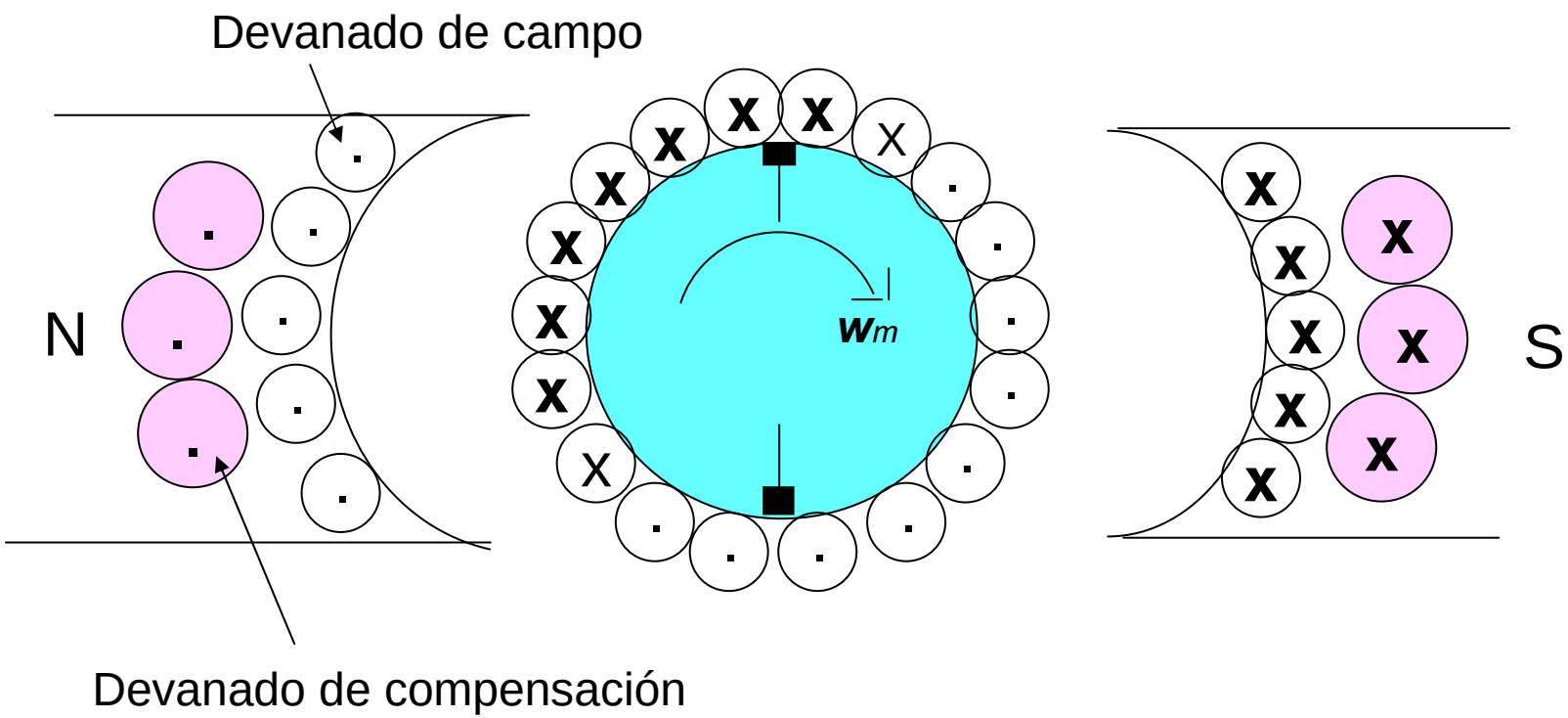
F1 - F2 CIRCUITO DE CAMPO.
D1 - D2 CIRCUITO DE COMPENSACION.
A1 - A2 CIRCUITO DE ARMADURA
1B1 - 1B2 , 2B1- 2B2 CIRCUITO DE INTERPOLOS

REACCIÓN DE ARMADURA

La forma de disposición del campo magnético que generan el campo principal se ven distorsionadas cuando circulan corrientes en los devanados de la armadura.



FINALIDAD DEL DEVANADO DE COMPENSACIÓN



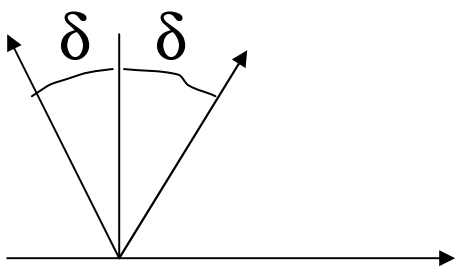
1.- Eliminar por completo la reacción de l armadura.
2.- Seguidor automático de la reacción de la armadura.

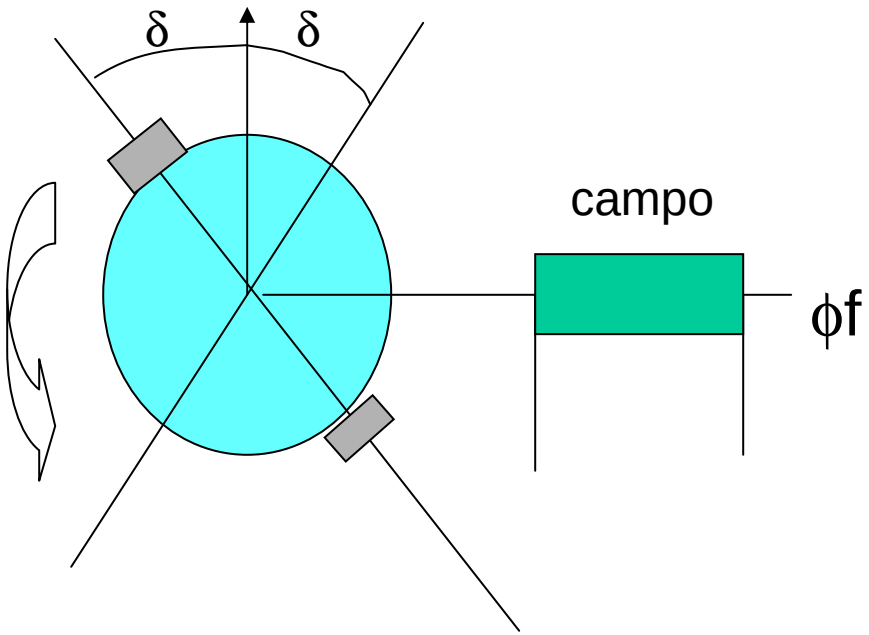
HALLANDO EL ANGULO δ

- El ángulo δ que se va a desplazar las esacobillas se determina por la siguiente relación:
- E’ = Emax . Seno (90 - δ).
- E’ = Emax . Cos δ .

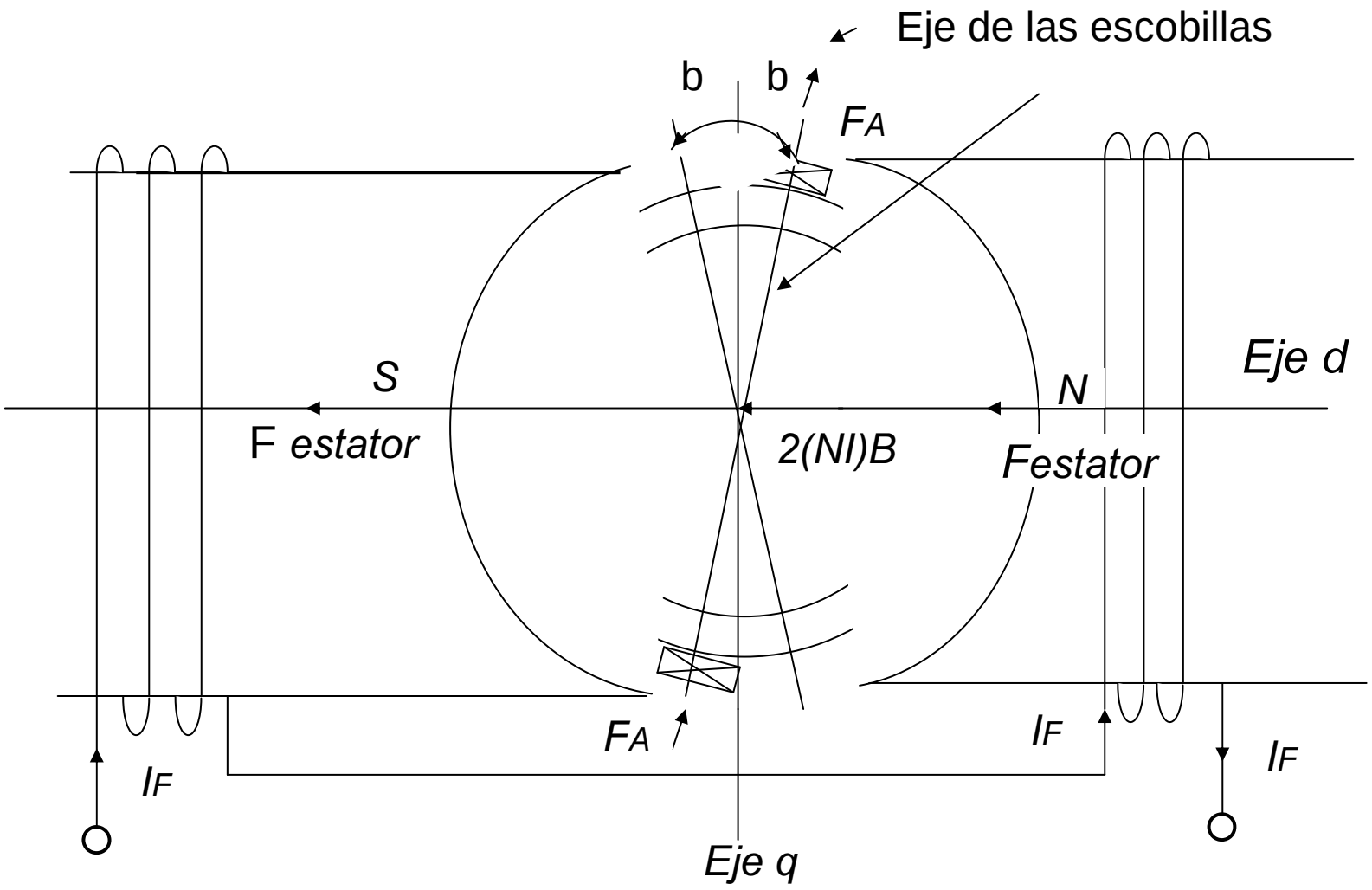
Donde:

- E’: Voltaje de vacío para un generador.
- E: Voltaje a plena carga.





EFECTO MAGNÉTICO DEL GIRO DE ESCOBILLAS



CIRCUITOS DE INTERPOLOS

PARTES:

- NUCLEO O ZAPATA POLAR
- PAPELES AISLANTES
- ALAMBRE ESMALTADO

CARACTERISTICAS:

- Presenta una resistencia baja.
- Se utiliza alambres de gran sección.
- Al ser conectados produce un pequeño arco.
- Soporta la corriente de armadura.
- Se halla ubicado entre los circuitos de campo.

ESPECIFICACIÓN DE LOS BORNES INTERPOLOS

ARROLLAMIENTO DE CONMUTACIÓN	BORNES
	H - G

INTERPOLOS

Cuando un motor funciona a varias velocidades, en diferentes direcciones o contra cargas variables, la corriente de armadura y la reacción de armadura también varían.

Para que un motor como éste funcione con conmutación eficiente, se requeriría un cambio en la posición de las escobillas para cada desplazamiento del plano neutro.

Como este realineamiento constante de escobillas es poco práctico, los motores necesitan alguna forma de mantener el plano neutro.

Contunuación

Una solución a este problema es usar circuitos derivados especiales llamdos polos de **conmutación o interpolos.**

Los interpolos son piezas polares de electroimanes especiales colocadas en el eje del plano neutro, entre las piezas polares principales.

Los devanados de los interpolos se conectan en serie con el devanado de armadura, de manera que la corriente de armadura establece campos magnéticos en ellos.

Las direcciones de estos campos son tales que anulan los campos magnéticos producidos alrededor de las bobinas de armadura cerca de los interpolos y contrarrestan la tendencia de la reacción de armadura a desplazar el plano neutro.

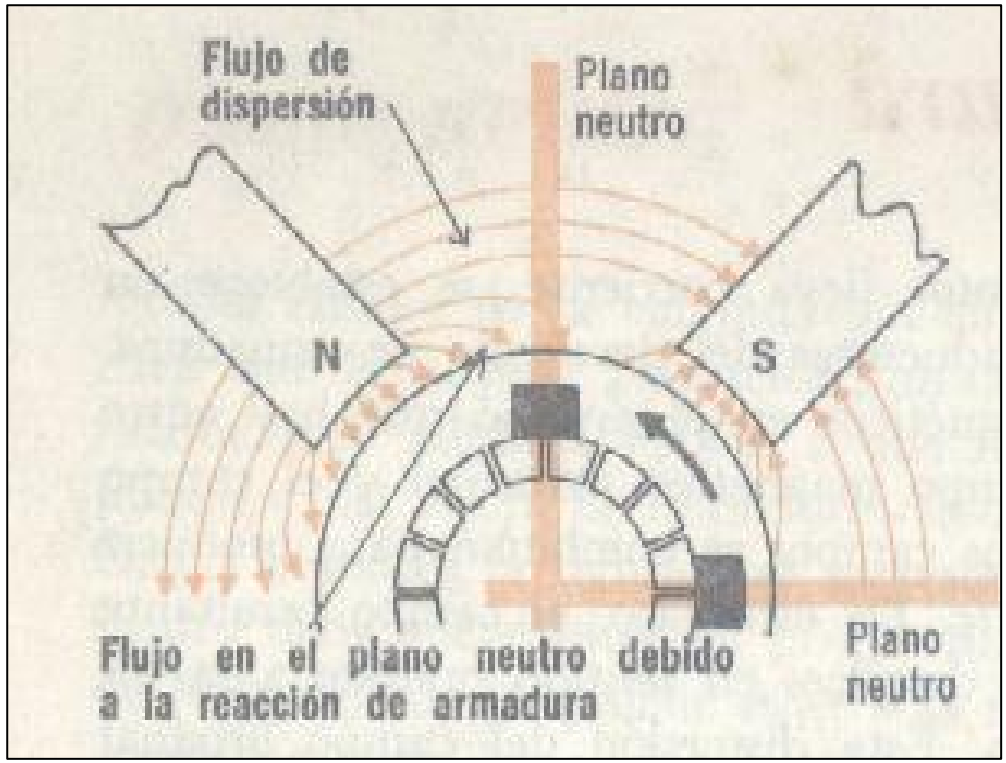
Contunuación

Como resultado, el plano neutro geométrico para todas las modalidades en que funciones el motor son recuparados.

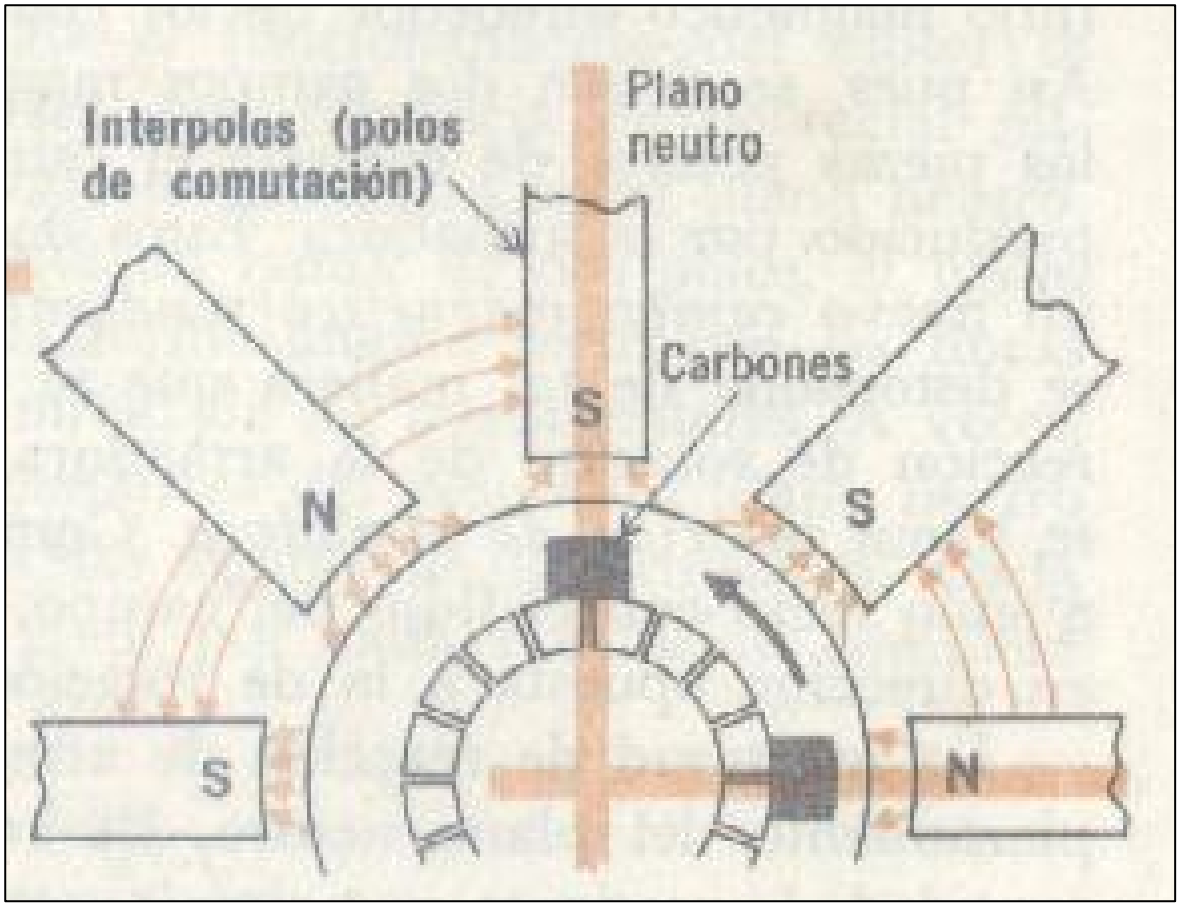
El hecho de que los devanados de los interpolos estén en serie con la armadura hace que se autorregulen; los interpolos proporcionarán la cantidad apropida de campo de anulación para cada posición distinta de condiciones.

Por ejemplo, en el caso de altas corrientes de armadura, en las cuales la reacción de armadura es grande y, también es grande la tendencia a desplazar el plano neutro, entonces el campo de interpolos que anula el desplazamiento también será fuerte.

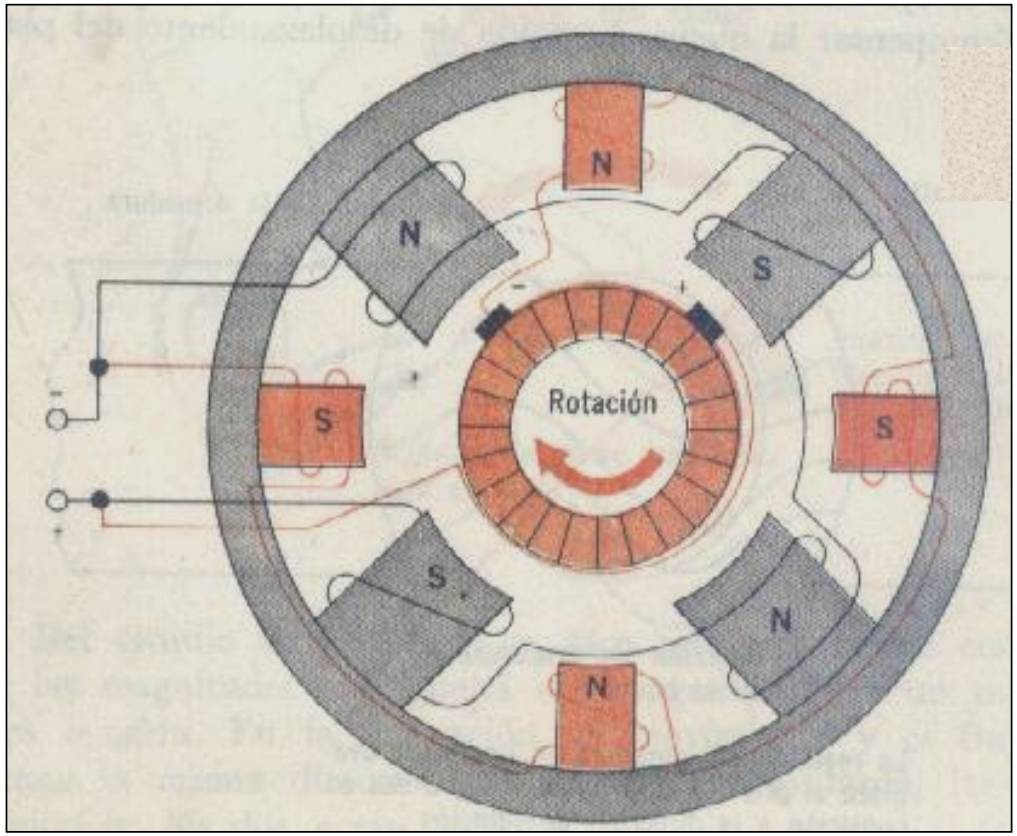
Lo contrario ocurre en bajos niveles de corriente de armadura.



Los polos de conmutación producen un campo local en el plano neutro que se interponen al flujo producidos por la reaccción de la armadura para restaurar el plano neutro original.



Los polos de conmutación producen se usan en los motores prácticos de CC para contrarrestar la reacción de la armadura.

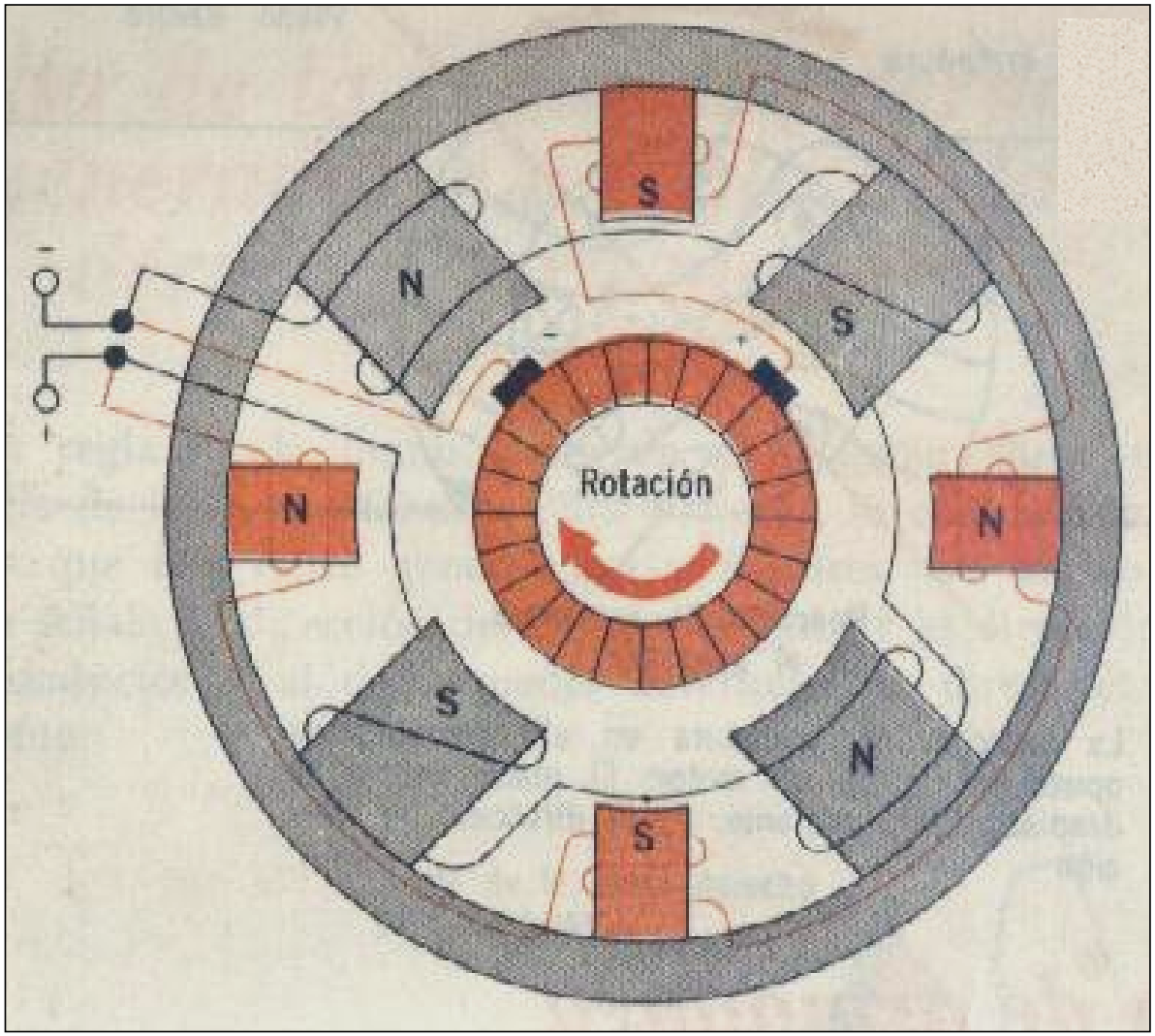


En los generadores la polaridad de los interpolos son opuestas a la polaridad de los motores.

Nótece que, en ambos casos, los interpolos estan conectados en serie con la armadura.

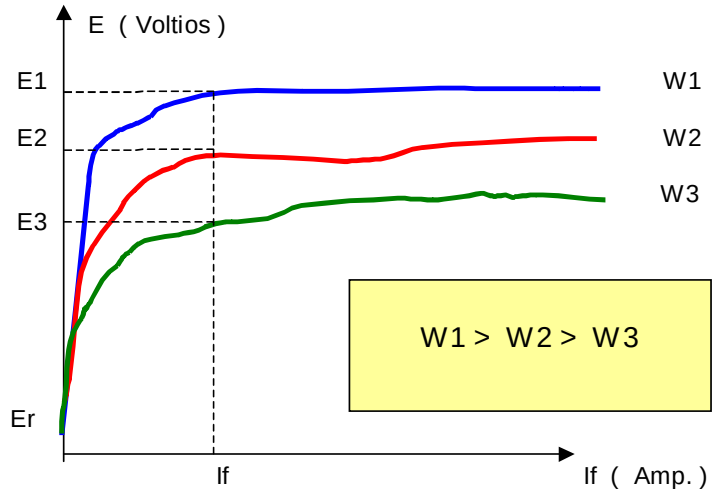
GENERADORES INDUSTRIALES CC

De manera que puedan responder a cambios de la reacción de la armadura a diferentes velocidades.

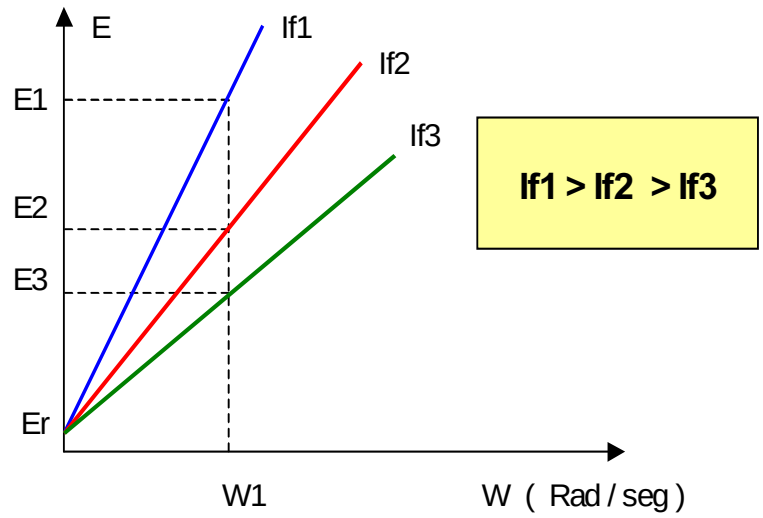


Devanados de los interpolos de los motores de CC

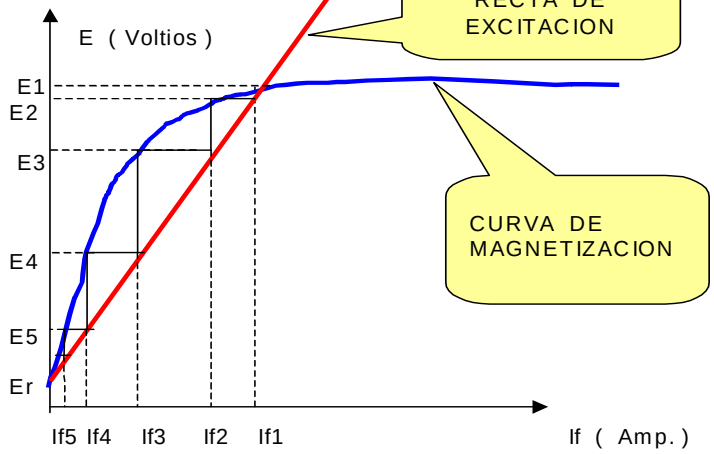
GENERADORES INDUSTRIALES CC



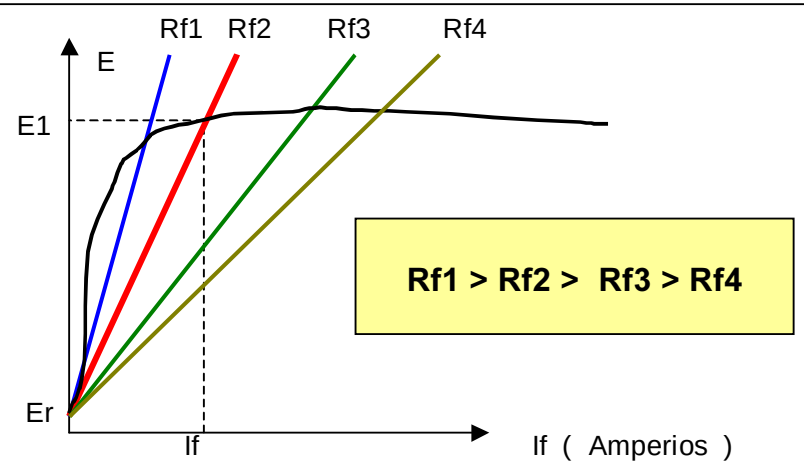
CURVAS DE VACIO EN MAQUINAS DE CC E vs If.



CURVAS DE VACIO EN MAQUINAS DE CC E vs W.



CURVAS DE VACIO EN MAQUINAS DE CC E vs If.



CURVAS DE VACIO EN MAQUINAS DE CC E vs If.

LA SATURACION DEL MATERIAL MAGNÉTICO

1. Evaluar el comportamiento del material magnético por la presencia del flujo magnético.
2. El comportamiento de los materiales magnéticos no es lineal.
3. De esta característica depende de manera especial las máquinas eléctricas rotativas y transformadores.
4. El punto óptimo de operación es el codo.
5. Podemos apreciar en la curva de vacío de la máquina que esa región no es lineal.
6. En esta región con un ΔV se logra obtener unalto ΔI esto nos muestra la saturación.

7 El tramo B - C (de la figura) es comúnmente denominado codo e SATURACION

8 El núcleo se comienza a saturar, con el resultado de que sus permeabilidades magnéticas comienzan a disminuir al igual que su eficacia en la contribución total de densidad de flujo en la máquina.

9 La línea del entrehierro nos indica con mucha aproximación la fuerza magnetomotriz necesaria para superar la reluctancia del entrehierro.

Continua

7 El tramo B - C (de la figura) es comúnmente denominado codo de SATURACION

8 El núcleo se comienza a saturar, con el resultado de que sus permeabilidades magnéticas comienzan a disminuir al igual que su eficacia en la contribución total de densidad de flujo en la máquina.

9 La línea del entrehierro nos indica con mucha aproximación la fuerza magnetomotriz necesaria para superar la reluctancia del entrehierro.

Continua

- La reducción del ΔV respecto a I_f a partir del codo podría apreciares con mayor precision cogiendo una escala adecuada para el ploteo.

- La saturación que se da en una máquina a plena carga ocurre como resultado de la fuerza magnetomotriz total que actúa en el circuito magnético.

Curva de saturación

FIN