

# Principios de máquinas: Motores eléctricos de Corriente Continua (c.c.)



En los motores de corriente continua (c.c.) concurren una serie de características que les hace especialmente indicados para ciertas aplicaciones, por lo que cada día son más empleados en el ámbito industrial.

La amplia gama de velocidad que ofrecen, su fácil control y la gran flexibilidad de las curvas par-velocidad de este tipo de motores, así como el que presenten un alto rendimiento para un amplio margen de velocidades, junto a su elevada capacidad de sobrecarga, los hace más apropiados que los motores de corriente alterna para muchas aplicaciones.



Imagen 01. [wikipedia](#). Creative commons

La idoneidad de este tipo de motores para arrastrar máquinas que precisen una amplia gama de regímenes de velocidad con un preciso y ajustado control de las mismas, han provocado que últimamente, estos motores tengan más presencia en diversos procesos industriales que requieren de esta característica. Igualmente son los motores de elección en el ámbito de la juguetería, del tipo de imanes permanentes se pueden conseguir potencias desde algún watio a hasta cientos de watios.

Así como en los equipos lectores de CD, en los giradiscos y en las unidades de almacenamiento magnético, donde se utilizan motores de imán fijo y sin escobillas, estos motores proporcionan un eficaz control de la velocidad y un elevado par de arranque.

Otra significativa ventaja es la facilidad de inversión de giro de los grandes motores con elevadas cargas, al tiempo que son capaces de actuar de modo reversible, devolviendo energía a la línea durante los tiempos de frenado y reducción de velocidad.

Además de que tienen tamaños muy reducidos y no contaminan el medio ambiente.



## Curiosidad

### **¿Cuántos motores tiene un... tren AVE?**

Normalmente tenemos la imagen de un tren como una locomotora de tracción equipada con un gran motor y un montón de vagones detrás.

Sin embargo, los trenes más modernos, los de alta velocidad por ejemplo, no tienen esta configuración. Son trenes "reversibles" con cabinas de conducción en los dos extremos y dependiendo del tren, los motores pueden estar distribuidos en hasta 16 motores asíncronos a lo largo del tren. Es el caso del ICE3 de Siemens, o el talgo de la foto conocido como "pato", que funciona con 8 motores asíncronos.



Imagen 02. Revista Via Libre. ©



Son convertidores electro-mecánicos rotativos de energía que debido a los fenómenos de inducción y de par electromagnético, transforman energía eléctrica, de naturaleza continua, en energía mecánica.

Los primeros motores eléctricos contruidos en el siglo XIX por Michael Faraday y Zénobe Gramme, fueron de corriente continua.

La corriente continua captada de la red recorre los devanados del motor, generando campos magnéticos que dan lugar a fuerzas que provocan el movimiento rotativo del motor.

Diremos que el motor trabaja en vacío cuando no tenga acoplado en su eje ningún objeto y no realice por lo tanto ningún trabajo útil, ya que no arrastra ninguna carga, en esas condiciones la potencia eléctrica absorbida de la red es mínima, ya que solamente sería la necesaria para producir el campo magnético inductor, puesto que en vacío el par motor sería cero y también sería nula la intensidad del inducido.

Se dice que un motor funciona con carga cuando está arrastrando algún objeto que le obliga a absorber energía mecánica.



### Curiosidad

#### **Desarrollo histórico**

La forma y/o configuración actual de los motores eléctricos es consecuencia de un desarrollo histórico de la tecnología eléctrica.

En la web del [Sparkmuseum](#) sobre la electricidad, puedes ver unas fotografías sobre diferentes "artilugios" históricos que diferentes científicos fueron proponiendo y desarrollando.



Imagen 03. Sparkmuseum. ©



## Early Electric Motors

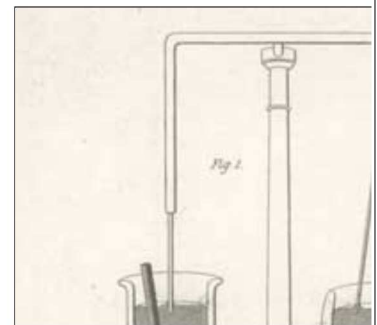
# The Development of the Electric Motor

As is so often the case with invention, the credit for development of the electric motor belongs to an individual. It was through a process of development and discovery beginning with Hans Oersted's discovery of [electromagnetism](#) in 1820 and involving additional work by William Sturgeon, Joseph Henry, Andre Bregno, Michael Faraday, Thomas Davenport and a few others.

Using a broad definition of "motor" as meaning any apparatus that converts electrical energy into motion, most sources cite Faraday as developing the first electric motors, in 1821. They were useful as demonstration devices, but that is about all, and most people wouldn't recognize them as anything resembling a modern electric motor. There are several Faraday motors in the collection.



The motors were constructed of a metal wire suspended in a cup of





### Importante

El funcionamiento de un motor de c.c. se basa en la fuerza que se produce sobre un conductor eléctrico recorrido por una intensidad de corriente eléctrica en el seno de un campo magnético, según la expresión:

$$F = B \cdot l \cdot I$$

En la que:

**B** es la inducción de campo magnético (teslas).

**l** es la longitud del conductor cortado por líneas de campo magnético (metros).

**I** es la intensidad que recorre al conductor (amperios).

**F** es la fuerza que se produce sobre el conductor (newton).

Para conocer la dirección de la fuerza se aplica la regla de la mano izquierda, tal y como vemos en la figura, si colocamos los dedos de la mano izquierda índice, corazón y pulgar abiertos y perpendiculares entre sí, de modo el índice coincida con el sentido de la inducción magnética; el corazón coincida con el de la corriente eléctrica que recorre el conductor, el pulgar indicará el sentido de la fuerza que se ejerce sobre el conductor.

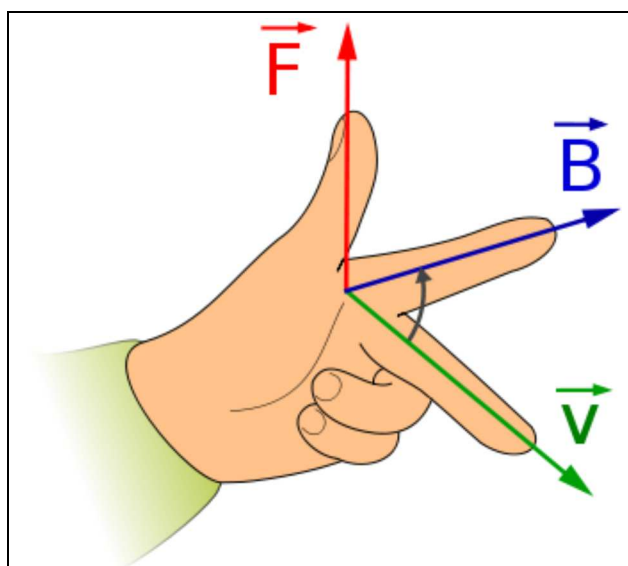


Imagen 04. IES F. zobel. ©

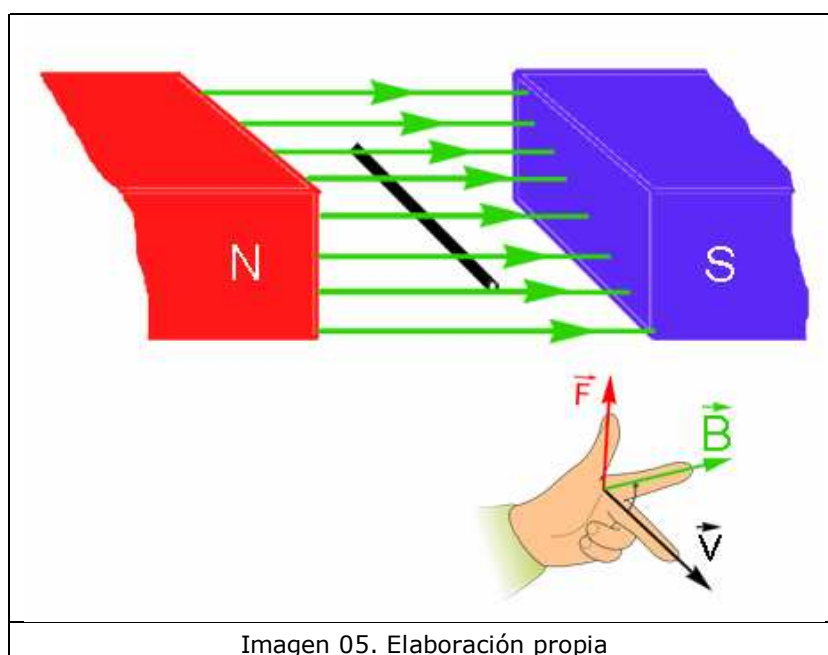
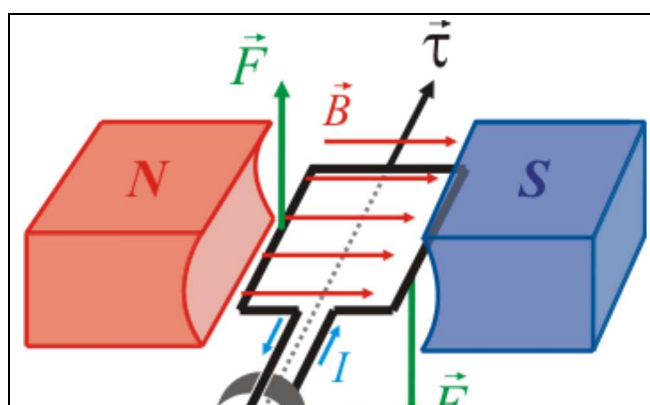


Imagen 05. Elaboración propia





#### Importante

Los motores están constituidos por diversos elementos de distintos materiales que describimos a continuación:

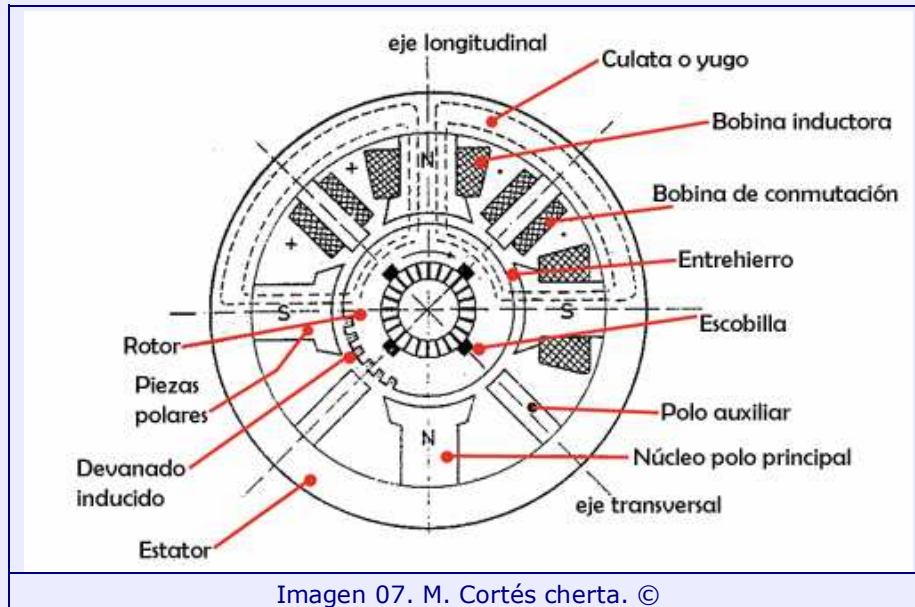


Imagen 07. M. Cortés cherta. ©

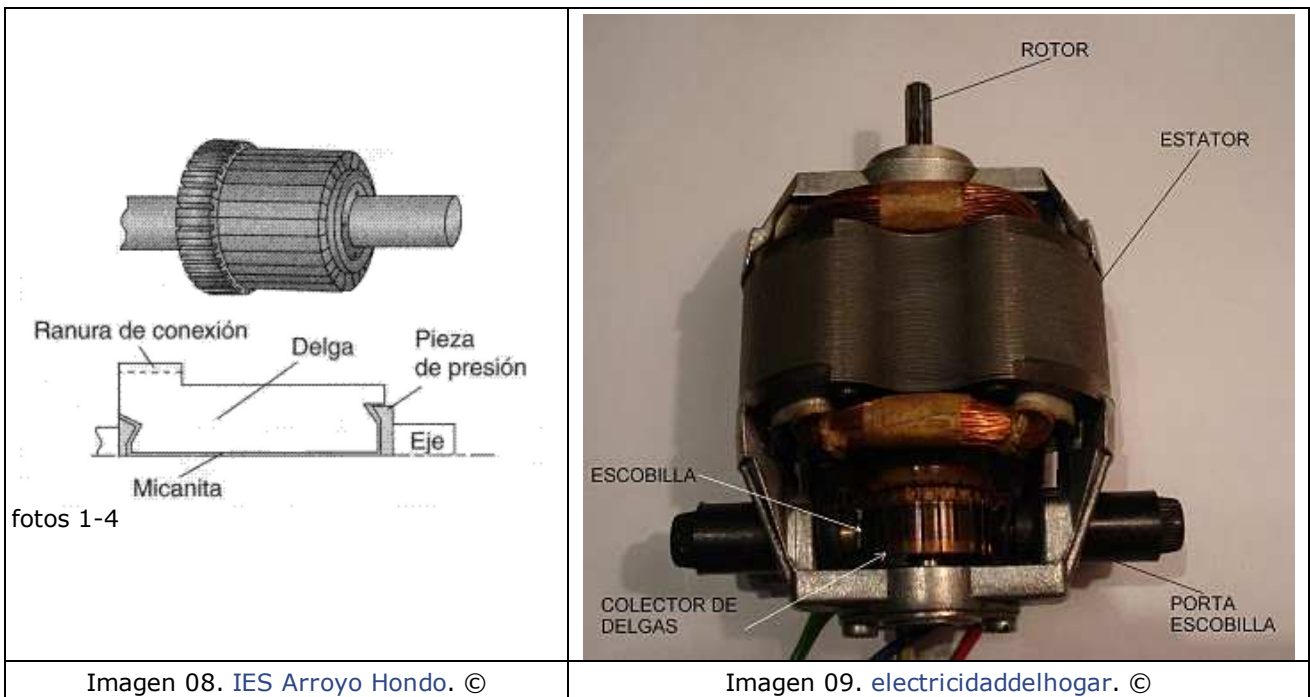
**Estator**, es una corona de material ferromagnético, llamado carcasa, culata o yugo, en cuyo interior y regularmente distribuidos se encuentran, en número par, los **polos inductores**, sujetos mediante tornillos a la carcasa, están constituidos por un núcleo y por unas expansiones en sus extremos. Alrededor de los polos se encuentran unas bobinas, que constituyen **el devanado inductor**, generalmente de hilo de cobre aislado, que al ser alimentados por una corriente continua, generan el campo inductor de la máquina, presentando alternativamente polaridades norte y sur (siempre debe haber un número par de polos).

En las máquinas de cierta potencia se encuentran distribuidos alternativamente entre éstos, otros **polos auxiliares** o de conmutación, macizos y sin expansiones, cuya misión es facilitar la conmutación y evitar la generación de chisporroteo en el contacto entre las delgas del colector y las escobillas.

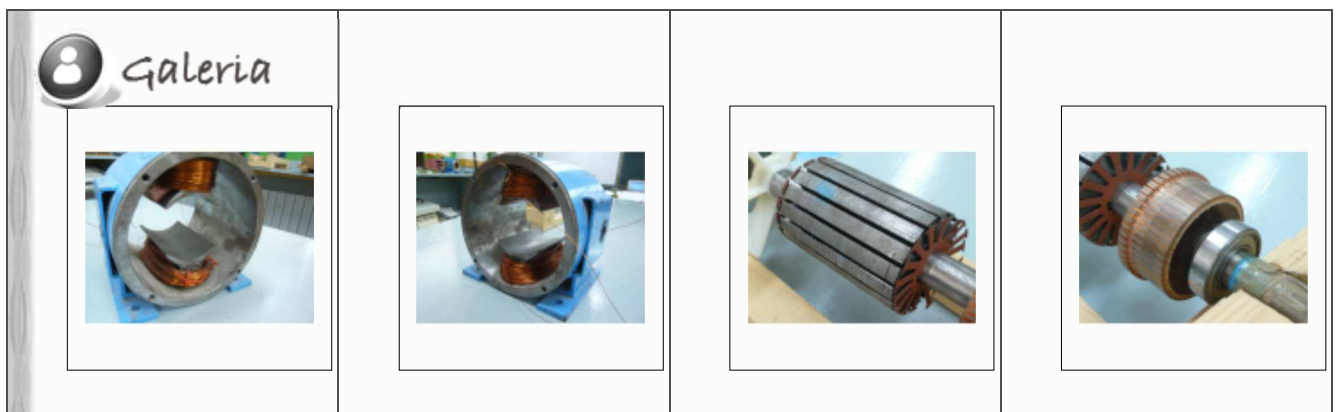
**Entrehierro**, así se llama al espacio que hay entre el estator y el rotor, es imprescindible que exista para evitar el rozamiento entre ambos, aunque debe ser lo menor posible, ya que el aire presenta una elevada reluctancia magnética, y si el entrehierro fuese muy amplio se debilitaría el campo magnético inductor.

**Rótor**, construido con chapas de acero con bajo contenido en silicio de 0,5 mm de espesor, aisladas unas de otras por una capa de barniz o de óxido, está montada sobre el eje de la máquina. En su superficie externa tiene practicadas unas ranuras de una cierta inclinación respecto a su generatriz donde van alojadas las bobinas del **devanado inducido** de la máquina, generalmente de hilo de cobre convenientemente aislado.

**Colector de delgas**, va montado sobre el eje de giro y debe disponer de tantas delgas como bobinas tiene el devanado inducido, cada delga está unida eléctricamente al punto de conexión de una bobina con otra. Las delgas están fabricadas de cobre de elevada pureza y están separadas unas de otras por unas delgadas películas de mica que las mantienen aisladas.



En la siguiente galería fotográfica, puedes ver un motor eléctrico desmontado y sus componentes

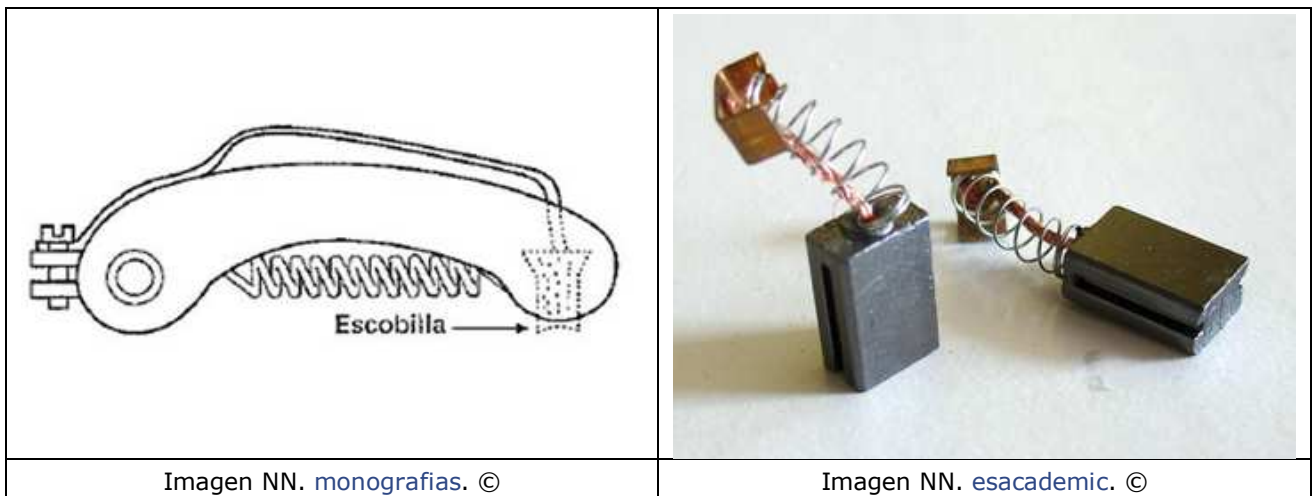






Imágenes 10-16. Elaboración propia

**Escobillas**, son los elementos que aseguran el contacto eléctrico entre las delgas del colector y el circuito de corriente continua exterior, están fabricadas de carbón (grafiito) y permanentemente están rozando sobre el colector, van sujetas en un collarín portaescobillas que mantiene la presión prevista mediante elementos elásticos para asegurar que el contacto sea el adecuado, por ello se produce un desgaste progresivo que acorta su vida útil, teniendo que sustituirlas cada cierto tiempo. Desde las escobillas se conecta con la placa de bornes de la máquina.







Se distinguen claramente varias fases de funcionamiento de los motores de c.c.

➤ **Arranque**, es el momento inicial en el que, partiendo del reposo, se conecta a la red, en ese instante el motor debe vencer el par resistente que se le opone constituido por las resistencias debidas a la inercia y a los rozamientos de los órganos móviles del motor, este par resistente debe ser inferior al par de arranque del motor, porque de no ser así el motor no arrancaría.

Este régimen es crucial para el motor ya que la intensidad captada de la línea alcanza picos muy elevados que podrían ocasionar graves daños a la línea y quemar los bobinados del motor.

➤ **Aceleración**, es el periodo en que el motor va ganando velocidad hasta alcanzar la de régimen nominal, por ello el par motor debe ser muy poderoso en esta fase, ya que además de vencer el par resistente debe acelerar el motor hasta alcanzar la velocidad de funcionamiento normal.

➤ **Régimen nominal**, es cuando el motor ha alcanzado su marcha nominal y se mantienen todos los parámetros, en este instante el par motor debe ser igual al par resistente y de signo opuesto.

➤ **Estabilidad en los motores de c.c.** tras alcanzar el régimen nominal, pueden modificarse los parámetros del motor de forma inesperada, debido a pérdidas de carga,... para que el motor se comporte de modo estable es preciso que responda a estas variaciones de modo que trate de anularlas, para recuperar el régimen nominal, de no ser así, se dice que el sistema es inestable, es decir, cuando tras producirse una acción que modifica los parámetros, estos continúan separándose más y más de sus valores nominales.

Por lo tanto cuando se produce un aumento brusco de velocidad el motor estable responde con un par motor inferior al resistente, para tratar de reducir la velocidad y así recuperar el régimen nominal. Si el motor fuese inestable el par motor sería mayor que el resistente con lo que aumentaría progresivamente la velocidad, embalsándose el motor.

Si las variaciones de régimen son en el sentido de disminuir la velocidad un motor estable responde amentando su par motor frente al resistente para tratar de corregir la velocidad y recuperar el régimen nominal de trabajo.

➤ **Inversión del sentido de giro**, el motor puede funcionar en ambos sentidos de giro, para lo que es necesario intercambiar las conexiones de ambos devanados.

Recordemos que el sentido del par motor depende de la polaridad del campo magnético y del sentido de la corriente del inducido; si invertimos las conexiones del inducido, invertimos el sentido de la corriente en él, y si lo hacemos en el inductor invertiremos la polaridad del campo magnético.

Si se cambia el sentido de giro con el motor detenido, no importa cuál sea el devanado en el que se permutan las conexiones, pero si el cambio de sentido de giro se realiza con el motor en marcha, es necesario que sea el devanado inducido el que cambie de conexión, porque si se hiciera con el bobinado inductor, durante un instante quedará la máquina sin excitación, lo que provocaría el embalamiento del motor.

➤ **Frenado de un motor de c.c.** para detener un motor no es suficiente con desconectarlo de la red, ya que por inercia éste continuaría girando. Existen tres procedimientos distintos para frenar un motor:

➤ **Frenado dinámico**, se hace funcionar al motor como generador, transformando la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, que puede ser inmediatamente consumida en unas resistencias conectadas al efecto (**frenado reostático**), o bien se cede a la red de alimentación eléctrica (**frenado regenerativo**).

➤ **Frenado en contramarcha**, para lo que se precisa invertir el sentido del par electromagnético mientras el motor está en marcha.

## 5. Arranque de los motores de c.c.



El arranque de un motor es el instante en que conecta a la red. En ese momento, el par motor debe ser mayor que el par resistente que opone la carga.

En el instante del arranque, al estar parado el motor su velocidad es nula, por lo que la fuerza contraelectromotriz que es proporcional a la velocidad también es nula. Esto provoca que toda la tensión de alimentación cae en el devanado del inducido, por lo que en el instante del arranque la intensidad que recorre el motor es muy elevada, pudiendo alcanzar valores de hasta diez veces la intensidad nominal en régimen de funcionamiento estable y más aún para motores de gran potencia, que es cuando el motor ha alcanzado una velocidad que se mantiene constante, ya que el par motor y el par resistente de la carga están equilibrados.

La intensidad que recorre el inducido tiene por expresión:

$$I_i = \frac{U - E - 2U_e}{R_i} \approx \frac{U - E}{R_i}$$

Como en el arranque  $E=0$ , ya que  $\omega=0$ , la expresión anterior resulta:

$$I_{arr} = \frac{U - 0}{R_i}$$

Por lo que para limitar la corriente de arranque a valores compatibles con los requerimientos del trabajo, y que no provoque efectos perjudiciales para los devanados se introduce una resistencia en serie con el inducido, que consistirá en un reostato de arranque de varios escalones, que en el momento del arranque estará totalmente introducido y que durante el proceso de cebado del motor hasta alcanzar el régimen nominal se va extrayendo, bien manualmente, o bien automáticamente mediante dispositivos electrónicos, el número de saltos o "plots" que presente el reóstato de arranque dependerá de la suavidad que precise el arranque y de la potencia del motor.

Además de estos reóstatos también se utilizan otros equipos, como variadores electrónicos de tensión, generalmente de tiristores (SCR), se alimentan con corriente alterna que convierten en tensión continua variable, permitiendo el arranque por aplicación creciente de tensión, limitando la corriente y el par de arranque.

El criterio para elegir el uso de los diferentes sistemas de arranque suelen ser soluciones de compromiso de tipo técnico-económica.



### Curiosidad

#### ¿Sabías que...?

El artículo 36 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión dice que los motores con potencias de más de 0,75 Kw, deben estar provistos de reóstatos de arranque o dispositivos equivalentes que limiten la corriente en el momento del arranque, para que no se sobrepasen los valores señalados a continuación:

- Para  $0,75 \text{ Kw} < P_{\text{motor}} < 1,5 \text{ Kw}$  .....  $I_{\text{arranque}} < 2,5 I_{\text{nominal}}$
- Para  $1,5 \text{ Kw} < P_{\text{motor}} < 5 \text{ Kw}$  .....  $I_{\text{arranque}} < 2 I_{\text{nominal}}$
- Para  $P_{\text{motor}} > 5 \text{ Kw}$  .....  $I_{\text{arranque}} < 1,5 I_{\text{nominal}}$



El acoplamiento entre el sistema eléctrico y mecánico se produce mediante el campo magnético inductor y este puede producirse mediante imanes permanentes, solución que solo se emplea en motores de muy poca potencia, o lo que es más común por electroimanes alimentados por corriente continua, constituyendo el devanado inductor de la máquina, según sea la alimentación de estas bobina, las máquinas pueden ser de excitación independiente o autoexcitadas.

► **Excitación independiente**, cuando la corriente continua que alimenta el devanado inductor proviene de una fuente de alimentación independiente de la máquina, (un generador de c.c. un rectificador, una batería,...).

► **Autoexcitación**, cuando la corriente continua que recorre las bobinas inductoras procede de la misma máquina de c.c. Aprovechando la existencia de un cierto magnetismo remanente, debido al ciclo de histéresis que presentan los materiales magnéticos, este flujo remanente provoca que al girar el inducido se genere en él una pequeña f.e.m., que convenientemente aplicada al circuito de excitación, dará lugar a una pequeña corriente inducida que reforzará el magnetismo remanente de inicio, lo que provocará que la f.e.m. inicial se vea reforzada, generando una mayor corriente, que dará mayor excitación, reforzándose el flujo, produciendo un nuevo aumento de f.e.m. y así sucesivamente hasta conseguir el punto de cebado de la máquina, en el que se alcanza un punto de estabilidad de tensión en bornes de la máquina, dando lugar a que se mantenga constante la corriente de excitación y por lo tanto también el flujo inductor. Este punto de estabilidad se alcanza debido a que los materiales magnéticos presentan un codo de saturación, a partir del cual aunque se aumente la corriente de excitación, no puede aumentarse la magnetización del núcleo magnético.



### Importante

*Según sea la conexión entre las bobinas del devanado inductor y del inducido, se distinguen tres tipos de máquinas autoexcitadas: shunt o derivación, serie y compuesta o compound.*



El esquema de un motor de excitación independiente es como el que se observa en la figura, distinguiéndose claramente dos circuitos eléctricos independientes, el de excitación o inductor, y el de inducido, por lo que podemos establecer, según la ley de Kirchhoff, dos ecuaciones eléctricas.  $R_A$  es un reostato para regular  $I_i$ , e inicialmente su valor es cero.

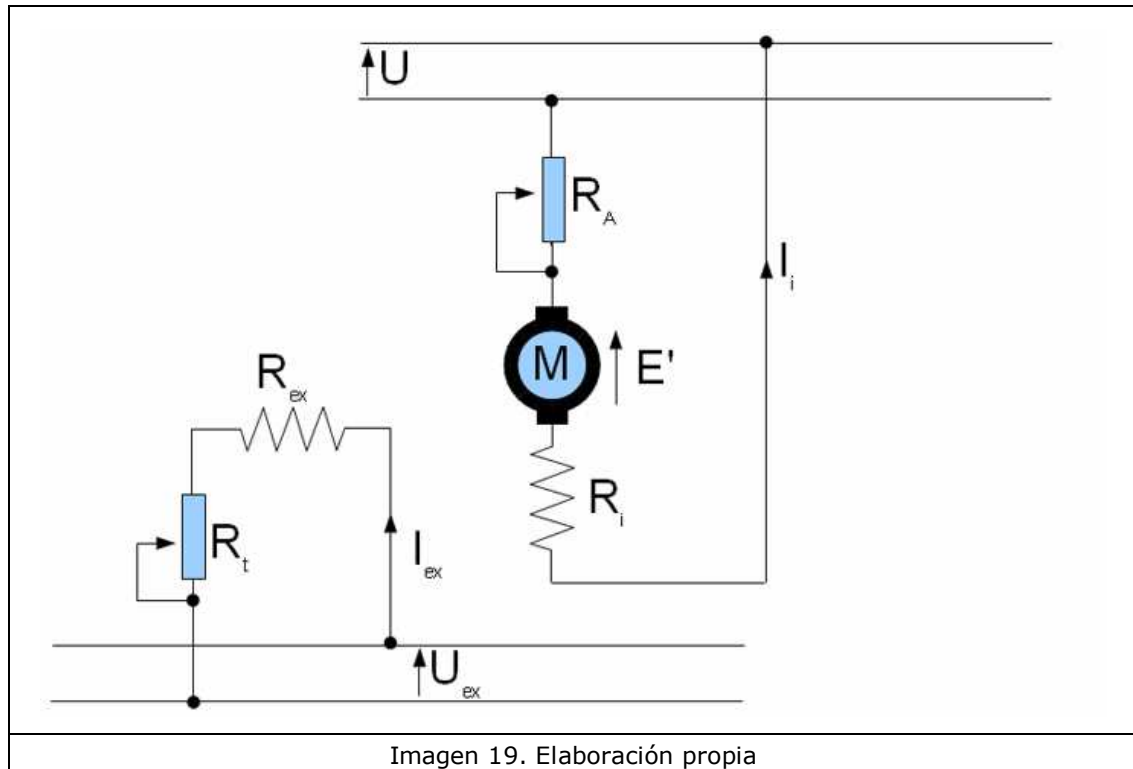


Imagen 19. Elaboración propia

$$U = E' + R_i I_i + 2U_e$$

$$U_{ex} = R_{ex} I_{ex}$$

Donde  $2U_e$ , es la caída de tensión que se produce en el contacto entre las delgas del colector y las escobillas, se cuantifica como una cantidad constante de 2 voltios, y si la tensión de alimentación del motor es razonablemente elevada se desprecia al hacer cálculos, ya que no se introduce un error muy significativo.

Las curvas características del motor suelen ser dos:

- la **característica de velocidad** en las que se representa como se modifica la velocidad de giro en función de la intensidad de inducido mientras se mantiene constante la intensidad de excitación.

En la excitación independiente la intensidad de excitación es siempre la misma y puesto que cien de otra alimentación, no cambia pase lo que pase en el inductor. Como el valor del flujo es proporcional a la intensidad de excitación independiente, se debe cumplir:

$$E' = K \cdot \phi \cdot n = K_1 \cdot I_{ex} \cdot n$$

Como además en el inductor se cumple

$$E' = U - R_i \cdot I_i$$

Igualando  $E'$ , y despejando:

$$n = \frac{U - R_i I_i}{K_1 \cdot I_{ex}}$$

- Y la **característica de par**, en la que se representa la variación del par en función de la intensidad de inducido mientras se mantiene constante la intensidad de excitación.

Por lo que se cumple:

$$M = K \cdot I_i \cdot \phi = K_2 \cdot I_i$$





## Ejercicio resuelto

Un motor eléctrico de c.c. consume 20 A. cuando gira a 1000 r.p.m., posee una  $R_i = 0,2\Omega$  y la fuerza electromotriz es de 12 V.

Calcular:

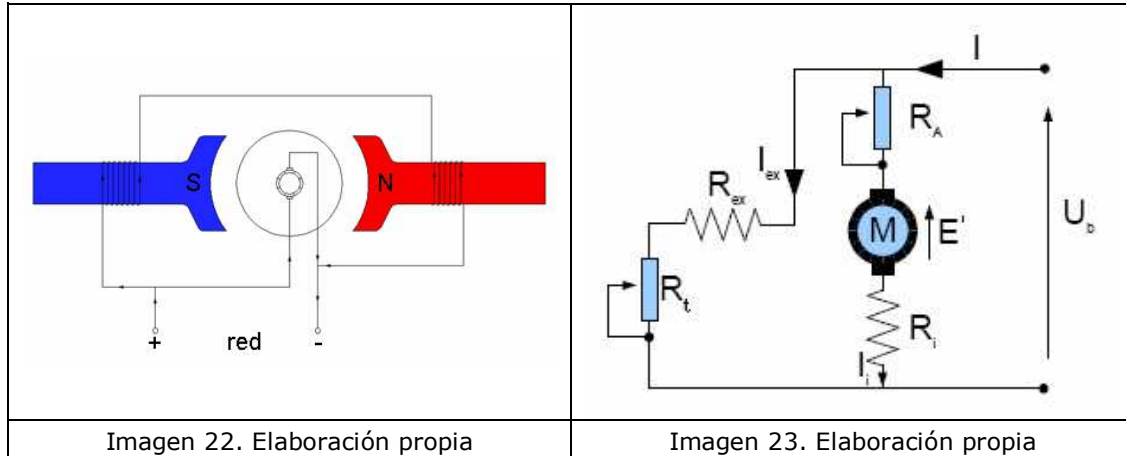
- a) Tensión de alimentación.
- b) Potencia absorbida, potencia útil y rendimiento.
- c) Intensidad de cortocircuito.
- d) Resistencia del reóstato de arranque para limitar la intensidad en ese régimen a  $1,5 I_n$ .
- e) Par motor y par de arranque suponiendo el flujo constante.

Cómo quizá no estés muy acostumbrado a resolver circuitos, te recomendamos te ayudes de la solución para intentar comprender la resolución del ejercicio (pulsando en [Mostrar información](#)). Observa, que en la resolución se hace una suposición que podrás realizar en otros ejercicios propuestos.

## 6.2. Motor autoexcitación shunt.



El esquema de un motor autoexcitación shunt o derivación es como el de la figura, donde se observa que el devanado inductor está conectado en paralelo con el devanado del inducido, por lo que en este caso la tensión de la red alimenta a las dos ramas del circuito y la intensidad absorbida de la red se reparte entre la intensidad del inducido, por donde se derivará la mayor parte de la corriente y la intensidad de excitación derivación que será de un valor muy reducido, por lo que la resistencia de esta rama debe ser muy elevada, lo que provoca que el devanado de excitación shunt esté construido con muchas espiras de hilo fino.



$$U = E' + R_i I_i + 2U_e$$

$$U = R_{ex} I_{ex}$$

$$I = I_i + I_{ex}$$



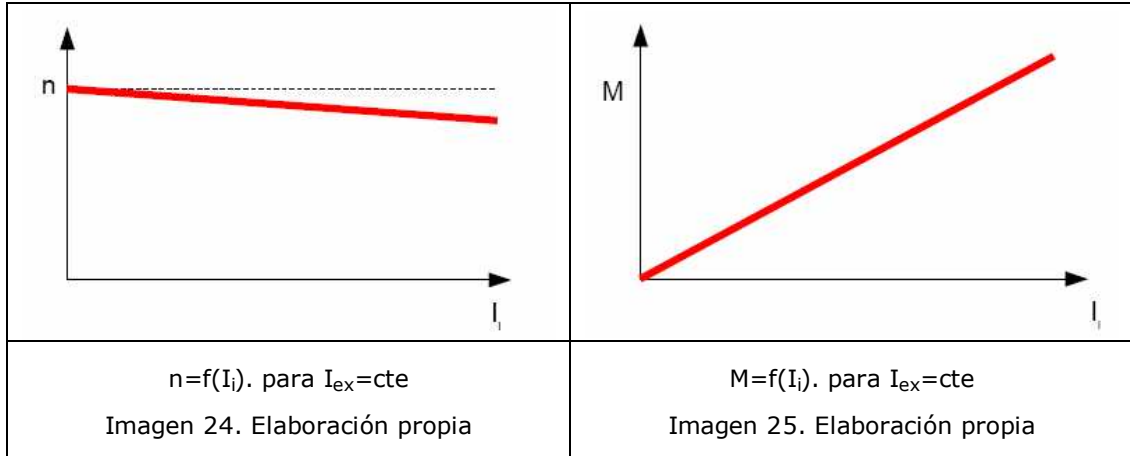
Si multiplicamos estas ecuaciones de tensiones por las intensidades correspondientes, se obtienen las potencias respectivas:

$$P_{ab} = U \cdot I = U(I_i + I_{ex}) = E' \cdot I_i + R_i \cdot I_i^2 + R_{ex} \cdot I_{ex}^2$$

$$P_{ab} = P_{ei} + P_{cu}(R_i + R_{ex})$$

Toda la potencia eléctrica absorbida de la red, se reparte entre la potencia necesaria para crear el campo inductor y la potencia que se pierde en el inducido por efecto Joule, estos dos conceptos se identifican como pérdidas de potencia en el cobre, y se restan a la potencia eléctrica absorbida de la red para obtener la potencia eléctrica interna, que será el producto de la fuerza contraelectromotriz ( $E'$ ) y la intensidad de inducido ( $I_i$ ).

Las curvas de velocidad y par son muy similares al motor de excitación independiente, ya que ambos esquemas eléctricos son muy parecidos.



Presentan una velocidad prácticamente constante (apenas disminuye al aumentar la carga, y se mantiene prácticamente constante aún trabajando en vacío). Son motores muy estables y de gran precisión, por lo que son muy utilizados en máquinas herramientas: fresadoras, tornos, taladradoras,... Tienen el inconveniente de que su par de arranque es más pobre que el de los motores serie.



## Ejercicio resuelto

Un motor eléctrico de corriente continua excitación en derivación tiene las siguientes características: Potencia útil,  $P_u=10$  CV, tensión de alimentación,  $U=440$  V, intensidad absorbida de la red,  $I_{abs}=20$  A. Velocidad de giro  $n=1500$  rpm. Resistencia del inducido,  $R_i=0,2\ \Omega$ . Resistencia del devanado de excitación,  $R_{exc}=440\ \Omega$

Determine, para el funcionamiento del motor a plena carga:

- El valor de la fuerza contraelectromotriz.
- La potencia perdida por efecto Joule en los devanados (pérdidas del cobre) y el valor conjunto de las pérdidas del hierro y mecánicas.
- El par útil.

Nota: Despreciar en este problema la caída de tensión en las escobillas y la resistencia del reóstato de arranque ( $R_t$ ) y de los polos auxiliares.

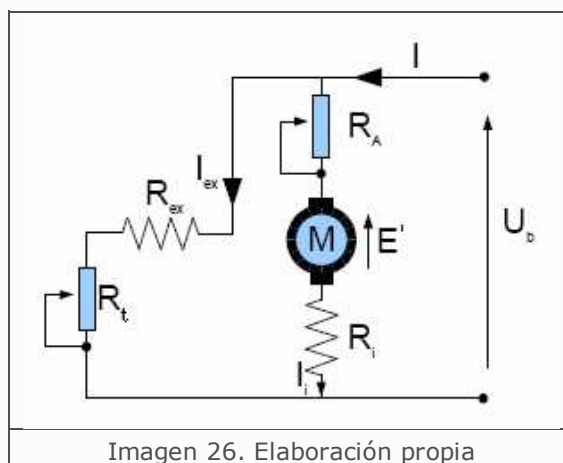


Imagen 26. Elaboración propia

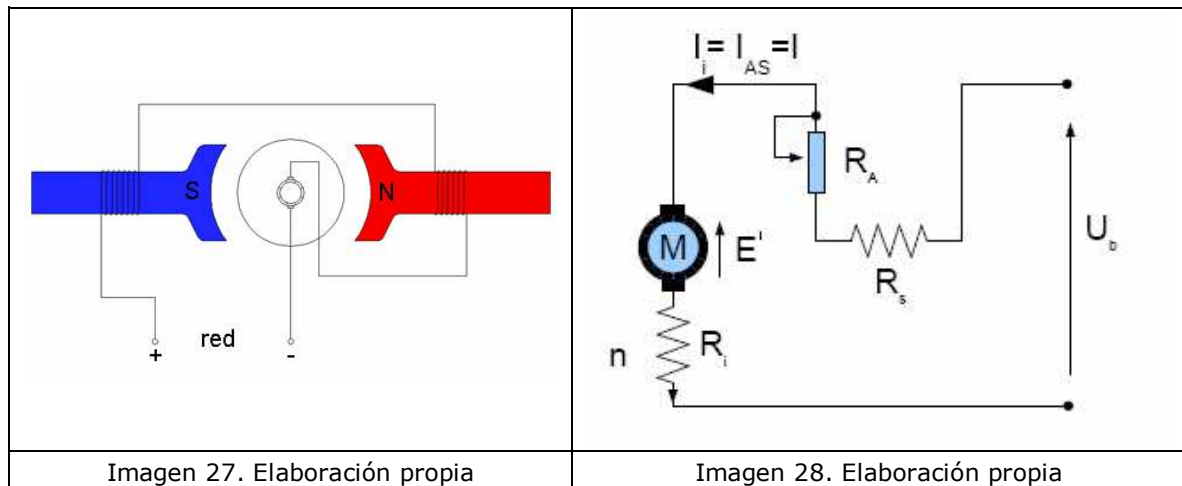
De nuevo, este ejercicio es para ilustrar como hacer cálculos en el circuito de excitación en shunt, por lo que te recomendamos abras la solución antes de tratar de resolver el ejercicio sin ayuda (aunque si lo sabes hacer sin abrirla... mejor)

### 6.3. Motor autoexcitación serie



El esquema de un motor autoexcitación serie es como el de la figura, donde se observa que el devanado inductor está conectado en serie con el devanado del inducido, por lo que en este caso solamente hay un circuito eléctrico, la intensidad del inducido y la de excitación serie serán iguales, y de valor muy elevado, para que no ocasionen caídas de tensión elevadas en este devanado es preciso que tenga pocas espiras y además estas deben ser de hilo grueso.

Al aplicar la ley de Kirchhoff a esta malla se obtiene la ecuación eléctrica:



Ya que en este circuito:

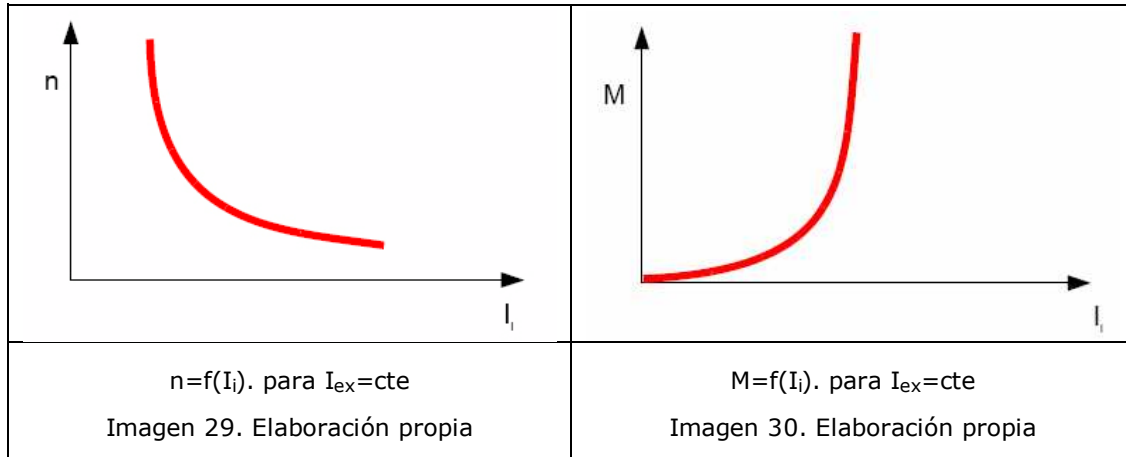
$$I = I_i = I_{ex}$$

Por tanto al multiplicar estas ecuaciones por la intensidad obtenemos:

$$P_{ab} = U \cdot I = E' \cdot I_i + R_i \cdot I_i^2 + R_{ex} \cdot I_{ex}^2$$

$$P_{ab} = P_{ei} + P_{cu}(R_i + R_{ex})$$

Las curvas características de velocidad y par para este tipo de motores resultan ser como las mostradas en la figura.



La curva de velocidad de estos motores es una hipérbola. En el caso del par, la curva es una parábola, ya que las intensidades de inducido y excitación son las mismas.

La característica fundamental de estos motores es que presentan un gran par de arranque, por lo que les permite arrancar estando en carga, aunque su velocidad no se mantiene constante, sino que varía mucho dependiendo de la carga que deba arrastrar, disminuye al aumentar la carga y aumenta al disminuir ésta. Esto los convierte en muy peligrosos en aquellos trabajos en que puedan quedarse sin carga, ya que corren grave riesgo de embalamiento, como es el caso de grúas,...

Por su gran par de arranque son los utilizados en tracción eléctrica, se emplean en ferrocarriles, funiculares, tranvías,...

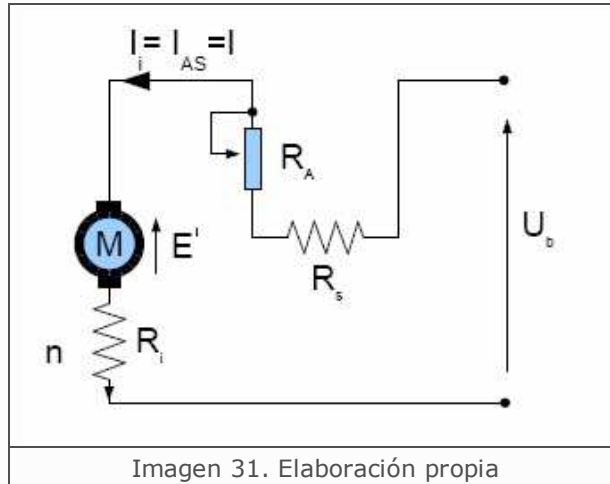


## Ejercicio resuelto

Un motor serie de corriente continua suministra una potencia útil de 20 CV. Las características del motor son las siguientes: rendimiento 84,2%, velocidad 900 rpm, tensión en bornes 230 V, resistencia del inducido 0,12  $\Omega$  y resistencia de excitación es de 0,05  $\Omega$ . Determine cuando funciona a plena carga:

- La intensidad que consume.
- El valor de la fuerza contraelectromotriz.
- El par útil.

Nota: Despreciar en este problema la caída de tensión en las escobillas y la resistencia del reóstato de arranque ( $R_A$ ) y de los polos auxiliares.



De nuevo, abre directamente la información para poder ver la solución

## 6.4. Motor autoexcitación compound



Para aprovechar las características que tiene cada uno de los dos motores anteriores, se recurre al montaje de un sistema de excitación que los combina, es llamado compound, o compuesto, y puede ser largo o corto, según que el devanado derivación comprenda o no al devanado serie.

En estos motores, parte del devanado excitador se coloca en serie y parte en paralelo.

Presentan características intermedias entre el motor serie y shunt, mejorando la precisión y estabilidad de marcha del serie y el par de arranque del shunt y no corre el riesgo de embalsarse al perder la carga.

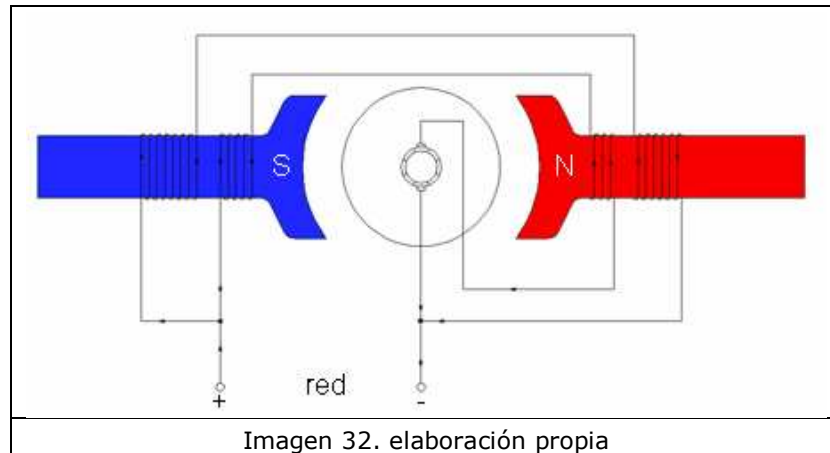


Imagen 32. elaboración propia

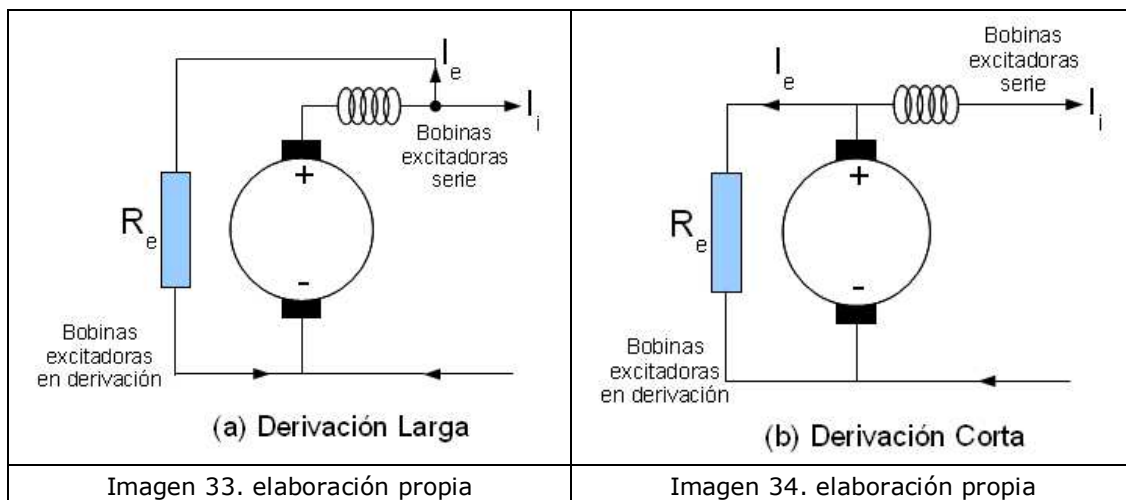


Imagen 33. elaboración propia

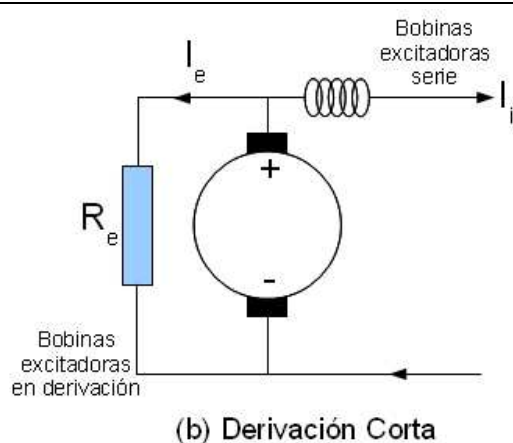


Imagen 34. elaboración propia



### Curiosidad

#### ¿Sabías que...?

Los motores tienen una placa de bornas que es donde se encuentran los extremos de cada uno de los bobinados del motor, y es sobre esta placa de bornas donde se efectúan las conexiones necesarias de la máquina.

Estas bornas se identifican por dos letras mayúsculas consecutivas, de modo que la corriente que circula por el devanado va desde la letra que ocupa el primer lugar en el alfabeto, hasta la que ocupa el lugar siguiente.

- Devanado inducido A-B.
- Devanado autoexcitación shunt, o derivación C-D.
- Devanado de excitación serie E-F.
- Devanado de excitación independiente J-K.
- Devanado de los polos de conmutación o auxiliares G-H.



## Ejercicio resuelto

Los dos siguientes ejercicios resueltos, son también para ilustrar ejercicios con circuitos, por lo que te recomendamos pases a ver las soluciones directamente.

Un motor de c.c. excitación compound larga, tiene una  $f_{cem}$  de 230V, una resistencia de inducido de  $0,1 \Omega$ , una resistencia de excitación derivación de  $40 \Omega$  y una resistencia de excitación serie de  $0,1 \Omega$ . Se alimenta con 240 V. Determinar:

- Intensidades que circulan por las bobinas.
- Potencia absorbida de la red. Potencia útil en el eje. Pérdidas en el cobre.
- Par motor cuando gira a 1000 r.p.m.

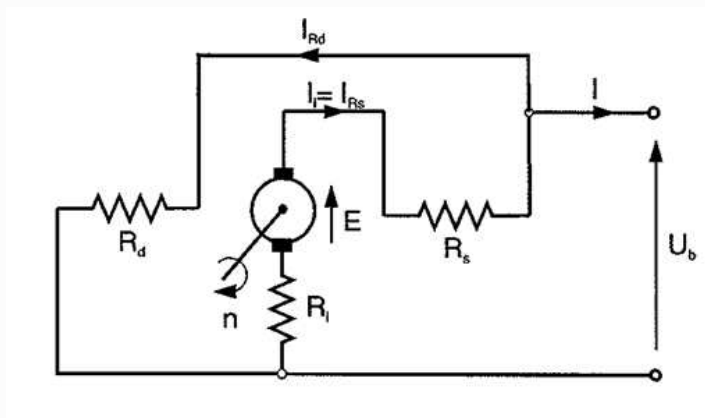


Imagen 35. elaboración propia

Un motor de c.c. excitación compound corta tiene las siguientes características: Tensión en bornes 150 V, resistencia de inducido  $0,2 \Omega$ , resistencia de excitación serie  $0,1 \Omega$ , resistencia de excitación derivación  $30 \Omega$ , en régimen nominal gira a 1000 r.p.m. y absorbe de la red una potencia de 4500w. Calcular:

- Intensidades de corriente en sus bobinados.
- Fuerza contraelectromotriz.
- Potencia suministrada en el eje. Par motor.

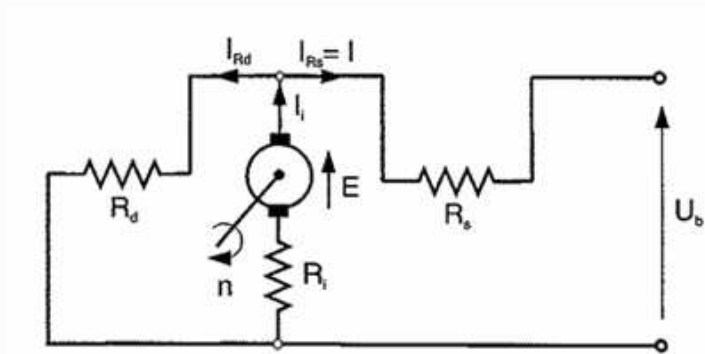


Imagen 36. elaboración propia



## 7. Balance de potencias. Rendimiento



En primer lugar vamos a identificar las distintas potencias que están presentes en un motor de corriente continua.

► **P<sub>ab</sub>** Potencia absorbida

es la potencia que el motor toma de la red y es igual al producto de la tensión de la red o de la línea, aplicada en bornas del motor, por la intensidad de la línea.

$$P_{ab} = U \cdot I$$

► **P<sub>cu</sub>** Potencia de pérdidas en el cobre

son las que se producen por efecto Joule, cuando un conductor es recorrido por corriente eléctrica, en nuestro caso hay de dos tipos: pérdidas de excitación o en el devanado inductor, cuya expresión es el producto de la resistencia del devanado de excitación por el cuadrado de la intensidad de excitación.

$$P_{cu}(ex) = R_{ex} \cdot I_{ex}^2$$

Y pérdidas en el devanado inducido, cuya expresión es el producto de la resistencia del devanado inducido por el cuadrado de la intensidad de inducido.

► **P<sub>ei</sub>** Potencia eléctrica interna

es el resultado de restar a la potencia absorbida de la red, las pérdidas que se producen en los devanados del motor, o pérdidas en el cobre, y es igual al producto de la fuerza contraelectromotriz por la intensidad que recorre el inducido.

$$P_{ei} = E' \cdot I_i$$

► **P<sub>mi</sub>** Potencia mecánica interna

la potencia eléctrica interna en el seno del motor se convierte en potencia mecánica interna, cuya expresión es el producto del par en el eje por la velocidad de giro.

$$P_{mi} = M_i \cdot \omega$$

► **P<sub>Fe</sub>** Pérdidas en el hierro

son pérdidas de tipo magnético que se producen debido al asentamiento de corrientes parásitas de Foucault y debido al ciclo de histéresis que presentan los núcleos magnéticos (para minimizar, en lo posible, este tipo de pérdidas es por lo que los núcleos magnéticos no se construyen macizos, si no por capas de pequeño espesor). Son difíciles de cuantificar.

► **P<sub>m</sub>** Pérdidas mecánicas

debidas sobre todo a rozamientos entre elementos mecánicos del motor (rodamientos, cojinetes, escobillas,...), también son difíciles de cuantificar.

Se puede conocer estas pérdidas en el hierro y mecánicas cuando se conoce la potencia absorbida en vacío y se conocen las pérdidas en el cobre, ya que en vacío toda la potencia que se absorbe de la red eléctrica son pérdidas y éstas coinciden con las pérdidas mecánicas del motor, ya que no hay potencia útil en el eje.

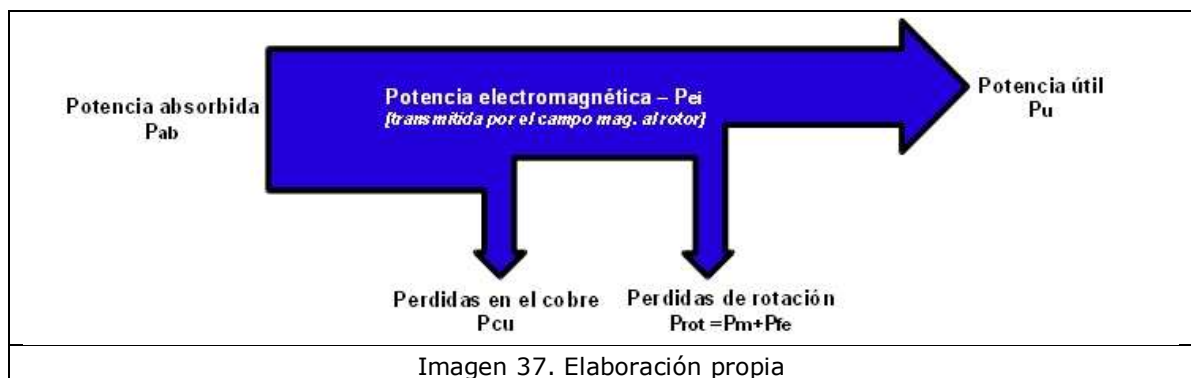
► **P<sub>u</sub>** Potencia útil

es la potencia mecánica que se dispone en el eje del motor y se calcula restando a la potencia mecánica interna las pérdidas en el hierro y mecánicas.

Igualmente se expresa como el producto del par útil en el eje por a velocidad de giro.

$$P_u = M_u \cdot \omega$$

$$P_u = P_{ei} - (P_{Fe} + P_m)$$





## Importante

Se define el **rendimiento** de un motor de c.c. como el *cociente entre la potencia útil que se dispone en el eje, para realizar un trabajo mecánico rotativo y la potencia que se absorbe de la red eléctrica*, se suele expresar en %.

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}}$$

En los motores de c.c. este rendimiento varía entre el 75% y el 95%, siendo tanto mejor cuanto mayor es la potencia de motor.



## Ejercicio resuelto

Te sugerimos de nuevo que consultes la solución incluso antes de intentar resolver el ejercicio.

Un motor de c.c. de excitación compuesta corto es alimentado por una línea de 150 v. Los valores de sus resistencias son:  $R_{ed}=20\ \Omega$  y  $R_i=0,1\ \Omega$ . Sabiendo que cuando gira a 1.000 r.p.m. genera una fcm de 120 V y suministra una potencia mecánica de 4.800 w.

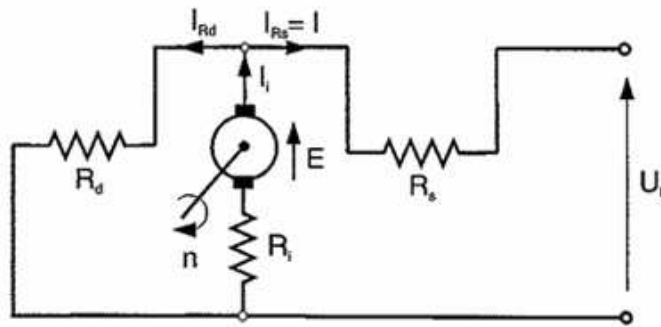


Imagen 38. elaboración propia

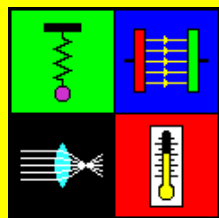


## Curiosidad

Visita la página personal de W. Fendt (que mostramos debajo). En ella, encontrarás una colección de applets Java programados por el autor sobre física y más concretamente, sobre electrodinámica. Ejecuta los correspondientes

- al motor de cc
- y al generador (selecciona la opción con conmutador)

Observa el funcionamiento de ambos y modifica los parámetros de la simulación para comprenderlos mejor.



# Applets Java de Física

Walter Fendt

Traducción: Prof. Ernesto Martín Rodríguez, Juan Muñoz,  
José Miguel Zamarro, Mario Alberto Gómez García

Versión en  
español



[www.walter-fendt.de/ph14s](http://www.walter-fendt.de/ph14s)

(Java 1.4, 45 applets,  
2010-03-17)

[Download](#)



Download: [Sun Microsystems JRE \(Java Runtime Environment\)](#)

## Mecánica

<a href="#">Movimiento con Aceleración Constante</a>	2.11.2000 - 15.3.2010
<a href="#">Tres Fuerzas en Equilibrio</a>	2.5.2000 - 16.3.2010
<a href="#">Composición de Fuerzas (Suma de Vectores)</a>	2.11.1998 - 19.1.2003
<a href="#">Resolución de una Fuerza en sus Componentes</a>	30.5.2003 - 22.9.2003
<a href="#">Sistema de Poleas</a>	24.3.1998 - 19.1.2003
<a href="#">Principio de la Palanca</a>	2.11.1997 - 16.3.2010
<a href="#">Plano Inclinado</a>	24.2.1999 - 19.1.2003
<a href="#">Experimento de la Segunda Ley de Newton</a>	23.12.1997 - 17.3.2010

## 8. Ejercicios resueltos



Esta colección de ejercicios propuestos es una aplicación de los que hemos ido salpicando por el tema. En esta ocasión si te sugerimos que a diferencia de la recomendación de abrir antes la solución en los ejercicios anteriores (ya que eran ejercicios de ilustración de cada concepto), abras las soluciones después de haber intentado resolverlos sin consultar las soluciones.

Para ello, abre:

- PRIMERO, [enunciados de los ejercicios](#)
- SEGUNDO, [soluciones de los ejercicios](#)



Descarga el enunciado de una extensa [colección de problemas](#) con los que puedes practicar.

Lógicamente no es objetivo del curso que hagas todos. Consulta con el tutor y el te recomendará si encuentra alguno más interesante.

Aproximadamente, los 30 primeros tiene la solución para que puedas "autoevaluarte" (ver si lo has hecho bien). Quizá sea más interesante que pruebes con alguno de estos que tiene solución ya que con los otros no sabrás si vas bien o no en la resolución del ejercicio.

**[ABRIR EJERCICIOS PROPUESTOS](#)**