

Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

IEE2273 — Laboratorio de Máquinas Eléctricas

Apuntes de Máquinas Eléctricas

Máquina de Corriente Continua

Digitalización a LaTeX el año 2014 por:
Rodrigo Henríquez Auba

Acerca de este documento

Este material es la transcripción y actualización de contenidos del trabajo de distintas personas, cuyo aporte al documento se señala a continuación:

El autor de la primera versión es del autor Rodolfo Palma Z. que junto a la comisión editora compuesta por los señores Jorge Romo L. y Nelson Morales O., de la Oficina de Publicaciones Docentes del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, publicaron el documento en Agosto de 1983.

Posteriormente, en el año 2014, el alumno Rodrigo Henríquez Auba, trabajó en la digitalización a LaTeX de los documentos, junto a los profesores del ramo IEE2273 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, don Mario Ricardo Saez S. y don Luis Vergara R.

Índice

1. Introducción **1**

2. Principios básicos de funcionamiento **2**
2.1. Campo magnético y tensiones inducidas . . . 2
2.2. Campos y corrientes en operación como motor y como generador . . . 4
2.3. Circuitos de excitación. Polos o campos . . . 5
2.4. Tipos de máquinas de corriente continua según la conexión de sus campos . . . 6
2.5. Escobillas . . . 8
2.6. Reacción de armadura y conmutación . . . 9

3. Aspectos Constructivos **13**
3.1. Estator . . . 13
3.2. Rotor . . . 14
3.3. Carcaza y accesorios . . . 16

4. Descripción general del funcionamiento **16**
4.1. Ecuaciones . . . 16
4.2. Curvas características . . . 17

5. Características de generadores de C.C. **18**
5.1. Generador con excitación separada . . . 18
5.1.1. Característica en vacío o de excitación . . . 18
5.1.2. Característica en carga . . . 20
5.1.3. Característica externa . . . 23
5.1.4. Curva de regulación . . . 24
5.2. Generador Shunt . . . 25
5.2.1. El fenómeno de autoexcitación . . . 25
5.2.2. Característica en vacío . . . 27
5.2.3. Característica en carga . . . 27
5.2.4. Característica externa . . . 27
5.2.5. Curva de regulación . . . 29
5.3. Generador serie . . . 29
5.4. Generador compound . . . 30
5.5. Aplicaciones de generadores de C.C. . . . 31

6. Características de motores de C.C. **32**
6.1. Motor con excitación separada y motor shunt . . . 32
6.1.1. Curva torque – velocidad . . . 32
6.1.2. Característica torque – corriente . . . 33
6.1.3. Característica velocidad – corriente . . . 34
6.2. Motor serie . . . 34
6.2.1. Curva torque – velocidad . . . 34
6.2.2. Característica torque – corriente . . . 36
6.2.3. Característica velocidad – corriente . . . 36

6.3. Motor compuesto 37
6.4. Métodos de partida de motores de C.C. 38
6.4.1. Método de partida con reóstatos 39
6.4.2. Partida mediante tensión de armadura reducida 41
6.5. Repartición de cargas entre dos motores 42
6.6. Aplicaciones de motores de C.C. 43

Referencias **46**

1. Introducción

La máquina de corriente continua (C.C.) es constructivamente la más compleja entre las máquinas rotatorias tradicionales; sin embargo, fue la primera en ser construida, usada y desarrollada, allá por el año 1880, seguramente por el desconocimiento que los ingenieros de la época tenían de los circuitos de corriente alterna y de los campos magnéticos variables. Aparte de su mayor complejidad mecánica (escobillas, portaescobillas, colector, etc.), las máquinas de C.C. son menos robustas, requieren mayor mantención y necesitan unión eléctrica entre armadura (móvil) y el estator (fijo). Esto hace que, a igual potencia y tensión, una máquina de C.C. sea de mayor precio, requiera de mayor espacio y tenga un mayor costo de mantención que una máquina de corriente alterna.

A pesar de lo anterior, las máquinas de C.C. han sido usadas y siguen usándose en forma amplia, principalmente como motor, en una gran variedad de accionamientos de industrias mineras, papeleras, etc., en especial cuando se requiere:

i) Un amplio rango de velocidades, ajustable en modo continuo.

ii) Una característica torque – velocidad variable, constante, o una combinación de ambas por tramos.

iii) Rápida aceleración, desaceleración o cambio de sentido de giro (como en laminadoras de metal, ascensores, tracción, etc.).

iv) Control de velocidad de muy alta calidad y precisión (como en el tensionado de laminadoras de papel).

v) Correlación exacta de la velocidad entre dos o más partes del proceso industrial.

vi) Frenado regenerativo.

En esta publicación se analizan los principios de funcionamiento de la máquina de C.C. y sus principales características electromecánicas; se indican las curvas características de régimen permanente como generador y como motor, y se describen los métodos experimentales para la obtención de las mismas.

2. Principios básicos de funcionamiento

2.1. Campo magnético y tensiones inducidas

En un conductor de largo ℓ [m], moviéndose perpendicularmente con respecto a un campo magnético uniforme B [Wb/m^2] o [T], se induce una fuerza electromotriz (fem) e, dada por:

$$e = v\ B\ \ell\ \ [V] \tag{1}$$

donde v [m/s] es la velocidad del movimiento.

El inducido (donde se induce la fem) de una máquina de C.C., lleva espiras de modo tal que cada lado axial de ellas, corta un campo magnético con distinta polaridad (Figura 1) simultáneamente, de modo que las fem se suman.

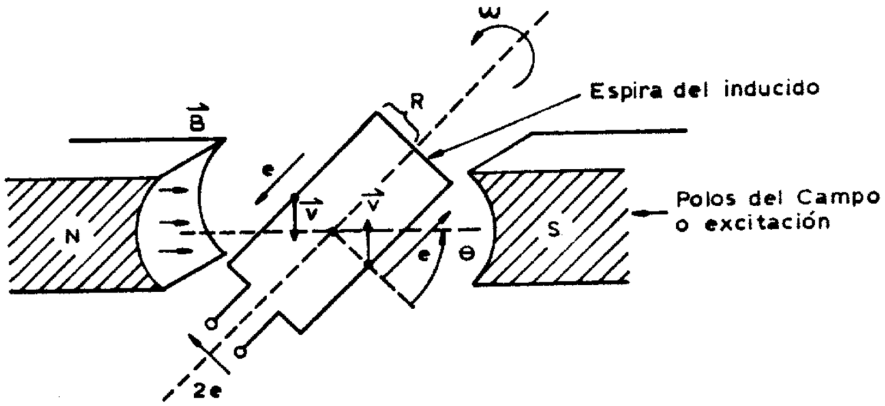


Figura 1: Espira girando en campo magnético.

Por lo tanto para cada espira se tiene:

$$e = 2\ v\ B\ \ell\ \cos\theta \tag{2}$$

$$\text{donde: } \theta = \omega t \tag{3}$$

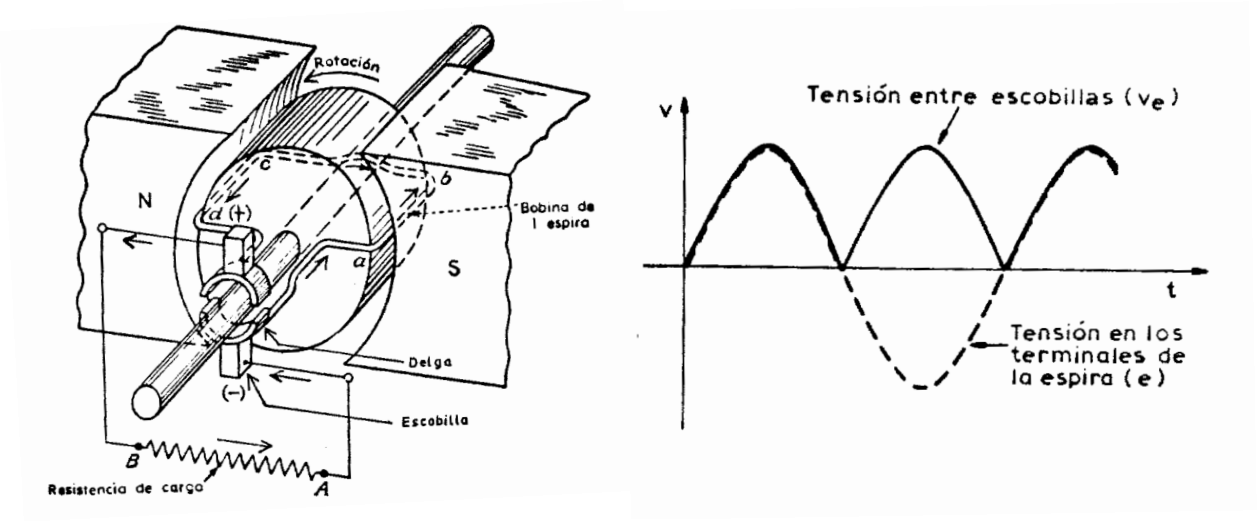
$$v = \omega R \tag{4}$$

obteniéndose:

$$e = 2\ \omega\ B\ R\ \ell\ \cos(\omega t) \quad [\text{V/espira}] \tag{5}$$

Se aprecia que la tensión inducida por espira es sinusoidal, y su amplitud es directamente proporcional a la velocidad de giro, a la densidad de campo magnético y al área de espira ($2R\ell$). Para una bobina de N espiras, la tensión inducida es $N \cdot e$.

Mediante la acción de un sistema denominado colector, formado por delgas y escobillas, la tensión de la espira se rectifica (Figura 2).



(a) Esquema físico. (b) Formas de onda.

Figura 2: Bobina giratoria conectada a un colector, el cual rectifica la tensión inducida.

En la Figura 3 puede apreciarse un diagrama esquemático extendido de la situación descrita en la Figura 2.

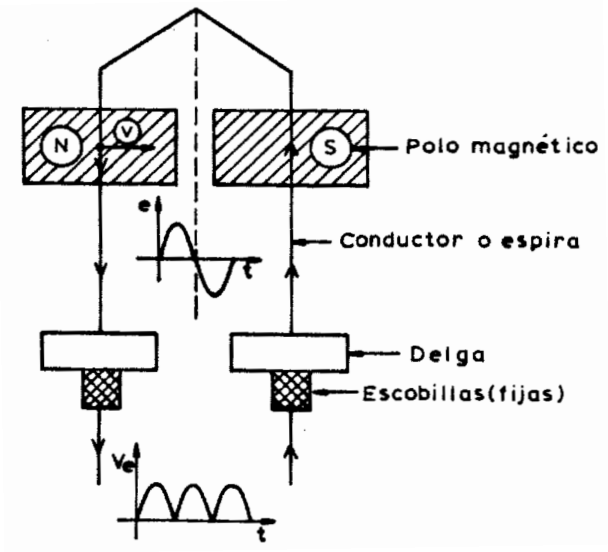
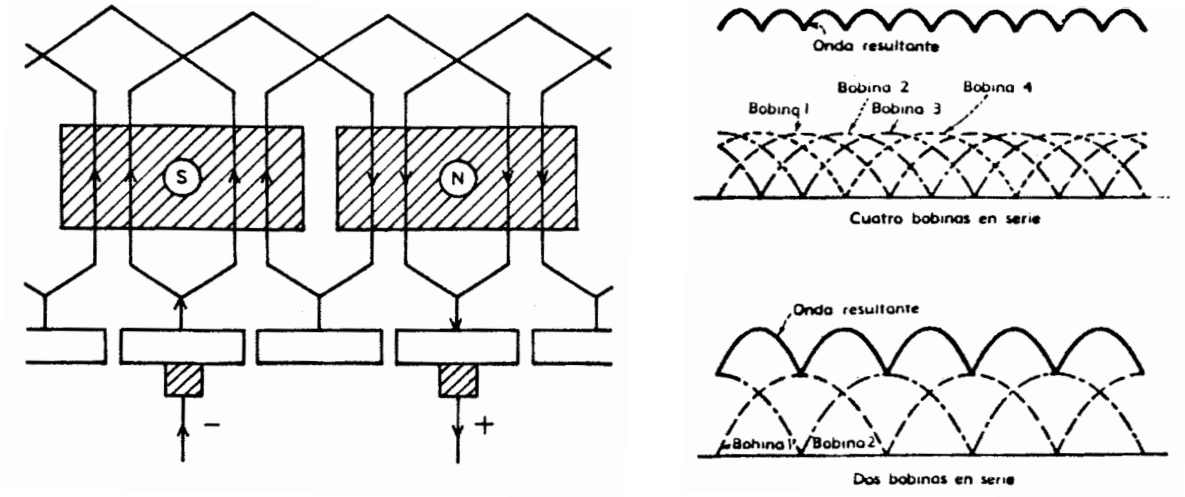


Figura 3: Diagrama extendido.

En las máquinas prácticas, los conductores están ubicados en toda la periferia del rotor, conformando lo que se denomina “armadura”, teniendo cada espira dos delgas terminales. Sin embargo, y con el fin de elevar la tensión en bornes y reducir el contenido armónico de la tensión generada, es usual conectar todas las espiras en serie bajo la distancia de un polo (paso polar), como se aprecia en la Figura 4 (a) para el caso simple de una máquina de dos polos, 4 delgas y 4 bobinas en serie (nótese que el bobinado es continuo). En la Figura 4 (b) se indica la forma de onda resultante en las escobillas. En la figura superior se ilustra la forma de onda resultante con

cuatro bobinas en serie, y que es mejor que la figura inferior que solo tiene dos bobinas en serie.



(a) Diagrama extendido.

(b) Formas de onda.

Figura 4: Máquina C.C. de 2 polos, 4 delgas y 4 bobinas por par de polos.

2.2. Campos y corrientes en operación como motor y como generador

En un generador, la fem inducida tiene un sentido tal, que establece una corriente que produce fuerza igual y opuesta a la causa de movimiento.

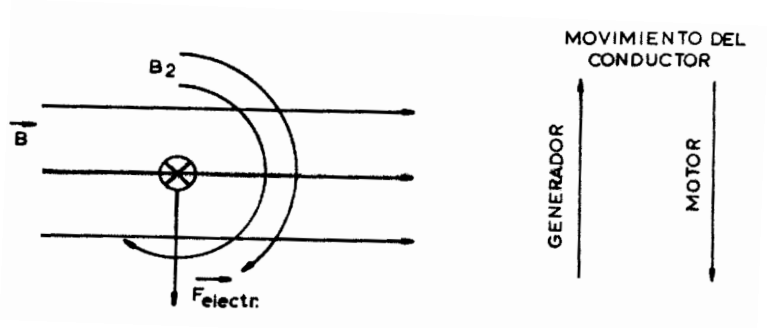


Figura 5: Principio de funcionamiento.

En la Figura 5 se representa un conductor perpendicular al plano, por el cual circula corriente hacia adentro (produciendo un campo magnético $\vec{B}_2$), en un campo externo $\vec{B}$ uniforme. En estas condiciones, la interacción entre el campo magnético externo y la corriente produce una fuerza $\vec{F}_{elect}$ sobre el conductor, la cual apunta hacia abajo en la Figura pudiendo desplazarlo desarrollando una potencia $\vec{v} \cdot \vec{F}_{elect}$. Esta condición de operación se denomina motor.

Debe notarse que en esta misma condición la fem $(\vec{v} \times \vec{B})$ generada por el movimiento es opuesta a la corriente indicada. Por lo tanto debe existir una fuente externa de alimentación, que haga circular la corriente en sentido indicado.

Ahora si el conductor se mueve en la Figura hacia arriba gracias a una fuerza externa (de origen mecánico por ejemplo), que le entrega una potencia $-\vec{v} \cdot \vec{F}_{elect}$ (el signo $-$ indica potencia recibida por el conductor), la potencia eléctrica generada $(V \cdot I)$ será igual a la potencia recibida externamente, si se desprecian las pérdidas de potencia en el conductor (I^2R). Esta operación se denomina generador. Nótese que también en este caso la fem generada $(\vec{v} \times \vec{B})$ en el conductor es la que impulsa a la corriente en su mismo sentido.

Existe un tercer modo de operación conocido como freno, en el cual la máquina recibe potencia eléctrica (motor) como mecánica (generador) convirtiéndose esta última en calor (pérdidas).

2.3. Circuitos de excitación. Polos o campos

Cualquiera sea el modo de operación de la máquina, debe existir el campo magnético $\vec{B}$ de la Figura 5, dentro del cual se muevan los conductores del rotor.

En la Figura 6 se muestra un diagrama de una máquina C.C. indicando sus partes más relevantes. El campo magnético, o flujo, puede provenir de un imán permanente (pequeños dínamos, tacómetros, magnetos, etc.) o de un electroimán (pieza polar de un enrollado de campo).

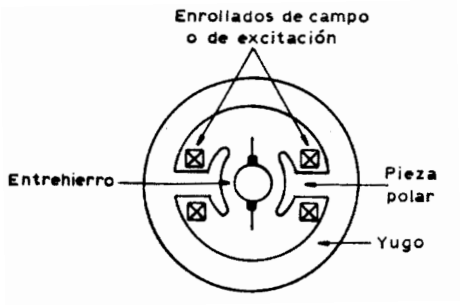


Figura 6: Circuito de excitación de una máquina de dos polos.

La distribución del flujo a lo largo del entrehierro depende principalmente de la forma de la pieza polar, del valor relativo del entrehierro y de la distancia entre las puntas de una pieza polar a otra.

La distribución de flujo a lo largo del entrehierro en las máquinas prácticas es usualmente del tipo indicado en la Figura 7.

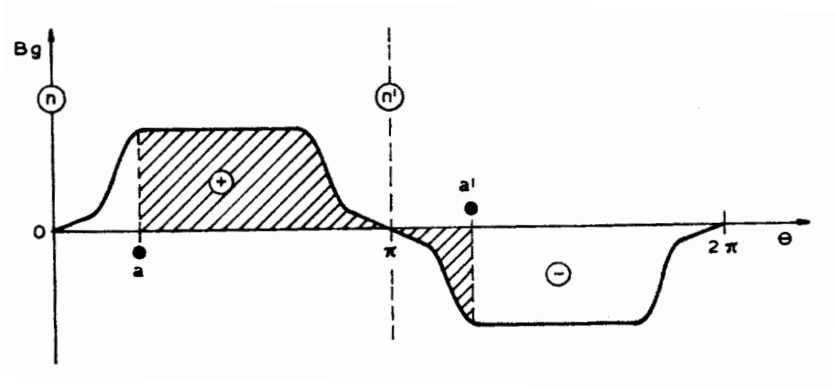


Figura 7: Distribución de flujo a lo largo del entrehierro en una máquina de C.C. de dos polos.

Así, como para una espira con lados en a y a' la tensión inducida es proporcional al flujo enlazado y a su velocidad de giro, la tensión en bornes de a a' será proporcional al área achurada en la figura, sumada con los signos adecuados. La máxima tensión se conseguirá para bobinas ubicadas en n - n'.

Por otra parte, la tensión inducida total en bornes de la máquina es directamente proporcional al valor del campo magnético (ec. (1)). Sin embargo, y debido a la relación no lineal entre la corriente de excitación y el campo magnético (curva de magnetización) la relación entre la tensión en bornes y la corriente de excitación (característica en vacío) es similar a la curva de magnetización del fierro (Figura 8).

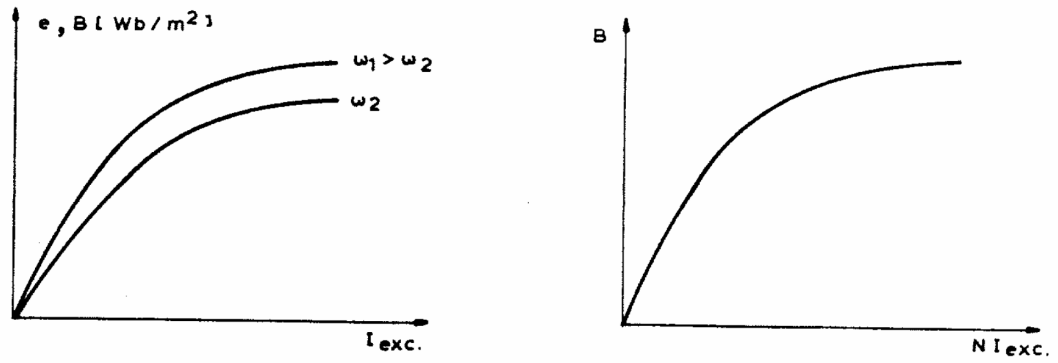


Figura 8: Curvas de excitación de una máquina de C.C. y de magnetización del fierro.

2.4. Tipos de máquinas de corriente continua según la conexión de sus campos

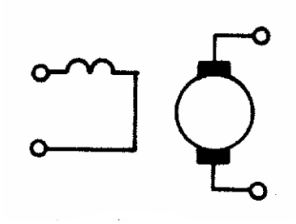
El modo de conexión del o de los campos define el comportamiento electromecánico de la máquina de C.C. Así pueden tenerse los siguientes tipos de generadores y motores (ver Figura 9):

(a) Excitación separada (o independiente).

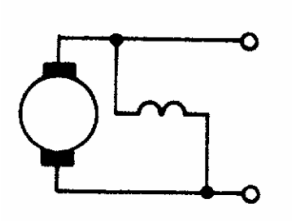
(b) Excitación en paralelo (o shunt).

(c) Excitación en serie.

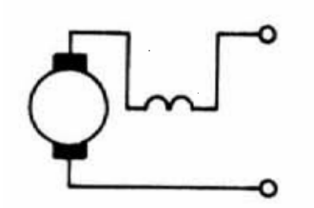
(d) Excitación compuesta (o compound).



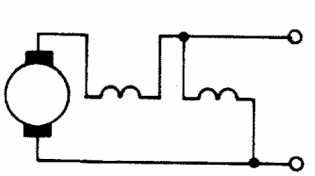
(a) Excitación separada.



(b) Excitación shunt.



(c) Excitación serie.



(d) Excitación compound.

Figura 9: Conexión del campo en Máquinas de Corriente Continua.

El enrollado de campo paralelo (o shunt) es siempre un enrollado de muchas vueltas de alambre de poco calibre, soporta una corriente pequeña (comparada con la de armadura) y se conecta a la tensión de la máquina.

El enrollado de campo serie, al igual que los enrollados de los interpolos, está hecho con pocas vueltas de alambre de grueso calibre, ya que debe ser capaz de conducir toda o una fracción no despreciable de la armadura.

Notación: Los extremos de los distintas enrollados (bornes) están designados en la placa de conexiones con una o más letras, de acuerdo a la norma que se adopte, como se indica en la Tabla 1.

Elemento	Norma			
	VDE	ASA	BS	IEC
– Armadura	A–B	A_1–A_2	AA–A	A_1–A_2
– Campo shunt	C–D	F_1–F_2	Z–ZZ	E_1–E_2
– Campo serie	E–F	S_1–S_2	Y–YY	D_1–D_2
– Interpolos	G–H	–	HH–H	B_1–B_2
– Interpolo simétricamente distribuido en el lado A	GA–HA	–	–	$1B_1$–$1B_2$
– Id. en el lado B	GB–HB	–	–	$2B_1$–$2B_2$
– Enr. de campo de excit. separada	I–K	F_1–F_2	X–XX	F_1–F_2

Tabla 1: Designación normalizada de bornes de una máquina de C.C. según distintas normas.

2.5. Escobillas

Las escobillas son los elementos que permiten, junto al colector (formado por delgas), el contacto eléctrico entre el rotor (móvil) y el estator (fijo).

Las escobillas están constituidas normalmente de carbón u otros materiales similares, ya que ellos combinan un coeficiente de roce escobilla-colector pequeño y una resistividad propia y de contacto bajas, además de aceptar buenos niveles de densidad de corriente. Dependiendo de la potencia, del uso y otras características de la máquina, se elige el tipo de material para la escobilla más adecuado.

En la Tabla 2 se indican algunos materiales de escobillas y algunas de sus características más importantes.

Tipo de Escobilla	Propiedades	Aplicaciones	Caída de tensión por par [V]
Carbón	Duras	Máquinas de tensión > 500 V.	2 a 2.5
Carbón con cantidades media de grafito.	Medianamente duras.	Máquinas de 220 V. Tracción.	2.1
Carbón con gran cantidad de grafito.	Blandas, excepto grafito duro.	General	1.8 a 2.0
Morganita	Silenciosas. Sensibles a la presión.	Maq. de menos de 100 V.	1.8 a 1.9
Morganita dura	Poca inercia	Turbogeneradores	1.6 a 2.1
Electrografíticas	De blandas a duras.	Máqs. de B.T. y Máqs. normales.	1.6 a 1.8
Mixtas (Graf. y cobre; graf. y bronce; graf. normal).	Baja caída de tensión.	Máquinas de B.T.	0.5 a 1.4

Tabla 2: Tipos y propiedades de escobillas mas usuales.

2.6. Reacción de armadura y conmutación

Al circular corriente por la armadura, el rotor crea en el entrehierro un campo magnético B_r debido a estas corrientes (Figura 10).

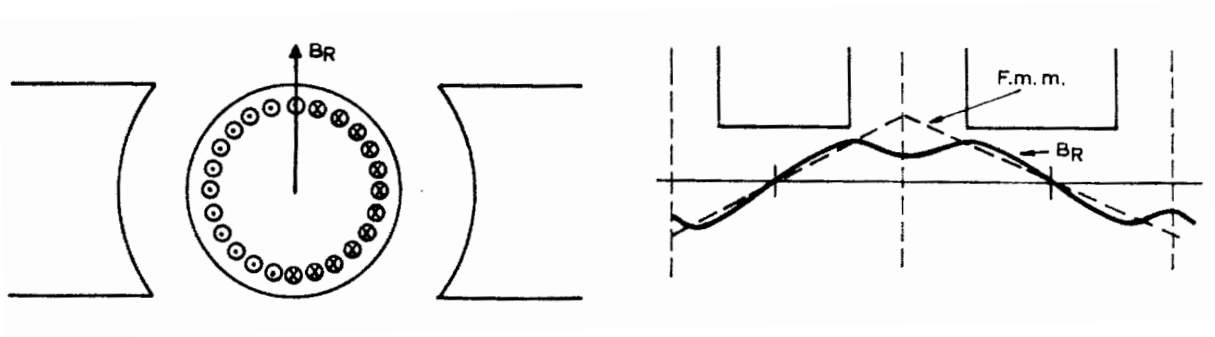


Figura 10: Dirección y distribución del campo de reacción de armadura.

En la Figura 11 se indican, en un diagrama extendido, las fuerzas magneto motrices (fmm) o flujos de campo y de la armadura (ϕ_1, ϕ_a), (recordar que fmm $= \mathcal{R}\phi$) y el flujo total en el entrehierro ($\phi_{total} = \phi_1 + \phi_a$).

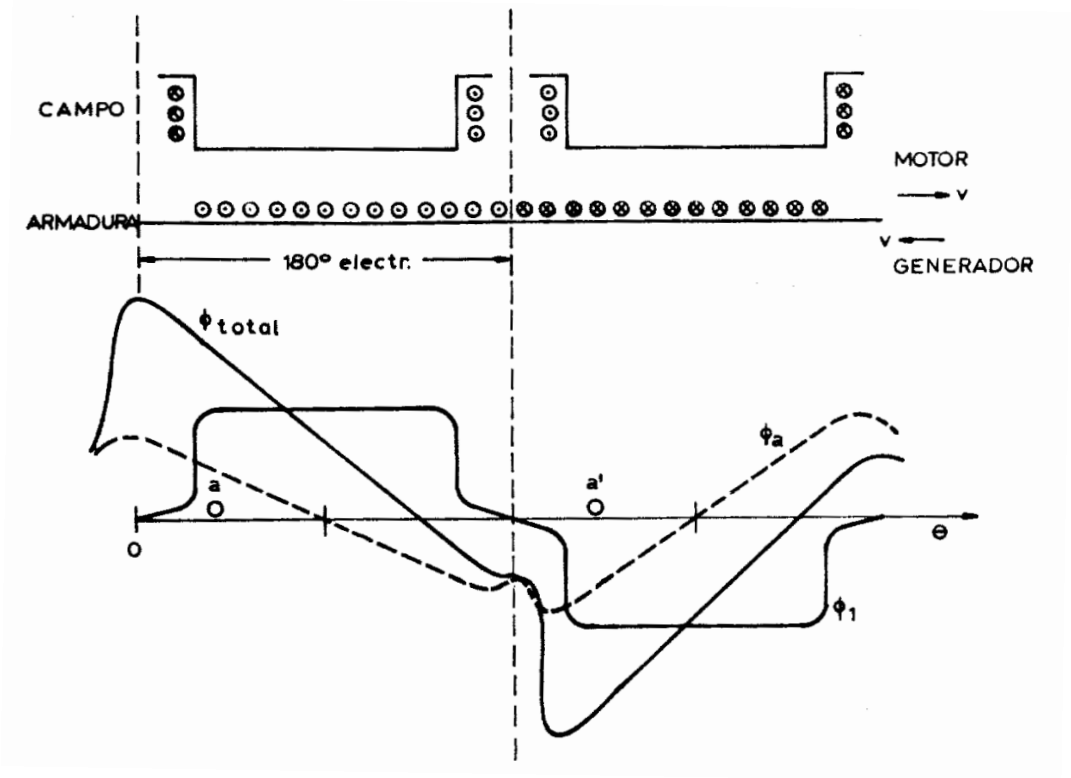


Figura 11: Reacción de armadura.

Se aprecia en la Figura 11 que debido a la circulación de corrientes por la armadura, la dis-

tribución de flujo a lo largo del entrehierro cambia notablemente, dependiendo de la magnitud de las corrientes de armadura.

La distorsión del flujo resultante en el entrehierro puede producir zonas en que el valor de la densidad de flujo sobrepasa al nivel de saturación. Esta saturación se manifiesta en mayores pérdidas en el fierro y en el rotor, y lo que es más importante, una reducción en la tensión generada, ya que por efecto de la saturación en torno al punto P, el flujo total resulta ser menor que la suma de los flujos y disminuye el flujo total enlazado por una espira tal como la a – a' de la Figura 11. Esta reducción en la tensión generada puede también interpretarse como una caída de tensión por "reacción de armadura".

Otro efecto importante de la reacción de armadura es ocasionado en la conmutación.

La conmutación, efectuada con ayuda de las delgas y las escobillas, permite que la fem inducida en una espira, que es alterna, pueda ser recogida de una sola polaridad.

La conmutación entre dos delgas contiguas debe efectuarse cuando la tensión entre ellas es cero (o mínima); de otro modo, la escobilla durante el tiempo que está en contacto entre ambas, produce un cortocircuito entre ellas (Fig. 12).

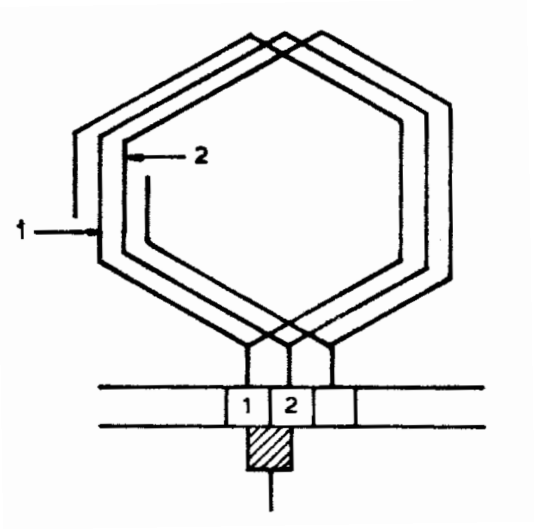


Figura 12: Conmutación entre bobinas.

Si en el instante de conmutarse la delga 1 a la delga 2 las espiras 1 y 2 están ubicadas en una posición como la mostrada en la Figura 13, la diferencia de tensión entre ambas es proporcional al área achurada.

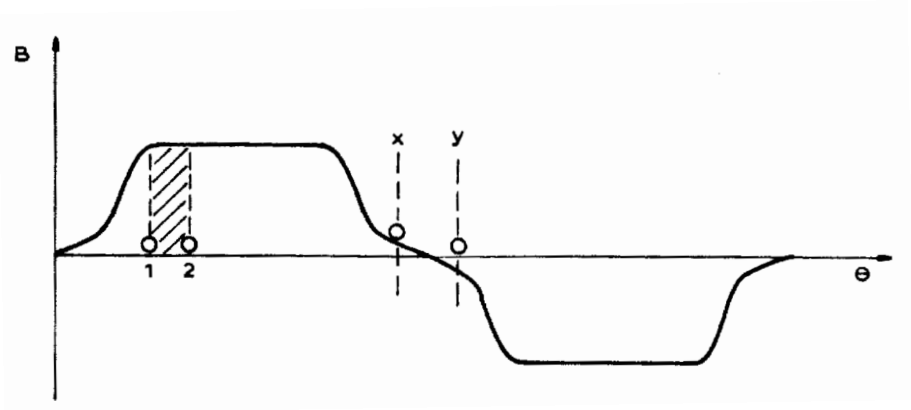


Figura 13: Ubicación de bobinas a lo largo del entrehierro, y flujo de ellas, durante la conmutación.

En cambio si la escobilla se situa en la posición x – y, la tensión entre delgas es cero, o mínima (en vacío) y la conmutación es óptima.

Cuando la máquina está con carga, o sea circulan corrientes por la armadura, se vió que la distribución de flujo en el entrehierro se modifica, lo que modifica a su vez las condiciones de conmutación.

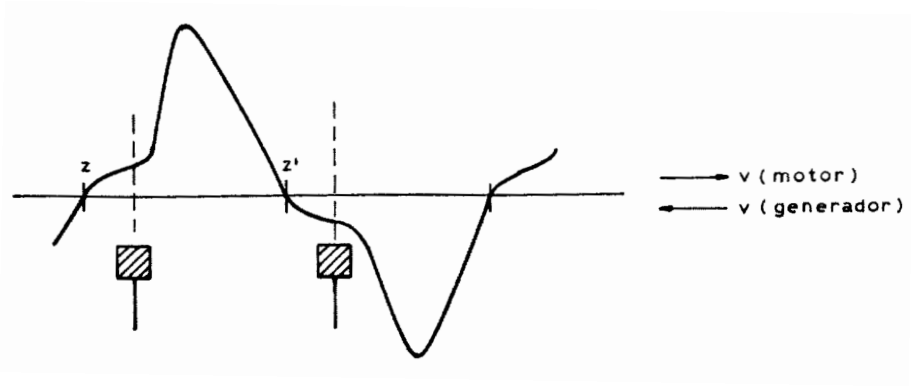


Figura 14: Condición de conmutación bajo carga.

En la Figura 14 se puede apreciar que la "zona neutra" (donde la diferencia de tensión entre delgas es nula) se desplaza como se indica, si los sentidos de giro, como motor o generador, son las que se muestran.

Para solucionar este problema, en máquinas pequeñas se emplea el "calaje" de las escobillas; esto es, cambiar la posición de las escobillas a Z – Z', lo que hace que nuevamente se desplace la zona neutra. El procedimiento se repite hasta encontrar una conmutación aceptable.

Sin embargo, el procedimiento anterior, si bien mejora la conmutación, hace que el efecto de reacción de armadura sea considerable. En la Figura 15 se muestra una máquina con sus escobillas caladas, donde puede verse claramente como el flujo total tiene un valor menor que el flujo de campo.

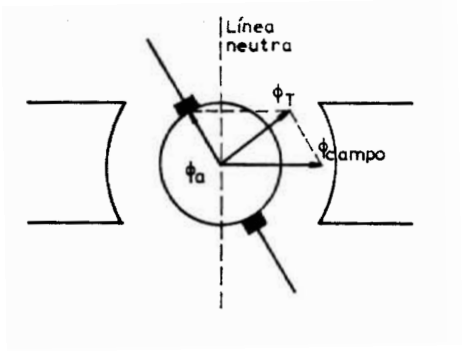


Figura 15: Máquina de C.C. con sus escobillas caladas. (Existe una componente del flujo de armadura opuesta al flujo de campo).

La solución adecuada (económica en máquinas mayores de 1 kW) es el uso de interpolos. Los interpolos son campos magnéticos ubicados a 90° eléctricos de los polos principales (Fig. 16) y excitados con la corriente de armadura, de modo que el campo producido por ellos crece en la misma proporción que la reacción de armadura.

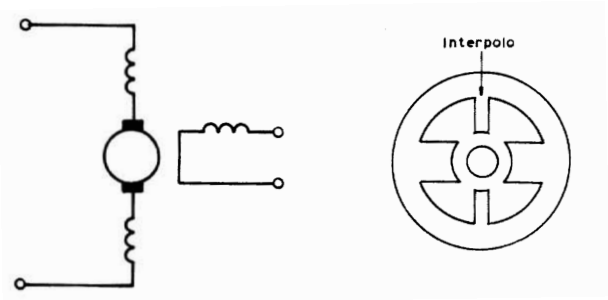


Figura 16: Diagrama eléctrico y circuito magnético de una máquina con interpolos.

En la Figura 17, se ve el efecto magnético de dichos interpolos.

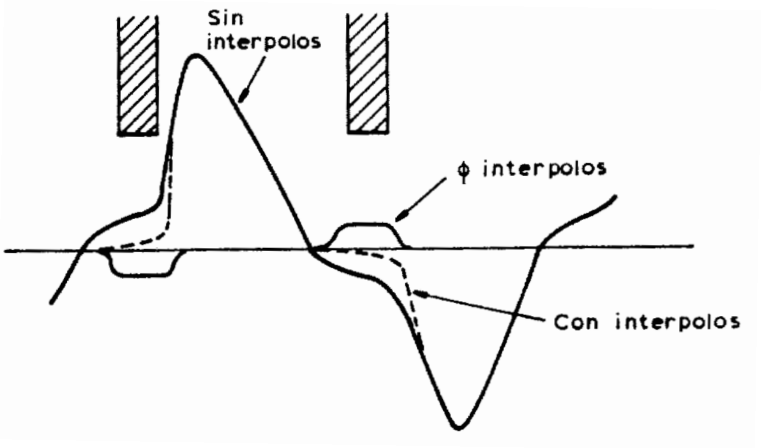


Figura 17: Diagrama eléctrico y circuito magnético de una máquina con interpolos.

3. Aspectos Constructivos

La solución de problemas prácticos (eléctricos, térmicos, mecánicos, aislaciones, etc.) ha permitido ir perfeccionando constantemente el diseño de máquinas de C.C., lo cual se puede visualizar en la Figura 18, donde se indica la evolución de la potencia extraible por unidad de peso de una máquina de C.C. Esto da también una idea de como se han reducido los tamaños y los precios por kW de potencia a través del tiempo.

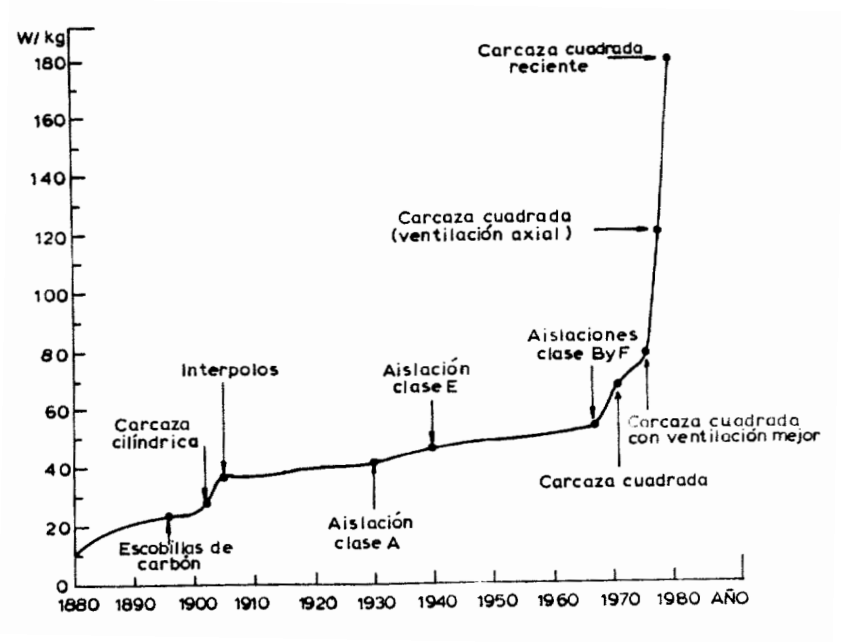


Figura 18: Evolución de los W/kg en las máquinas de C.C.

Entre las características constructivas más importantes de una máquina de C.C. destacan:

3.1. Estator

En la Figura 19 se muestra un esquema de la estructura magnética y de los enrollados de estator en una máquina de C.C.

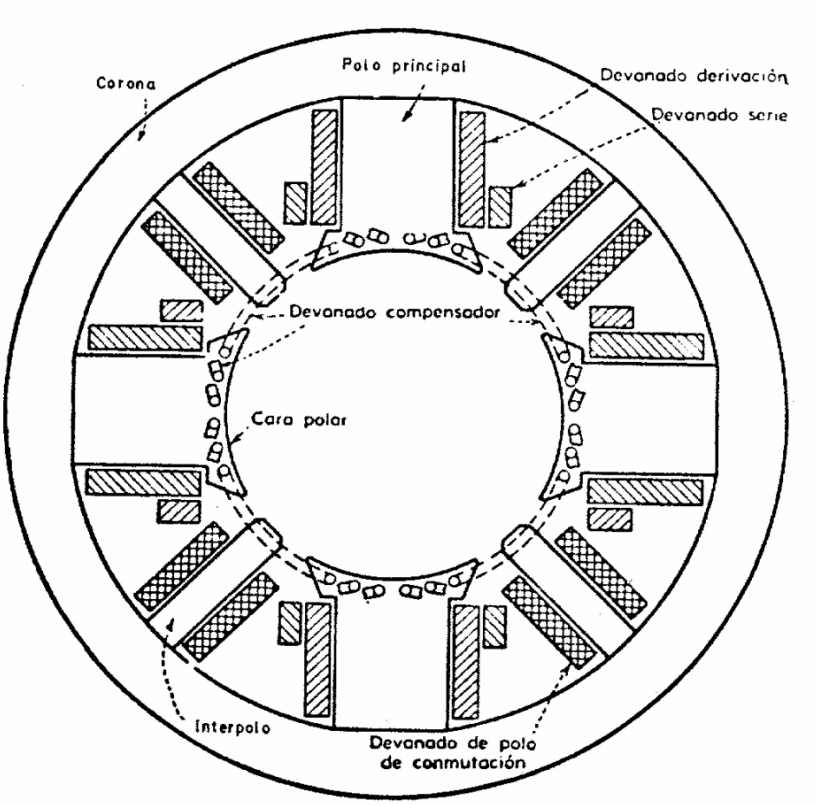


Figura 19: Estructura magnética y devanados de estator de una máquina de C.C. de 4 polos.

Detalles de una pieza polar y del devanado de campo se aprecian en la Figura 20.

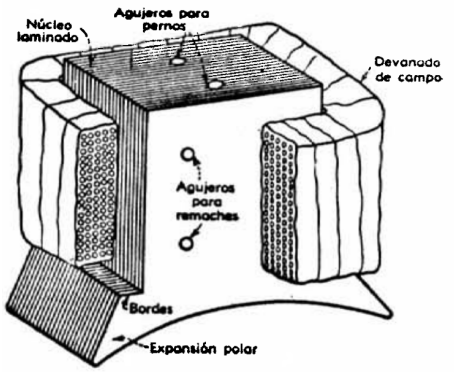


Figura 20: Vista de una pieza polar y del devanado de campo de una máquina de C.C.

3.2. Rotor

El rotor, de fierro laminado, lleva ubicadas en ranuras las bobinas de la armadura. Cada bobina está conectada a un par de delgas y el conjunto de estas forman el colector. En la Figura 21 se muestran detalles de lo anterior. En la Figura 22 se indican algunos tipos de portaescobillas y un montaje del sistema de portaescobillas.

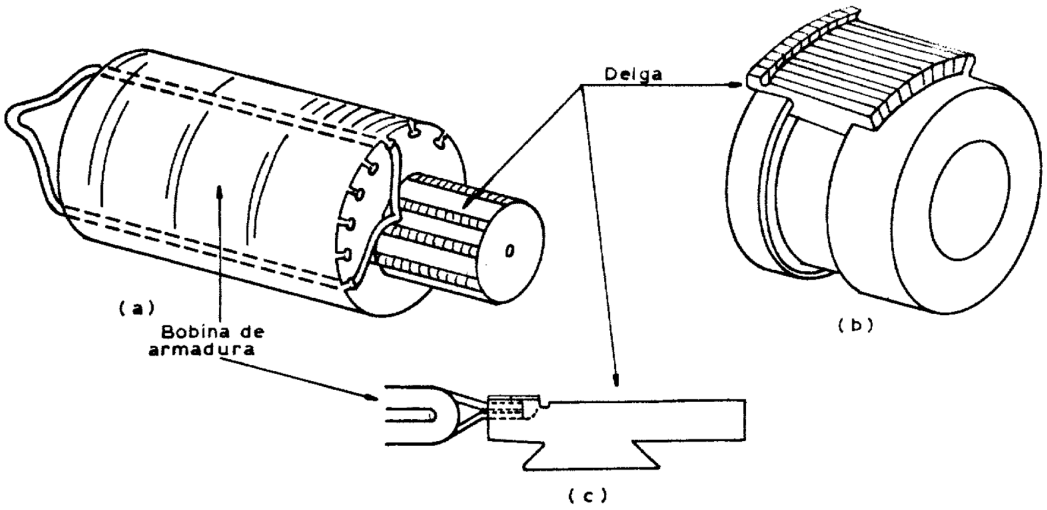
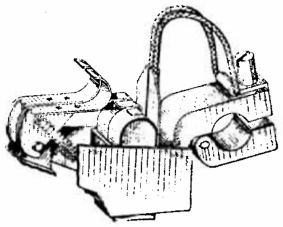
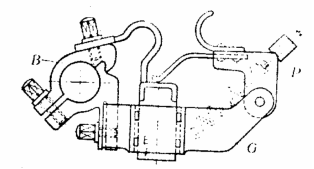


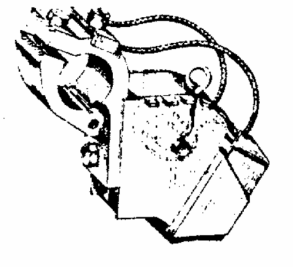
Figura 21: a) Rotor, colector y bobinas de armadura. b) Vista del colector con las delgas parcialmente ubicadas. c) Detalles de la delga y de su conexión con las bobinas de armadura



(a) Portaescobillas radial.



(b) Portaescobillas de caja.



(c) Portaescobillas oblicuo.



(d) Montaje portaescobillas para máquinas de 4 polos.

Figura 22: Elementos del sistema de contacto eléctrico entre rotor y estator.

3.3. Carcaza y accesorios

Finalmente en la Figura 23 se aprecia una máquina de C.C. comercial, en que se distinguen la carcaza y otros accesorios; además en la vista en corte se aprecian los elementos interiores.

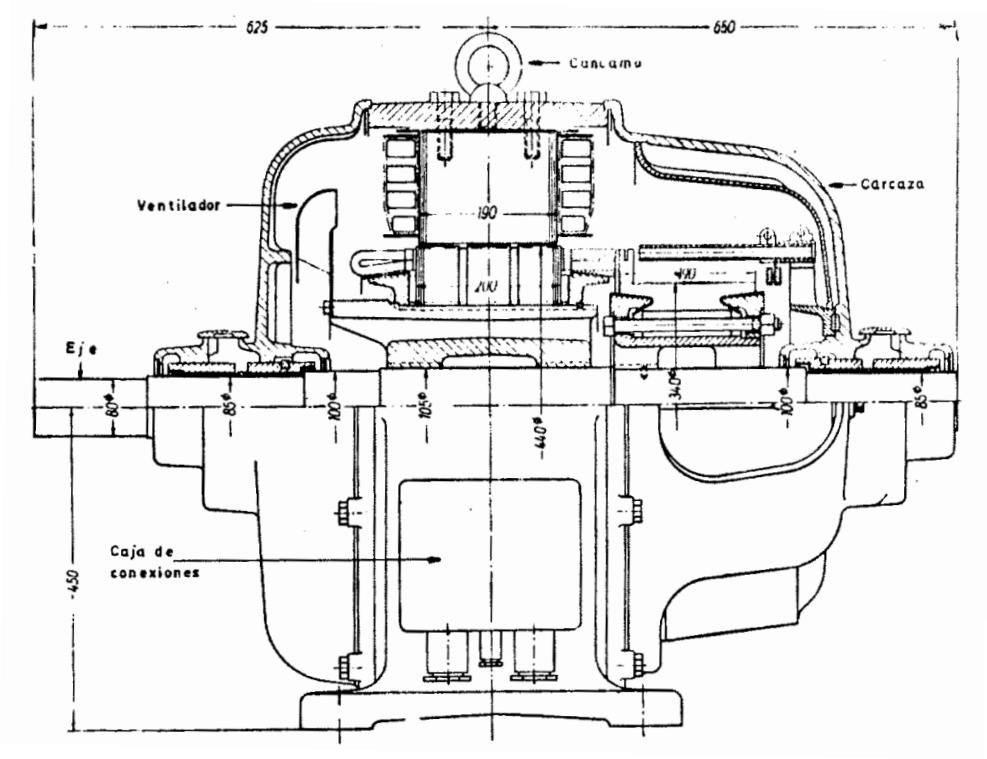


Figura 23: Máquina de C.C. de 100 kW, 240 V, 975 rpm, 435 A (B.B.C.). (Dimensiones en mm).

4. Descripción general del funcionamiento

4.1. Ecuaciones

El comportamiento estático y dinámico de una máquina de C.C. queda descrito por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$V_f = L_{ff}\frac{dI_f}{dt} + R_f I_f \tag{6}$$

$$V_a = L_a\frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_i \tag{7}$$

$$T = \frac{E_i I_a}{\omega} \tag{8}$$

$$J\frac{d\omega}{dt} = T - T_{mec} \tag{9}$$

donde:

- V_f, I_f: tensión aplicada y corriente entrando al campo.
- V_a, I_a: tensión aplicada y corriente entrando a la armadura.
- E_i: fem generada en la armadura.
- T: torque de origen electromagnético.
- T_{mec}: torque mecánico.
- ω: velocidad de giro.
- J: momento de inercia del rotor y las masas acopladas al eje.
- L_{ff}, R_f: inductancia y resistencia del campo.
- L_a, R_a: inductancia y resistencia del circuito de armadura (armadura, escobillas, etc.).

Además, para una máquina con un solo campo:

$$E_i = G\omega I_f \tag{10}$$

con lo que

$$T = GI_f I_a \tag{11}$$

siendo G la denominada inductancia de rotación.

Debe notarse que las parámetros de la máquina no son constantes. Por ejemplo $R_a = R_{armadura} + R_{escobillas} + R_{colector}$ es función de la corriente por la escobilla entre otras cosas. G depende fuertemente de I_f (de la saturación), y de algún modo de I_a (reacción de armadura). Sin embargo, para pequeñas variaciones en torno a un punto, estos parámetros pueden considerarse constantes.

Por lo anterior, para determinar los puntos de régimen permanente normalmente se prefiere la determinación gráfica a partir de las curvas características experimentales de la máquina, las que incluyen las variaciones de los parámetros y cuya determinación se explica en las secciones 5 y 6.

4.2. Curvas características

Las curvas características más destacadas son:

- Para generadores:

  i) La característica en vacío, o curva de magnetización:

  $$E = f(I_f); \qquad \omega \text{ constante}$$

  ii) La característica en carga:

  $$V_a = f(I_f); \qquad \omega \text{ e } I_a \text{ constantes}$$

iii) La característica externa:

$$V_a = f(I_a); \qquad \omega \text{ constante}$$

iv) La curva de regulación:

$$I_f = f(I_a); \qquad V_a \text{ y } \omega \text{ constantes}$$

- Para motores:

i) La característica en vacío:

$$E = f(I_f); \qquad \omega \text{ constante}$$

ii) Curva torque velocidad, o característica de torque:

$$T = f(\omega); \qquad V_a \text{ constante}$$

iii) Curva de torque-corriente:

$$T = f(I_a); \qquad V_a \text{ constante}$$

iv) Curva corriente de carga-velocidad:

$$I_a = f(\omega); \qquad V_a \text{ constante}$$

También es posible, para fines especiales, obtener curvas $\omega = f(I_f)$ con V_a constante; $\omega = f(V_a)$, con I_f constante; etc.

5. Características de generadores de C.C.

5.1. Generador con excitación separada

5.1.1. Característica en vacío o de excitación

Es la prueba que relaciona la tensión generada en vacío ($I_a = 0$) con la corriente de excitación I_f. Esta característica es la misma para una máquina dada operando como motor o generador, y para cualquier tipo de conexión. Experimentalmente se determina con la máquina operando como generador de excitación separada (Figura 24).

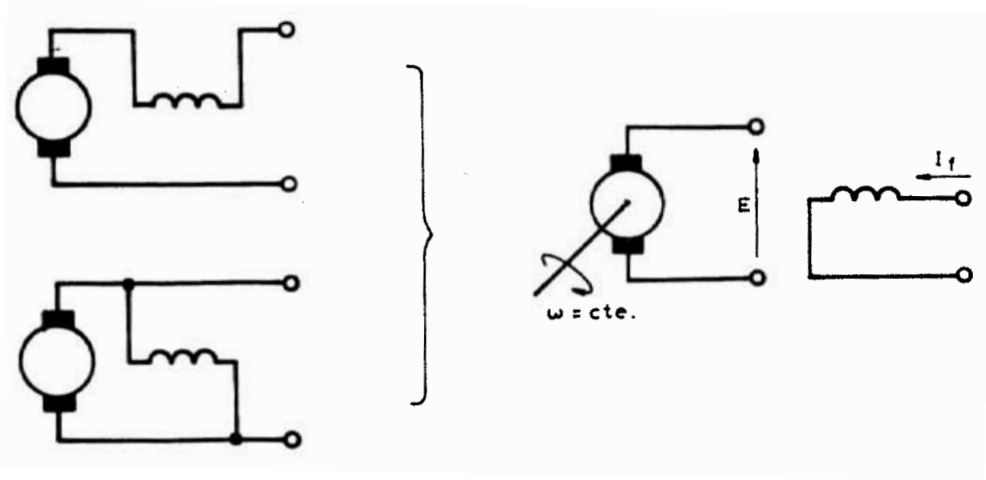


Figura 24: Prueba en vacío, para obtener la característica de excitación.

Para efectuar dicha prueba, la máquina debe ser accionada por máquina a una velocidad constante, en especial la velocidad nominal. El enrollado de campo debe excitarse de modo independiente con una corriente variable, de acuerdo al tipo de campo que se trate (corrientes bajas si es shunt, o altas corrientes y baja tensión aplicada, si el enrollado es serie).

Notas:

1. La velocidad debe mantenerse rigurosamente constante.
2. La corriente de excitación debe variarse primero en un único sentido, y luego en el otro. De otro modo se comenten errores como los de la Figura 25, debido a las características magnéticas del núcleo.

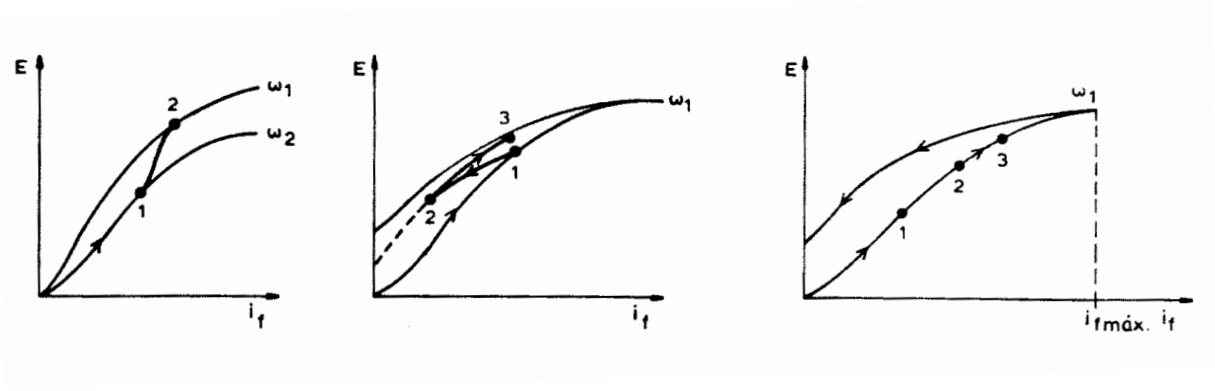


Figura 25: Obtención de la curva en vacío.

Cabe indicar que esta misma prueba puede servir para determinar curvas propias del fierro del núcleo, como las indicadas en la Figura 26.

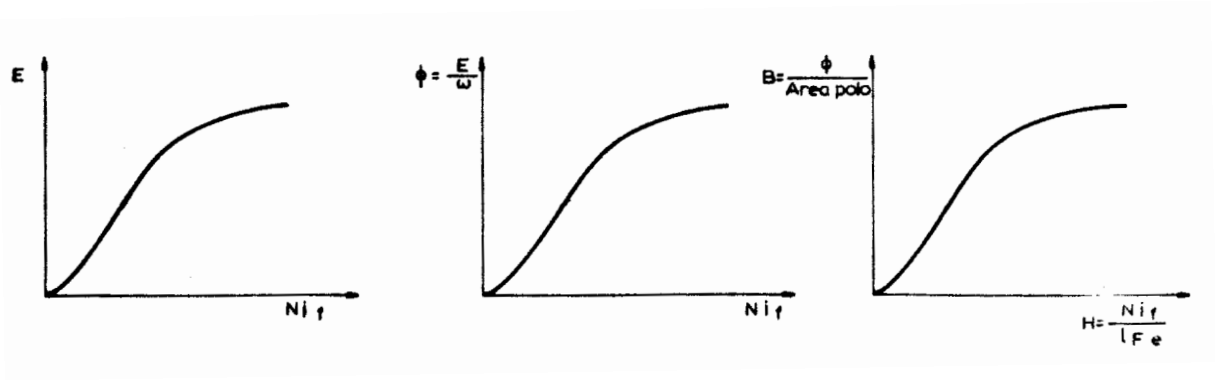


Figura 26: Curva de magnetización en vacío, de flujo enlazado y características B-H del fierro.

También de la curva de magnetización es posible obtener el valor de la inductancia rotacional G usada en la ecuación (10), como se indica en la Figura 27.

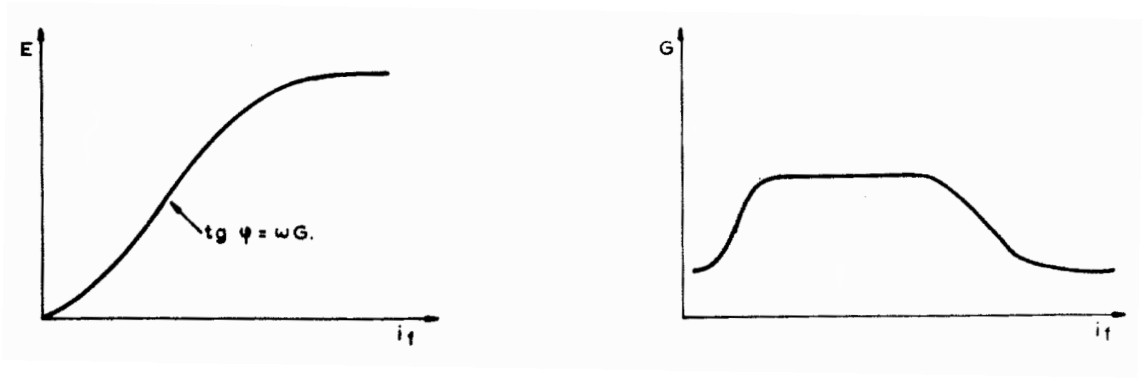


Figura 27: Obtención de G.

Debe notarse que en la zona cercana al origen, G no está claramente definido, ya que si existe flujo remanente, G tiende a infinito, y si no existe flujo remanente, G tiene a un valor finito.

5.1.2. Característica en carga

La característica en carga de un generador de C.C. representa la relación entre la tensión en bornes y la corriente de excitación, manteniendo I_a y ω constante.

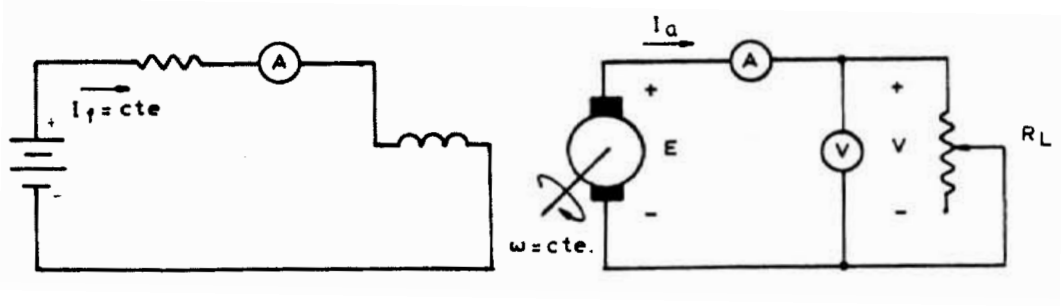


Figura 28: Obtención experimental de la característica en carga en un generador de excitación separada.

En la Figura 28 se indica el diagrama de conexiones para determinar experimentalmente dicha característica en un generador de excitación independiente, donde la resistencia de carga R_L debe ser ajustada para un valor de I_f, de modo que I_a se mantenga constante. También debe operarse convenientemente sobre la máquina motriz para mantener ω constante.

En la Figura 29 se indica la forma típica de la característica de carga así obtenida (curva I), junto a la curva de excitación (Curva II). En el punto R, la tensión de salida es cero, y toda la tensión interna generada es compensada por las caídas de tensión en la resistencia de armadura (I_a R_a), y en las escobillas (ΔV_e), es decir $u = I_a R_a + \Delta V_e$.

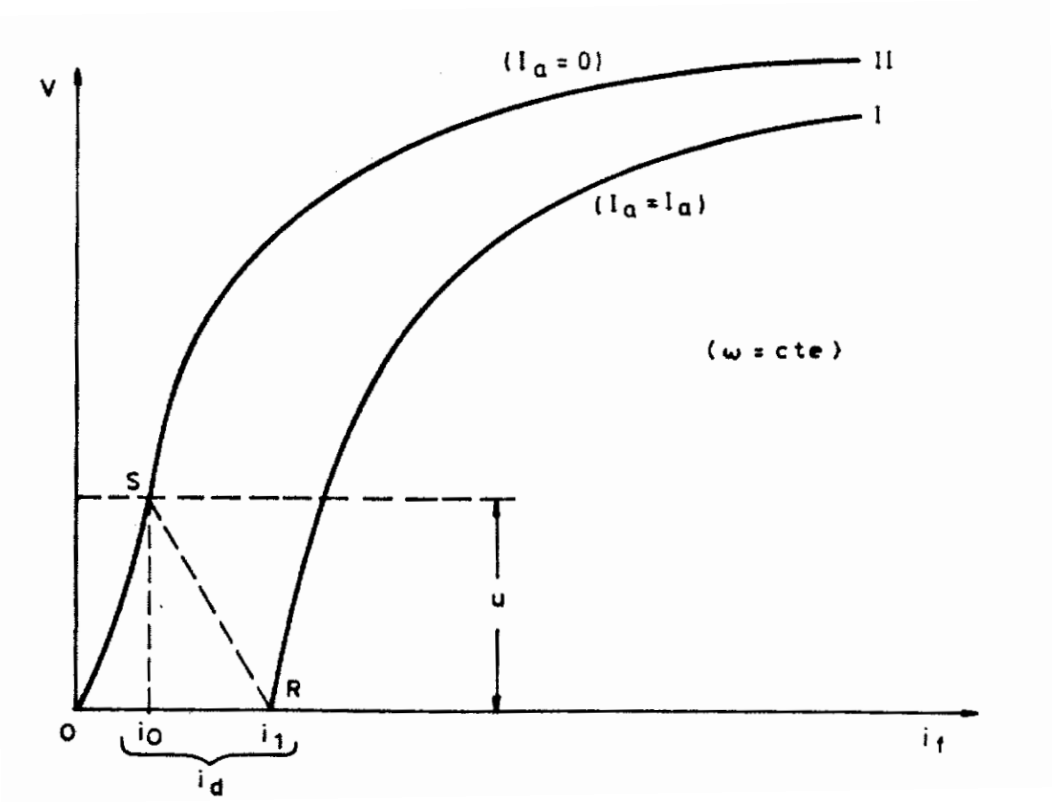


Figura 29: Características en carga y vacío.

Para generar u en vacío, sólo es necesario una excitación i_0 (punto S en la figura); sin embargo, para obtener la misma tensión generada u, cuando circula I_a, es necesaria una corriente de excitación i_1 (punto R) siendo $i_d = i_1 - i_0$, la parte adicional a i_0 necesaria para compensar el efecto de reacción de armadura.

Resumiendo, cuando circula la corriente de armadura I_a, la caída de tensión interna (escobillas, resistencias) es u, y el efecto de reacción de armadura se puede considerar como una corriente desmagnetizante i_d, proporcional a I_a.

Se concluye entonces que conocidos u e i_d para cierto valor de I_a, se puede dibujar la curva característica a partir de la curva de excitación, siendo ambas paralelas. En la Figura 30 se indica gráficamente el procedimiento:

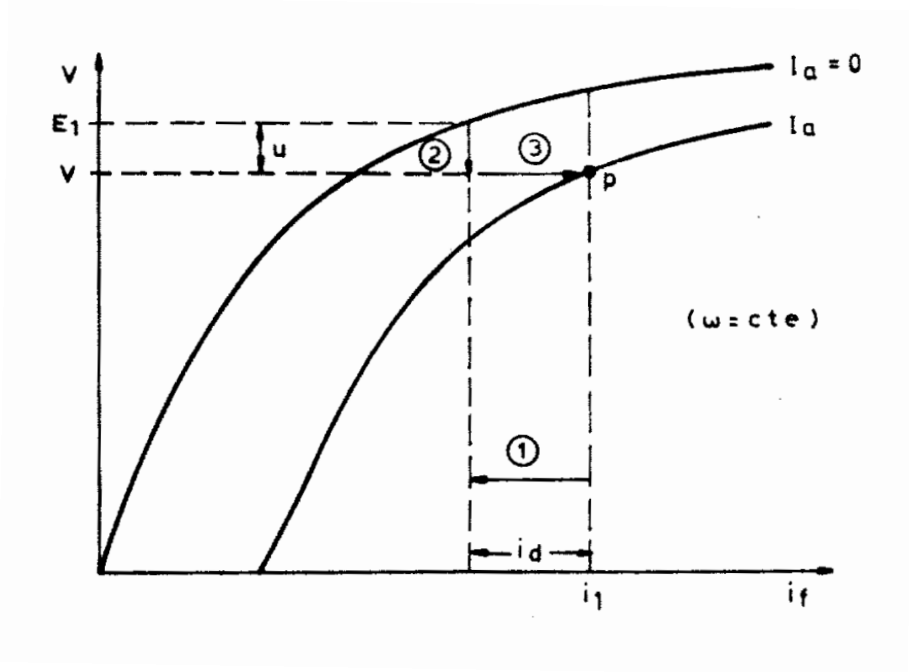


Figura 30: Obtención gráfica de la característica en carga a partir de la curva de excitación.

1. A la corriente de excitación i_1 se le resta i_d (función de I_a) y esto determina E_1, sobre la curva de excitación;
2. A E_1 se le resta la caída de tensión interna u, obteniéndose V;
3. La intersección de V e i_1 determina el punto P de la característica de carga, siendo V la tensión en bornes de la máquina de C.C. cuando circula I_a y la excitación es i_1.

El método gráfico anterior es sólo aproximado, ya que el valor de i_d ha sido determinado en la zona lineal. Para I_f en la zona saturada i_d es mayor, siendo por lo tanto los valores reales de V, ligeramente menores que los determinados gráficamente según el método expuesto.

5.1.3. Característica externa

Esta curva relaciona la tensión en bornes con la corriente de carga o de armadura, con excitación constante.

En la Figura 31 se indica un circuito para determinar experimentalmente la característica externa de un generador de excitación separada.

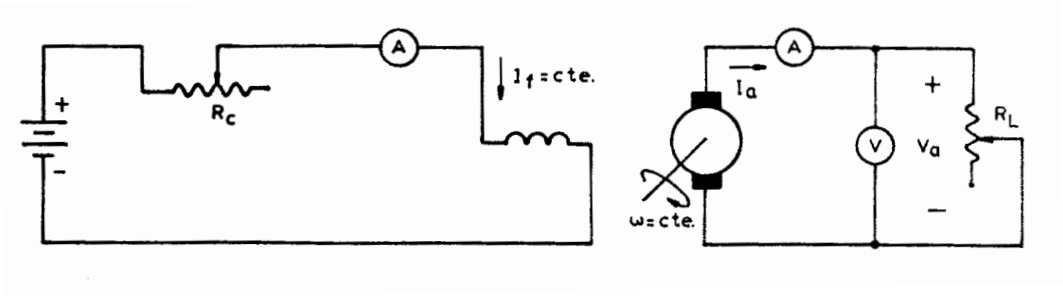


Figura 31: Circuito experimental para determinar la característica externa de un generador de excitación separada.

La carga R_L se varía de modo que la corriente de carga varíe entre 0 y la nominal, tomando lecturas de corriente y tensión simultáneamente. Durante toda la prueba deben mantenerse I_f y ω constantes.

En la Figura 32 se indica el tipo de curva obtenida. V es la tensión en bornes, $V - u = E$ es la tensión interna generada por el flujo resultante. E_0 es la tensión interna generada en vacío. Por lo tanto $E_0 - E$ es la caída de tensión debida al efecto de reacción de armadura.

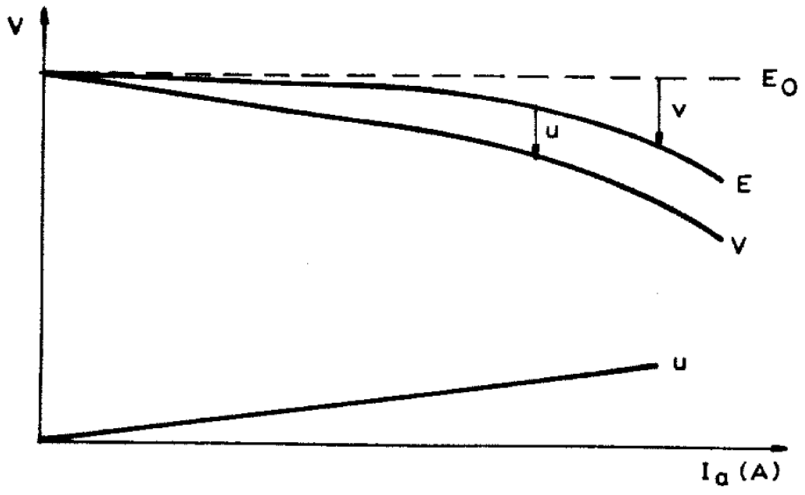


Figura 32: Característica externa de un generador de excitación independiente.

La característica externa puede también determinarse gráficamente a partir de la curva de excitación si se conocen los valores de la caída de tensión interna u, y de la corriente desmagnetizante

i_d para cada valor de I_a (o las respectivas constantes de proporcionalidad). En la Figura 33, se muestra dicho método.

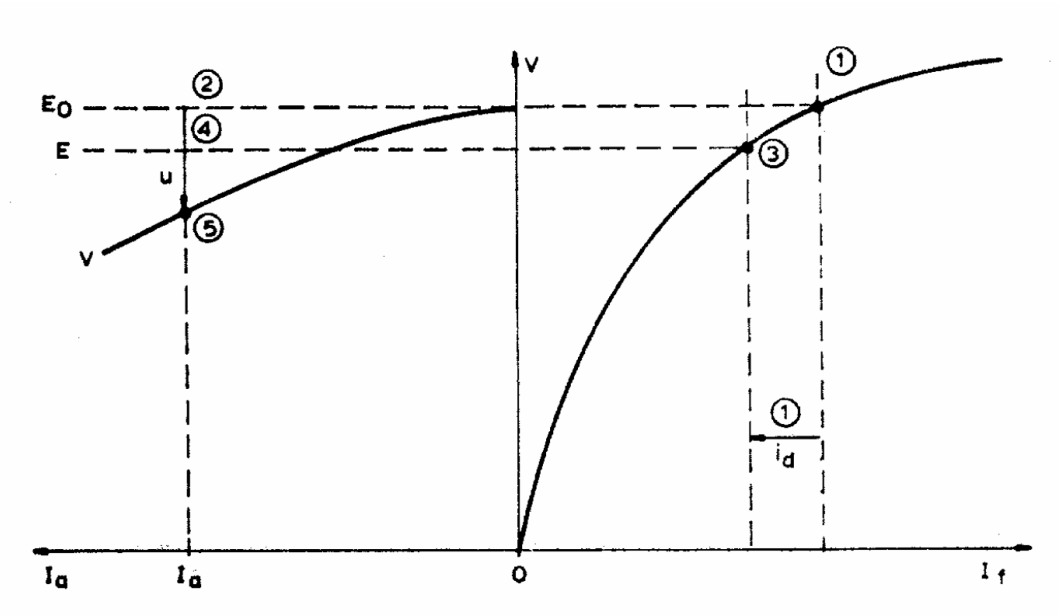


Figura 33: Obtención de la característica externa a partir de la curva de excitación.

5.1.4. Curva de regulación

Para mantener en un generador la tensión en bornes constante, al aumentar la corriente de carga I_a, debe aumentarse la corriente de excitación. La curva de regulación, $I_f = f(I_a)$, determina la corriente de campo necesaria para lograr dicha condición, para distintos valores de la corriente de armadura, manteniendo la velocidad de giro constante.

En la Figura 34 se indica un circuito para obtener experimentalmente la curva de regulación en un generador de excitación separada, y en la Figura 35 se muestra la curva obtenida.

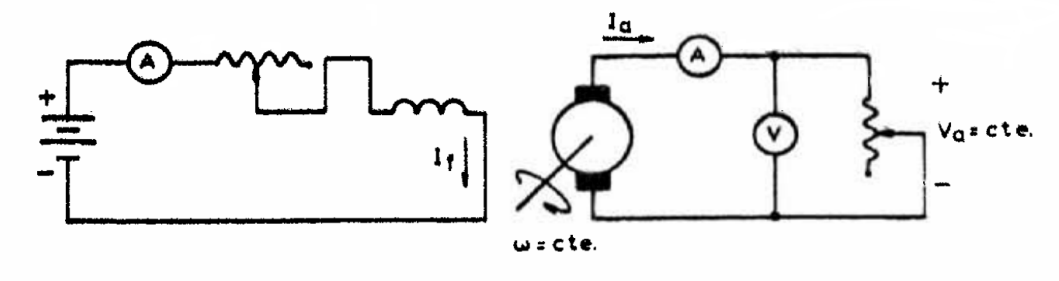


Figura 34: Circuito experimental para determinar la curva de regulación.

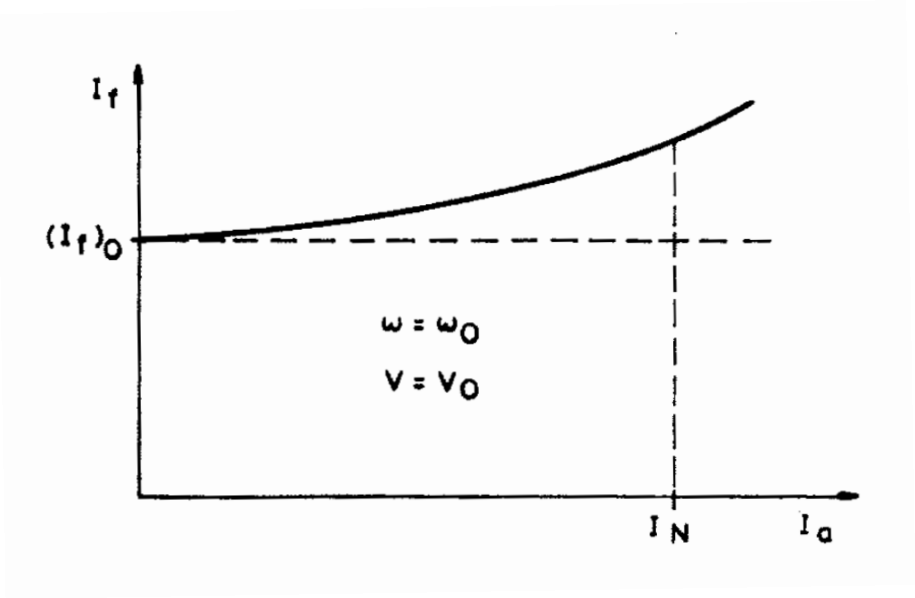


Figura 35: Curva de regulación de un generador de excitación separada.

$(I_f)_0$ es la corriente de excitación necesaria para obtener V_0 en vacío cuando la máquina gira a ω_0. Para $I_a > 0$ es necesaria una excitación adicional a $(I_f)_0$ que compense las caídas de tensión internas, $u = R_a I_a + \Delta V_e$, y la reacción de armadura.

5.2. Generador Shunt

5.2.1. El fenómeno de autoexcitación

Este fenómeno, que se presenta en generadores con excitación en paralelo, es básicamente un proceso de realimentación positiva. Estos procesos son generalmente inestables; sin embargo, en este caso se alcanza un punto estable gracias a la característica no lineal del fierro. Si la máquina ha generado tensión alguna vez, queda un cierto flujo remanente característico del fierro y de la historia magnética de la máquina.

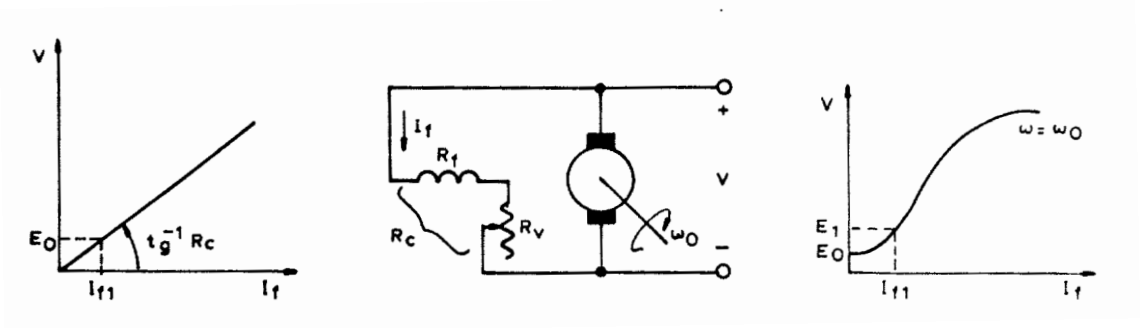


Figura 36: Releaciones de tensión – corriente, para el circuito de excitación y para el circuito de armadura.

Así al conectarse la máquina sin carga como en la Figura 36, el campo queda con una tensión aplicada E_0, la que de acuerdo a la resistencia total $R_c = R_f + R_v$ del circuito de excitación, hace

circular una corriente de excitación I_{f1}. La corriente de excitación I_{f1} provoca una tensión E_1, la cual hace circular una corriente de excitación mayor, y así sucesivamente (Figura 37).

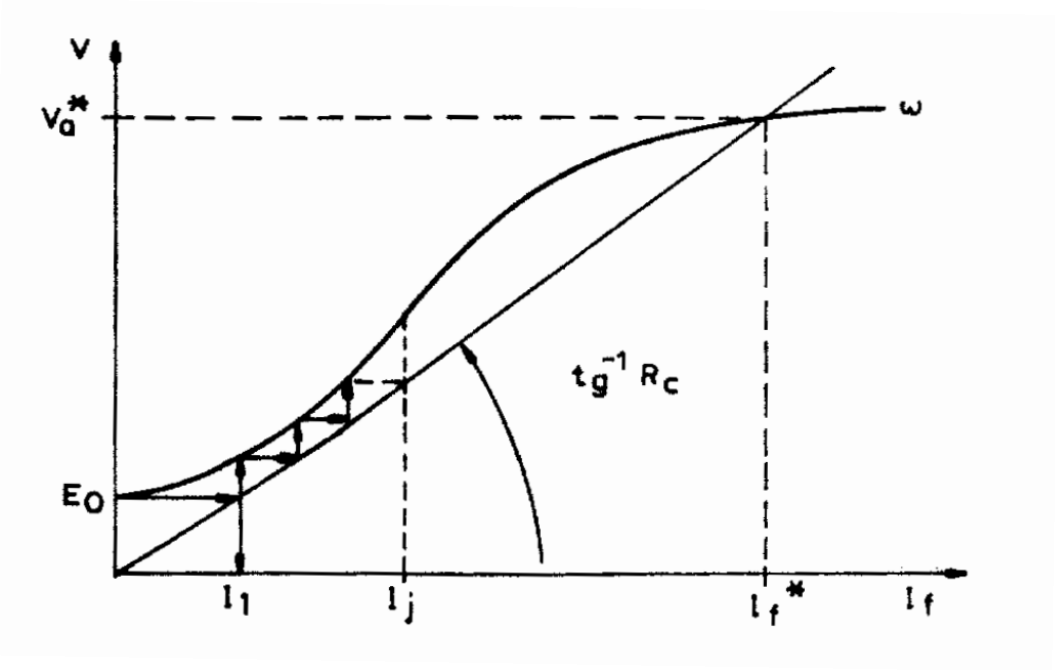


Figura 37: Representación gráfica del fenómeno de autoexcitación.

Este proceso termina a causa de la saturación del fierro, cuando la tensión V aplicada al campo es idéntica al a tensión generada V_a^* para un valor de la corriente de campo I_f^*.

El valor V_a^* finalmente alcanzado depende claramente de la velocidad de giro, de la resistencia R_c total en el circuito de excitación y de la característica de magnetización del fierro.

Se define como "resistencia crítica" al valor R_c de la resistencia en el circuito de excitación para el cual no existe un único punto estable de funcionamiento; es decir cuando la pendiente $V = R_c I_f$ coincide con la parte lineal de la curva de excitación. En la Figura 38, se indica un método gráfico para determinar la resistencia crítica.

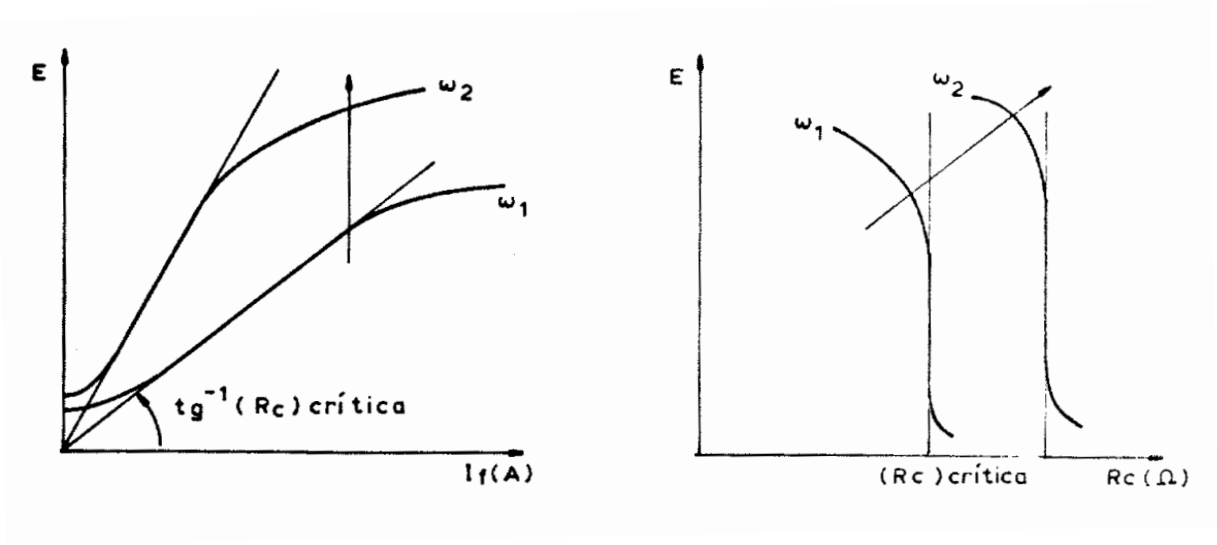


Figura 38: Determinación del valor de resistencia crítica.

5.2.2. Característica en vacío

Como se dijo en 5.1.1. esta prueba se hace con la excitación en forma separada. La curva obtenida y el método de prueba ya han sido indicados en 5.1.1.

5.2.3. Característica en carga

Esta característica casi coincide con la característica en carga del generador de excitación separada. Usualmente se toma esta última (desarrollada en 5.1.2.) para ambos tipos de máquina.

5.2.4. Característica externa

En la Figura 39 se indica un circuito experimental para determinar la característica externa de un generador shunt. Durante esta prueba, el valor R_c de la resistencia en el circuito de campo debe mantenerse constante, al igual que la velocidad de giro.

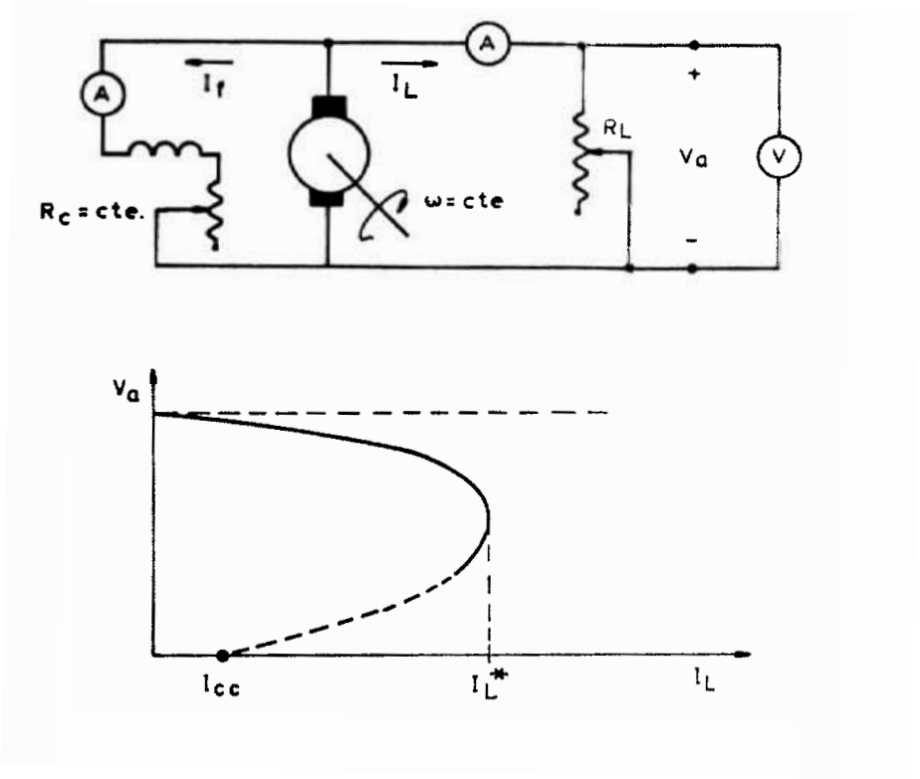


Figura 39: Determinación de característica externa de un generador shunt.

Puede apreciarse que para un cierto valor I_L^* (corriente de carga crítica) la característica externa retrocede hasta I_{cc}, que corresponde al valor de corriente de cortocircuito. Esta corriente tiene un valor reducido, pues en condiciones de cortocircuito ($V_a = 0$ ó $R_L = 0$, ver también Fig. 40), la tensión aplicada al campo es cero y la tensión generada es sólo la remanente.

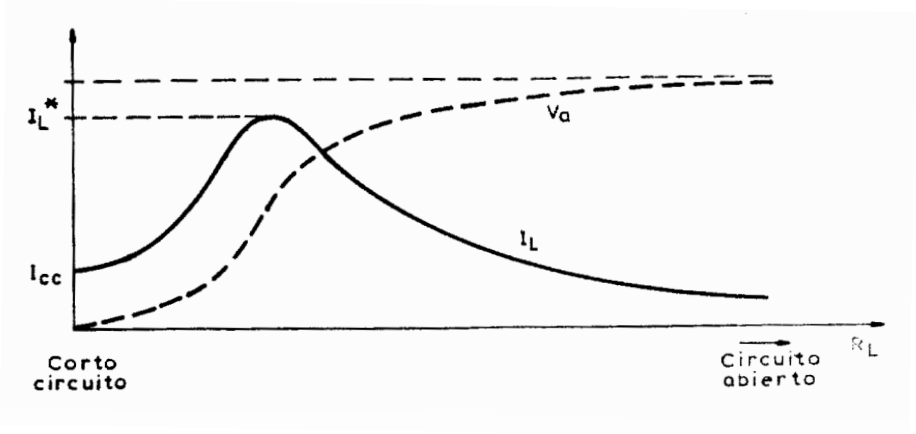


Figura 40: Variación de V_a e I_L al variar la resistencia de carga R.

5.2.5. Curva de regulación

Se define y determina igual que en el generador de excitación separada (punto 5.1.4.).

5.3. Generador serie

Las característica en vacío y en carga deben tomarse (y definirse) con el enrollado serie excitado independientemente.

La característica externa se determina con el circuito experimental de la Figura 41 variando la resistencia de carga.

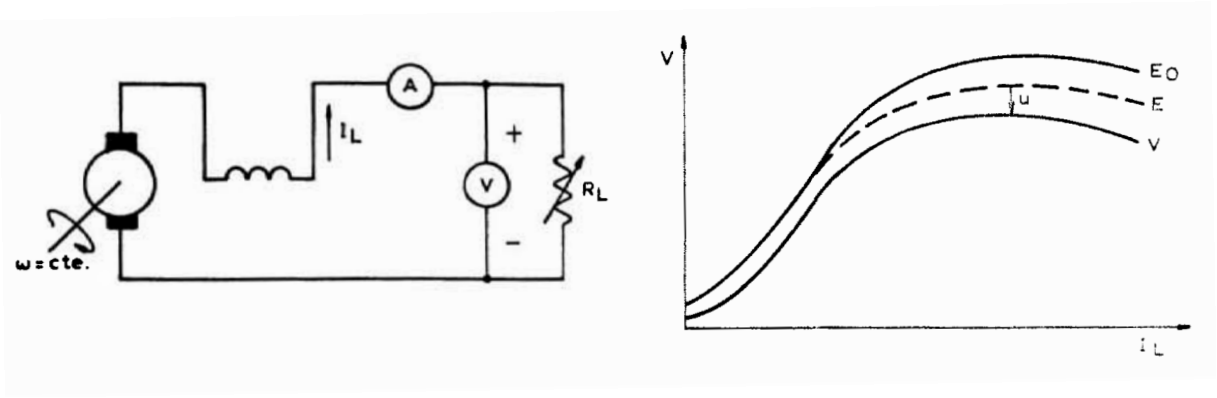


Figura 41: Característica externa del generador serie.

Para comenzar el proceso de generación, la máquina debe ser cortocircuitada y luego aumentarse paulatinamente la resistencia de carga, para ir aumentando simultáneamente la tensión y la corriente de carga (y de excitación).

La deficiente característica que se obtiene, hace que este tipo de generador se use sólo en aplicaciones muy especiales. Asimismo, la curva de regulación no tiene sentido para este generador.

5.4. Generador compound

Con el fin de compensar las caídas de tensión bajo carga, en el generador shunt se introduce una realimentación de corriente de carga en el flujo de entrehierro, como se meustra en la Figura 42.

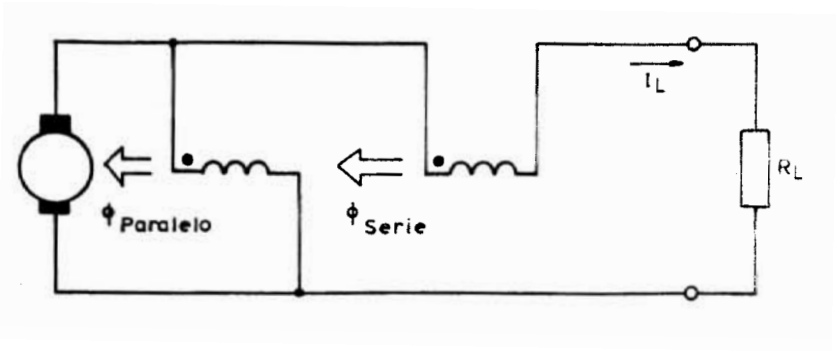


Figura 42: Máquina compound.

Así, la corriente de carga I_L produce un flujo de refuerzo ϕ_{serie}, proporcional a su valor. En este caso se habla de máquina compound acumulativa. Si el flujo del campo serie se resta al campo paralelo, la máquina es compound diferencial.

En un generador compound acumulativo, la característica externa está bastante cercana a la cota E_0 (tensión en vacío) gracias a esta compensación, como se muestra en la Figura 43.

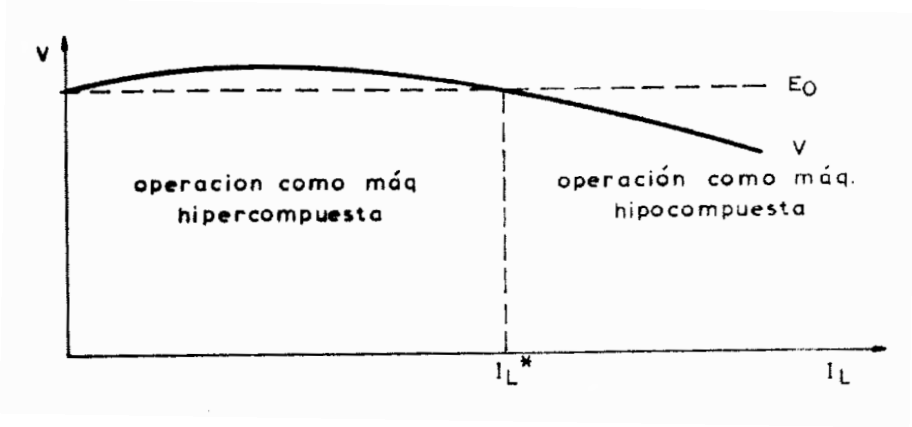


Figura 43: Característica externa del generador compound.

Si se diseñan los enrollados de campo serie y paralelo de modo que para corriente nominal la tensión en bornes sea la nominal, e igual a la de vacío (regulación = 0), se dice que el generador es compuesto plano.

Generadores compuesto diferenciales sólo se usan en aplicaciones especiales donde sea necesario un gran valor de regulación (grandes variaciones en la tensión de salida en vacío y a plena carga).

5.5. Aplicaciones de generadores de C.C.

Sin lugar a dudas es en el ámbito de la generación de C.C. donde la máquina de C.C. ha perdido más terreno, siendo reemplazada por sistemas de rectificación de estado sólido. Sin embargo, conviene tener en mente las principales características de los generadores de C.C. que definen sus aplicaciones desde un punto de vista sólo eléctrico.

El generador compuesto acumulativo era el más ampliamente usado (ahora en reemplazo se usan sistemas rectificadores) por su característica de voltaje plana (regulación cero), lo que permite alimentar circuitos a una tensión constante.

El generador compuesto diferencial es recomendable en aplicaciones donde se necesita una tensión inicial relativamente alta y luego una tensión reducida a medida que la corriente se eleva, como es el caso de la soldadura al arco (soldaduras rotativas), y otros proceso de arco.

El generador shunt y de excitación separada tienen en general una buena regulación de tensión (pero peor que el generador compuesto acumulativo) y son recomendables en laboratorios y en aplicaciones donde los requisitos de regulación no sean exigentes.

El generador serie es raramente usado y sólo se emplea donde sea necesaria una característica $V - I_L$ creciente.

En la Figura 44 se resumen las características de los distintos tipos de generadores de corriente continua.

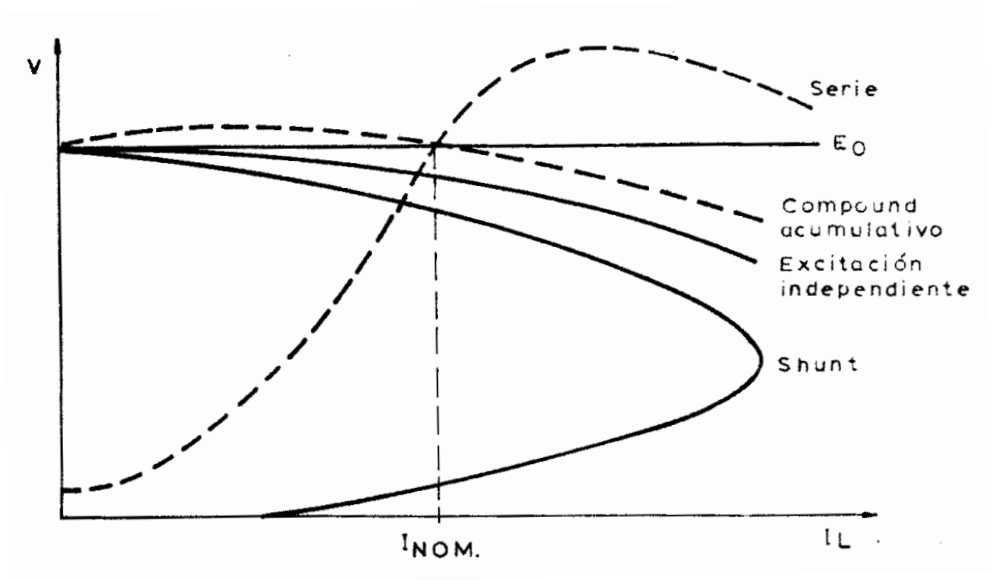


Figura 44: Características externas de generadores de C.C.

6. Características de motores de C.C.

6.1. Motor con excitación separada y motor shunt

Ambos motores pueden ser tratados simultáneamente, ya que en régimen permanente los circuitos de campo y de armadura no tienen interacciones eléctricas (sólo magnéticas).

La curva en vacío es la misma que para generador (vista en 5.1.1.) por lo que no se repetirá aquí.

6.1.1. Curva torque – velocidad

En régimen permanente la tensión aplicada a la armadura es:

$$V_a = R_a I_a + G I_f \omega \tag{12}$$

y el torque desarrollado:

$$T = G I_f I_a \tag{13}$$

de donde puede obtenerse la relación torque – velocidad:

$$T = \left(\frac{G I_f}{R_a} \right) [V_a - G I_f \omega] \tag{14}$$

que se muestra gráficamente en la Figura 45:

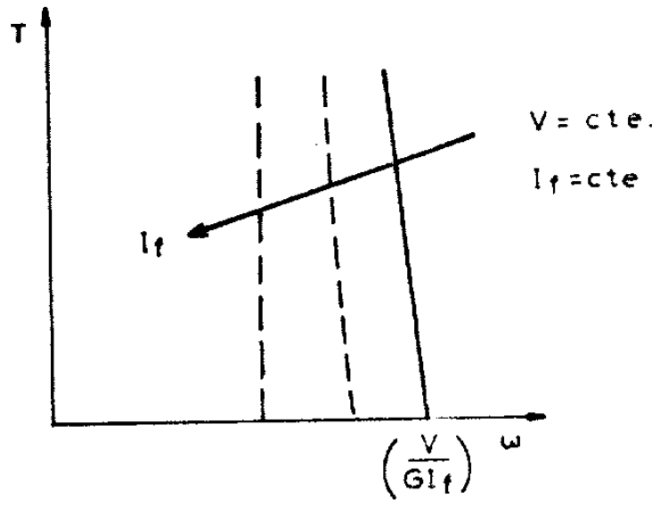


Figura 45: Curva torque – velocidad motor shunt.

Experimentalmente dicha relación puede obtenerse en el esquema de la Figura 46.

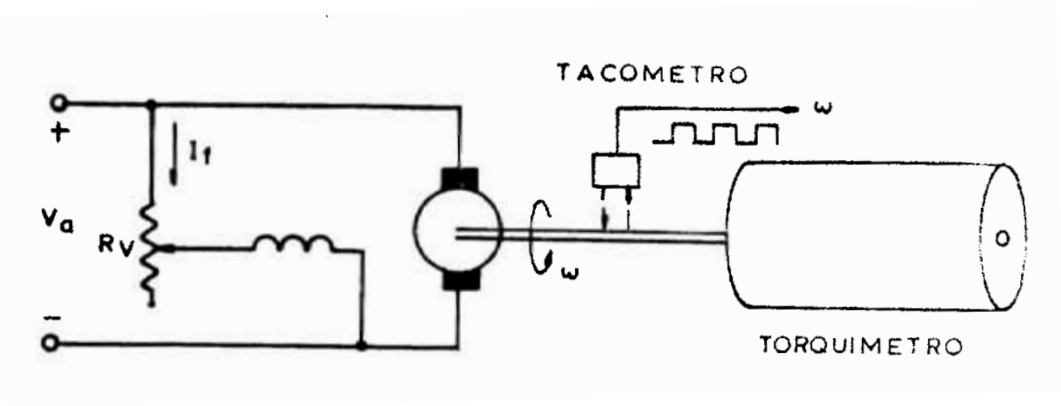


Figura 46: Esquema experimental para la determinación de la curva torque – velocidad de motor shunt.

En la misma Figura 45 puede apreciarse el efecto de aumentar la corriente de excitación, sobre la característica $T - \omega$.

6.1.2. Característica torque – corriente

De la relación (13) se deduce que la característica $T - I_a$ debeira ser una recta para $I_f =$ constante. Sin embargo, como se muestra en la Figura 47, para valores de I_a mayores que el 50 % del nominal, la curva difiere de una recta.

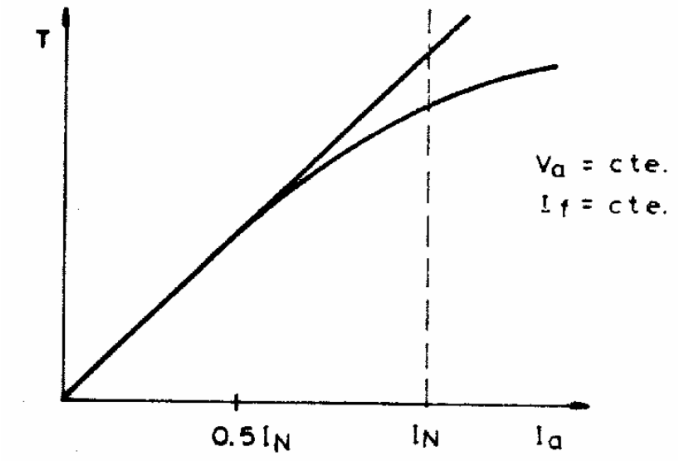


Figura 47: Característica torque – corriente en un motor shunt.

Esto se debe a que el valor de la inductancia rotacional equivalente es una función del nivel de saturación, definido principalmente por I_f; y además es una función de la reacción de armadura, definido principalmente por I_a.

Así, para $I_f =$ cte, el valor de G disminuye al aumentar I_a, lo que explica la forma de la curva $T - I_a$ del motor shunt. Esta curva puede obtenerse experimentalmente punto a punto con el

esquema indicado en la Figura 46 intercalando adecuadamente un amperímetro para la medición de I_a.

6.1.3. Característica velocidad – corriente

De la ecuación (12) se obtiene la relación $\omega - I_a$:

$$\omega = \frac{V - R_a I_a}{G I_c} \tag{15}$$

cuya interpretación gráfica corresponde a la Figura 48 (a), si los efectos de las caídas de tensión ($R_a I_a$) predominan sobre la reacción de armadura (reducción de G), y a la Figura 48 (b), si el efecto de la reacción de la reacción de armadura predomina sobre las caídas de tensión. En las máquinas reales ambos fenómenos están presentes y tienden a compensarse, obteniéndose una curva cercana a la curva (c).

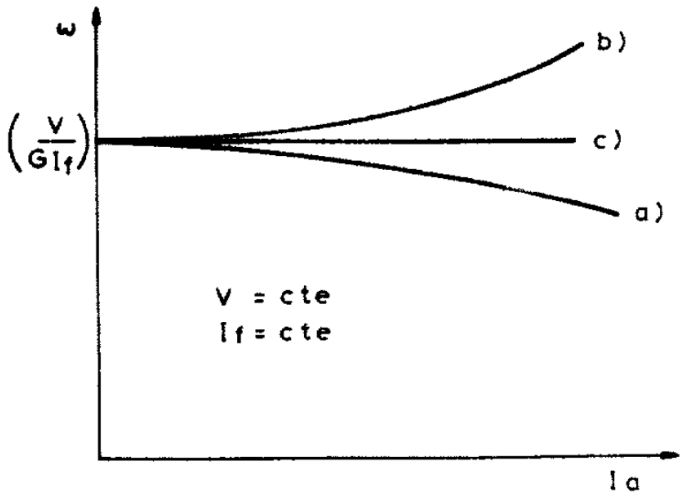


Figura 48: Características $\omega - I_a$ de un motor shunt, donde en (a) dominan las caídas de tensión y (b) domina la reacción de armadura.

Experimentalmente esta curva puede obtenerse con el esquema mostrado en la Figura 46.

6.2. Motor serie

Al igual que para el generador serie, la característica en vacío se debe tomar con el enrollado serie excitado independientemente (ver 5.1.1.).

6.2.1. Curva torque – velocidad

En el motor serie (Figura 50), la corriente de armadura es igual a la corriente de excitación, es decir:

$$I_f = I_a \tag{16}$$

por lo tanto la ecuación (13) se transforma en

$$T = GI_a^2 \tag{17}$$

y de la ecuación (12) se obtiene I_a, como:

$$I_a = \frac{V}{R_a + G\omega} \tag{18}$$

de modo que:

$$T = \frac{GV^2}{(R_a + G\omega)^2} \tag{19}$$

cuya representación gráfica, $T - \omega$, se indica en la Figura 49.

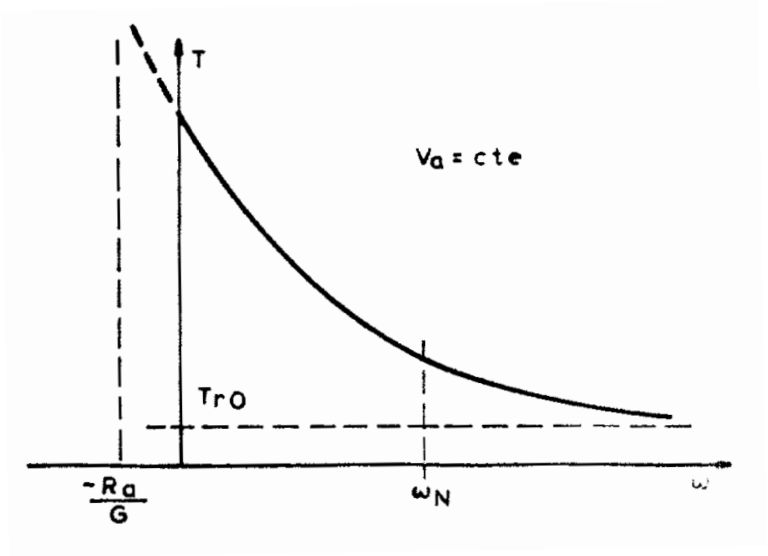


Figura 49: Característica $T - \omega$ de un motor serie.

La característica torque – velocidad de un motor serie puede ser obtenida experimentalmente mediante el montaje representado en la Figura 50.

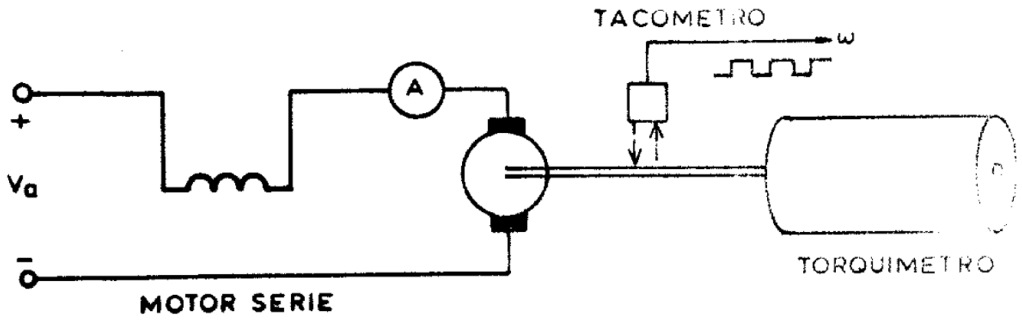


Figura 50: Montaje experimental para la obtención de las curvas $T - \omega$, $T - I_a$, $\omega - I_a$ de un motor serie.

Debe destacarse que:

- **Un motor serie nunca debe conectarse a la línea si no existe la certeza de que está con carga** (excepto en el caso de motores menores de 1 HP). En la Figura 49 se aprecia la curva $T-\omega$ de un motor serie, y un torque T_{R0}, resistente, de valor reducido, que corresponde aproximadamente al torque de roce mecánico de la máquina ($\leq 5\,\%\ T_{nominal}$). En estas condiciones la velocidad de régimen del motor excede enormemente a la nominal, alcanzando valores peligrosos, suficientes para, incluso, destruir a la máquina.
- En la zona de operación, y debido a la particular relación $T-\omega$, la potencia mecánica de salida se mantiene casi constante.

6.2.2. Característica torque – corriente

El montaje experimental para obtener esta característica es el mismo utilizado en 6.2.1., e indicado en la Figura 50, donde deben medirse la corriente I_a y el torque T al aplicar sucesivas cargas mecánicas en el eje.

En la Figura 51 se muestra la curva $T-I_a$, dada por la ecuación (17), indicándose la desviación con respecto a una parábola, debido a la disminución de G al aumentar I_a.

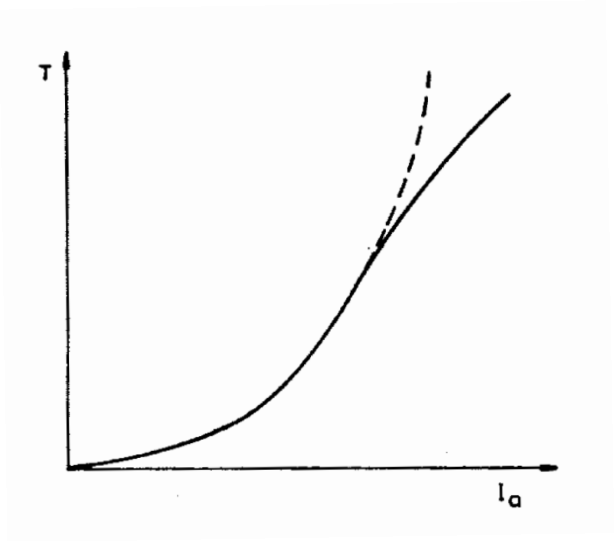


Figura 51: Curva $T-I_a$ para un motor serie.

6.2.3. Característica velocidad – corriente

De la ecuación (15) se obtiene la relación entre la velocidad y la corriente de armadura siendo,

$$\omega = \frac{1}{G}\left(\frac{V}{I_a} - R_a\right) \tag{20}$$

que se muestra gráficamente en la Figura 52.

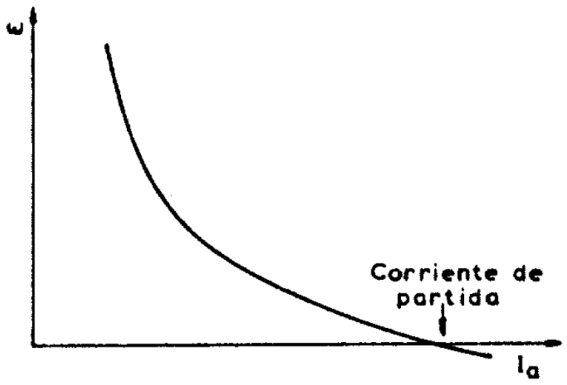


Figura 52: Característica $\omega - I_a$ de un motor serie.

Experimentalmente la característica $\omega - I_a$ del motor serie se obtiene con el esquema de la Figura 50.

6.3. Motor compuesto

Un motor compuesto (o compound) acumulativo como el de la Figura 53 posee características semejantes a las de un motor serie, o a las de un motor shunt, dependiendo de la importancia relativa de los flujos producidos por los campos serie o shunt, respectivamente.

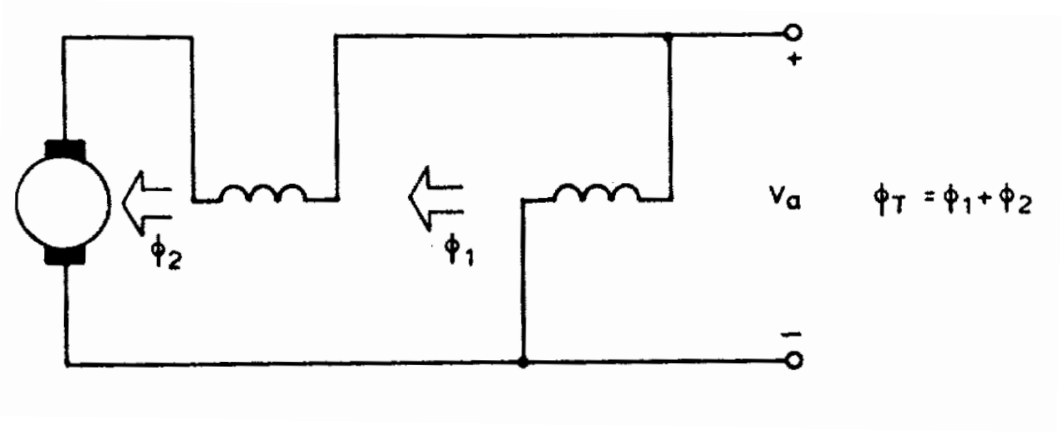


Figura 53: Motor compuesto acumulativo.

El motor compound acumulativo, a diferencia del motor serie, no tiene la posibilidad de sobrevelocidad en vacío, ya que posee un campo shunt.

Las curvas experimentales $T - \omega$, $T - I_a$ y $\omega - I_a$ pueden obtenerse de un modo similar al señalado para los motores serie y shunt.

Debe destacarse que el motor compuesto diferencial ($\phi_T = \phi_1 - \phi_2$) no es usado, salvo muy contadas excepciones. Su "riesgo" reside en que para algunos valores de corriente de armadura, el

flujo total se reduce a cero o lo que es lo mismo $G_1 I_f - G_2 I_a = 0$, con lo que el motor se embala, puesto que en estas condiciones:

$$\omega = \frac{V - R_a I_a}{G_1 I_f - G_2 I_a} \to \infty$$

Por esta razón, los motores compuestos diferenciales se diseñan y construyen con un devanado serie, tal que en condiciones nominales produce sólo una pequeña fracción del flujo total, de modo de alejar la posibilidad de embalamiento.

En la partida de motores compuestos diferenciales debe asegurarse siempre de conectar primero el devanado shunt (o cortocircuitar el serie); de otro modo el motor podría partir en el sentido opuesto al deseado. Lo anterior se debe a que el circuito de armadura posee una inductancia mucho menor que la del campo shunt, por lo que la corriente en él se establece primero. De este modo en el instante inicial el campo serie es dominante, y hace girar la máquina de acuerdo a su signo.

En la Figura 54 se indican las curvas $\omega - I_a$ de motores compuestos, comparándose con uno shunt como referencia.

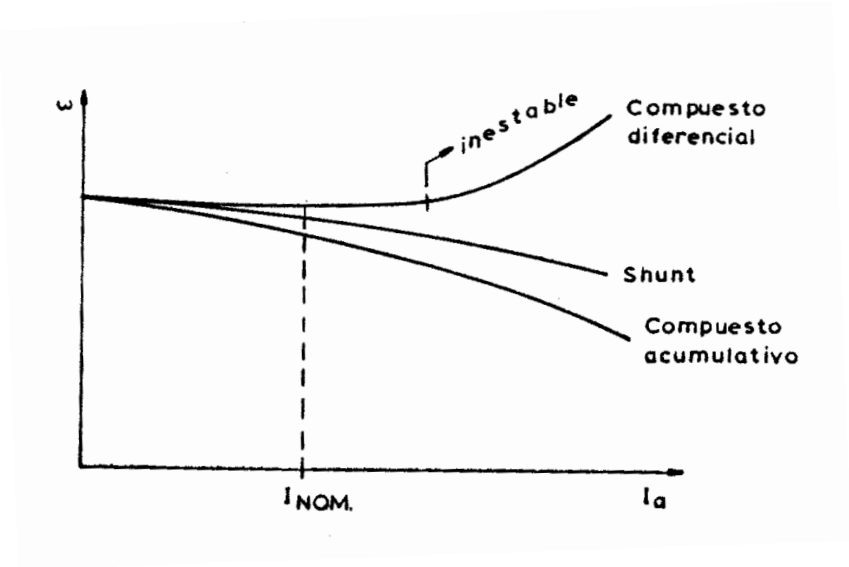


Figura 54: Curvas $\omega - I_a$ de motores compuestos.

6.4. Métodos de partida de motores de C.C.

A modo de ejemplo, se analiza un motor con excitación independiente (Figura 55).

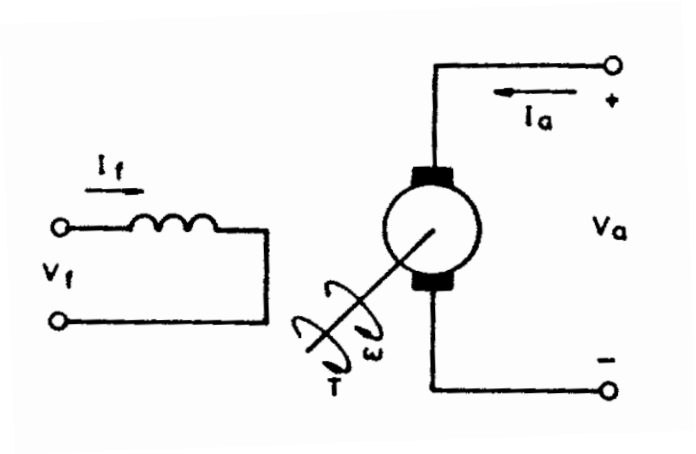


Figura 55: Motor de C.C. con excitación independiente.

A la partida $\omega = 0$, con lo que de (12):

$$V_a = R_a I_a \tag{21}$$

Normalmente R_a tiene un valor pequeño, de modo que si se aplica la tensión nominal a la armadura durante la partida, circulará una corriente de armadura elevada, de un nivel **peligroso**, que destruirá el circuito de armadura y que incluso puede dañar las instalaciones de la fuente de C.C. Por lo tanto debe limitarse la corriente de partida.

Por otra parte, normalmente se requiere un torque de partida dado, e incluso es deseable disponer del mayor torque posible de modo de reducir el tiempo de aceleración a tiempos razonables, por lo que al limitar I_a, de acuerdo a la relación (13), el valor de la corriente de campo debe ser máximo.

Algunos de los métodos de partida más usados contemplan el empleo de reóstatos, o tensión de armadura reducida.

6.4.1. Método de partida con reóstatos

En el circuito de la Figura 56 R_p es la resistencia de partida y R_v la de velocidad.

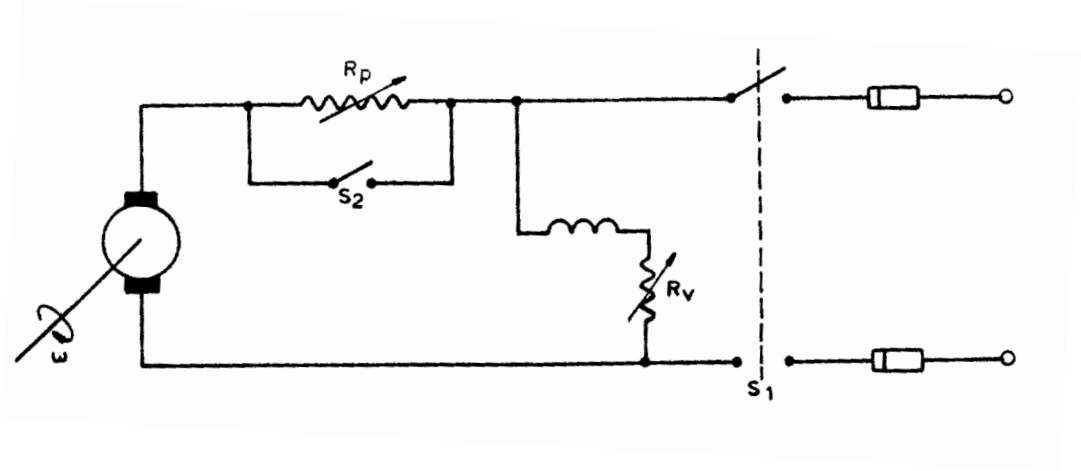


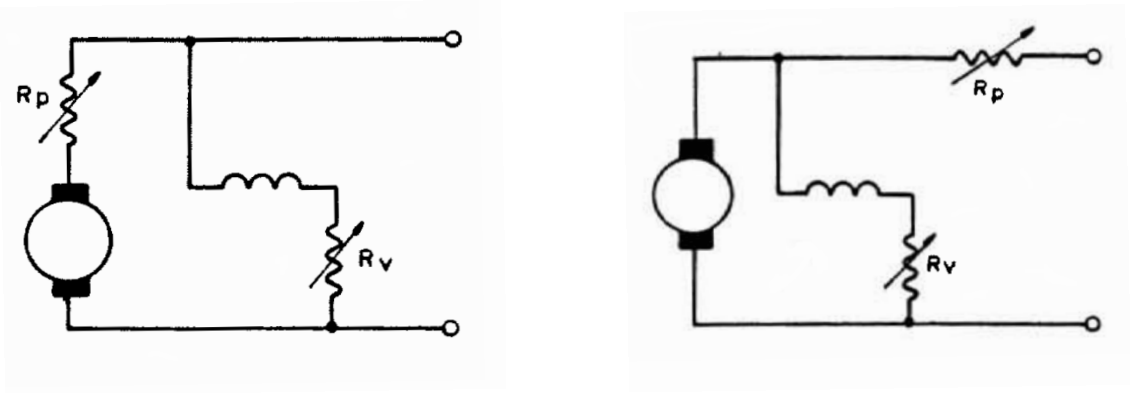
Figura 56: Circuito de partida reostática de un motor shunt.

El procedimiento de partida que debe ser rigurosamente respetado es el siguiente:

1. Poner R_p en su valor máximo.
2. Poner R_v en su valor mínimo.
3. Precaverse que el rotor esté libre y que no haya objetos que lo puedan trabar o ser arrastrados por él de un modo no deseado.
4. Cerrar el interruptor S_1. Si la tensión del campo fuera distinta a la de la armadura y se usasen fuentes distintas, el **campo debe ser conectado siempre primero que la armadura.**
5. Debe reducirse gradualmente la resistencia de partida R_p, hasta cortocircuitarla mediante el interruptor S_2.
6. En caso de que se desee elevar la velocidad de giro, se debe reducir la corriente de excitación (aumentar R_v) ya que de (12):

$$\omega = \frac{V - R_a I_a}{G I_f} = \frac{\text{constante}}{I_f} \tag{22}$$

Un error frecuente es el indicado en la Figura 57 (b).



(a) Correcto.

(b) Incorrecto (peligroso).

Figura 57: Circuito de partida reostática, correcto e incorrecto.

La condición mostrada en (b) conduce a elevadas corrientes de partida, que pueden ser peligrosas. Además se obtienen bajos torques de partida, y por lo tanto una menor aceleración, prolongando el tiempo de partida y la duración de las corrientes elevadas.

Los partidores industriales tienen normalmente 3 o más pasos y algún tipo de automatismo. En la Figura 58 se muestra uno de 3 pasos, donde cada sección del reóstato de partida es cortocircuitado por un contactor accionado por un dispositivo de tiempo (o de velocidad), que no se indica en la figura.

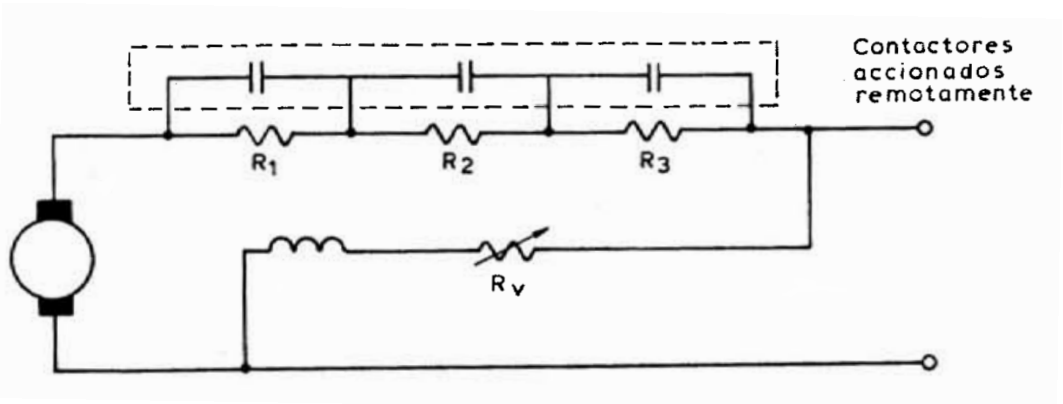


Figura 58: Esquema de un partidor de reóstatos industrial.

6.4.2. Partida mediante tensión de armadura reducida

Se trata de emplear un dispositivo que entregue tensión continua de nivel variable (como uno de estado sólido por ejemplo) de modo de subir gradualmente la tensión aplicada a la armadura, cuidando de que la corriente de armadura no sobrepase los valores fijados.

En la Figura 59 se indica el circuito y una posible estrategia de este tipo.

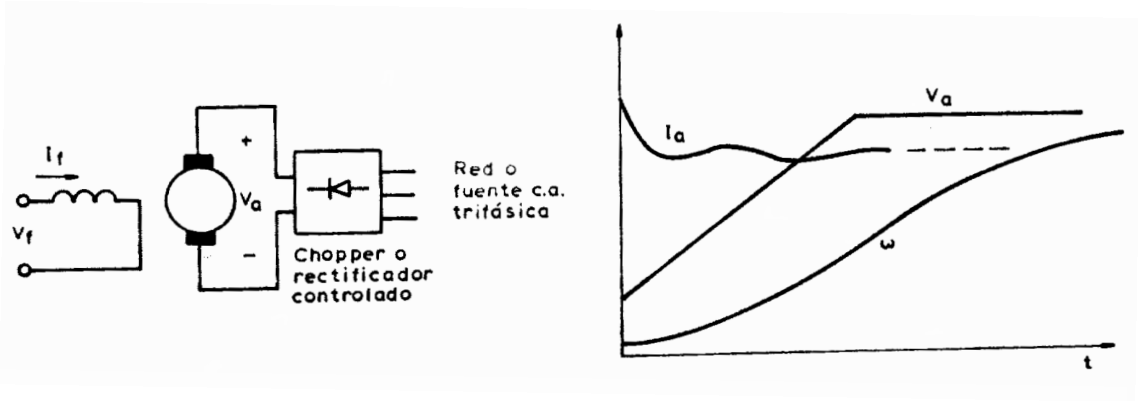


Figura 59: Sistema de partida y control de un motor de C.C. mediante un dispositivo de estado sólido.

Este tipo de dispositivos son cada día más usados, en todos los niveles de potencia, debido a las posibilidades de control y al hecho de que la alimentación de C.C. puede obtenerse de una red de corriente alterna (sistemas rectificadores), de un modo económico. (El costo de los dispositivos de estado sólido tiene niveles convenientes, y su mantención es menor que la de un dispositivo rotatorio).

6.5. Repartición de cargas entre dos motores

En algunos casos es necesario mover una misma carga mecánica con dos motores distintos (Figura 60) conectados a una misma red eléctrica o no.

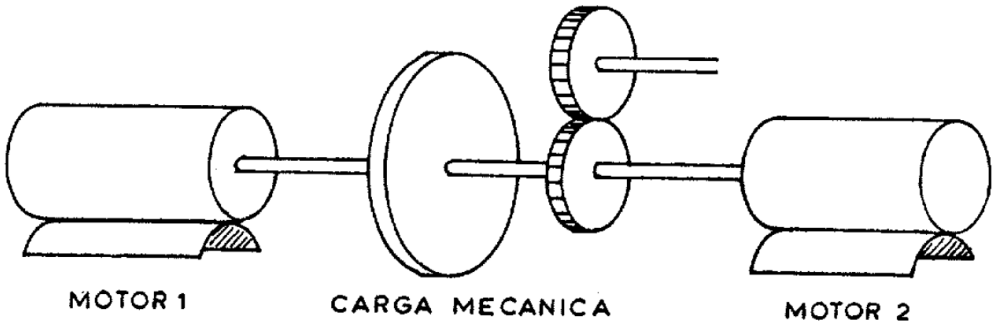


Figura 60: Dos motores accionando una carga mecánica común.

Para simplicidad del análisis se considera que ambos motores están conectados a tensiones iguales, y que la potencia con la cual contribuye cada uno es proporcional a la corriente de armadura.

Puede encontrarse que el uso de motores shunt distintos, accionando una carga común, presenta inconvenientes ya que la distribución de cargas no es proporcional a sus capacidades como es deseable. Lo anterior puede subsanarse mediante un adecuado control de las corrientes de excitación en cada uno de ellos, para una velocidad dada.

Los motores serie, conectados en paralelo y accionando una carga mecánica común, no presentan los problemas anteriores. Esto los hace ser preferidos en aplicaciones de tracción (tranvías, locomotoras) donde son usadas combinaciones de 2, 4, 6 o más motores conectados en serie – paralelo y moviendo una carga única.

En la Figura 61 se muestran las características $\omega - I_a$ de dos motores serie distintos, A y B, y la característica que resulta de sumar $I_a + I_b$ para cada velocidad $\omega = \text{cte}$.

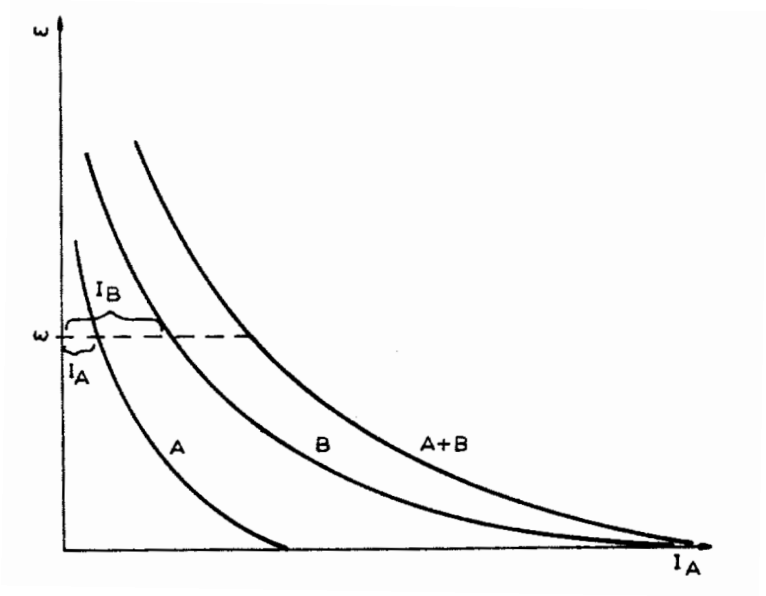


Figura 61: Repartición de carga entre dos motores serie accionando una carga común.

Se aprecia que para cualquier velocidad ω, la proporción en que la carga total es repartida entre los motores A y B es prácticamente constante.

6.6. Aplicaciones de motores de C.C.

Como ya se ha mencionado en la Introducción, los motores de C.C. tienen en la actualidad importantes competidores en la combinación Motor de Inducción – dispositivo de estado sólido. Sin embargo, en la misma introducción se destacan las características de una gran variedad de accionamientos que son satisfechos de un modo natural por los motores de C.C., siendo, las más destacadas:

1. Amplio rango de velocidades, ajustable de un modo continuo.
2. Facilidad (relativa) de obtener curvas $T - \omega$ cualquiera.
3. Facilidad de control para obtener grandes aceleraciones, o desaceleraciones, frenado regenerativo, inversión de marcha, etc., con medios de control económicos y simples.

La elección entre motores de C.C. debe basarse, entre otras consideraciones, en el comportamiento electromecánico, descrito por las curvas $T - \omega$, $T - I_a$, $\omega - I_a$ resumidas para los 3 tipos

básicos de motores en la Figura 62. Se puede apreciar que el motor shunt, al igual que el compound diferencial son esencialmente **motores de velocidad constante**. El motor serie se define como un motor de potencia mecánica constante, muy útil, y usado en tracción (vagones, trenes, movimiento de puentes – grúas, etc.).

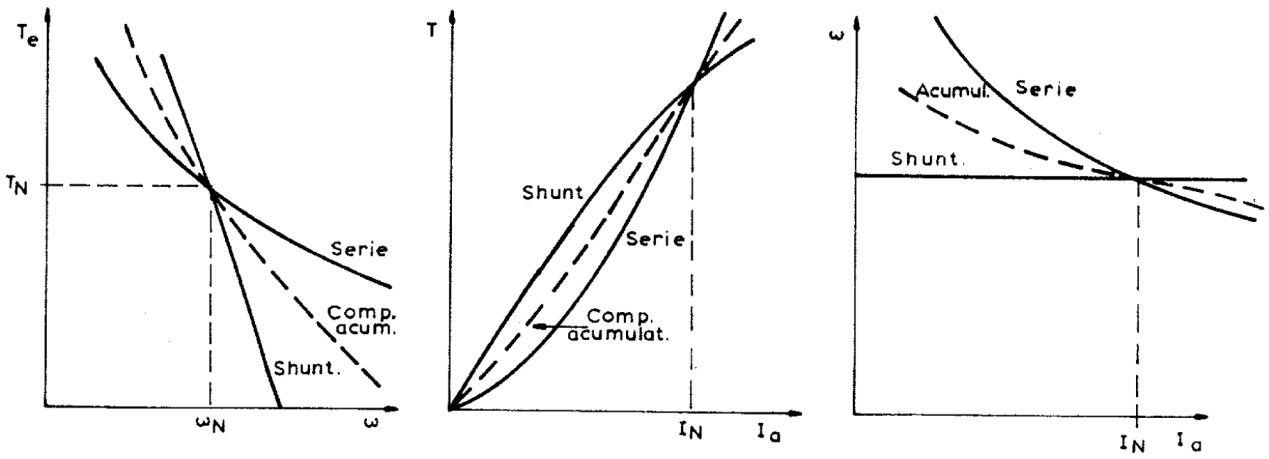


Figura 62: Curvas características $T - \omega$, $T - I_a$ y $\omega - I_a$ de motores de C.C. de igual potencia, para I_f = cte (si corresponde).

En la Figura 63 se muestra la corriente de armadura y el rendimiento de un motor de C.C. operando con tensión nominal, como función de la potencia mecánica de salida, apreciándose lo siguiente:

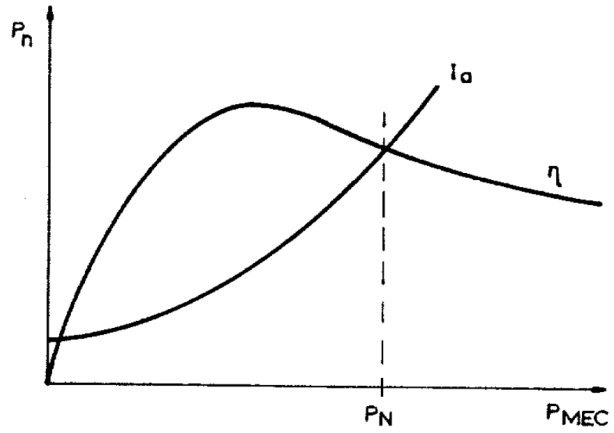


Figura 63: Rendimiento y corriente de armadura en motores de C.C. como función de la potencia mecánica de salida.

i) El rendimiento máximo ocurre, en motores bien diseñados, para valores bajos de la potencia mecánica (40 – 60 % de P_N) y luego decrece muy lentamente. Los valores máximos de rendimiento van desde el 70 % en motores de 1 HP, 80 % para 10 HP hasta el 90 a 92 % en motores sobre 100 HP.

ii) La corriente de armadura I_a no crece linealmente debido a que la potencia de salida está dada por EI_a, y como E disminuye al aumentar la potencia de salida (debido a la reacción de armadura), I_a debe aumentar más que linealmente con P_{mec}.

En la referencia [1] se realiza una discusión extensa acerca de las características de las cargas y la elección del motor de C.C. adecuado, así como un análisis de los tipos, tamaños y costos de motores de C.C.

Referencias

[1] M. Liwschitz-Garik y C.C. Whipple: *Direct–Current Machines*, CECSA, 1971.

[2] A. E. Fitzgerald, C. Kinsley Jr., A. Kusko: *Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas*, Editorial Hispano Europea, 1975.

[3] Ch. V. Jones: *The Unified Theory of Electrical Machines*, Buttersworth, & Co., 1967.

[4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.: *IEEE Standard Test Code for Direct–Current Machines*, IEEE Std 113-1973, November 1, 1973, IEEE, New York.

[5] J. Corrales: *La Máquina Eléctrica, Teoría, Construcción y Funcionamiento*, Labor S.A., 1969.

[6] Ch. Siskind: *Máquinas de Corriente Continua*, Editorial H.A.S.A., 1967.