

Capítulo 3

Máquinas de corriente continua

1 – INTRODUCCIÓN

El principal uso que se le da a la máquina de corriente continua (**CC**) es el de motor. Es más flexible que la máquina de alterna (**CA**) a la hora de controlar su velocidad y su par, lo cual la convirtió en casi exclusivamente en la máquina eléctrica por excelencia en diversos campos de aplicación industriales. Sin embargo, debido al desarrollo reciente de la electrónica de potencia, el uso de la máquina de **CC** ha ido cediendo espacio a los motores de **CA**, cuyos costes y mantenimiento son más bajos. Actualmente, cuando es necesario el uso de corriente **CC**, recurrimos a rectificadores de silicio que transforman la corriente alterna de la red en continua de forma estática y con un gran rendimiento.

La máquina de **CC** puede funcionar o como **motor** o como **generador**. Estas configuraciones serán analizadas en las secciones 2 y 3 respectivamente de este capítulo.

1.1 – Conceptos básicos

1.1 – 1: Bobina

Recibe el nombre de bobina (Figura 1-1a) cada uno de los conjuntos compactos de espiras que unidos entre sí forman el bobinado inducido de la máquina. Van alojadas en las ranuras de las armaduras. Están compuestas de lados activos y cabezas, el lado activo de la bobina es la parte de la misma que es atravesada transversalmente por el flujo magnético actuando como generador de **fem**.

1.1 – 2: Número de polos

En todo circuito magnético se distinguen «polos norte», zonas donde salen las líneas de fuerza del flujo, y «polos sur», zonas por donde entran dichas líneas. El número total de polos de una máquina se designa por **2p**, por lo que **p** es el número de pares de polos.

$$2p = \text{Número total de polos} \quad \text{y} \quad p = \text{Número de pares de polos}$$

1.1 – 3: Pasos

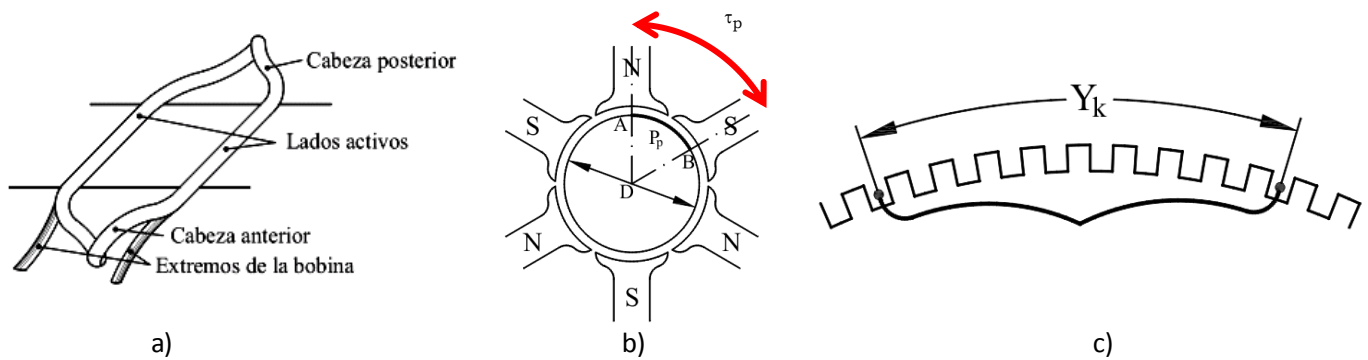


Figura 1-1: a) Bobina usada en una máquina de CC, b) paso polar y c) paso de ranura.

• **Paso polar:** es la distancia que existe entre los ejes de dos polos consecutivos, tomada en arco de circunferencia de entrehierro o en número de ranuras. Se mide en [cm] y se calcula dividiendo el perímetro por la cantidad de pares de polos, como se intuye de la Figura 1-1b

$$\tau_p [\text{cm}] = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad (1-1)$$

También lo podemos expresar en número de ranuras. Llamando **K** el número total de ranuras, el paso polar Y_p será

$$y_p [\text{número}] = \frac{K}{2p} \quad (1-2)$$

• **Paso de ranura:** se representa por Y_k , y es el número de ranuras que es preciso saltar para ir desde un lado activo de una bobina hasta el otro lado activo. A veces es designado como «ancho de bobina». En la Figura 1-1c este paso es de 8 ranuras. Su valor es aproximadamente igual al paso polar y debe ser forzosamente un número entero.

• **Paso de conexión:** recibe el nombre de paso de conexión la distancia, medida en secciones inducidas, existente entre el haz activo que constituye el final de una sección y el haz activo principio de la siguiente, siguiendo el curso del bobinado. Se designa por Y_2 . El bobinado será imbricado u ondulado si el cálculo de este paso resulta positivo o negativo respectivamente.

• **Paso resultante:** es la distancia, medida en secciones inducidas, existente entre los haces activos superiores o principios de dos secciones consecutivas siguiendo el curso del bobinado. Se designa mediante la letra **Y**.

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

1.1 – 4: Bobinados (consideraciones sobre devanados)

En un bobinado de corriente continua, la conexión entre secciones sucesivas puede ser efectuada de dos formas diferentes, dividiendo a los bobinados en imbricados u ondulosos.

Bobinado imbricado

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

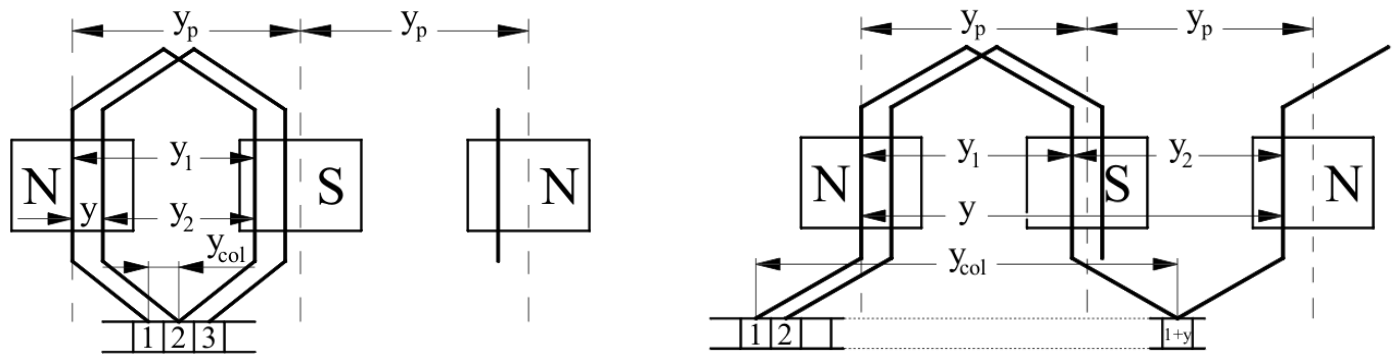


Figura 1-2: a) Bobina imbricado y b) bobinado ondulado.

$$\text{Paso de conexión: } Y_2 = Y_1 - Y_{col}$$

$$\text{Paso resultante: } Y = Y_1 - Y_2$$

Donde Y_1 se llama «Ancho de sección» y es la distancia entre los dos lados activos de una misma sección (se mide en secciones inducidas). El ancho de sección tiene que ser forzosamente un valor entero.

Bobinado ondulado

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

$$\text{Paso de conexión: } Y_2 = Y_{col} - Y_1$$

$$\text{Paso resultante: } Y = Y_1 + Y_2$$

1.2 – Aspectos constructivos

La máquina de CC está constituida por una parte fija o **estator** y una parte móvil o **rotor**. En la Figura 1-1(a) se muestra un esquema básico de la forma física que presenta este tipo de máquinas. El estator está formado por la culata (1), que pertenece al circuito magnético inductor y hace las veces de soporte mecánico del conjunto. La culata tiene pies (13) sobre los que se apoya la máquina.

En la culata se fijan los **polos**, constituidos por núcleos polares (2), encima de los cuales se apila convenientemente el devanado **inductor** o de excitación (8). La parte de los polos próxima al rotor presenta una expansión magnética denominada zapata polar (3). Para mejorar la conmutación (ya veremos de qué se trata) estas máquinas suelen llevar también unos polos intermedios (4) y (5), que reciben también el nombre polos auxiliares o polos de conmutación; el devanado de estos polos se conecta en serie con el inducido.

El rotor está formado por el **inducido** (6) y el colector de delgas o conmutador (10). El inducido se construye con discos de chapa de acero al silicio convenientemente ranurado para alojar en él el correspondiente devanado.

Los devanados de las máquinas de CC son cerrados, lo cual quiere decir que no tienen principio ni final. Los devanados pueden ser imbricados u ondulado, dependiendo de si se cruzan o no las partes de la bobina observadas desde el lado del colector. Esto se ve en la Figura 1-3. Los dos lados activos de estos devanados se colocan debajo de polos diferentes para así obtener la mayor **fem** posible.

El **colector** de delgas es lo que caracteriza específicamente a estas máquinas, es el encargado de la conversión mecánica de la CA inducida en las bobinas en CC de salida. Podemos ver el colector en la Figura 1-2.

La fijación del conjunto se consigue merced a la presión que ejercen unos anillos extremos de forma cónica. Para facilitar la soldadura de las conexiones de las bobinas del inducido con el colector, las delgas presentan en un extremo un talón con unas hendiduras convenientemente fresadas para alojar los conductores terminales. Después de que se conecta el colector al inducido, se procede a la rectificación de aquél por medio de un torno, hasta dejar su superficie perfectamente cilíndrica.

La extracción o suministro de corriente al colector se realiza por medio de escobillas de grafito. Las escobillas permanecen inmóviles en el espacio, dispuestas en los porta escobillas, y de esta manera, mientras gira el rotor, las escobillas conservan una posición invariable con respecto a los polos de la máquina. La Figura 1-1b muestra la disposición típica de una escobilla alojada dentro del porta escobillas. Las escobillas de la misma polaridad van juntas en paralelo al mismo terminal de salida para su conexión al exterior.

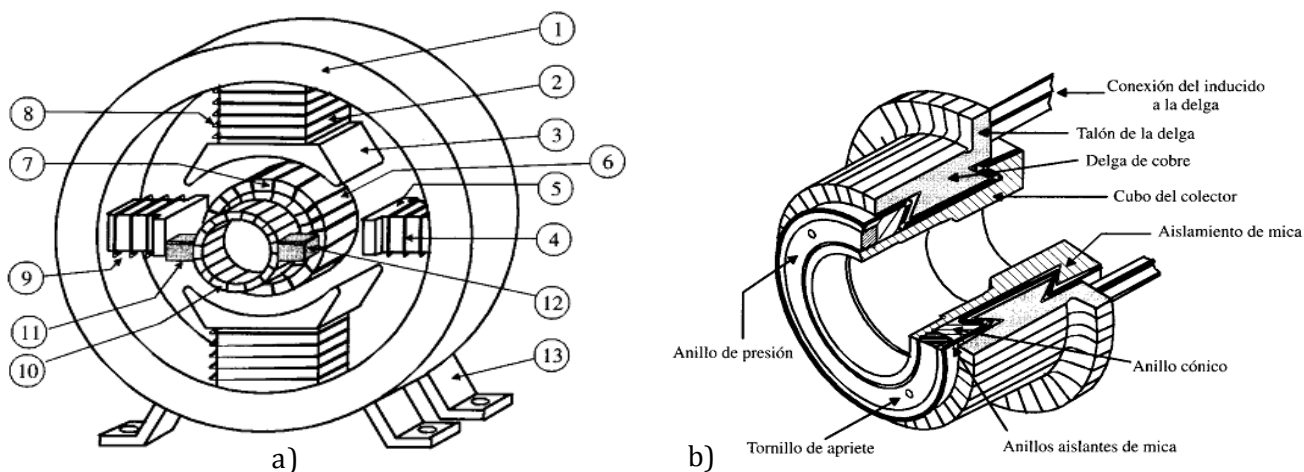


Figura 1-1: a) Elementos constitutivos de una máquina de CC y b) sección de un colector de delgas.

1.3 – Principio de funcionamiento

Para comprender el principio de generación de la **fem** en las espiras del rotor, vamos a considerar el inducido en forma de anillo que se indica en la Figura 1-2. En este devanado, al girar el rotor, se induce una **fem** en los conductores dispuestos en la cara exterior del núcleo, al ser cortados por el flujo del estator. En los conductores interiores no aparece ninguna **fem**, ya que no les atraviesa el flujo de los polos, al estar sus líneas de fuerza limitadas al circuito de baja reluctancia del anillo.

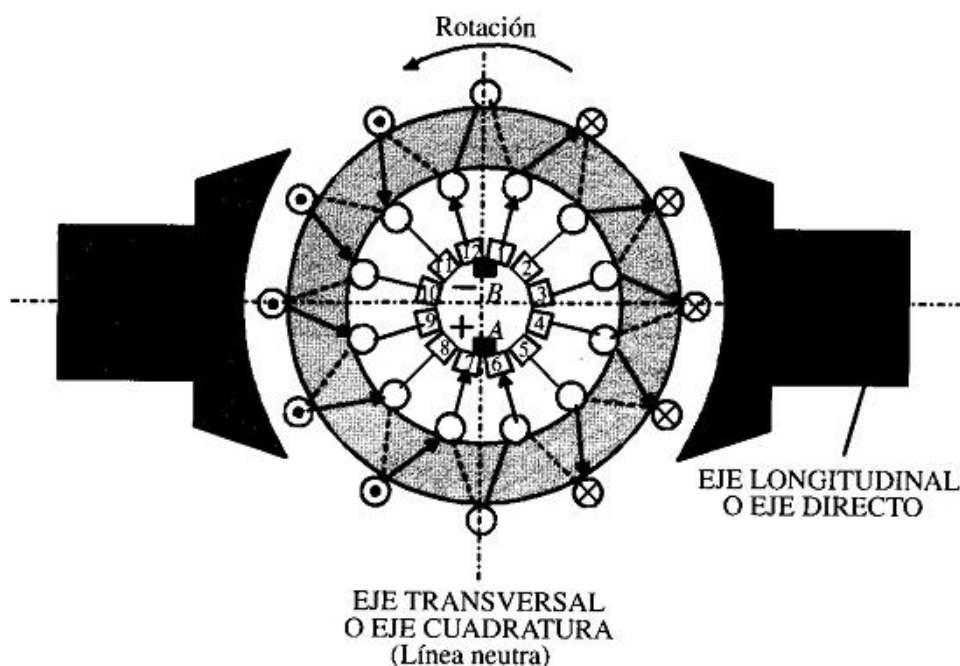


Figura 1-3: Máquina de CC con inducido en anillo.

Analizando la figura anterior observamos que el sentido de las **fems** de los conductores situados debajo del polo norte son de signo contrario a la de los conductores situados debajo del polo sur (el sentido de estas **fem** se obtiene aplicando la conocida expresión: $\mathbf{e}=(\mathbf{V}\times\mathbf{B})\mathbf{L}$ a estos conductores). Como la estructura de la máquina es simétrica, las **fems** de la parte izquierda del inducido serán opuestas a las de la parte derecha, y en consecuencia no circulará ninguna corriente por el arrollamiento.

Para utilizar la **fem** del inducido y llevarla a un circuito exterior conectamos unas escobillas de salida **A** y **B**, situadas en el eje transversal de los polos para que puedan aprovechar la máxima **fem** del devanado. Estas escobillas dividen el arrollamiento en dos ramas en paralelo con una misma **fem**. En cada una de estas ramas, las **fem** deben tener el mismo sentido, pues de lo contrario no se utilizarían totalmente las **fem** generadas en el arrollamiento (como caso limite, si las escobillas se disponen bajo los centros de los polos, la tensión entre ellos sería nula). El eje que forma la alineación de las escobillas se denomina línea neutra. Esta línea tiene gran importancia, pues indica las posiciones en las que se produce la inversión de f.e.m. en las bobinas del inducido pasando las espiras correspondientes de una rama paralelo a la otra.

Nota práctica: La posición exacta de la línea neutra se determina experimentalmente moviendo el collar de las escobillas hasta encontrar el punto en el que se producen las mínimas chispas en el colector de delgas.

Para calcular la **fem** producida en el inducido de una máquina de **CC** debe tenerse en cuenta que en cada bobina del arrollamiento se obtiene una **fem** alterna, el cálculo de esta **fem** se ve en la siguiente sección.

En los generadores o dinamos esta **fem** se obtiene como consecuencia del movimiento del rotor por la acción de una energía mecánica de entrada y puede aprovecharse en un circuito exterior conectando una carga eléctrica que hará circular corriente por el inducido. En los motores, el giro de la máquina es el resultado de la interacción del flujo del inductor con las corrientes del inducido al conectar éste a una red de cc, lo que provoca una **fem** de reacción en el rotor que se opone al sentido de la corriente y que recibe por ello el nombre de fuerza contra electromotriz (**fcem**).

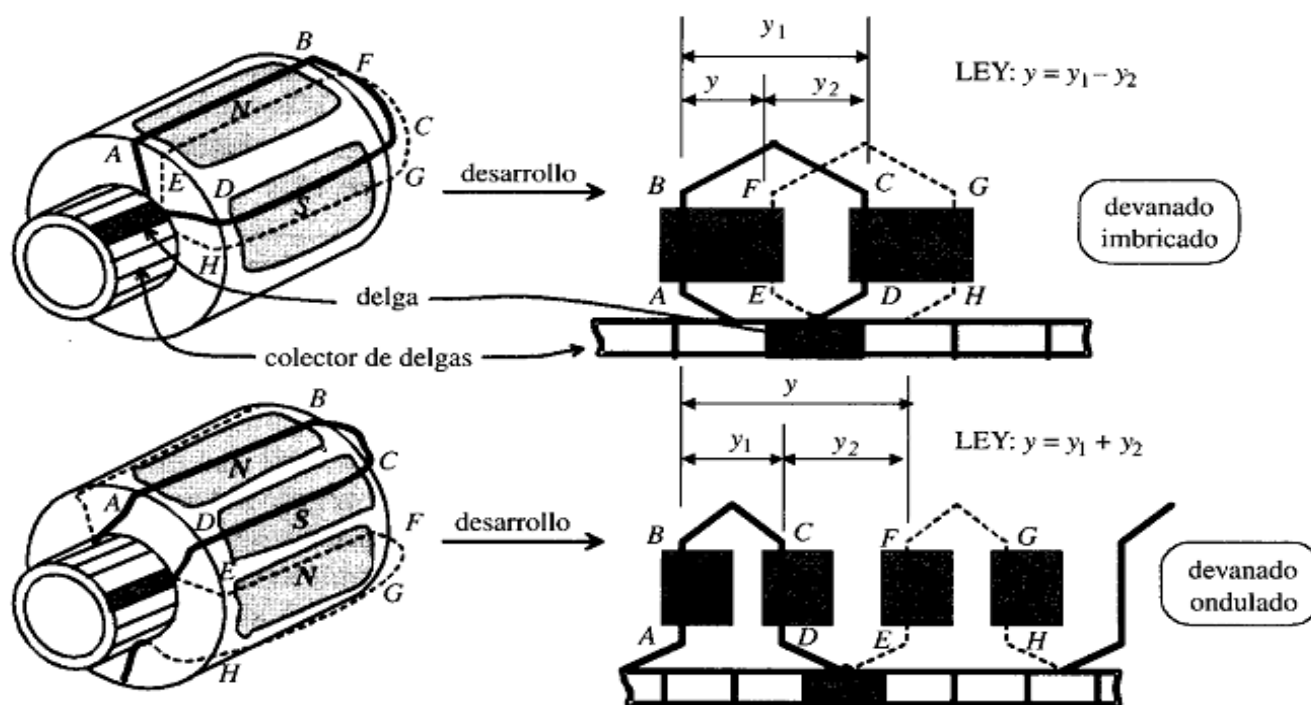


Figura 1-4: Devanados imbricado y ondulado.

2 – FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR

Los generadores de **CC** o dinamos convierten una energía mecánica de entrada en energía eléctrica de salida en forma de corriente continua. En la actualidad, estos generadores han caído en desuso y se reemplazaron por rectificadores, generalmente de silicio, que transforman **CA** de la red en **CC**, en forma estática y con mayor rendimiento. En lo que sigue, analizamos el funcionamiento básico para comprender el comportamiento de los motores de **CC**.

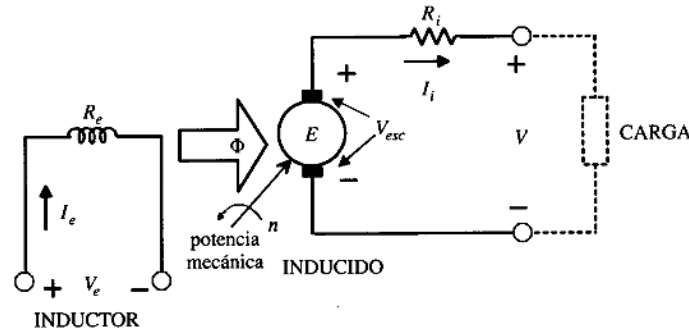


Figura 2-1: Generador de **CC** o dínamo.

Estas máquinas constan de un inductor, colocado en el estator, y de un inducido giratorio provisto de colector de delgas. La representación de ambos devanados es la indicada en la Figura 2-1. El devanado de excitación está formado por los arrollamientos de todos los polos conectados en serie, a los que se aplica una tensión de alimentación de **CC** que produce una corriente de circulación I_e , que da lugar a una **fmm** que origina el flujo Φ en el entrehierro de la máquina. El inducido gira dentro del campo magnético del inductor y genera, merced a la combinación colector-escobillas, una **fem** continua E en vacío cuya magnitud viene la calculamos en la siguiente sub sección (2.3).

Al conectar una carga eléctrica exterior aparece una corriente I_i de circulación que provoca una caída de tensión en el inducido, que se debe en parte a la resistencia propia de este devanado R_i y en parte a la resistencia que presentan los contactos escobillas-colector. Si se denomina U_E a la caída de tensión por par de escobillas (que por lo general suelen ser 2 voltios), la segunda ley de Kirchhoff aplicado al circuito de la Figura 2-1, nos da

$$E = V + R_i I_i + U_E \quad (2-1)$$

Donde V indica la tensión terminal en bornes de la máquina (también llamado U en los ejercicios de la materia). Para encontrar el balance de potencias en el sistema, se multiplica la ecuación anterior por I_i , obteniéndose

$$I_i \cdot E = I_i \cdot V + R_i I_i^2 + I_i \cdot U_E \quad (2-2)$$

Donde $P_2 = V \cdot I_i$ es la potencia eléctrica de salida suministrada por el generador.

$P_{cu-i} = R_i \cdot I_i^2$ son las pérdidas en el cobre del inducido.

$P_{esc} = U_E \cdot I_i$ son las pérdidas en los contactos de las escobillas.

$P_a = E \cdot I_i$ es la potencia electromagnética desarrollada por la máquina.

Para encontrar la potencia mecánica de entrada (P_1), se debe sumar a éstas, las siguientes pérdidas: Las pérdidas en el cobre del arrollamiento de excitación, definidas por

$$P_{exc} = V_e I_e = R_e I_e^2$$

Las pérdidas mecánicas P_m debidas al rozamiento y ventilación. Las pérdidas en el hierro P_{Fe} , que sólo existen en el apilamiento del rotor, debido a la magnetización cíclica que aparece por su movimiento a pesar de ser el flujo inductor constante. Entonces P_1 será:

$$P_1 = P_{exc} + P_m + P_{Fe} + E \cdot I_i \quad (2-3)$$

Válido para todas las máquinas **CC** en donde la potencia de excitación viene de la misma máquina.

2.1 – Generación de una fem

Para encontrar la **fem** generada en una máquina de **CC**, partimos de la expresión conocida que corresponde a la **e** generada por una sola espira

$$e = B \cdot \ell \cdot v \quad (2-4)$$

La **e** de una máquina que posee **p** pares de polos, **a** ramas en paralelo y **Z_i** conductores activos¹ es

$$E = \frac{Z_i}{2a} \cdot B \cdot \ell \cdot v \quad (2-5)$$

En esta ecuación tenemos que calcular el valor de la inducción, esta será

$$B = \Phi / S_p \quad (2-6)$$

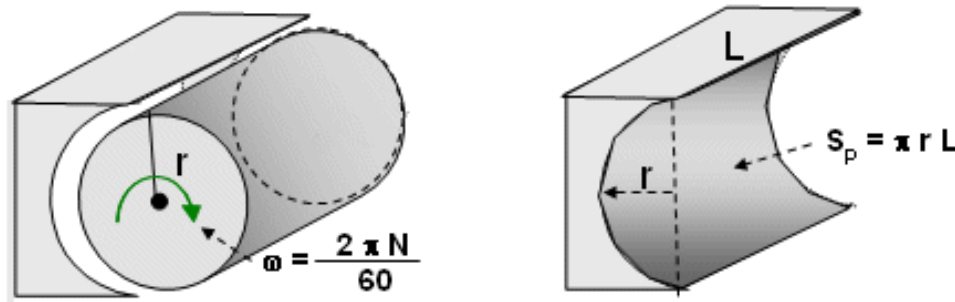


Figura 2-2: Inducido más la expansión polar. Gráfico para calcular la superficie que atraviesa el flujo.

Donde Φ es el flujo que atraviesa al inducido y S_p es la superficie de la expansión polar, que la obtenemos de la siguiente fórmula deducida a partir de la [Figura 2-2](#)

$$S_p = \tau_p \cdot \ell = \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell \quad (2-7)$$

Reemplazando esta ecuación en (2-6) para encontrar **B** y ahora reemplazando este **B** en (2-5) la expresión de **E** nos va quedando

$$E = \frac{Z_i}{2a} \cdot B \cdot \ell \cdot v = \frac{Z_i}{2a} \cdot \left(\frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell} \right) \cdot \ell \cdot v \quad (2-8)$$

Nos resta todavía encontrar la velocidad **v**, la cual la obtenemos mediante

$$v = \omega \cdot r \quad (2-9)$$

Donde ω es la velocidad angular de la espira (medida en **rad/seg**), para ponerla en función de **n** (número de **rpm**) basta con hacer el siguiente artilugio

$$\omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right] = n \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right] \cdot \left[\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right] \cdot \left[\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right] = n \frac{2\pi}{60} \quad (2-10)$$

Reemplazamos este valor en (2-9) y a este valor de **v** lo reemplazamos en (2-8), obtenemos así la ecuación para encontrar **E**

$$E = \frac{Z_i}{2a} \cdot \frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell} \cdot \ell \cdot \left(n \frac{\pi D}{60} \right) = \frac{Z_i \cdot p \cdot \Phi \cdot n}{a \cdot 60} = \left(\frac{Z_i \cdot p}{a \cdot 60} \right) \cdot \Phi \cdot n = K \cdot \Phi \cdot n = E \quad (2-11)$$

En donde hemos introducido una constante **K** en la ecuación, puesto que **Z_i**, **p**, **a** y **60** son constantes. Resumiendo el desarrollo tenemos

¹ No debe confundirse con impedancia de entrada. Es pura casualidad que la nomenclatura coincide.

$$E = \frac{Z_i}{2a} \cdot B \cdot \ell \cdot v = \frac{Z_i}{2a} \cdot \left(\frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell} \right) \cdot \ell \cdot \left(n \frac{\pi \cdot D}{60} \right) = \left(\frac{Z_i \cdot p}{60 \cdot a} \right) \cdot \Phi \cdot n = \boxed{K \cdot \Phi \cdot n = E}$$

$$\bullet B = \frac{\Phi}{S_p} = \frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell}$$

$$\bullet \bullet S_p = \tau_p \cdot \ell = \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell$$

$$\bullet v = \omega \cdot r = n \frac{2\pi}{60} r = n \frac{\pi(2 \cdot r)}{60} = n \frac{\pi \cdot D}{60}$$

$$\bullet \bullet \omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right] = n \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right] \cdot \left[\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right] \cdot \left[\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right] = n \frac{2\pi}{60}$$

2.2 – Reacción del inducido

Cuando una máquina de **CC** funciona en vacío (trabajando, como es en este caso, como generador), no existe corriente en el inducido y el flujo en el entrehierro está producido únicamente por la **fmm** del inductor. Cuando se cierra el circuito del inducido sobre una resistencia de carga aparece una corriente de circulación por los conductores del rotor que dan lugar a una **fmm** que combinada con la del estator producen el flujo resultante en el entrehierro de la máquina. Se produce entonces en el inducido un campo magnético –puesto que circula una corriente por él– cuyo flujo es transversal al del inductor. Se conoce con el nombre de reacción del inducido al efecto que ejerce la **fmm** de este devanado sobre la **fmm** del inductor, y que hace variar la forma y magnitud del flujo en el entrehierro respecto a los valores que la máquina presentaba en vacío. Recurrimos a la siguiente figura para explicar este fenómeno. De esta forma, podrá aplicarse el principio de superposición tanto a los diagramas de **fmm** como a los que representan las distribuciones de flujo magnético en el entrehierro. Dicho de otra manera, en vez de combinar las **fmm** del inductor y del inducido para obtener el flujo resultante, se obtendrá éste sumando las distribuciones del campo magnético que produce cada **fmm** actuando independientemente.

- **Comportamiento en vacío:** Cuando la máquina trabaja en vacío, solamente actúa la excitación de los polos, de esta forma se obtiene una distribución de campo magnético en el entrehierro que es constante y máxima debajo de cada polo y que decrece rápidamente en el espacio interpolar hasta hacerse cero en la línea neutra. En la [Figura 2-3a](#) se muestra un esquema desarrollado de la máquina con la distribución de la inducción magnética correspondiente en vacío (sin corriente en el inducido). Teóricamente la curva anterior debiera tener una amplitud constante y de diferente signo debajo de cada polo y ser nula en el espacio interpolar, pero esto no es así debido a los flujos de dispersión que aparecen en los cuernos polares, que hacen que la forma de **B** sea en la práctica de forma trapezoidal.
- **Comportamiento en el inducido cuando se cierra el circuito:** Al cerrar el circuito del inducido, se originan unas corrientes que producen una **fmm** de forma triangular. El eje de esta **fmm** coincide con el de la línea de escobillas, de tal forma que si éstas se disponen en la línea neutra, la **fmm** del inducido será máxima en esta línea interpolar; en consecuencia, la **fmm** de reacción de inducido tiene carácter transversal respecto a la **fmm** del inductor ([Figura 2-3b](#)).
- **Comportamiento resultante en el entrehierro:** En la [Figura 2-3c](#) se representa la distribución de la **fmm** del inducido sobre la periferia del entrehierro. Se lo puede obtener sumando las flechas que representan el flujo magnético en cada caso.

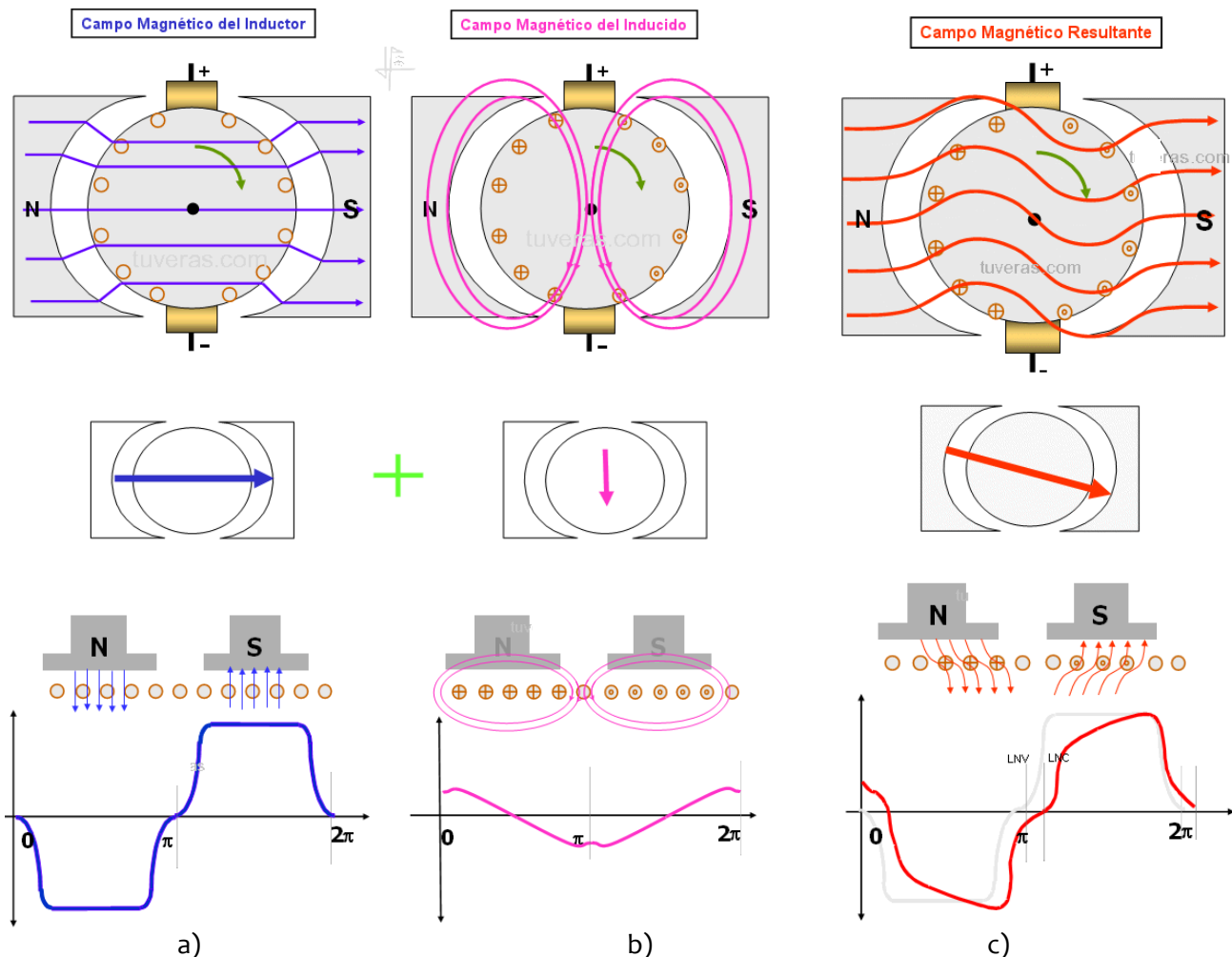


Figura 2-3: Distribución del flujo y el campo magnético respecto de la periferia del inducido en a) el inducido en vacío, b) el inducido cuando se carga el generador con una carga y c) resultante en el entrehierro.

2.1 – 1: Consecuencias de la reacción del inducido

Como consecuencia de la reacción del inducido la línea neutra (línea que une los conductores que no producen **fem**) en carga, adelanta respecto del sentido de giro un ángulo α , tomada como referencia la línea neutra en vacío:

- **Deformación del B principal:** las líneas debajo de los polos se concentran hacia un lado, produciéndose un aumento de la inducción en una mitad del polo y una disminución en la otra.
- **Disminuye la fem en la carga:** como la disminución no es compensada por el aumento, el campo se debilita.
- **Corrimiento de la zona neutra:** a consecuencia de la reacción del inducido la línea neutra (línea que une los conductores que no producen **fem**) en carga, adelanta respecto del sentido de giro un ángulo α , tomada como referencia la línea neutra en vacío. Esto hace que se deban correr las escobillas el mismo ángulo.
- **Disminuye indirectamente el rendimiento:** A consecuencia de que ha disminuido la fem en la carga, aumenta la corriente de excitación para compensar ese efecto. Lo que provoca un aumento de la potencia en el estator, lo que se traduce una disminución en el rendimiento.
- **Crea peligro de chispas en el inductor.**
- **Aumenta las dificultades para realizar una buena conmutación.**

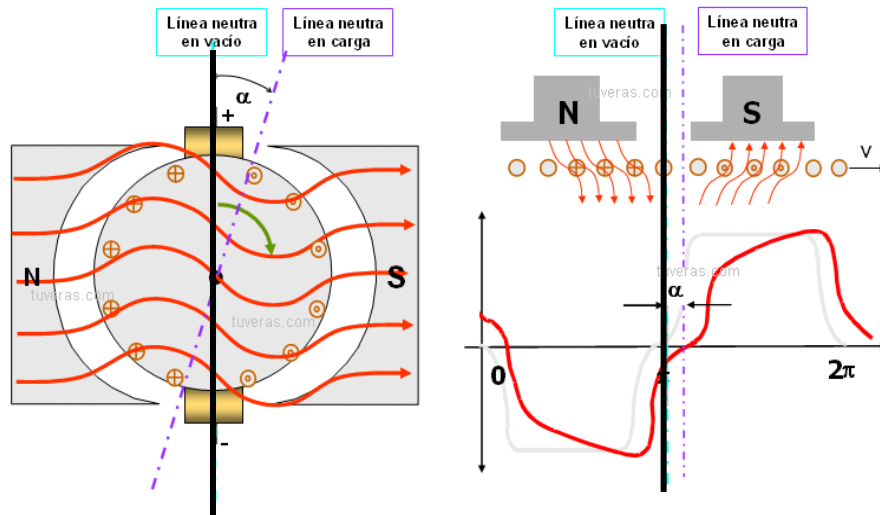


Figura 2-4: Corrimiento del eje transversal (línea neutra) como consecuencia de la reacción del inducido.

Por todo lo anterior, conviene minimizar la reacción del inducido, para esto podemos:

- **Reducir la deformación de la curva de inducción en el entrehierro.** Esto se puede hacer mediante el uso de:
 - Hendiduras en los polos o
 - Usar entrehierros variables.
- **Combatir la reacción transversal mediante flujos opuestos:** Esto se logra mediante el uso de arrollamientos de compensación.

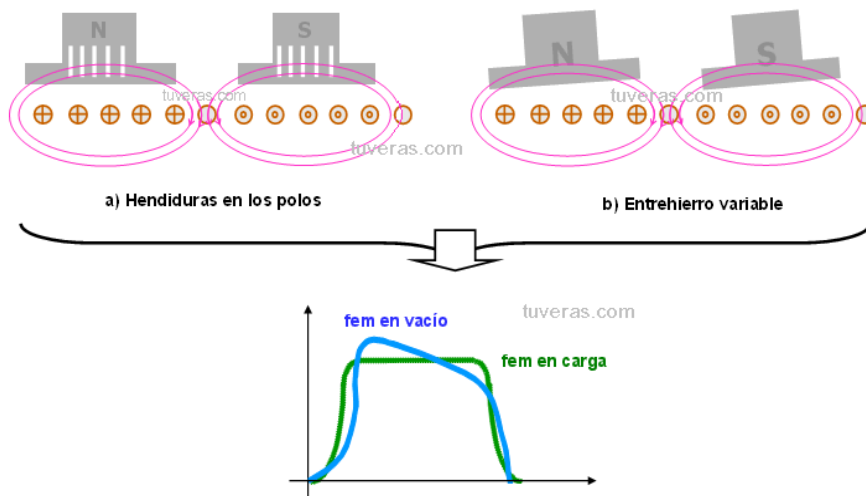


Figura 2-5: Hendiduras de hierro y entrehierro variable.

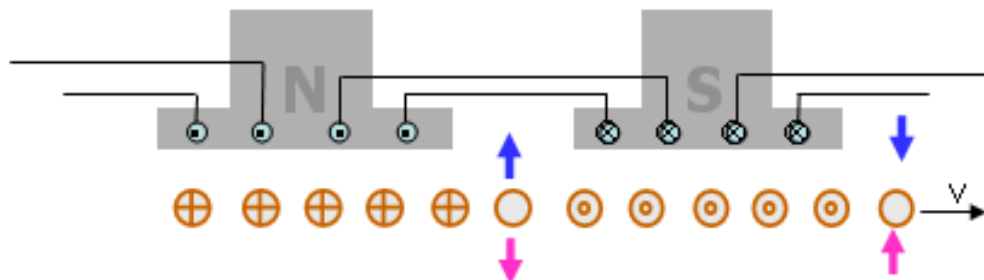


Figura 2-6: Arrollamientos de compensación.

2.3 – Conmutación

Cuando una espira pasa de una escobilla a otra, la variación de corriente en la misma produce una serie de fenómenos que depende de varios factores, a este fenómeno le llamamos **conmutación**. Una

buena conmutación debe realizarse sin la formación de chispas en el colector, mientras que una mala conmutación, concurrente con la formación de chispas, produce, para un trabajo prolongado de la máquina, un deterioro notable de la superficie del colector que perturba el buen funcionamiento de la máquina.

El chisporroteo entre las escobillas y el colector se debe a causas mecánicas y eléctricas. Entre las primeras figuran: defectuoso ajuste de las escobillas con el colector, resalte de algunas delgas, insuficiente equilibrado del rotor, etc.; todos estos factores empeoran el contacto entre las escobillas y el colector. La causa eléctrica fundamental del chisporroteo es la elevación de la tensión entre delgas adyacentes del colector, que puede ser provocada por los fenómenos de autoinducción de las secciones del arrollamiento del inducido.

Hay varios factores que intervienen en este fenómeno, por lo que resulta difícil predecirlo matemáticamente. Por eso consideramos un colector perfecto con un devanado del inducido en el que se van a omitir en principio las **fem** inducidas en las espiras conmutadas.

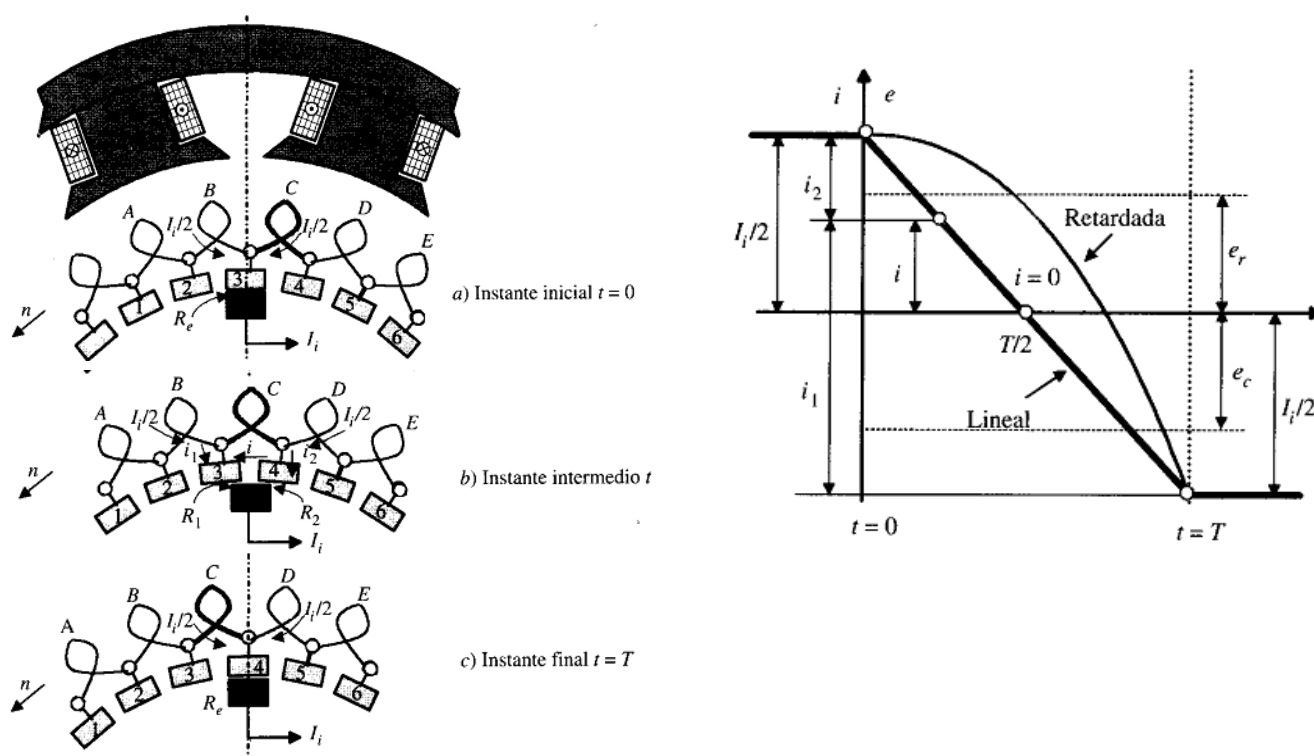


Figura 2-7: a) Proceso de conmutación en un inducido y d) variación de la corriente en la conmutación.

- **En teoría:** en la Figura 2-7, la corriente de ambas ramas del devanado pasa por la escobilla 3 y en la figura c) pasa por la escobilla 4. Al pasar la escobilla de la delga B a la C, (Figura 2-7), se anula la corriente en la bobina, puesto que en este punto la delga C recibe una corriente en un sentido (provocada por el campo en el lado izquierdo de la Figura 2-7a) y otra corriente en sentido inverso (provocada por el campo en el lado derecho de la Figura 2-7b). En el instante T que dura la conmutación, el valor de la corriente disminuye primero a cero y luego crece de nuevo.

Si representamos la corriente desde $+i$ hasta $-i$ durante el instante T, se ve que la corriente pasa de un valor a otro de forma lineal, tal como lo haría en presencia de una resistencia, y el valor en donde $i=0$ es exactamente igual a $T/2$.

- **En la práctica:** lo anterior sería lo ideal, pero en la práctica, la tensión de la reactancia $e_r + e_c$ tiende a retardar la inversión de la corriente en la bobina y como el período de conmutación es siempre T, la corriente cambia de signo no en $T/2$, sino un poco después, lo cual provoca chispas entre el colector y las escobillas. La imagen de la Figura 2-8 aclara un poco más este concepto.

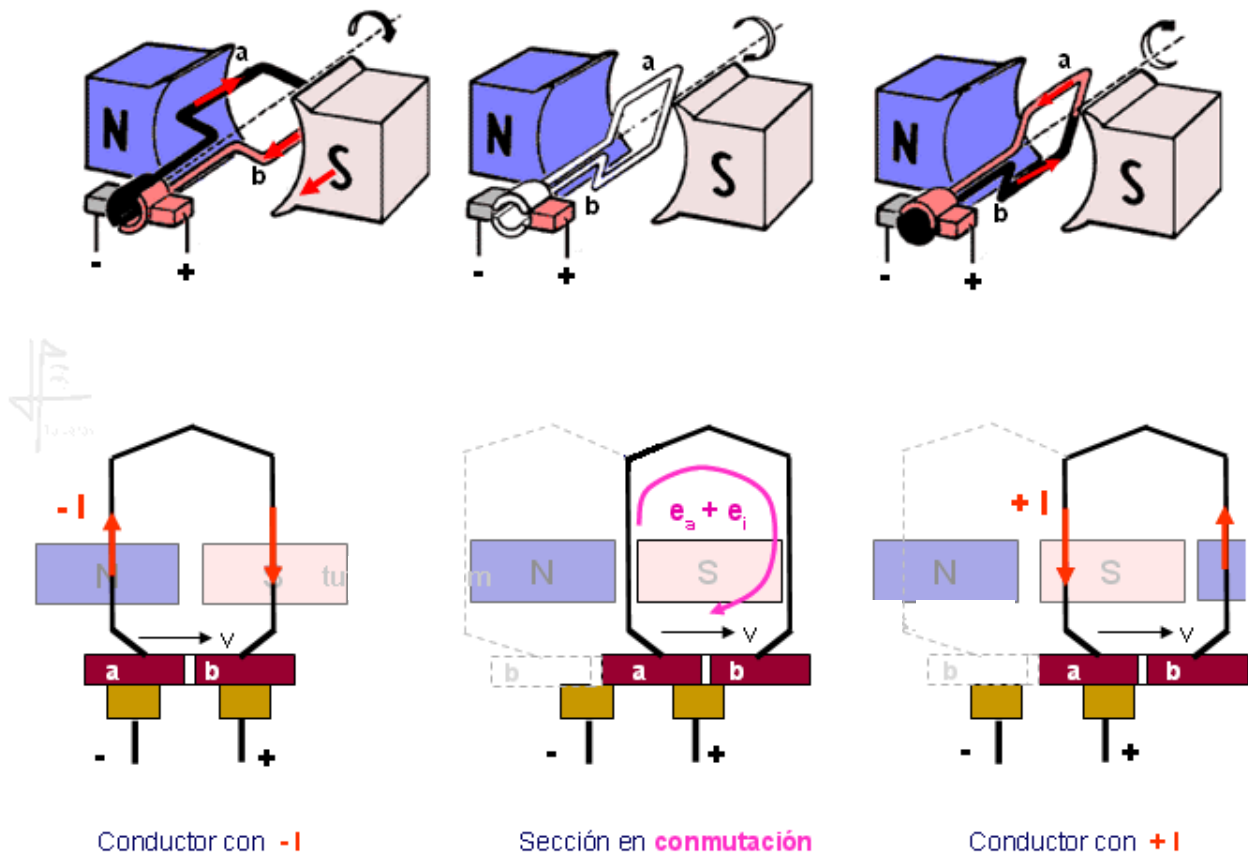


Figura 2-8: Conmutación en un motor de corriente continua.

2.3 – 1: Medidas para mejorar la conmutación

Para evitar esto aplicamos los siguientes principios:

- Hacer las fem e_c y e_r lo mas chicas posibles:
 - Aumentando el número de delgas del colector.
 - Aumentando el número de escobillas
 - Disminuyendo el flujo transversal, por los métodos vistos para disminuir la reacción del inducido.
- Aumentar la resistencia que se opone a la corriente: La resistencia del circuito de la corriente consta de la resistencia de la sección de conmutación, de la resistencia de las escobillas y de las resistencias de las escobillas 3 y 4.
- Crear en la sección de conmutación, una **fem** opuesta a $e_r + e_c$:²
 - Desplazamiento de las escobillas: en el sentido de rotación.
 - Polos de conmutación o auxiliares: que anula el flujo transversal sobre la línea neutra teórica y además producen en la sección de conmutación una **fem** opuesta a $e_r + e_c$.

2.4 – Formas de excitación y curvas características

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

1. La **excitación independiente** significa que la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente de la máquina, como una batería de acumuladores, un rectificador conectado a una red alterna, o bien un generador de corriente continua rotativo. En este

² De estos dos métodos, excepto para tensiones y potencias muy bajas, se usa exclusivamente el de los polos de conmutación.

último caso, si el generador va montado sobre el propio eje de la máquina, la excitación independiente se denomina excitación propia.

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

Las máquinas de **CC** con autoexcitación se clasifican a su vez en:

- Máquinas serie, en las que el inductor está en serie con el inducido; en este caso el devanado de excitación está preparado con pocas espiras de hilo grueso, ya que circulará por él la corriente total de la máquina.
- Máquinas shunt o derivación, en las que el devanado inductor se conecta directamente a los terminales de la máquina, quedando en paralelo (derivación) con el inducido; en este caso el devanado de excitación está formado por arrollamientos de hilo delgado con gran número de espiras.
- Máquinas compound o compuestas, en las que la excitación total está repartida entre dos devanados, uno colocado en serie (de pocas espiras de hilo grueso) y otro colocado en paralelo con el inducido (de muchas espiras de hilo delgado). Según que el devanado en derivación esté conectado directamente a las escobillas del inducido o después del devanado en serie, se obtienen las máquinas compuestas con corta o larga derivación, respectivamente.

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

1.4 – 1: Excitación independiente

El esquema es el de la figura. A través del reóstato comenzamos a excitar el inducido, creando el campo principal. Para lograr que el inducido comience a girar, debemos utilizar un medio exterior en el arranque, así comenzará a gestarse una **fem** y se podrá entregar tensión **U** a la carga.

Este método de excitación cuenta con la ventaja de la aislación entre inductor e inducido, pero tiene la contra de que necesita una fuente (**U_{ex}**) externa para excitar el inducido. La excitación independiente se usa cuando la tensión del inducido ha de variar considerablemente.

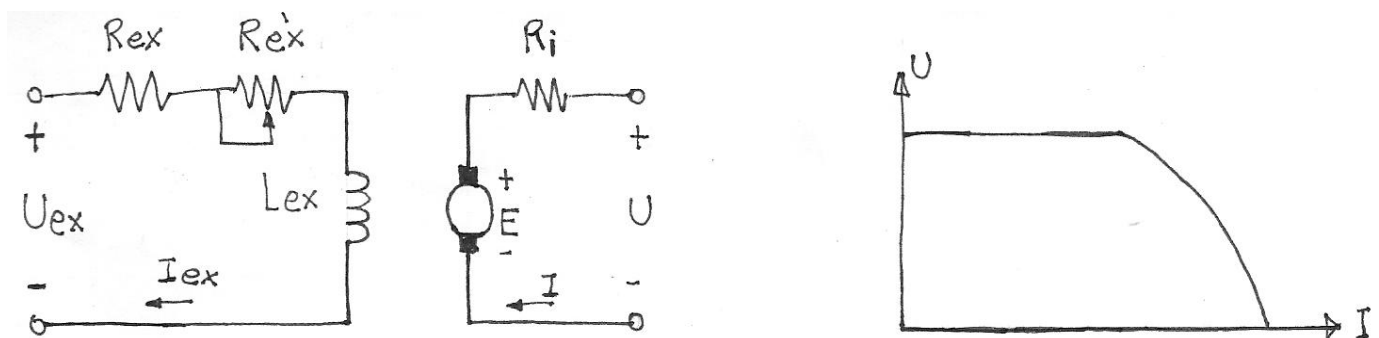


Figura 2-9: Excitación independiente.

1.4 – 2: Autoexcitación

Este método no necesita una fuente exterior de corriente continua sino que se excitan solos.

Derivación o paralelo

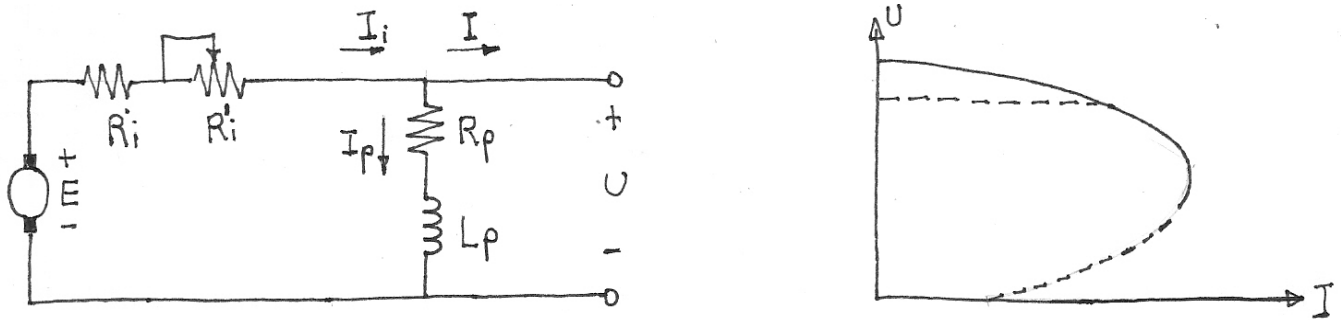


Figura 2-10: Excitación derivación o paralela.

Debido a que la corona del generador tiene un pequeño magnetismo remanente, los polos principales están magnetizados y al girar las bobinas del inducido por un medio mecánico exterior, se inducirá en ellos ($R_p + R_p' + L_p$) una pequeña **fem**, pero de valor suficiente para que derive una pequeña corriente de excitación I_p . Esta corriente creará una corriente adicional y cuando los flujos de ambas tengan el mismo sentido, el generador se autoexcitará. La corriente irá en aumento a medida que aumente la autoexcitación y el flujo, hasta saturarse los polos inductores, lo que se evita colocando devanados de regulación.

Serie

Ubal no explica el funcionamiento como en el caso anterior. Este generador solo se autoexcitará cuando se conecte una carga y la tensión será proporcional a la misma. Las corrientes de máquina I , de inducido I_i y de excitación I_s son las mismas.

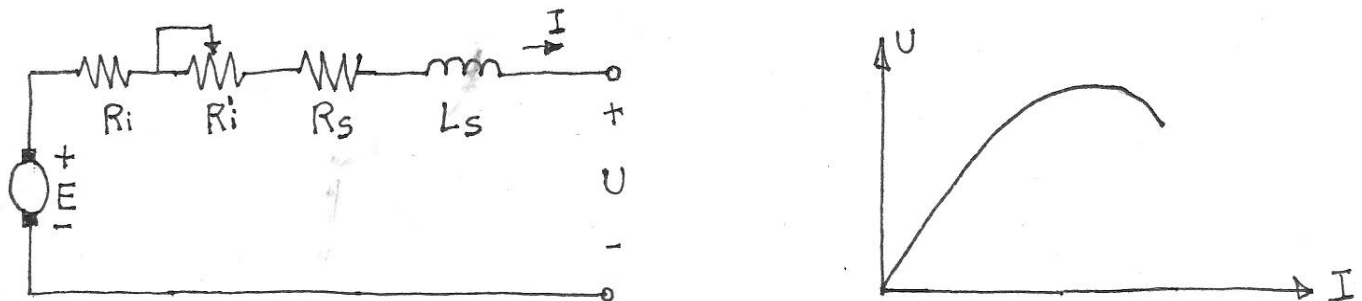


Figura 2-11: Excitación en serie.

Compuesta

Los métodos se combinan para aprovechar ambas prestaciones. El campo principal es producido por ambos devanados (L_p y L_s) siendo el aporte de L_s menor. Los devanados son recorridos por corrientes de igual sentido, por lo que sus flujos y sus **fems** se adicionan. Cuando las corrientes tienen distinto sentido (figura b), se trata de la conexión usada para generadores (usada también para soldadura rotativa de arco). En la figura c tenemos las distintas curvas.

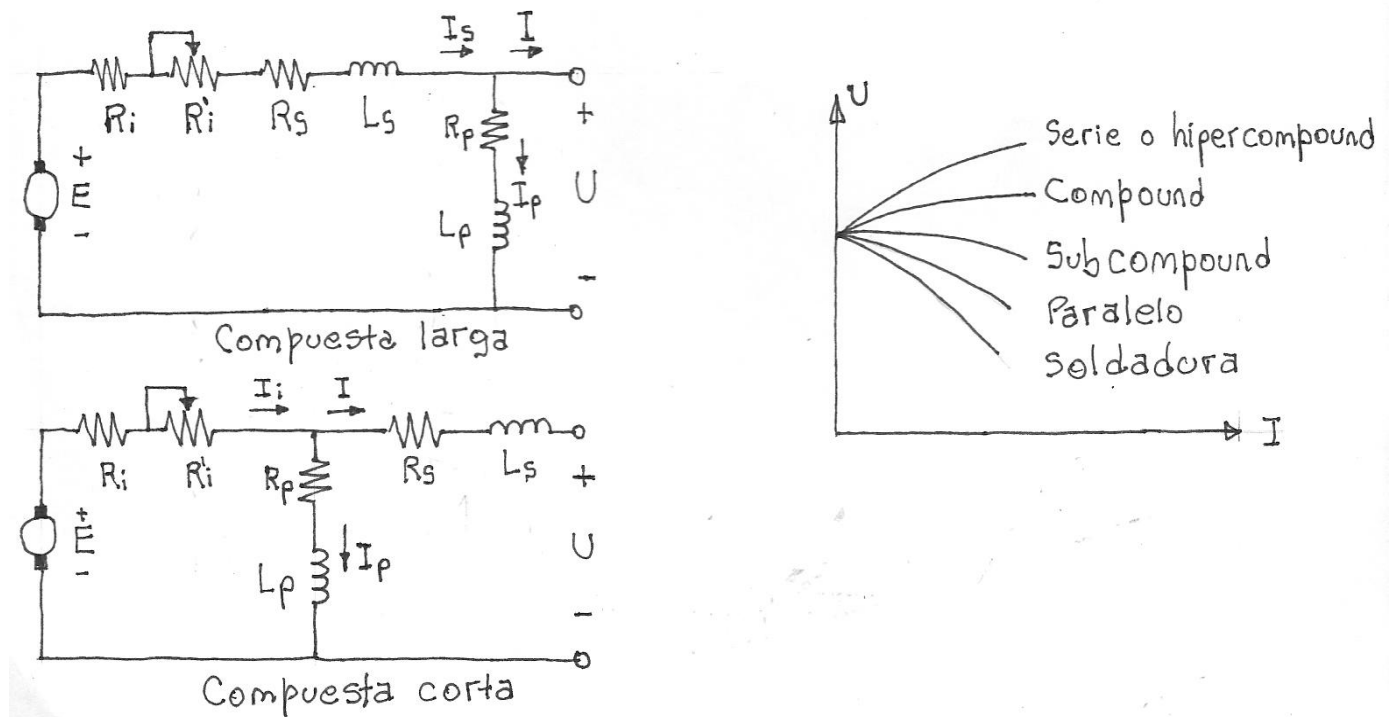


Figura 2-12: Excitación compuesta.

3 – FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR

Un motor de CC transforma una energía eléctrica de entrada en una energía mecánica de salida. Esencialmente consiste en una dinamo trabajando en régimen inverso, lo que está de acuerdo con el principio de reciprocidad electromagnética formulado por Faraday y Lenz. Para comprender este principio básico de reciprocidad en el funcionamiento de una máquina de CC, vamos a considerar una dinamo derivación que suministra energía eléctrica a una red de CC de tensión constante (Figura 3-1).

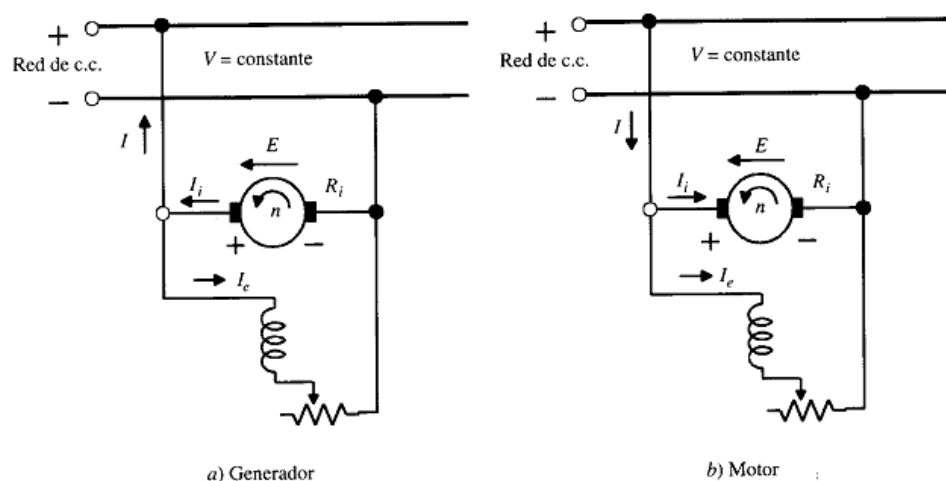


Figura 3-1: Funcionamiento de la máquina de CC como generador o como motor.

De acuerdo con la expresión (2 – 1), la aplicación de la segunda ley de Kirchhoff al circuito del inducido conduce a la siguiente ecuación:

$$V = E + I_i R_i + U_E \quad (3 - 1)$$

Que denominando $V_i = V + U_E$ a la tensión neta en el inducido nos da una corriente I_i

$$I_i = \frac{E - V_i}{R_i} \quad (3 - 2)$$

Si la fem **E** es superior a la diferencia de potencial **V_i**, el sentido de la corriente en el inducido coincide con el de **E**; en consecuencia, la máquina trabaja como generador suministrando una potencia electromagnética **E·I_i**. La máquina crea entonces un par resistente que se opone al de rotación, es decir, contrario al movimiento del motor primario.

Si disminuimos la **fem** del generador, reduciendo la velocidad de rotación o la excitación del inductor, cuando **E** se hace menor que la tensión **V_i**, la corriente **I_i** del inducido cambiará de sentido, como así lo expresa la ecuación (3 – 2); decimos entonces que la máquina produce una fuerza contra-electromotriz, ya que **E** se opone a la corriente **I_i**. En esta situación la máquina trabaja como motor y se produce un par electromagnético que coincide con el de rotación, lo que indica que el par ha pasado de ser resistente a ser motor. Desconectando el motor primario, la máquina de CC continuará girando en el mismo sentido que lo hacía cuando actuaba como generador pero desarrollando ella ahora su propio par motor. El que la máquina conserve el mismo sentido de giro trabajando como generador o como motor se debe a que se ha cambiado la polaridad de la corriente en uno solo de los devanados. En la Figura 3-1 anterior se muestra esta acción, donde puede observarse que en ambos casos la corriente de excitación tiene el mismo sentido, pero que sin embargo la corriente **I_i**, ha cambiado de signo.

Si en el régimen de funcionamiento como motor se considera positivo el signo de la corriente **I_i**, absorbida, al aplicar la segunda ley de Kirchoff al circuito del inducido de la Figura 3-1b obtenemos

$$V = E + R_i I_i + U_E \quad (3 - 3)$$

que no es más que la ecuación (3 – 2) en la que se han cambiado los signos de **I_i**, **V_i** y **E**.

Para hallar el balance de potencia en el motor de CC, multiplicamos la ecuación (3 – 3) por **I_i**

$$V \cdot I_i = E \cdot I_i + R_i I_i^2 + U_E \cdot I_i \quad (3 - 4)$$

Cuyos términos significan:

P_i = V·I_i: es la potencia eléctrica absorbida por el inducido del motor.

P_{cui} = R·I_i²: son las pérdidas en el cobre del inducido.

P_{esc} = U_E·I_i: son las pérdidas en los contactos de las escobillas.

P_a = E·I_i: es la potencia electromagnética desarrollada por la máquina.

De acuerdo con esta nomenclatura, el balance de potencias en el inducido se convierte en:

$$P_i = P_a + P_{cui} + P_{esc} \quad (3 - 5)$$

La potencia electromagnética **P_a** expresa la potencia mecánica total que produce el motor, y que da lugar, al dividir por la velocidad de giro, al par interno desarrollado por la máquina.

Para calcular la potencia mecánica útil en el árbol del motor habrá que restar a la potencia electromagnética, **P_a**, las pérdidas rotóricas, que abarcan las pérdidas en el hierro **P_{Fe}** y las pérdidas mecánicas **P_m** de rozamiento y ventilación. En consecuencia, la potencia útil del motor **P₂** se podrá poner

$$P_2 = P_a - P_{Fe} + P_m \quad (3 - 6)$$

La potencia absorbida por la máquina **P_i**, en el caso de tener el motor excitación independiente, será igual a la potencia que llega al inducido **P_i**; sin embargo, en las máquinas auto excitadas la potencia de entrada tendrá que compensar también las pérdidas en el circuito de excitación **P_{ex}** debidas al efecto Joule en el cobre del inductor, resultando:

$$P_1 = P_i + P_{esc} \quad (3 - 7)$$

La Figura 3-2 muestra cómo se reparten las potencias en el motor de CC. La potencia de entrada **P_i** es el producto de la tensión de alimentación por la corriente absorbida, el rendimiento del motor será

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (3 - 8)$$

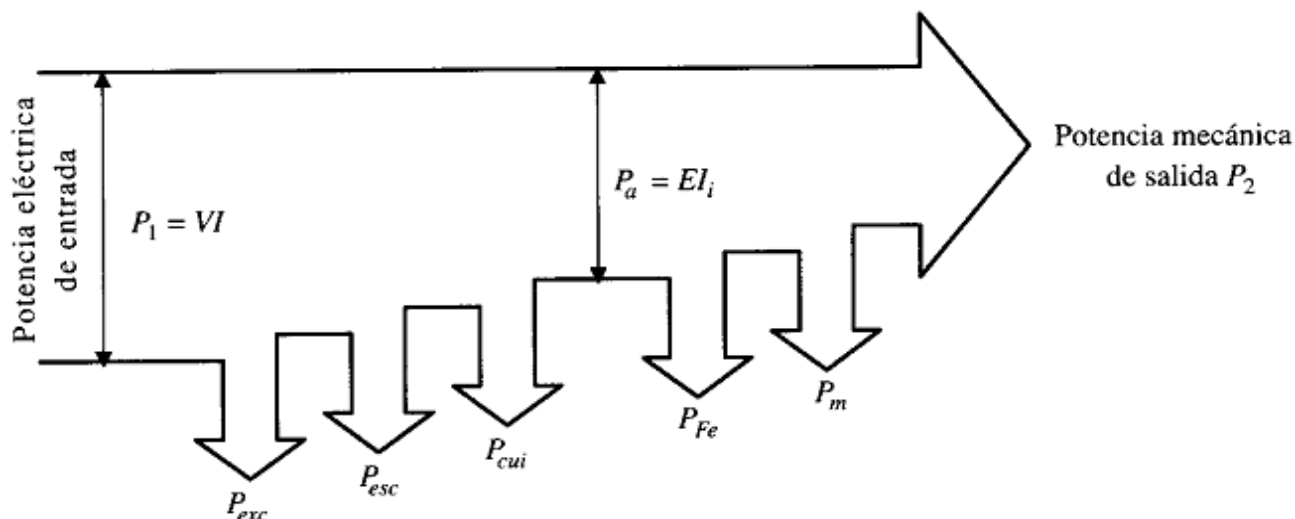


Figura 3-2: Balance de potencias en el motor de CC.

3.1 – Cupla motora

La cupla motora es el par de fuerzas aplicado en la periferia del inducido, por tanto su valor será

$$M = \frac{F \cdot D}{2} \quad (3-9)$$

La fuerza de un solo conductor activo es

$$F = B \cdot \ell \cdot I$$

La fuerza en un motor con Z_i , a y p será

$$F(\text{motor}) = B \cdot \ell \cdot I \cdot \frac{Z_i \cdot \alpha_i}{2 \cdot a} \quad (3-10)$$

La inducción sabemos que vale

$$B = \Phi_a \cdot S \quad (3-11)$$

En donde la superficie aquí será

$$S = \frac{2 \cdot p}{\ell \cdot \alpha_i \cdot \pi \cdot D} \quad (3-12)$$

Y el flujo lo obtenemos despejando Φ de la ecuación (2-11).

$$\Phi = \frac{E \cdot 60 \cdot I}{n \cdot \pi \cdot D} \quad (3-13)$$

Reemplazando esta ecuación y la anterior en (3-11) y ésta a su vez en (3-10) tendremos que la fuerza en un motor será

$$F(\text{motor}) = \frac{E \cdot 60 \cdot a}{p \cdot Z_i \cdot n} \cdot \frac{2 \cdot p}{\ell \cdot \alpha_i \cdot \pi \cdot D} \cdot \ell \cdot I \cdot \frac{Z_i}{2 \cdot a} \alpha_i = \frac{E \cdot 60 \cdot I}{n \cdot \pi \cdot D} \quad (3-14)$$

Y reemplazando este valor en (3-9) obtenemos que la cupla motora (o par motor) es

$$M = \frac{F \cdot D}{2} = \frac{E \cdot 60 \cdot I}{n \cdot \pi \cdot D} \cdot \frac{D}{2} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{E \cdot I}{n} = 0,975 \frac{P}{n} = M[\text{Kgm}] \quad (3-15)$$

El motor deberá contar con una cupla o par determinado, de modo tal que pueda vencer al par resistente M_r que se opone al giro del mismo. En la siguiente figura además del par interno M_i , hemos representado la del par sobrante M_a más el par resistente M_r . En el instante n_1 , vemos que hay un gran par sobrante que se emplea para la aceleración del inducido. Al aumentar la velocidad, se reduce cada vez más el par sobrante o acelerador, hasta el punto de intersección de ambas curvas (n_2), que es cuando el

inducido llega finalmente a una velocidad en la cual el par interno equivale al par absorbido $M_a + M_r$. En este punto, el motor no puede acelerar más, ya que está en el punto de funcionamiento correspondiente al valor de régimen.

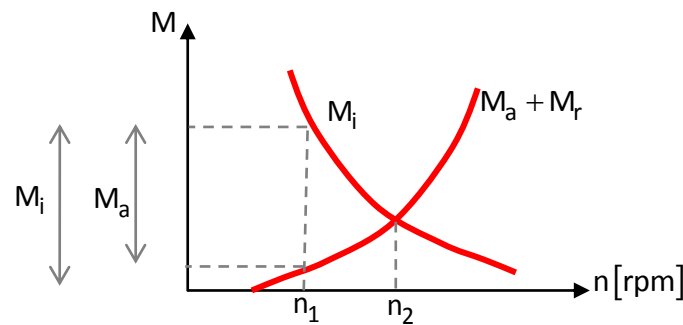


Figura 3-3: Cupla M_i y $M_a + M_r$ en función de n .

3.2 – Formas de excitación y curvas características

Al igual que en el caso de los generadores, en los motores existen las mismas formas de excitación.

3.2 – 1: Independiente

Como su nombre lo indica, va conectada en forma directa a la red, por ello se usa en muy pocos casos, por lo que su análisis no tiene sentido.

3.2 – 2: Excitación derivación

El esquema de conexión es el de la figura. El reóstato R_p' se coloca en serie con el circuito inductivo (L_p) para limitar la corriente de arranque, ya que el valor de la misma es el doble o triple que la corriente nominal. A medida que el motor va ganando velocidad (n) el reóstato va disminuyendo su valor, ya que $R_p' \ll X_{LP}$. A medida que variamos el reóstato obtenemos los gráficos de la figura a.

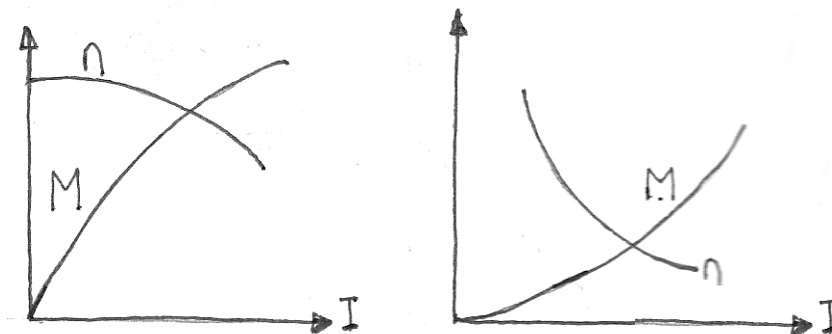


Figura 3-4: a) Excitación independiente y b) excitación en serie.

3.2 – 3: Excitación en serie

El esquema de esta conexión se muestra en la figura. El funcionamiento es parecido al de su equivalente del generador. De nuevo aquí, a medida que el motor aumenta la velocidad, el reóstato se elimina, así se conforman las figura b.

3.2 – 4: Excitación compuesta

Este tipo de excitación es la mezcla de las dos anteriores, en el arranque los motores de CC, y su principio se basa en la variación de la tensión aplicada al motor durante su puesta en marcha.