

Unidad 7

MÁQUINAS ELÉCTRICAS: de CORRIENTE CONTINUA

ELECTROTECNIA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

(INGENIERÍA MECÁNICA)

M - 14

Ing. Julián J. Ronco (Prof. Adj.)

Ing. Jorge C. Ronco (Prof. Adj.)

Mauro Curli (Aux.)

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

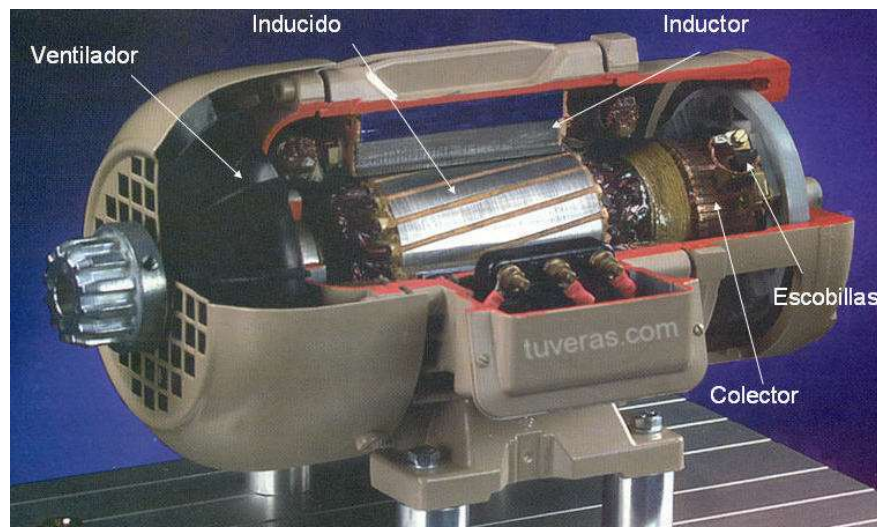
7.1 INTRODUCCIÓN

"Las máquinas de corriente continua (c.c.) transforman energía eléctrica, en forma de corriente continua, en energía mecánica si son motores, o viceversa si son generadores, también conocidos como dinamos"

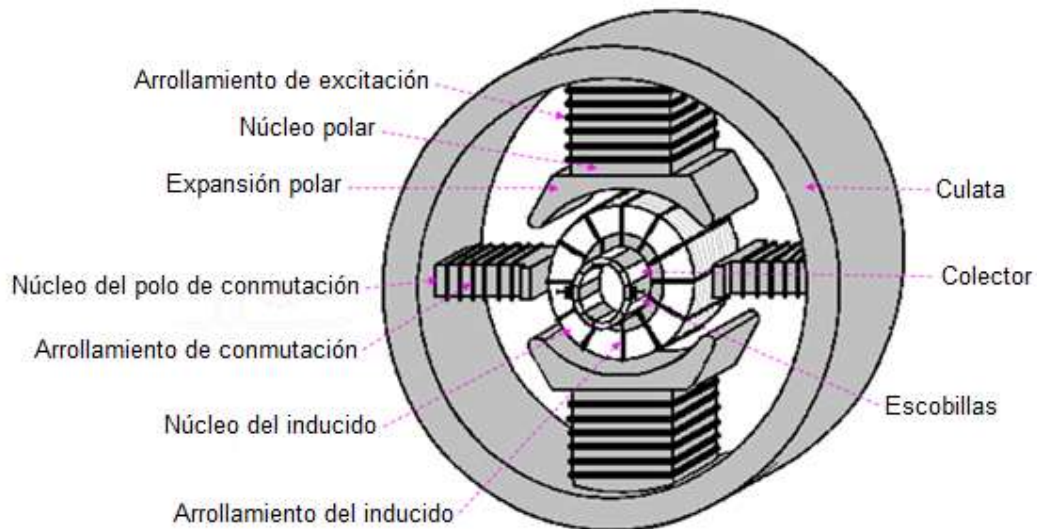
Las máquinas de c.c. fueron las primeras en emplearse como generadores o dinamos, representando el primer procedimiento para producir energía eléctrica a gran escala. Sin embargo, al día de hoy su empleo como generador está prácticamente obsoleto debido a las diferentes ventajas (analizadas a lo largo de la materia) que presenta la corriente alterna para la generación, transporte y distribución de la energía eléctrica frente a la c.c. Actualmente, cuando se requiere corriente continua para una aplicación determinada, se recurre al empleo de rectificadores electrónicos, que transforman de forma estática la c.a. de la red en c.c., con un gran rendimiento.

El modo de funcionamiento más utilizado de las máquinas de corriente continua es como motor. Las ventajas fundamentales de estos motores de c.c. frente a los motores de c.a. son: su mayor grado de flexibilidad para el control de su velocidad y par; y el rango de velocidades muy superior a los motores de c.a. Es por esto que resulta interesante su aplicación en diversos accionamientos industriales, tales como: trenes de laminación, telares, tracción eléctrica, etc. Pero nuevamente, a causa del avance de la electrónica de potencia, su aplicación está siendo reemplazada, incluso en estos campos, por los motores de c.a., cuyo costo de fabricación y mantenimiento es más reducido.

7.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVO



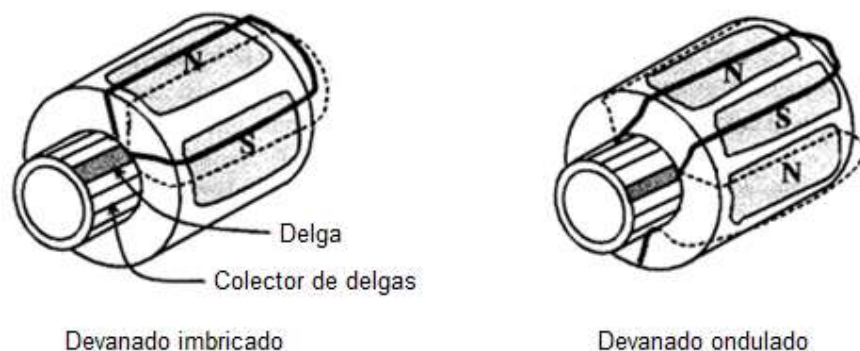
Como las demás máquinas dinámicas, a la máquina de c.c. la componen una parte fija o estator y una parte móvil o rotor. En la siguiente figura, se muestran las partes constitutivas principales de una máquina de corriente continua:



En el **estator** se aloja el arrollamiento **inductor** o de **excitación**, que es el que generará el campo magnético fijo en el espacio al ser alimentado por corriente continua. Dicho campo será tanto mayor cuanto mayor sea la corriente por los devanados. Puede suponerse que en la región del entrehierro, el campo magnético es radial, centrípeto en el polo norte y centrífugo en el polo sur.

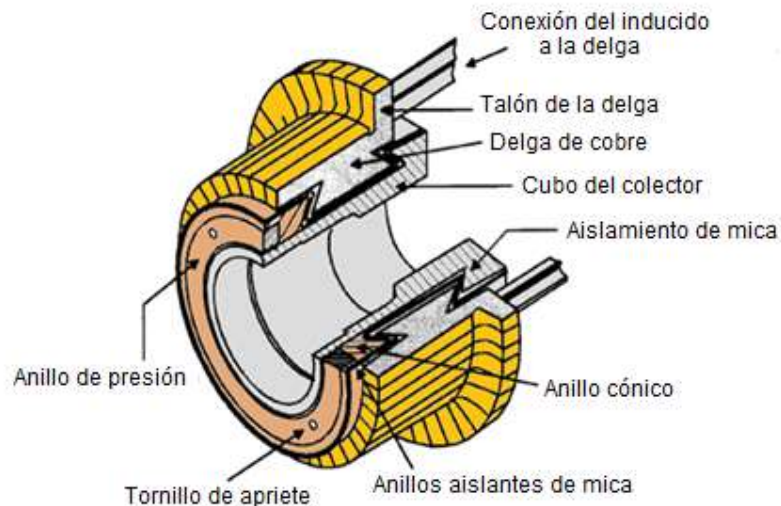
El **rotor** está formado por el **inducido** y el **colector de delgas** o **conmutador**. Se construye con discos de chapas de acero al silicio, que tienen fresadas unas ranuras para alojar en ellas el correspondiente devanado.

En la actualidad, los arrollamientos del inducido son en *tambor*, cerrados, lo cual indica que el bobinado se cierra sobre sí mismo sin principio ni fin. Los mismos pueden ser *imbricados* u *ondulados*, dependiendo de si se cruzan o no las partes de la bobina observadas desde el lado del colector:



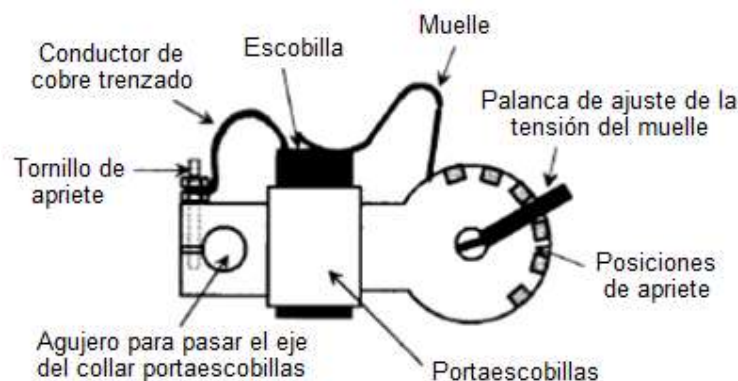
Vale observar en las figuras que, en ambos casos, las bobinas que forman los devanados, constan de dos lados activos que se sitúan debajo de polos de diferente nombre con objeto de obtener la mayor f.e.m. posible; se dice que están alojados en dos ranuras diametralmente opuestas

El **colector de delgas** o **conmutador** es el órgano que caracteriza específicamente a estas máquinas, y es el encargado de la conversión mecánica de la corriente alterna inducida en las bobinas en corriente continua de salida:



El colector de delgas está formado por láminas de cobre o delgas, las cuales están aisladas entre sí y giran solidariamente con el rotor. Las delgas están conectadas eléctricamente a las bobinas del devanado inducido y por medio de ellas se produce la extracción o suministro de corriente al colector, a través de las escobillas.

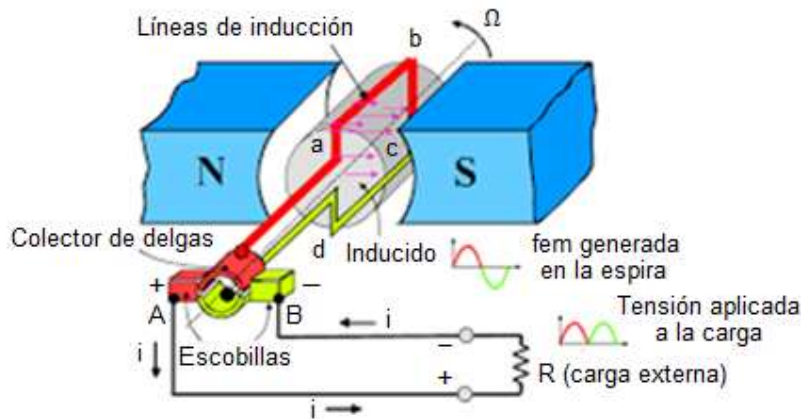
Las **escobillas** permanecen fijas en el espacio, dispuestas en los portaescobillas, estando en contacto permanente con la superficie del colector de delgas, el cual gira junto con el rotor. Esto permite el paso de corriente eléctrica entre el exterior y el devanado inducido del rotor:



7.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Como se señaló en el punto anterior, para introducir o sacar corrientes de los bobinados situados en el rotor de la máquina de corriente continua, es preciso recurrir a un sistema colector de delgas o conmutador.

Para ver el funcionamiento de los colectores de delgas, vamos a considerar el estudio de una máquina funcionando como generador elemental, constituido por un imán en el estator (inductor), y una espira en el rotor (inducido):

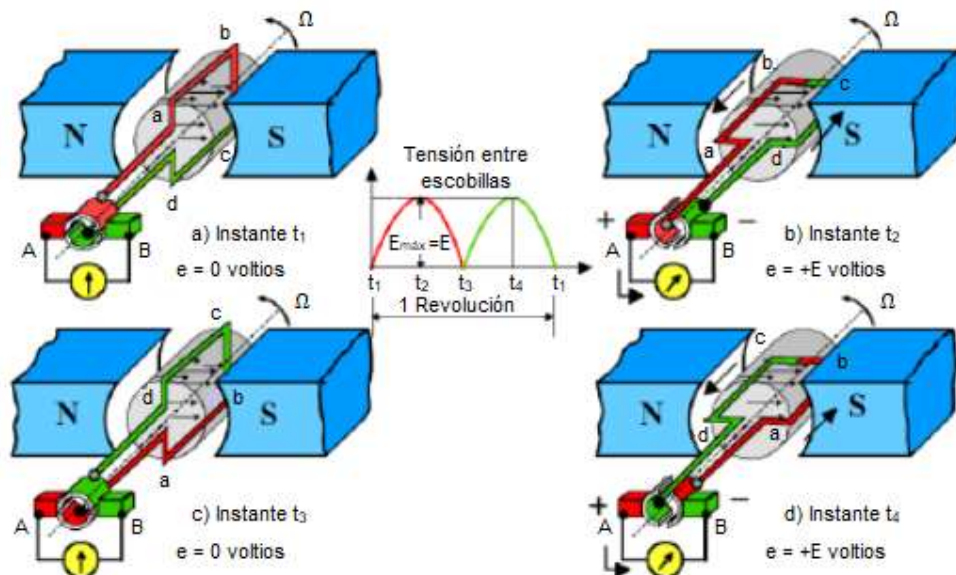


Como se analizó en las unidades anteriores (ver pág. 15 de la Unidad 1), al hacer girar la espira dentro del campo inductor fijo, se induce en ella una f.e.m. alterna, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de giro (n) y al número de pares de polos (p) de la máquina: $f = \frac{np}{60}$

Se observa en la figura que los extremos de la espira van a parar a un anillo formado por dos delgas (segmentos de cobre), que estarán aisladas entre sí y del eje. Sobre las delgas van colocadas las escobillas fijas en el espacio, a las cuales se conecta el circuito exterior. La misión del colector de delgas es obligar a que la corriente que atraviesa el circuito exterior circule siempre en el mismo sentido, de forma que, aunque la f.e.m. inducida en la espira sea sinusoidal (c.a.), la corriente que atraviesa el circuito sea unidireccional. A esta operación se la conoce como *rectificación*, y se realiza de forma automática con el conmutador. Para que la rectificación de la onda alterna sea total, las escobillas deben colocarse de modo que la f.e.m. inducida en la espira sea igual a cero en el momento en el que la escobilla pasa de una delga a la otra.

Este proceso puede verse más claramente en la siguiente secuencia de imágenes, donde se representa una revolución completa de la espira, instalando a la salida un voltímetro con el cero en el centro para ver la polaridad de la tensión que resulta entre las escobillas en cada instante; también, en la parte central de la figura, se representa la evolución temporal de la tensión de salida.

Recordar:
$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \oint_{\gamma} (v \times B) \cdot dl \quad (\text{f.e.m. de movimiento})$$

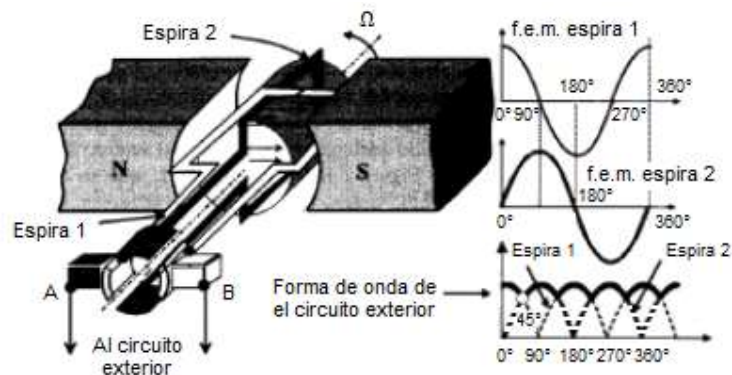


En el instante t_1 , el plano de la espira es vertical por lo que el flujo magnético es máximo y en consecuencia la f.e.m. inducida es nula, lo que se refleja en el voltímetro que señalará cero voltios. En el instante t_2 la f.e.m. inducida será máxima, y se dirigirá de **b** a **a** en la parte **roja** de la espira (atrás-adelante), respondiendo al producto vectorial $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, mientras que en la parte **verde** de la espira, la f.e.m. inducida irá de **d** a **c** (adelante-atrás); esto justifica el sentido de la desviación que aparece en el voltímetro en la figura b, que se dirige de la escobilla **roja** a la **verde**.

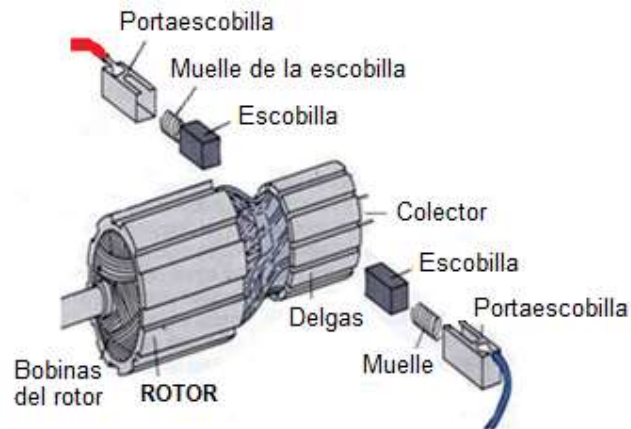
Como quiera que al moverse la espira, la escobilla **roja/verde** siempre hace contacto con el conductor que se encuentra bajo el polo norte/sur, la polaridad de la escobilla **roja/verde** será siempre positiva/negativa, por lo que la corriente se dirigirá siempre en el circuito exterior desde la escobilla **roja** a la escobilla **verde**, lo que significa que la tensión de salida tiene carácter unidireccional.

Con esta configuración se obtiene una tensión que suele denominarse *pulsante* por su aspecto, pero tiene siempre la misma polaridad.

En la práctica, para obtener una c.c. que tenga menor oscilación, se aumenta el número de delgas del colector, con más bobinas en el inducido. Supongamos el caso de un colector con cuatro delgas y dos bobinas:



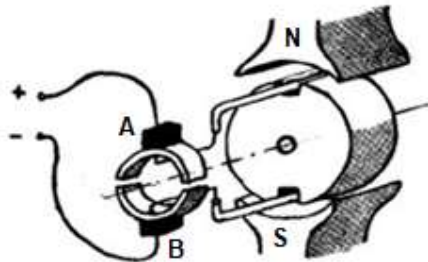
Entonces, para que las ondulaciones de la f.e.m. se reduzcan aún más, y de que la d.d.p. entre las delgas no llegue a ser tan alta que produzca chispas en el colector, se procura que el número de delgas sea relativamente grande, adquiriendo el conmutador la forma indicada en el punto 7.2.



Junto al incremento de la cantidad de delgas, también aumentará el número de bobinas en el rotor, para lo que se necesitará una mayor cantidad de ranuras en el mismo para alojarlas. Los devanados estarán organizados para que cada escobilla esté conectada a los extremos de los hilos que pasan frente a un polo y produzcan la **conmutación** cuando van a pasar a estar bajo la influencia del otro polo.

De esta forma, las escobillas de la máquina, situadas en el eje transversal de los polos, recogerán las f.e.m. inducidas en las distintas bobinas durante un semiperíodo, y la f.e.m. resultante en el inducido será igual a la suma de las f.e.m. medias de las distintas bobinas que se encuentren bajo la inducción de un mismo polo.

7.3.1 TENSIÓN INDUCIDA



Recordemos que, en cada bobina se inducirá una f.e.m. debido al movimiento de las espiras dentro del campo magnético inductor:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \oint_{\gamma} (v \times B) \cdot dl$$

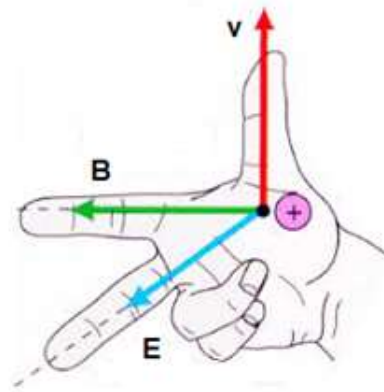
En un semiperíodo de la bobina el flujo concatenado varía entre los límites $+\Phi$ y $-\Phi$ (flujo de los polos), en consecuencia, el valor medio de la f.e.m. obtenida en la bobina en el tiempo mencionado será:

$$E_{med} = -\frac{2}{T} \int_{-\Phi}^{+\Phi} d\Phi = \frac{4\Phi}{T}$$

donde T indica el período de la corriente. Como se vio, la frecuencia de la tensión generada dependerá del número de polos $2p$ y de la velocidad n en r.p.m. según:

$$f = \frac{np}{60} \Rightarrow E_{med} = 4\Phi \frac{pn}{60}$$

El sentido de la f.e.m. viene dado por la regla de la mano derecha. En consecuencia, en el conductor que pasa debajo del polo norte tendrá una f.e.m. de sentido opuesto al conductor que pasa debajo del polo sur.



En una máquina real, en donde se disponen de distintas bobinas, la f.e.m. resultante colectada por las escobillas será igual a la suma de las f.e.m. medias de las distintas bobinas que componen cada rama en paralelo del devanado (esto dependerá del tipo de devanado utilizado y del número de pares de polos p , lo que excede el alcance de la materia).

La f.e.m. resultante tendrá la siguiente magnitud:

$$E = k_E n \Phi$$

donde k_E es la constante propia de cada máquina (tipo de devanado y pares de polos).

De esta última expresión se deduce que la f.e.m. puede regularse variando la velocidad del rotor (n) o cambiando el flujo inductor mediante el ajuste de la corriente de excitación de los polos (I_e).

7.3.2 TORQUE EN 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 una red de c.c., lo que provoca una f.e.m. de reacción en el rotor que se opone al sentido de la corriente y que recibe por ello el nombre de *fuerza contraelectromotriz* (f.c.e.m.).

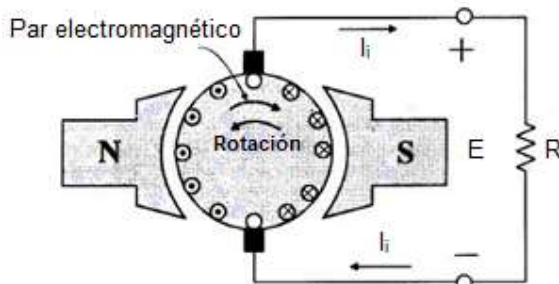
En cualquier caso, funcione la máquina de c.c. como generador o como motor, el paso de una corriente continua por los conductores del inducido provoca en el rotor un par electromagnético que tienen carácter resistente para el trabajo como generador y carácter motor cuando la máquina mueve una carga mecánica (es decir, cuando funciona como motor de c.c.).

Luego de un análisis, que excede a la cátedra, se llega a la expresión del par electromecánico de la máquina de corriente continua:

$$T = k_T I_i \Phi$$

Como se ve, el mismo surge de la interacción de dos campos magnéticos en cuadratura: el inductor (Φ_e), generado por el arrollamiento de excitación; y el inducido o de armadura, que será función de la corriente por el inducido (I_i).

Analicemos el comportamiento de la máquina de c.c. como generador y como motor de manera gráfica:



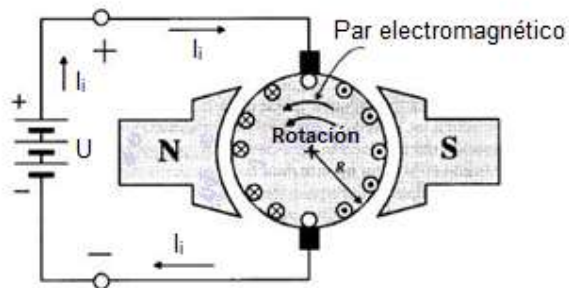
Como **generador**, al conectar una resistencia de carga entre las escobillas, aparecen unas corrientes de circulación en los conductores del inducido que al reaccionar con el campo magnético inductor provocan un par electromagnético que se opone a la rotación y que por tanto, tiene carácter resistente respecto a la acción del motor primario.

Para mantener la velocidad del dínamo (o generador), el par del motor primario ha de ser suficiente para equilibrar este par resistente, junto con el par de pérdidas debido a los efectos de rozamiento, ventilación, etc.

Como **motor**, se aplica una tensión de c.c. de alimentación al inducido, que provoca una corriente de circulación por los conductores de este devanado.

La interacción de estas corrientes con el flujo inductor origina un par de rotación que obliga a girar a la máquina. Esto origina una f.e.m. en el inducido que se opone a dichas corrientes y por ello, recibe el nombre de **fuerza contraelectromotriz**.

El movimiento del motor se mantendrá en tanto que el par electromagnético de rotación producido sea superior al par resistente ejercido por la carga mecánica conectada al eje de la máquina.

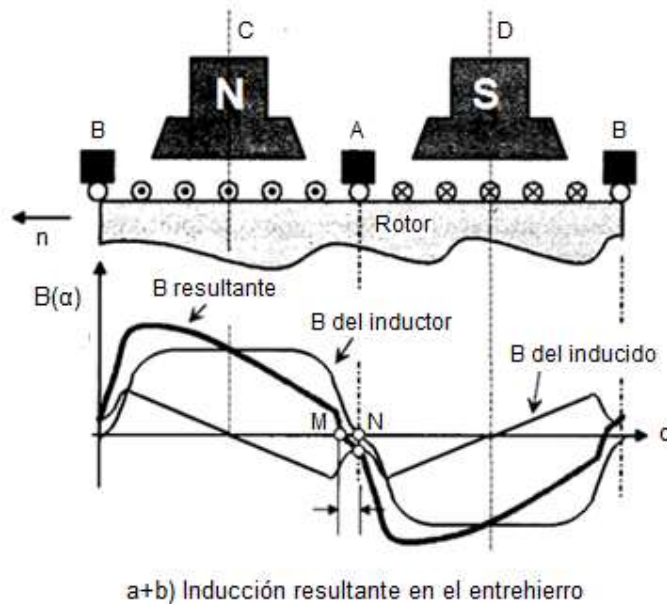
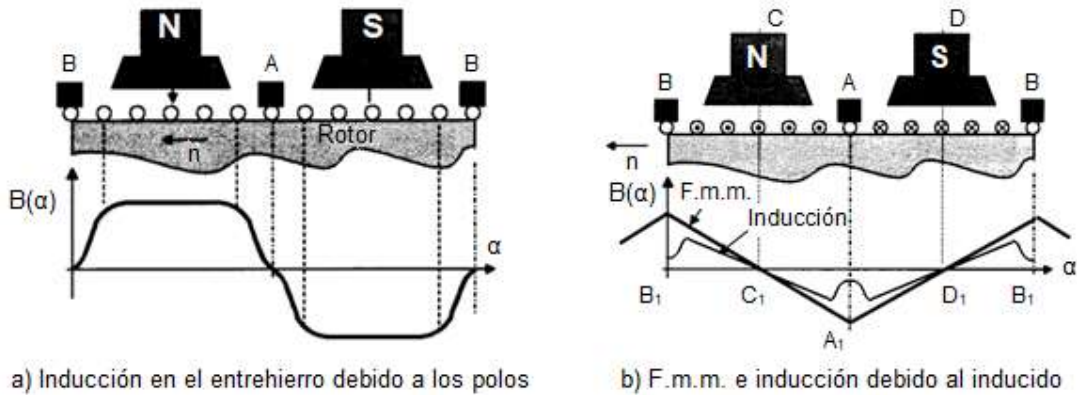


7.4 REACCIÓN DE INDUCIDO

Cuando una máquina de c.c. funciona en vacío (como generador), no circula corriente por el inducido y el flujo en el entrehierro está producido únicamente por la f.m.m. 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 da lugar a una f.m.m., que combinada con la del estator, produce el flujo resultante en el entrehierro de la máquina. Al efecto que produce la f.m.m. de este devanado sobre la f.m.m. del inductor se lo conoce como **reacción del inducido o de armadura**; haciendo variar la forma y magnitud del flujo en el entrehierro respecto a los valores que la máquina presentaba en vacío.

Si bien el desarrollo conceptual del tema excede a la materia (se puede acceder al mismo en el libro de seguimiento de la cátedra: "*Máquinas Eléctricas*, Jesús Fraile Mora" – Epígrafe 6.4), se van a representar en forma gráfica los campos magnéticos producidos

por el inductor y el inducido, y el campo magnético final en el entrehierro producto de la interacción de los mismos:



Como se aprecia en la última figura, algunas consecuencias producto de la reacción del inducido son:

- En primer lugar, la reacción del inducido deforma la curva de inducción debajo de cada polo, reforzando el campo en un lado del polo y debilitándolo en el otro. Esto puede reflejarse en una reducción de la f.e.m. de salida dado que disminuye la inducción neta en el entrehierro.
- Disminución del rendimiento de la máquina, ya que debemos aumentar la corriente de campo (excitación) para compensar la disminución de la inducción.

- En aumento del campo en un lado del polo, eleva la tensión entre delgas consecutivas en esa zona, lo que puede conducir a un chisporroteo en el colector. Esto empeora el proceso de conmutación, pudiendo afectar la vida útil de la máquina.

Este último punto se ve reflejado en la figura, donde la línea neutra magnética, que cuando la máquina trabaja en vacío coincide con la línea media entre los polos (punto **N**), se adelanta respecto del sentido de giro del rotor (punto **M**), cuando circula corriente por el inducido, con la máquina funcionando como generador.

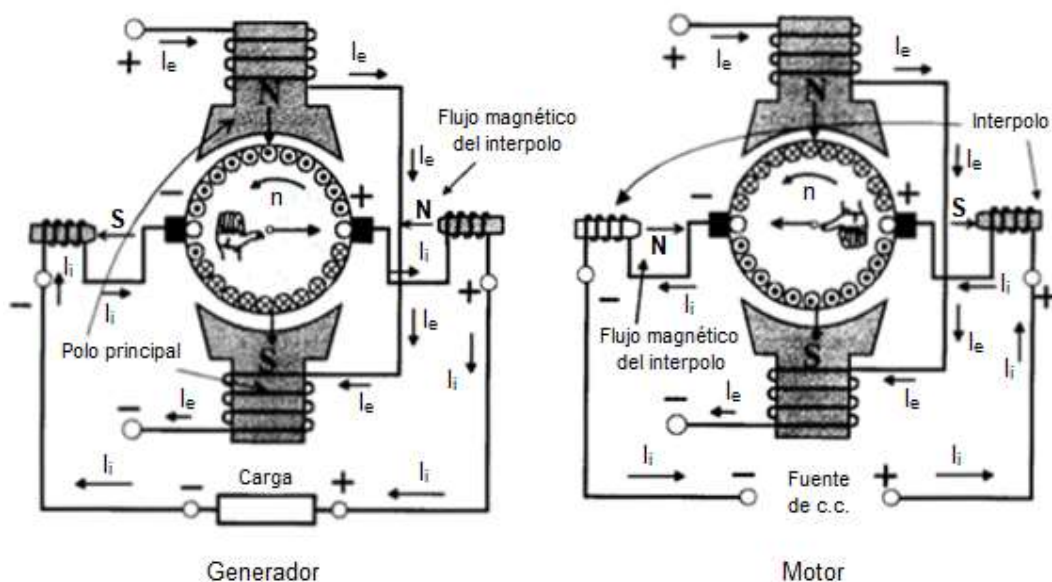
En el caso del funcionamiento como motor, un razonamiento análogo indicaría que la línea neutra magnética se retrasa respecto a la geométrica.

En ambos casos (generador o motor), el cambio de sentido de la corriente en los hilos del rotor se hace en presencia de un campo, el cual induce unas tensiones sobre los hilos conductores que impiden que la corriente pase por cero en el momento de la conmutación y se originen dichos arcos eléctricos (chisporroteo) perjudiciales para el colector y las escobillas.

Una de las alternativas para evitar este inconveniente sería desplazar ligeramente las escobillas a la línea neutra magnética verdadera. Sin embargo, este método no es aconsejable, ya que habría que adaptar la posición de las escobillas según la corriente de la carga.

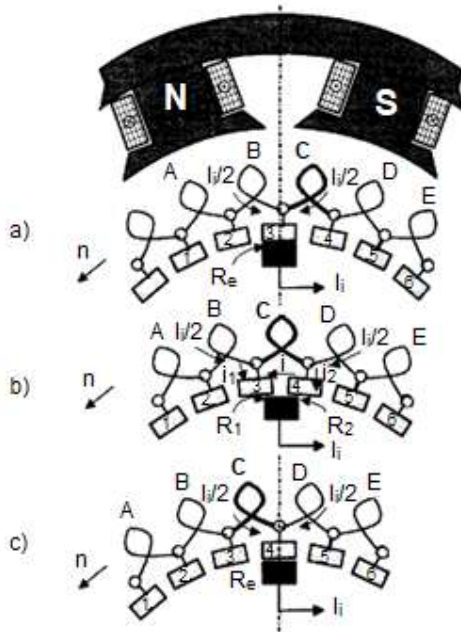
En la mayoría de las máquinas de c.c., para eliminar el desplazamiento de la línea neutra geométrica con las variaciones de carga y asegurar una mejor conmutación, se emplean los llamados *polos auxiliares*, *interpolos* o *polos de conmutación*. Los mismos consisten en pequeños núcleos magnéticos que se colocan en la línea neutra teórica, que van provistos de un devanado que se conecta en serie con el inducido, y que producen un campo magnético que contrarresta el efecto indeseado de la reacción del inducido.

El efecto de los mismos, tanto en su funcionamiento como generador como motor, se ejemplifica en las siguientes gráficas (su interpretación está disponible en el libro de seguimiento de la cátedra: "Máquinas Eléctricas, Jesús Fraile Mora" – Epígrafe 6.4):



7.5 CONMUTACIÓN

Se entiende por **conmutación** al conjunto de fenómenos relacionados con la variación de corriente en los conductores del inducido al pasar por la zona donde se cortocircuitan por las escobillas del colector:



Proceso de conmutación:

En el instante inicial, representado por la figura **a**, la corriente de salida de la escobilla se toma de la delga **3**, y la corriente por la espira **C** tiene un sentido de derecha a izquierda.

En la posición intermedia (figura **b**), la corriente en la espira **C**, que está pasando por la línea neutra, debe invertir su sentido.

Finalmente, la conmutación se obtiene cuando la escobilla deja de hacer contacto con la delga **3** (figura **c**), y la corriente en la espira **C** se ha invertido.

Ahora la corriente de salida es colectada de la delga **4**.

Puede verse que en el movimiento del rotor, hay momentos en que las escobillas hacen simultáneamente contacto sobre dos delgas consecutivas (delgas **3** y **4** en este caso), poniendo en cortocircuito las espiras del inducido. Cuando se produce la apertura del cortocircuito de las espiras, esto es, cuando la escobilla deja de tocar la delga **3**, aparece un arco eléctrico (chispas) entre escobilla y delga, que es tanto mayor cuanto mayor sea la corriente cortada y proporcional a la corriente total que circula por el inducido. Estas chispas en el colector pueden deberse a dos factores:

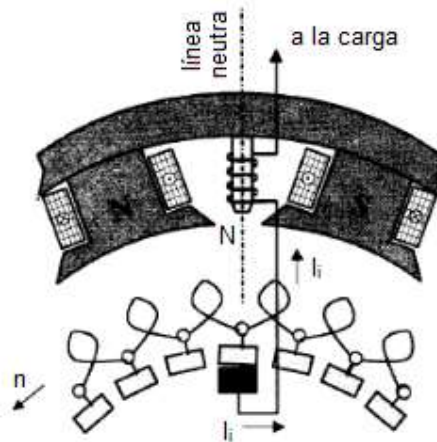
- **Mecánicos:** defectuoso ajuste de las escobillas con el colector, resalte de algunas delgas, insuficiente equilibrado del rotor, etc.
- **Eléctricos:** elevación de la tensión entre delgas adyacentes del colector, la cual puede ser provocada por los fenómenos de autoinducción de las secciones del arrollamiento del inducido.

Una buena conmutación debe realizarse sin producir dicho chisporroteo, ya que produce un deterioro de la superficie del colector que perturba el buen funcionamiento de la máquina.

En máquinas de pequeña potencia no suelen tomarse precauciones especiales, ya que el deterioro será tanto mayor cuanto mayor sea el arco, lo que ocurre en las máquinas de gran potencia (> 50HP).

La solución más utilizada para contrarrestar los efectos eléctricos, constituye en la utilización de los *polos auxiliares* o *de conmutación* mencionados en el punto anterior

(7.4). Los mismos, al estar conectados en serie con el arrollamiento del inducido, además de contrarrestar los efectos de la reacción de inducido, harán lo propio con los fenómenos de autoinducción mencionados entre los creadores de los arcos eléctricos entre escobillas y delgas:



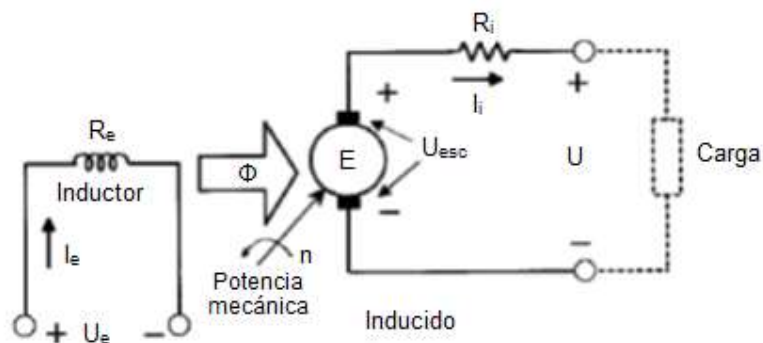
7.6 GENERADOR DE C.C.

Desde el punto de vista del circuito eléctrico, el devanado de excitación (inductor) está formado por los arrollamientos de todos los polos conectados en serie a los que se aplica una tensión de alimentación de c.c., que produce una corriente I_e , que da lugar a una f.m.m. que origina el flujo Φ en el entrehierro de la máquina.

Por su parte, el inducido de la máquina de c.c., tal como se ha visto anteriormente, puede considerarse constituido por una serie de pilas eléctricas elementales, que son conductores activos, caracterizados por una f.e.m., que recordamos:

$$E = k_E n \Phi$$

La representación de un generador de c.c. o dínamo resulta entonces:



Al conectar una carga eléctrica a la salida aparece una corriente I_i , que provoca una caída de tensión en el inducido debida a la resistencia propia del arrollamiento R_i y a la resistencia que presentan los contactos escobillas-colector (U_{esc}). Aplicando la segunda ley de Kirchhoff al circuito del inducido se llega a la siguiente ecuación:

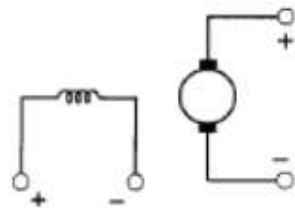
$$E = U + R_i I_i + U_{esc}$$

donde U es la tensión terminal en bornes de la máquina.

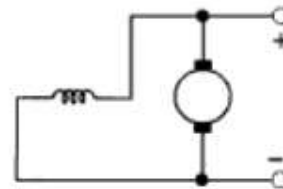
7.6.1 FORMAS DE EXCITACIÓN

Desde el punto de vista de comportamiento y condiciones de trabajo, tiene una gran importancia la forma en que se conectan entre sí los devanados inductor e inducido y así se distinguen:

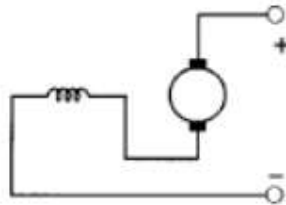
- Máquinas con Excitación Independiente** → en estas, el devanado inductor es alimentado mediante una fuente de alimentación externa a la máquina; por ejemplo: una batería de acumuladores.
- Máquinas con Excitación Derivación, Paralelo o Shunt** → el devanado inductor se conecta directamente a los terminales de la máquina, quedando en paralelo con el inducido; el mismo se conformará por arrollamientos de hilo delgado con gran número de espiras.
- Máquinas con Excitación Serie** → el inductor está en serie con el inducido; en este caso el devanado de excitación será de pocas espiras de hilo grueso, ya que circulará por él la corriente total de la máquina.
- Máquinas Compuestas, Combinadas o Compound** → la excitación total se reparte entre dos devanados: uno en serie (pocas espiras e hilo grueso); y otro en paralelo (muchas espiras de hilo delgado).



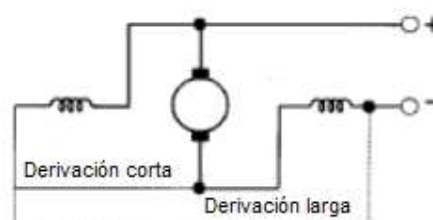
a) Excitación Independiente



b) Excitación Derivación (Shunt)



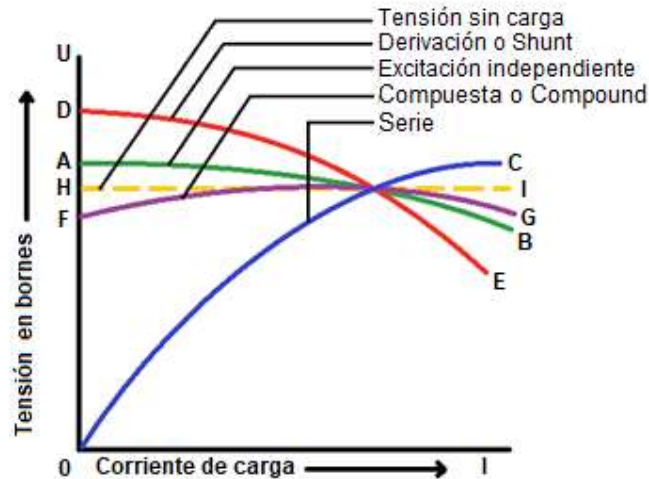
c) Excitación Serie



d) Excitación Compuesta (Compound)

7.6.2 CARACTERÍSTICAS DE SERVICIO

Una de las curvas características mediante las cuales se analiza el comportamiento de los generadores de c.c. es la denominada "*Característica externa $U = f(I)$* ", la cual representa la tensión en bornes en función de la corriente de carga, para una intensidad de excitación constante. Si bien existen otras curvas características de interés, solo tomaremos esta en particular para estudiar las diferentes respuestas de la máquina para sus diferentes formas de excitación (enumeradas en el ítem anterior):



Curva externa de un generador de c.c. según forma de excitación

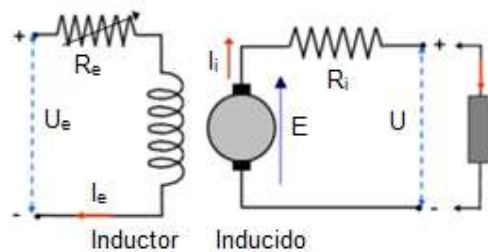
Para determinar la característica externa, hay que conectar una carga a la salida del generador e ir variando la misma para obtener la representación de la relación $U = f(I)$, manteniendo constante tanto la corriente de excitación como la velocidad de giro del motor primario.

Teniendo en cuenta las características externas recién representadas, y recordando que la tensión de salida será:

$$U = E - R_i I_i$$

se enumerarán las principales características de funcionamiento del generador de c.c. en servicio para cada forma de excitación:

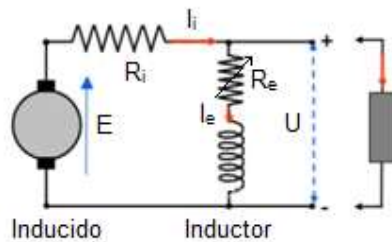
a) **Excitación Independiente**



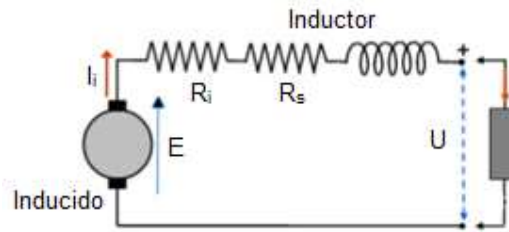
- ✓ La característica es prácticamente lineal en la zona de trabajo. A medida que aumenta el valor de la corriente de carga disminuye levemente el valor de la tensión entre bornes de generador; tiene un comportamiento **estable**.
- ✓ La tensión en los terminales podrá regularse, para compensar la caída de tensión producida por la carga, mediante la aplicación de un *reóstato de excitación*, mediante el cual regular la corriente de excitación.
- ✓ Estas máquinas requieren de una fuente externa para alimentar el devanado del inductor (excitación), por lo que su uso se limita para usos específicos (ensayos en laboratorios por ejemplo).

Las restantes formas de excitación no dispondrán de una fuente de tensión externa para la creación del campo de excitación, por lo que deberán realizar un **proceso de autoexcitación**, de allí su denominación de **máquinas autoexcitadas**. Para ello, deberán disponer de un magnetismo remanente en el hierro de la máquina para poder iniciar el proceso. Hay que tener presente que cuando la máquina lleva mucho tiempo sin trabajar, es probable que se deba proceder a excitarla exteriormente a través de una fuente auxiliar, para luego de trabajar un cierto período de tiempo reestablezca la magnetización residual.

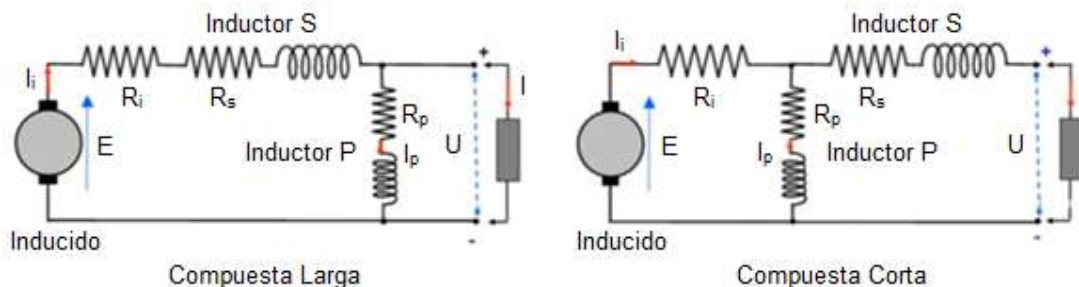
b) **Excitación derivación o shunt**



- ✓ Para que se produzca la autoexcitación se arranca la máquina en vacío, de esta forma, la corriente que se genera en el inducido alimenta al devanado de excitación.
- ✓ Si bien su característica externa no es tan estable como la de excitación independiente, este es el tipo más utilizado debido a que en los límites de carga normales no presenta caídas de tensión elevadas.
- ✓ Además, al igual que en los de excitación independiente, la tensión entre terminales podrá regularse mediante la aplicación de un *reóstato de excitación*.
- ✓ Para limitar la potencia consumida por el devanado de excitación (pérdidas), es conveniente que circule por él una corriente reducida, por lo que la resistencia de este bobinado debe ser elevada, de ahí que su sección será pequeña (alta resistencia). La f.m.m. necesaria se consiguen entonces construyendo este bobinado con un gran número de espiras.

c) **Excitación serie**

- ✓ La corriente absorbida por la carga es la misma que atraviesa el inducido y el inductor. Es por ello que el devanado de excitación tiene pocas espiras y un hilo de gran sección (resistencia baja, del orden de la que tiene el inducido).
- ✓ El flujo en el entrehierro, y por consiguiente el voltaje en terminales, varían mucho con la corriente de la carga (comportamiento inestable), por lo que este tipo de dínamo no se emplea como generador.
- ✓ Por otro lado, si el valor de la resistencia de carga es muy elevado, la corriente será pequeña, impidiendo que se produzca el proceso de autoexcitación de la máquina.

d) **Excitación compuesta o compaund**

- ✓ Generalmente, la conexión de los devanados serie y paralelo (la cual puede hacerse con corta o larga derivación) se realiza de forma tal que las f.m.m. generadas por los mismos sean del mismo signo, es decir, aditivas. De esta manera, puede conseguirse una curva prácticamente plana, lo que indica la constancia de la tensión terminal con la corriente de carga.
- ✓ Aumentando el número de espiras del devanado serie, puede conseguirse que la tensión terminal aumente con la carga, característica que se denomina *hipercompuesta*. En caso contrario, la tensión puede reducirse con la carga, dando lugar a la característica *hipocompuesta*.
- ✓ La conexión diferencial, caso que las f.m.m. sean sustractivas, se produce una caída de tensión elevada con el aumento de la carga, lo que hace útil su aplicación en generadores para soldadura en c.c.

7.7 MOTOR DE C.C.

Esencialmente, un motor de c.c. consiste en una dinamo trabajando en régimen inverso, lo que está de acuerdo con el principio de reciprocidad electromagnética (Faraday y Lenz). Entonces, como para el caso de los generadores, los motores de c.c. se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de excitación, teniendo: motores con excitación independiente, derivación, serie y compuesta.

Ahora, la corriente del inducido invierte su sentido, entrando por la escobilla por la que antes, trabajando como generador, salía hacia la red de alimentación. En esta situación se produce una fuerza contraelectromotriz, ya que E se opone a la dicha corriente I_i , y la máquina desarrolla su propio par motor sosteniendo la rotación de la armadura.

7.7.1 REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Desde el punto de vista práctico, estos motores de c.c. presentan una gran ventaja sobre los motores de c.a., debido a su posibilidad de regulación de velocidad.

La ecuación del circuito del inducido en su funcionamiento como motor será:

$$U = E + R_i I_i$$

teniendo en cuenta la expresión general de la f.e.m:

$$E = k_E n \Phi$$

al sustituir en la ecuación del inducido y despejando la velocidad n se obtiene:

$$n = \frac{U - R_i I_i}{k_E \Phi}$$

De esta última ecuación, se concluye que la velocidad del motor de c.c. se puede regular a base de controlar las siguientes variables:

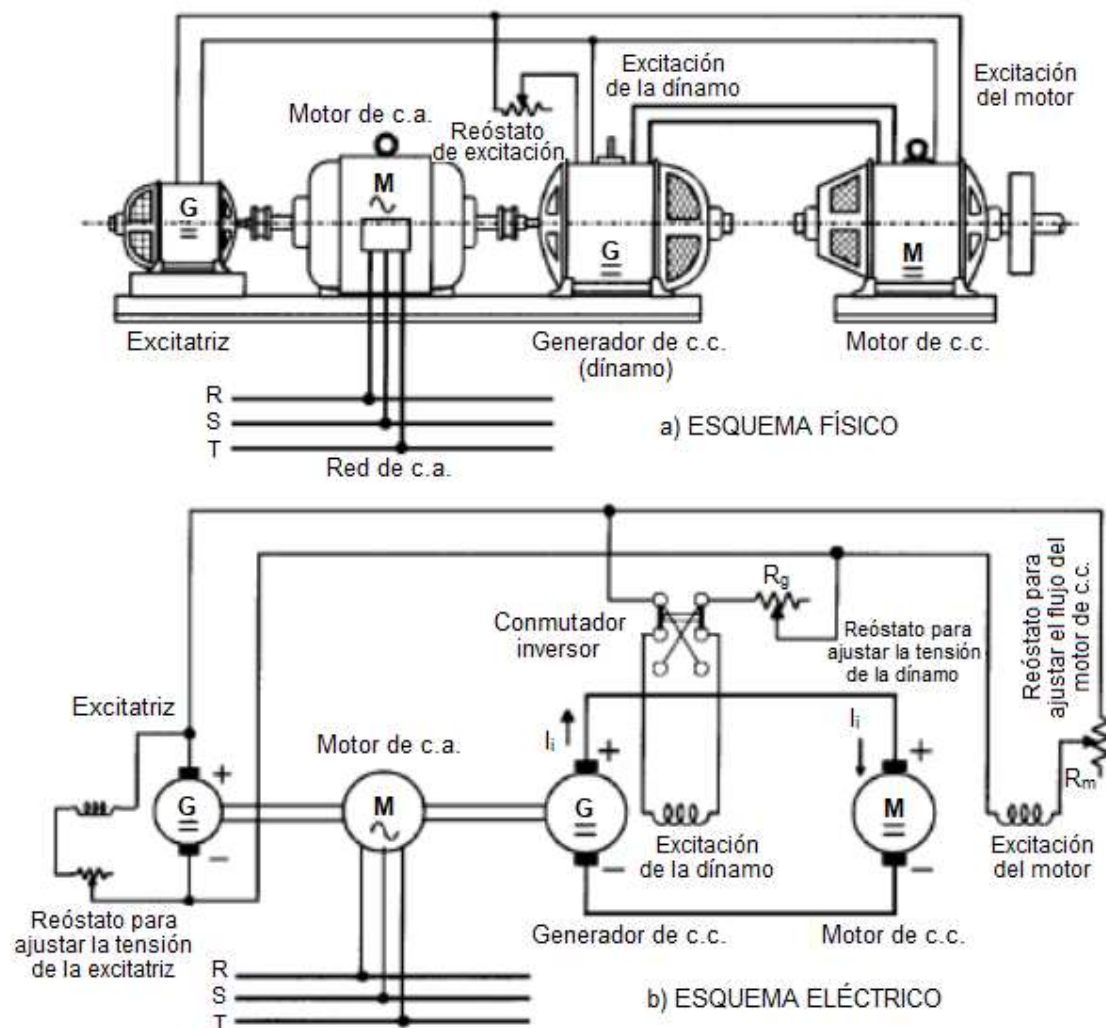
- a) *El flujo por polo producido por la corriente de excitación:* al disminuir el flujo aumenta la velocidad de rotación. Esto se consigue variando la resistencia de excitación, y permite alcanzar altas velocidades de trabajo, limitadas únicamente por aspectos mecánicos de la máquina. La velocidad mínima estará determinada por la máxima corriente permitida por el devanado de excitación.
- b) *La tensión de alimentación U , aplicada al motor:* al disminuir/aumentar la tensión de alimentación se reduce/aumenta la velocidad. Hay que prestar atención a que los niveles superiores de tensión no perjudiquen las aislaciones de la máquina.
- c) *La resistencia del circuito del inducido:* esto se consigue conectando en serie con este devanado una resistencia o reóstato variable. Al aumentar/disminuir la resistencia del inducido, la velocidad disminuye/aumenta. Este método se aplica solamente a pequeñas máquinas en virtud de su bajo rendimiento.

Para invertir el sentido de rotación de un motor de c.c. es necesario invertir únicamente la corriente en *uno solo* de los devanados: inducido o inductor. Si se modifican los sentidos de la corriente de ambos circuitos el sentido de rotación del motor no se modifica.

Existen varios esquemas de regulación, pero el más conocido se denomina sistema Ward-Leonard:

Sistema de regulación de velocidad Ward-Leonard

El mismo consiste en un motor asíncrono trifásico que lleva acoplado mecánicamente un generador de c.c. de excitación separada, cuyo ajuste permite obtener diferentes tensiones de salida en escobillas. El generador alimenta posteriormente el inducido de un motor de c.c. con excitación independiente:



La tensión necesaria para la alimentación de los inductores se obtiene de un pequeño generador en derivación (excitatriz) acoplado al mismo eje mecánico del grupo motor de c.a. – generador de c.c. La polaridad del inductor del generador principal se puede invertir con objeto de proceder al cambio del sentido de marcha del motor de c.c.

7.7.2 PROCESO DE ARRANQUE

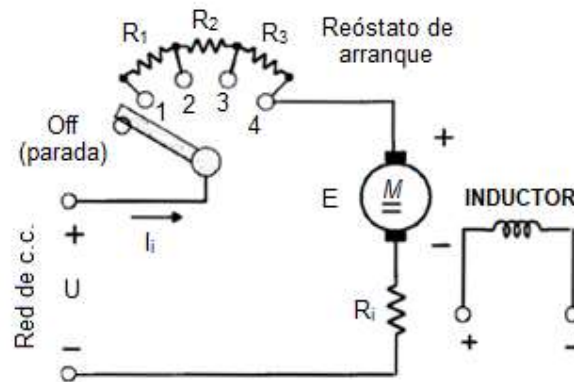
Hay que tener en cuenta que de acuerdo con la ecuación del circuito inducido, la corriente del inducido tiene una magnitud:

$$I_i = \frac{U - E}{R_i}$$

y al ser en el momento del arranque la velocidad $n = 0$, se tiene en ese momento una f.c.e.m. también nula ($E = k_E n \Phi = 0$), por lo que la corriente del inducido en ese instante será muy elevada, debido a que entonces el motor ofrece a la tensión de la red solo una pequeña resistencia R_i (debe ser pequeña para que las pérdidas durante la marcha también lo sean):

$$I_{iarr} = \frac{U}{R_i}$$

Para proteger el motor contra esta corriente de arranque tan fuerte, se utilizan *reóstatos de arranque* conectados en serie con el inducido, de forma tal de ser elevada en el momento del arranque, disminuyendo así el valor de la corriente en ese instante. Luego, deberá ir disminuyendo escalonadamente su valor durante el proceso de arranque, para terminar anulando su injerencia cuando el motor alcanza su velocidad de trabajo.



A su vez, el reóstato de arranque también tendrá una unión con el inductor (esto no está representado en la figura anterior), pero incorporándose en sentido opuesto, esto es, a medida que se va reduciendo la resistencia que se introduce en el circuito del inducido, se va aumentando simultáneamente la resistencia del circuito inductor. Esto es así ya que, para obtener una curva máxima en el arranque se debe tener un flujo de excitación máximo, lo que se consigue en sistemas con excitación independiente o paralelo, con el reóstato de arranque en mínimo para que la corriente sea la máxima.

Estos procesos, los cual se deben dar en simultaneo, pueden ser tanto mediante un accionamiento manual, o bien automáticamente a través de contactores.

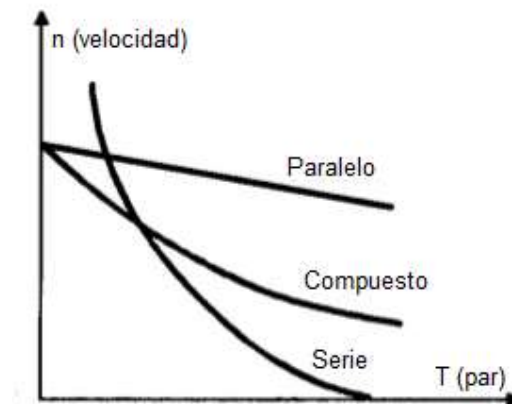
7.7.3 CARACTERÍSTICAS DE SERVICIO

Vamos a analizar las diferentes respuestas del motor de c.c. según su forma de excitación. Para ello, volvemos a repetir la ecuación del par interno del motor, donde se ve que el mismo es directamente proporcional al flujo en el entrehierro y a la corriente del inducido:

$$T = k_T I_i \Phi \quad ; \quad U = E + R_i I_i \quad ; \quad E = k_E n \Phi$$

Si bien el análisis del comportamiento del motor de c.c. para cada forma de excitación escapa al alcance de la materia, mostramos a continuación en forma gráfica los mismos, para luego hacer una breve interpretación y análisis al respecto.

La siguiente figura muestra las curvas características típicas de estado estable de velocidad-par, en las que se supone que a los terminales del motor se le suministra voltaje constante:



Así entonces, se puede deducir que las aplicaciones de estos motores se relacionan directamente con su manera de conexión respecto de su excitación, a saber:

a) **Excitación Independiente**

- ✓ La característica del motor será equivalente al del motor derivación, pero pudiendo controlar de manera independiente las variables de campo e inducido. Por ello, los mismos son utilizados en aplicaciones donde se requiera una regulación de velocidad amplia con controles precisos de la misma para variados estados de carga (ej.: un tren de laminación).

b) **Excitación Derivación, Shunt o Paralelo**

- ✓ En estos motores, al aumentar el par de carga se produce un frenado de la máquina, disminuyendo la velocidad del rotor. Como consecuencia de ello la f.c.e.m. E se reducirá, por lo que aumentará la corriente absorbida por el

inducido (rotor) y el par de la máquina T se elevará, igualándose con el nuevo par resistente ofrecido por la carga.

- ✓ Como se observa en la curva anterior, la caída de velocidad con el aumento del par de carga es muy pequeña (del orden del 5 al 10%), lo que indica que los motores de derivación presentan una característica de carga *dura* o *rígida* (similar a los motores asincrónicos) y por ello se utilizan en aquellas aplicaciones que requieran una velocidad casi constante: ventiladores, bombas centrífugas, cintas transportadoras, máquinas herramientas, etc.

c) **Excitación Serie**

- ✓ En estos motores, el flujo de la máquina depende de la corriente del inducido, ya que $I = I_i$ y en consecuencia, depende de la carga:

$$T \cong k_T I_i^2 \quad \Rightarrow \quad I_i \cong \sqrt{\frac{T}{k_T}}$$

- ✓ En la representación de la curva $n = f(T)$ mostrada más arriba, se muestra que, con tensión de alimentación constante, el par de un motor serie varía en relación inversa con el cuadrado de la velocidad. Por ello, resulta muy inestable su velocidad ante variaciones de carga. A su vez, con cargas bajas su velocidad adquiere valores peligrosos para la integridad del motor.
- ✓ Una de las propiedades valiosas de este motor es que presenta un *par de arranque* muy elevado y que soporta elevadas sobrecargas, con un aumento moderado de la corriente, a diferencia del "conexión paralelo" donde la corriente se eleva peligrosamente.
- ✓ Por lo expuesto, es que estos motores son apropiados para su uso en la tracción eléctrica: trenes, tranvías, trolebuses; y también en grúas donde son necesarios altos pares a bajas velocidades y viceversa.

d) **Excitación Compuesta**

- ✓ El devanado de excitación en serie puede conectarse de forma que refuerce el campo derivación (aditivo) o que se oponga al mismo (diferencial).
- ✓ La corriente del devanado derivación es constante, mientras que la intensidad del arrollamiento serie aumenta con la carga. De esta forma, se obtiene un flujo por polo que aumenta también con la carga, pero no tan rápidamente como en el motor serie. La característica mecánica de estos motores es intermedia entre las curvas del motor derivación y serie.