

Plan de contingencia Pedagógica Para 4to Año
Incluye Bibliografía y Ejercicios de Repaso



Instrucciones: Leer el material y luego tratar de resolver las actividades que se proponen.

Ante cualquier duda consultar al siguiente mail: hugowojczys@yahoo.com.ar

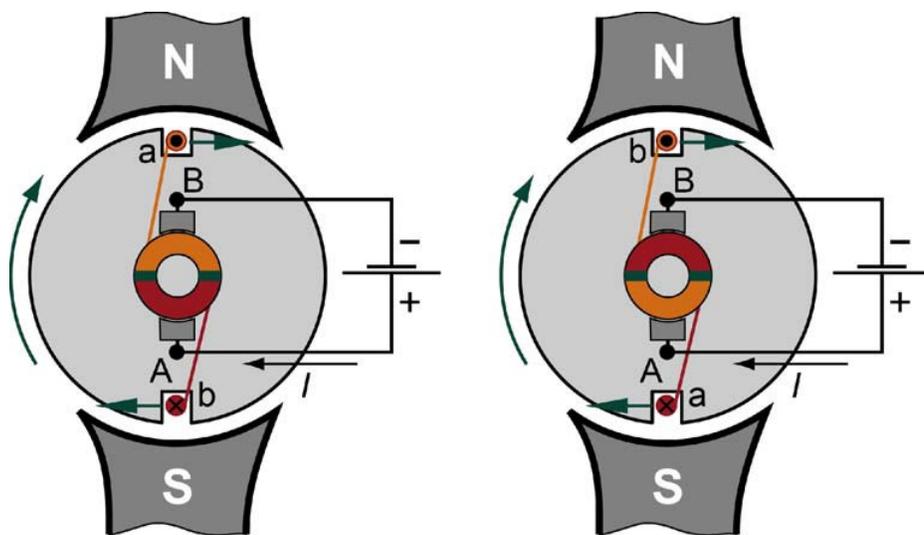
7. Motor de corriente continua

Los motores de corriente continua se basan en la interacción entre los campos magnéticos del estátor y del rotor.

Para el funcionamiento del motor se hace circular una corriente eléctrica por el rotor, llamada **corriente de alimentación** y otra por el estátor, llamada **corriente de excitación**.

La corriente de excitación provoca un campo magnético en el inductor que interacciona con la corriente que circula por el inducido generando una fuerza que provoca el giro del rotor, tal como se explicó en el apartado 1 de esta misma unidad.

En los motores, igual que en los generadores, también se realiza la conmutación en el colector de delgas. En este caso la conmutación tiene como objetivo que la circulación de la corriente se mantenga siempre en el mismo sentido en cada uno de los polos, para que la fuerza y el par de giro tengan también el mismo sentido, como vemos en la figura.



Comutación en un motor de corriente continua. (C.A.L.)

Fuerza contraelectromotriz

En los motores de corriente continua, el rotor y el bobinado inducido sobre él montado, se mueven dentro de un campo magnético. Como consecuencia de ello, en los conductores del bobinado inducido se genera una f.e.m. que se opone a la tensión aplicada en sus extremos a través de las delgas del colector. Por oponerse a la tensión aplicada se la denomina **fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.)**.

La fuerza contraelectromotriz depende de los mismos factores que dependería si en vez de un motor fuera un generador. Será mayor cuanto mayor sea la velocidad y el flujo magnético. Provoca una disminución de la intensidad de corriente que circula por el rotor evitando que este tenga que soportar intensidades muy altas, como sucede durante el arranque del motor cuando la f.c.e.m. es nula, por ser nula la velocidad de desplazamiento de los conductores en el campo magnético.

La f.c.e.m. adquiere valores próximos a los de la tensión en bornes (U_b), pero siempre inferiores a ella.

La **fuerza contraelectromotriz** se designa con la letra E' :

$$E' = K \cdot \Phi \cdot n$$

Cuando la tensión aplicada y la f.c.e.m alcanzan el equilibrio, al girar el motor a la velocidad de régimen, la intensidad por el inducido toma el valor:

$$I_i = \frac{U_i - E'}{R_i}$$

La tensión en el inducido (U_i) es igual a la tensión en bornes (U_b) en los **motores derivación** y ligeramente inferior en los **motores serie**.

Velocidad de rotación

La velocidad de rotación de un motor, despreciando la caída de tensión en el bobinado inducido ($R_i \cdot I_i$), se puede determinar de forma aproximada, a partir de las fórmulas anteriores, con la siguiente expresión:

$$n = \frac{U_b}{K \cdot \Phi}$$

Donde comprobamos que la velocidad de rotación de un motor de corriente continua depende de la tensión aplicada a sus bornes y del flujo inductor.

Par motor

El par de giro del motor lo podemos expresar en función de la fuerza generada en las espiras del inducido:

$$\tau = F \cdot D$$

τ : Par motor en newtons-metro (N·m)

F : Fuerza generada en las espiras del inducido en newtons (N)

D : Diámetro del inducido en metros (m)

También lo podemos expresar en función de la potencia útil:

$$\tau = \frac{P_u}{\omega}$$

ω : Velocidad angular del rotor en radianes por segundo (rad/s)

La velocidad angular la podemos determinar a partir de la velocidad de rotación del rotor en revoluciones por minuto:

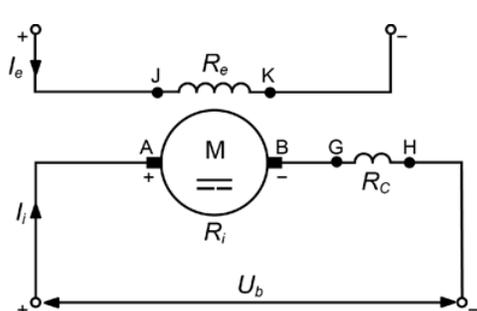
$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

ω : Velocidad angular en radianes por segundo (rad/s)

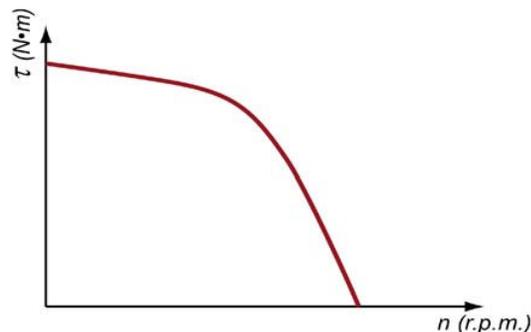
n : Velocidad de rotación en revoluciones por minuto (r.p.m.)

7.1. Motor de excitación independiente

El devanado del inductor y del inducido están alimentados con fuentes de tensión independientes. El flujo inductor será constante al ser también constante la corriente que circula por él (I_e).



Motor de corriente continua con excitación independiente. (C.A.L.)



Curva característica de un motor de corriente continua con excitación independiente. (C.A.L.)

La tensión entre los bornes del motor durante el funcionamiento viene dada por la siguiente expresión:

$$U_b = E' + (R_i + R_c) \cdot I_i + 2 \cdot U_e$$

De ella deducimos la intensidad que absorbe el motor durante el funcionamiento:

$$I = I_i = \frac{U_b - E' - 2 \cdot U_e}{R_i + R_c}$$



Ejemplo

9. Un motor de cc con excitación independiente conectado a una red de 200 V desarrolla una fuerza contraelectromotriz de 186 V. Si la resistencia del inducido es de $0,8 \Omega$ y la de conmutación de $0,2 \Omega$ y despreciamos la caída de tensión en la escobillas, calcula la intensidad de corriente que alimenta el motor y la potencia absorbida de la red.

Solución:

$$I = \frac{U_b - E'}{R_i + R_c} = \frac{200 - 186}{0,8 + 0,2} = 14 \text{ A}$$

$$P_{ab} = U_b \cdot I = 200 \cdot 14 = 2800 \text{ W}$$

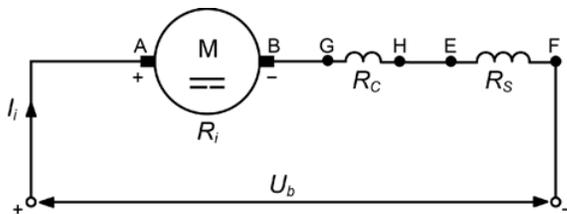
7.2. Motor de excitación serie

En estos motores, las bobinas de excitación están conectadas en serie con las bobinas de conmutación y con las bobinas del inducido. La corriente de alimentación es la misma para todas ellas. La tensión entre bornes es la suma de la fuerza contraelectromotriz y las caídas de tensión internas:

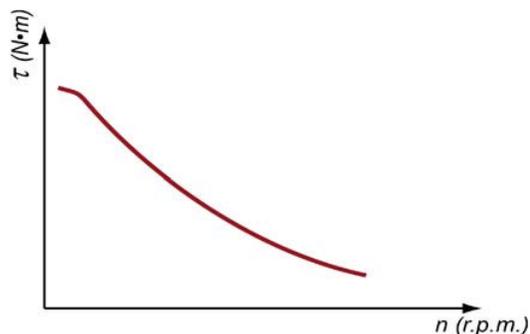
$$U_b = E' + (R_i + R_c + R_s) \cdot I_i + 2 \cdot U_e$$

Y la intensidad que absorbe el motor durante el funcionamiento es:

$$I = I_e = I_i = \frac{U_b - E' - 2 \cdot U_e}{R_i + R_c + R_s}$$



Motor de corriente continua con excitación serie. (C.A.L.)



Curva característica de un motor de corriente continua con excitación serie. (C.A.L.)

Este motor tiene un par elevado en el arranque y la velocidad varía mucho con la carga. Cuando el motor trabaja en vacío la velocidad aumenta sin control, es decir, se embala y pueden producirse averías.

Ejemplo

10. Un motor de excitación serie conectado a una tensión de 200 V absorbe de la red un potencia de 7 kW cuando gira a 1000 r.p.m. El rendimiento del motor es del 84%, la resistencia del inducido vale 0,08 Ω, la del devanado de conmutación 0,1 Ω y la del devanado inductor serie 0,06 Ω. La caída de tensión entre escobilla y colector es de 1,2 V. Calcula:

- La intensidad que absorbe el motor de la red.
- El valor de la f.c.e.m.
- La potencia perdida por el efecto Joule.
- El par de giro útil del motor.

Soluciones:

a) $P_{ab} = U_b \cdot I \Rightarrow I = \frac{P_{ab}}{U_b} = \frac{7000}{200} = 35 \text{ A}$

b) De la expresión $U_b = E' + (R_i + R_c + R_s) \cdot I_i + 2 \cdot U_e$ despejamos E' :

$$E' = U_b - (R_i + R_c + R_s) \cdot I_i - 2 \cdot U_e$$

$$E' = 200 - (0,08 + 0,1 + 0,06) \cdot 35 - 2 \cdot 1,2 = 189,2 \text{ V}$$

c) Incluimos en las pérdidas por Joule la caída de tensión en las escobillas:

$$P_{Cu} = (R_i + R_c + R_s) \cdot I_i^2 - 2 \cdot U_e \cdot I$$

$$P_{Cu} = (0,08 + 0,1 + 0,06) \cdot 35^2 + 2 \cdot 1,2 \cdot 35 = 378 \text{ W}$$

d) $P_u = \tau \cdot \omega \Rightarrow \tau = \frac{P_u}{\omega}$

Para calcular el par determinamos en primer lugar P_u y ω :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \Rightarrow P_u = P_{ab} \cdot \eta = 7000 \cdot 0,84 = 5880 \text{ W}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60} = 104,72 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\tau = \frac{P_u}{\omega} = \frac{5880}{104,72} = 56,15 \text{ N} \cdot \text{m}$$

7.3. Motor de excitación derivación

En estos motores la bobina de excitación o inductora está conectada en paralelo con la del inducido. La corriente que el motor absorbe de la red se divide de tal forma que una parte va al inductor y otra al inducido. Los dos bobinados estarán sometidos a la misma tensión (U_b):

$$U_b = E' + (R_i + R_c) \cdot I_i + 2U_e$$

La intensidad total que absorbe el motor de la red es:

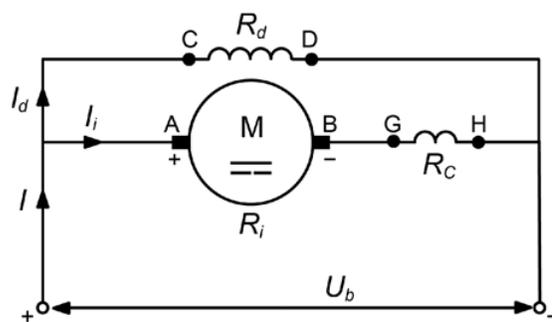
$$I = I_i + I_d$$

El valor de las intensidades del inductor y del inducido son:

$$I_d = \frac{U_b}{R_d}$$

$$I_i = \frac{U_b - E' - 2U_e}{R_i + R_c}$$

La curva característica del motor derivación es aproximadamente la misma que la del motor de excitación independiente. En este tipo de motores la velocidad disminuye a medida que aumenta el par de rotación, por lo que se autorregulan.



Motor de corriente continua con excitación derivación. (C.A.L.)

Ejemplo

11. Un motor de cc con excitación derivación tiene una tensión entre bornes de 125 V y absorbe una corriente de la red de 10 A. La suma de la resistencia del inducido y de conmutación vale 1 Ω y la resistencia del devanado de excitación es 100 Ω . Despreciamos la caída de tensión en la escobillas. Calcula:

- La potencia que absorbe el motor de la red.
- Las intensidades de corriente por el inductor y por el inducido.
- La fuerza contraelectromotriz.

Soluciones:

a) $P_{ab} = U_b \cdot I = 125 \cdot 10 = 1250 \text{ W}$

b) $I_d = \frac{U_b}{R_d} = \frac{125}{100} = 1,25 \text{ A}$

$$I = I_i + I_d \Rightarrow I_i = I - I_d = 10 - 1,25 = 8,75 \text{ A}$$

c) De la expresión $U_b = E' + (R_i + R_c) \cdot I_i + 2U_e$ despejamos E' y calculamos, teniendo en cuenta que $U_e = 0$:

$$E' = U_b - (R_i + R_c)I_i = 125 - 1 \cdot 8,75 = 116,25 \text{ V}$$

7.4. Motor de excitación compuesta

En estos motores el devanado de excitación se divide en dos partes, una se conecta en serie con el inducido y otra en paralelo. Es una combinación de la excitación serie y derivación. Dependiendo de dónde se conecte el devanado paralelo, la conexión recibirá el nombre de compuesta corta o larga.

La tensión entre bornes en la conexión compuesta corta es:

$$U_b = E' + (R_i + R_c) \cdot I_i + R_s \cdot I + 2 \cdot U_e$$

La tensión entre bornes en la conexión compuesta larga es:

$$U_b = E' + (R_i + R_c + R_s) \cdot I_i + 2 \cdot U_e$$

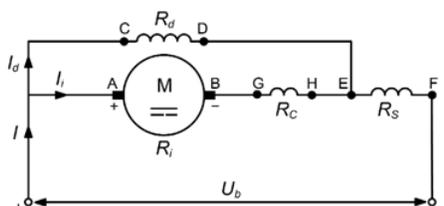
La corriente que circula por el devanado en derivación varía según el tipo de conexión.

En la conexión corta:

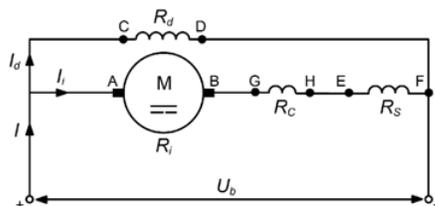
$$I_d = \frac{U_b - I \cdot R_s}{R_e}$$

En la conexión larga:

$$I_d = \frac{U_b}{R_d}$$

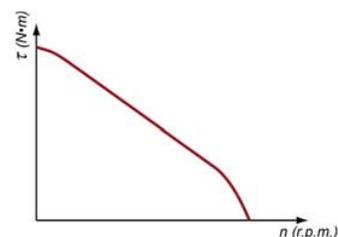


Motor de corriente continua con excitación compuesta corta. (C.A.L.)



Motor de corriente continua con excitación compuesta larga. (C.A.L.)

La curva característica del motor nos indica que su funcionamiento es estable. Cuando el par disminuye, aumenta la velocidad y viceversa. Esta curva es intermedia entre la del motor de excitación serie y la de excitación en derivación.



Curva característica de un motor de corriente continua con excitación compuesta. (C.A.L.)

Ejemplo

12. Un motor de cc con excitación compuesta larga, de 5 kW y 200 V, tiene en el devanado del inducido una resistencia de 0,6 Ω, en el devanado auxiliar de 0,4 Ω y en el devanado de excitación serie 0,5 Ω. La corriente que circula por el devanado de excitación en paralelo es de 2,5 A y la caída de tensión entre escobilla y colector es 1 V. Calcula:

- La intensidad de corriente por el inducido.
- El valor de la resistencia de excitación en derivación.
- La fuerza contraelectromotriz.

Soluciones:

a) $I_i = I - I_d$. En primer lugar tenemos que calcular el valor de I según la potencia y la tensión entre bornes:

$$P_{ab} = U_b \cdot I \Rightarrow I = \frac{P_{ab}}{U_b} = \frac{5000}{200} = 25 \text{ A} \Rightarrow I_i = I - I_d = 25 - 2,5 = 22,5 \text{ A}$$

$$\text{b) } I_d = \frac{U_b}{R_d} \Rightarrow R_d = \frac{U_b}{I_d} = \frac{200}{2,5} = 80 \text{ } \Omega$$

c) De $U_b = E' + (R_i + R_c + R_s) \cdot I_i + 2 \cdot U_e$ despejamos E' y calculamos:

$$E' = U_b - (R_i + R_c + R_s) \cdot I_i - 2 \cdot U_e \rightarrow E' = 200 - (0,6 + 0,4 + 0,5) \cdot 22,5 - 2 \cdot 1 = 164,25 \text{ V}$$

7.5. Arranque y regulación de la velocidad

Cuando un motor se pone en marcha debe proporcionar un par de arranque mayor que el par resistente que ofrece la carga. En el momento del arranque el valor de la fuerza contraelectromotriz es nulo ($E' = 0$); entonces la corriente de arranque será mucho mayor que durante el funcionamiento a régimen normal, dado que la resistencia del inducido es pequeña.

Por ejemplo, en un motor de corriente continua con excitación en derivación la corriente por el inducido en el arranque vale:

$$I_a = \frac{U_b - 2 \cdot U_e}{R_i + R_c}$$

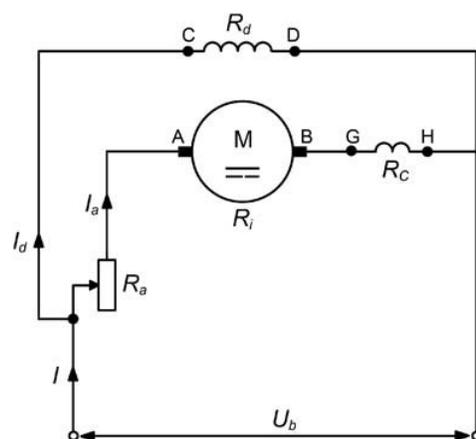
Como los valores de R_i y R_c son muy pequeños el valor de la intensidad será muy alto.

La intensidad de arranque está limitada en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (**REBT**). El reglamento dice que los motores con una potencia superior a 0,75 kW deben estar provistos de **reostatos** de arranque o dispositivos equivalentes. El sistema más común es el uso de reostatos. Se intercala una resistencia variable para la operación de arranque (R_a) entre la red y el inducido.

A medida que el motor aumenta la velocidad, aumenta la f.c.e.m. E' , por lo tanto se reduce la corriente I_a . Para que se mantenga el par la resistencia de arranque R_a debe ir disminuyendo hasta desaparecer.

Para el motor de la anterior figura, la tensión entre bornes en el momento de arranque es:

$$U_b = (R_a + R_i + R_c) \cdot I_a + 2 \cdot U_e$$



Motor de corriente continua excitación derivación y con reostato de arranque. (C.A.L.)

Regulación de la velocidad del motor

Muchas de las aplicaciones de los motores de corriente continua necesitan regulación de la velocidad. La posibilidad de regular la velocidad con facilidad hace que se utilicen motores de corriente continua frente a los de corriente alterna, por ejemplo, en máquinas herramientas.

La velocidad del motor es proporcional a la tensión aplicada en el inducido e inversamente proporcional al flujo magnético del inductor. Por lo tanto, controlando estas dos variables tendremos un control total sobre la velocidad del motor. Podemos aumentar la velocidad incrementando la tensión aplicada al inducido y manteniendo constante el inductor, o disminuyendo la tensión del inductor mientras se mantiene constante la del inducido.

En el pasado, la regulación de la velocidad se realizaba insertando reostatos en los circuitos del bobinado inductor o inducido que, mediante caídas de tensión, modificaban la tensión aplicada al inducido y el valor del flujo inductor.

En la actualidad, la regulación de la velocidad se realiza actuando sobre los mismos parámetros pero en vez de reostatos, se utilizan reguladores de tensión y corriente electrónicos controlados por microprocesador, lo que permite una regulación muy ajustada de la velocidad y el par motor entregado por el motor a la carga.

Cambio de sentido de giro del motor

Para cambiar el sentido de giro del motor es necesario cambiar el sentido de circulación de la corriente en el devanado inductor respecto al inducido, o al contrario.



Ejemplo

13. Un motor de cc con excitación en derivación está conectado a una tensión de 200 V; el motor girando en régimen de trabajo genera una fuerza contraelectromotriz de 184 V. La resistencia del inducido es 0,6 Ω , la del devanado auxiliar de conmutación es 0,6 Ω y la resistencia en derivación 200 Ω . La caída de tensión entre escobilla y colector es de 0,8 V. Calcula:

- Las intensidades de corriente por cada uno de los devanados y la total.
- La resistencia de arranque que hay que conectar para que la intensidad en el arranque no supere 2,5 veces la nominal.

Soluciones:

$$\text{a) } I_i = \frac{U_b - E' - 2 \cdot U_e}{R_i + R_c} = \frac{200 - 184 - 2 \cdot 0,8}{0,6 + 0,6} = 12 \text{ A}$$

$$I_d = \frac{U_b}{R_d} = \frac{200}{200} = 1 \text{ A}$$

$$I = I_i + I_d = 12 + 1 = 13 \text{ A}$$

- La intensidad máxima en el arranque es: $I_a = 2,5 \cdot I = 2,5 \cdot 13 = 32,5 \text{ A}$

De la fórmula de la tensión entre bornes en el arranque despejamos R_a y calculamos:

$$U_b = (R_a + R_i + R_c) \cdot I_a + 2 \cdot U_e$$

$$R_a = \frac{U_b - 2 \cdot U_e}{I_a} - (R_i + R_c) = \frac{200 - 2 \cdot 0,8}{32,5} - (0,6 + 0,6) = 4,9 \text{ } \Omega$$



Actividades

20. Por un motor de corriente continua de excitación independiente circula una corriente de 10 A cuando está conectado a una tensión de 150 V, gira a 1000 r.p.m., la resistencia total del inducido es de 2 Ω y su rendimiento del 80%. Calcula:

- La potencia absorbida por el motor.
- La fuerza contraelectromotriz.
- El par de rotación del motor.

21. Un motor de corriente continua con excitación serie conectado a una red de 300 V consume 15 A de corriente. La resistencia del inductor es 1 Ω , la de conmutación es 0,8 Ω y la del devanado serie de 2 Ω . La caída de tensión entre escobilla y colector es de 1 V. Calcula:

- La potencia absorbida de la red.
- La fuerza contraelectromotriz.
- La caída de tensión en el devanado serie.

22. Un motor de corriente continua con excitación en derivación conectado a una tensión de 200 V consume una potencia de 5 kW. La resistencia del inducido y del devanado de conmutación es de $0,8 \Omega$ y la resistencia del devanado de excitación en derivación es de 80Ω . La caída de tensión en el contacto entre escobilla y colector es de 0,8 V. Calcula:
- Las intensidades de corriente por cada uno de los devanados.
 - Las pérdidas en el devanado paralelo.
 - Las pérdidas por el efecto Joule y la potencia electromagnética.
23. Un motor de corriente continua con excitación compuesta en conexión corta está conectado a una tensión de 230 V, consume una corriente de 15 A y gira a 1000 r.p.m. El motor tiene un rendimiento del 82%. La resistencia del inducido y de conmutación vale 1Ω , la resistencia del devanado de excitación serie es $0,8 \Omega$ y la del devanado en derivación 100Ω . La caída de tensión entre escobilla y colector es 1 V. Calcula:
- La potencia consumida por el motor.
 - Las intensidades de corriente por cada devanado.
 - La potencia disipada en el devanado en derivación.
 - El par de giro del motor.
24. Determina la intensidad nominal por el inducido y la intensidad de arranque de un motor de cc con excitación serie que está conectado a una tensión de 150 V y consume 2,7 kW. La resistencia del reostato de arranque vale 3Ω , la del inducido $0,2 \Omega$, la de conmutación $0,6 \Omega$ y la del devanado serie $1,2 \Omega$. Despreciamos la caída de tensión entre escobillas y colector.



Recuerda

- ✓ En los motores la **conmutación** tiene como objetivo que la circulación de la corriente se mantenga siempre en el mismo sentido en cada uno de los polos, para que la fuerza y el par de giro tengan también el mismo sentido.
- ✓ La **fuerza contraelectromotriz** que se genera en los motores provoca una disminución de la intensidad de corriente que circula por el rotor evitando que este tenga que soportar intensidades muy altas, como sucede durante el arranque cuando la f.c.e.m. es nula.
- ✓ La intensidad de arranque de los motores está limitada en el **Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT)**.
- ✓ Los motores de corriente continua pueden ser de **excitación independiente** o **autoexcitados**, estos últimos, dependiendo de cómo estén conectados los devanados del inductor e inducido pueden ser: de excitación serie, de excitación paralelo y de excitación compuesta —combinación de los dos anteriores.