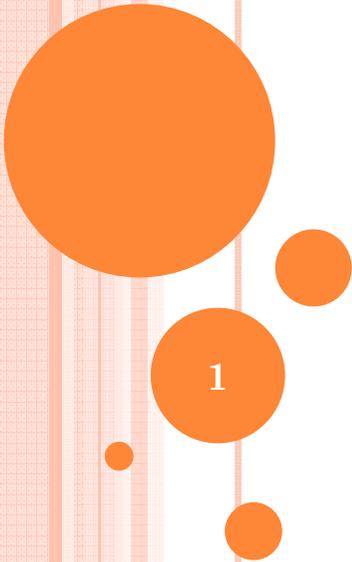


TEMA 8

Motores para vehículos eléctricos



1

SISTEMA HÍBRIDO NO CONVENCIONAL

- **Clasificación y aspectos generales:
Principios de funcionamiento**
- **Motores DC**
 - Bobinado y circuito equivalente
 - Propiedades mecánicas y eléctricas
 - Torque
 - Potencia
- **Motores AC**
 - Características generales
 - Inducción magnética: Propiedades. Leyes
 - Circuito equivalente
 - Tipos de motor
 - Asíncronos
 - Síncronos
- **Sistemas de control**

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- La clasificación de los motores para vehículos eléctricos se divide en dos categorías, motores de corriente continua, DCM, y motores de corriente alterna ACM
- Los motores de corriente continua operan con un tipo de corriente compatible con la que generan supercapacitores, baterías y pilas de combustibles, además de los paneles fotovoltaicos en caso que esta sea una alternativa como fuente de energía
- Los motores de corriente alterna necesitan de un sistema de conversión, inversor o convertidor, para aprovechar la corriente continua

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- Los motores de corriente continua pueden clasificarse en dos categorías
 - Bobinado en serie
 - Bobinado en derivación
- Dentro de los motores de corriente alterna existen, a su vez, distintos tipos:
 - Motores de inducción magnética
 - Motores síncronos de imanes permanentes
 - Motores síncronos de inducción magnética
 - Motores asíncronos de inducción magnética
 - Motores de reluctancia magnética

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- Aunque existen múltiples tipos de motores el número de configuraciones que se pueden dar cuando se trata de vehículos eléctricos es limitada
- Los motores eléctricos para vehículos se combinan, hoy en día, con inversores y sistemas de control electrónico que permiten combinaciones variadas entre las cuales están:
 - Amplio rango de velocidades con torque constante
 - Rango extendido de velocidades con potencia constante
- Así pues, en función de la configuración del sistema de propulsión el diseño y tipo de motor eléctrico será diferente

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- Por ejemplo, para vehículos híbridos, el grupo propulsor necesita proporcionar un torque y una velocidad para cualquier condición, lo que obliga disponer de un motor potente, pudiendo elegir, entre otras opciones por uno de inducción o uno de imanes permanentes
- Por el contrario, en vehículos con hibridación ligera o micro-hibridación se requiere un motor de poca potencia, lo que sugiere la elección de un motor DC o uno de reluctancia magnética

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- Uno de los principales problemas de los motores de corriente continua es el reducido valor del voltaje de las fuentes de corriente continua, lo que obliga a trabajar con intensidades muy elevadas que generan grandes pérdidas por efecto Joule y que degradan rápidamente elementos como los conmutadores, interruptores, componentes electrónicos, etc.
- Para remediar este problema se tiende a trabajar con fuentes de corriente continua de voltaje lo más elevado posible, agrupando en serie los elementos de las baterías

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- Aunque la agrupación en serie permite elevar el voltaje de la fuente, y reducir así la intensidad de corriente, presenta algunos problemas
 - Mayor nivel de interconexión entre los elementos de la batería, lo que complica el diseño e incrementa las pérdidas
 - Mayor tamaño de la batería, incrementando el espacio ocupado
 - Coste más elevado
 - Necesidad de diseñar y fabricar motores que se adapten al voltaje de la batería
 - Uso de sistemas de conversión de voltaje para alimentación de los servicios auxiliares de bajo voltaje

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- Aunque la agrupación en serie permite elevar el voltaje de la fuente, y reducir así la intensidad de corriente, presenta algunos problemas
 - Mayor nivel de seguridad por el alto voltaje de la batería
 - Necesidad de disponer de sistemas de carga adaptados al elevado voltaje de la batería, lo que obliga a diseñar nuevos sistemas de recarga
 - Problemas de compatibilidad entre elementos diseñados para voltajes estándares, 12 VDC, con las nuevas tensiones de operación

CLASIFICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

- Aunque la tendencia actual es a utilizar motores de corriente alterna, la diferencia entre este tipo de motores y uno de corriente continua sin escobillas es prácticamente nula
- Por otro lado, el uso de uno u otro tipo de motores, Ac o DC, es función de la potencia, del tipo de vehículo y de las prestaciones, aceleración, velocidad máxima, consumo, etc., que requiera el vehículo eléctrico
- Asimismo, el tipo de motor está ligado al tipo de transmisión del que vaya dotado el vehículo, aunque los sistemas convencionales no se utilizan en un vehículo eléctrico

MOTORES DC

- **Clasificación y aspectos generales**
- **Principios de funcionamiento**
- **Motores DC**
 - **Bobinado y circuito equivalente**
 - **Propiedades mecánicas y eléctricas**
 - **Torque**
 - **Potencia**
- **Motores AC**
 - **Características generales**
 - **Inducción magnética: Propiedades. Leyes**
 - **Circuito equivalente**
 - **Tipos de motor**
 - **Asíncronos**
 - **Síncronos**
- **Sistemas de control**

MOTORES DC

- El motor eléctrico de corriente continua es un dispositivo que ha sido comprobado a lo largo de muchos años y tiene una eficacia probada
- Su uso en vehículos eléctricos no es nuevo, habiendo sido utilizado en camionetas de reparto y en camiones de carga
- La principal desventaja que tiene es su reducido voltaje de operación, lo que obliga a trabajar con corrientes muy elevadas, con flujos altos a través de las escobillas y del conmutador

MOTORES DC (SERIE)

- El motor eléctrico con escobillas en serie presenta las siguientes características:
 - Elevado torque
 - Baja velocidad
- Estas características lo hacen ideal para sistemas de arranque
- El sistema de escobillas crea un campo magnético permanente que genera un flujo que hace que la parte móvil del motor gire, creando así un movimiento de rotación que es transferido al eje motriz para el desplazamiento del vehículo

MOTORES DC (SERIE)

- El torque de un motor está directamente relacionado con la fuerza motriz del mismo a través de la expresión: $F_m = T_{eje} / R$ donde F_m representa la fuerza motriz, T_{eje} el torque en el eje y R el radio de la rueda
- Por otro lado, el torque en el eje viene dado por la relación:

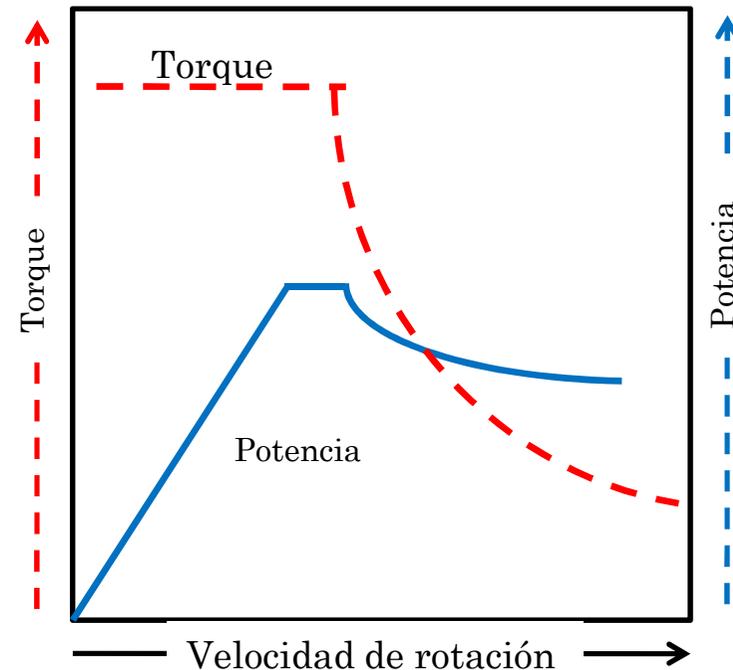
$$T_{eje} = T_m GR_{tr} GR_{dif} \eta_{tr} \eta_{dif}$$

siendo T_m el torque motor, GR la relación de marchas, y η la eficiencia

- tr: transmisión; dif: diferencial

MOTORES DC (SERIE)

- El motor opera en 3 regiones diferentes en función de la velocidad del vehículo:
- La primera región, de torque constante, está limitada por la potencia nominal del motor, que corresponde a una cierta velocidad de giro (par máximo del motor)
- La segunda región corresponde a la zona hasta la velocidad máxima. En dicha región el motor opera a potencia constante
- La tercera región es el llamado “modo natural” donde el torque disminuye de forma cuadrática con el inverso de la velocidad



MOTORES DC (SERIE)

- La zona de torque constante es aquella en la más adecuada para los períodos de aceleración
- El torque transforma su energía en cinética de rotación, la cual es , a su vez, convertida en cinética de traslación, dotando al vehículo de una determinada velocidad

$$T = F_I r = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} M v^2 \rightarrow v = \omega \left(\frac{I}{M} \right)^{1/2}$$

- T es el torque, F_I la fuerza del motor, r el brazo, I el momento de inercia, ω la velocidad de giro del motor, M la masa del vehículo y v su velocidad
- NOTA: No se han tenido en cuenta las eficiencias de transmisión

MOTORES DC (SERIE)

- Como se puede apreciar, cuanto mayor sea el torque mayor la velocidad para una masa dada
- Por tanto, a medida que se acelera el vehículo debe aumentar el torque. Esta situación presenta un límite, que es la potencia del motor, que viene relacionada con el torque a través de la expresión

$$P_t = F_I v = F_I r \omega = T \omega$$

- Durante el proceso de aceleración, podemos trabajar con diferentes situaciones:
 - Potencia constante y torque variable
 - Torque constante y potencia variable
 - Potencia y torque variables

MOTORES DC (SERIE)

- Potencia constante y torque variable
 - A medida que se acelera, y aumenta la velocidad, el torque va disminuyendo para mantener la potencia constante. Esta situación no es conveniente porque se tendría que variar la fuerza útil del motor, F_I , lo que implica que parte de la potencia se desperdiciaría
- Torque constante y potencia variable
 - En esta situación según se acelera, aumenta la velocidad, aumentando la potencia. Cuando se alcanza la potencia máxima, o el torque disminuye o la velocidad alcanza su límite
- Potencia y torque variables
 - En este caso, mientras se acelera pueden cambiar tanto la potencia como el torque. En esta situación se podría reducir la pérdida de potencia, acomodando el valor del torque, pero esto limitaría la aceleración del vehículo

MOTORES DC (SERIE)

- En el caso de trabajar a velocidad constante
- Potencia constante y torque variable
 - Inviabile, al no cumplirse la relación
- Torque constante y potencia variable
 - Inviabile, al no cumplirse la relación
- Potencia y torque variables
 - Como en el caso de aceleración, mientras se acelera pueden cambiar tanto la potencia como el torque. En esta situación se podría reducir la pérdida de potencia, acomodando el valor del torque, pero esto limitaría la aceleración del vehículo

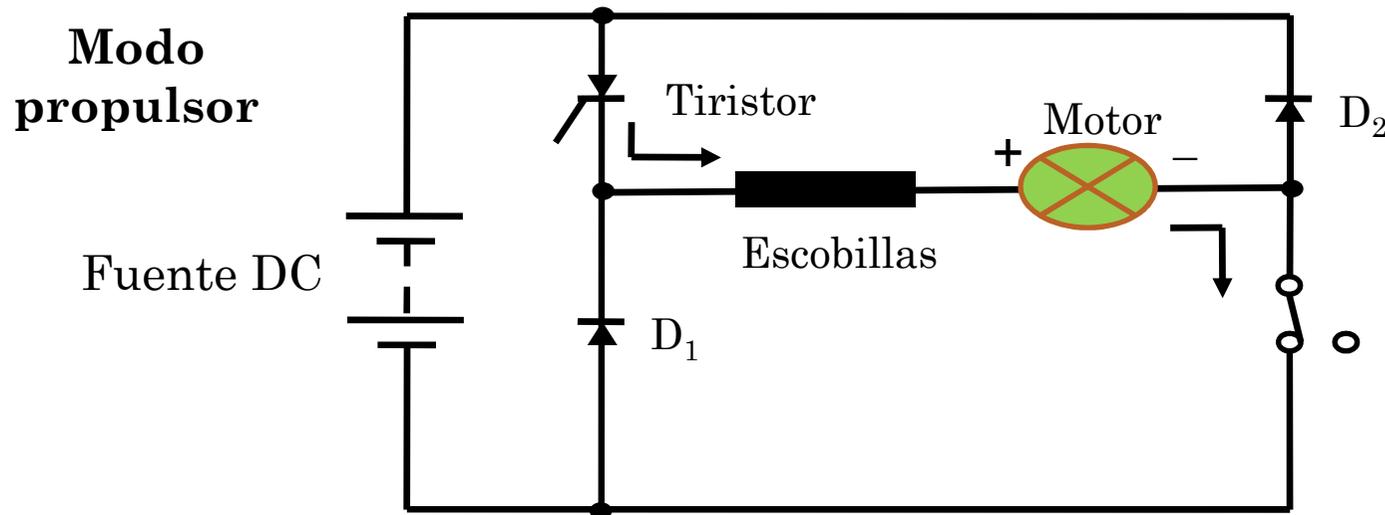
MOTORES DC (SERIE)

- Como resultado del análisis, se concluye que el motor trabaja en óptimas condiciones a torque constante durante los procesos de aceleración y que una vez alcanzada la máxima potencia, el torque va a ir disminuyendo a medida que el vehículo aumenta su velocidad de manera inversamente proporcional al cuadrado de dicha velocidad, tal y como se aprecia en la figura
- En esta situación, la capacidad de aceleración del vehículo va disminuyendo a medida que disminuye el torque

MOTORES DC (SERIE)

- Los motores eléctricos con esta configuración permiten ser utilizados en doble modalidad:
 - Modo propulsor
 - Modo generador (freno regenerativo)
- En el modo propulsor el motor recibe energía de la fuente de corriente continua y convierte la energía eléctrica en mecánica de rotación para mover el eje de transmisión que actúa sobre las ruedas
- En el modo generador, se invierte la polaridad del motor, el cual pasa a actuar como generador convirtiendo la energía mecánica de frenado en energía eléctrica que es enviada al almacenador

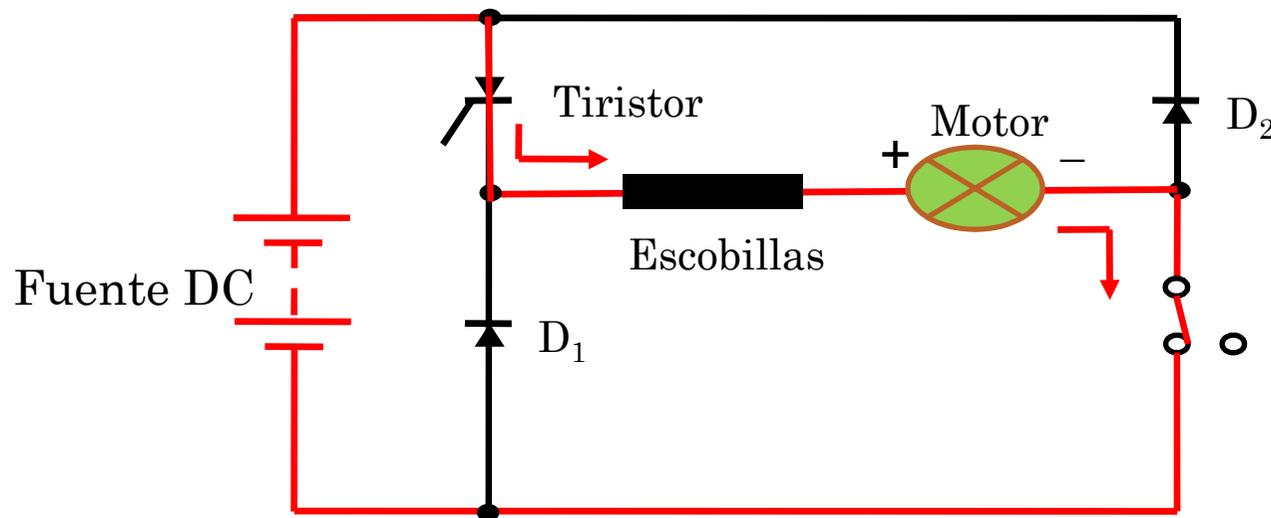
MOTORES DC (SERIE)



- El sistema con escobillas en serie, cuando actúa como sistema propulsor, utiliza un tiristor, el cual va controlado por el sistema de control
- De esta forma se regula la potencia generada por el motor y la energía que se proporciona al sistema de propulsión

MOTORES DC (SERIE)

- En el circuito anterior, el diodo D1 obliga a que la corriente se derive hacia el sistema de escobillas del motor haciendo que éste actúe con polaridad directa, actuando así como elemento consumidor de energía (propulsor)



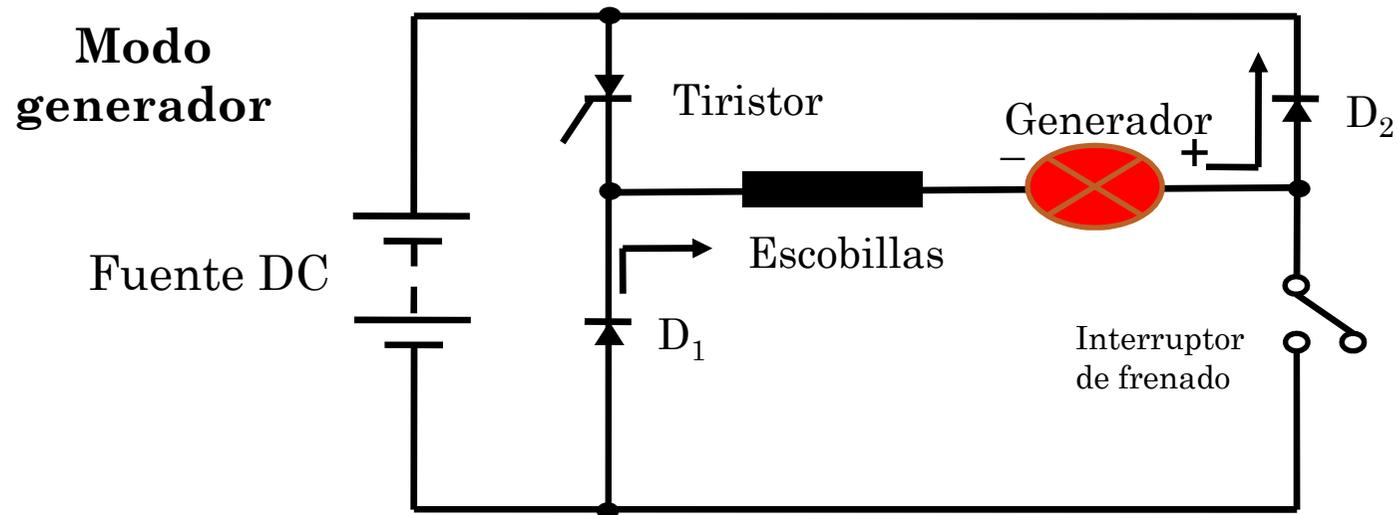
MOTORES DC (SERIE)

- Al encontrarse el interruptor de frenado cerrado, la corriente circula de manera simultánea por el diodo D2 y por el interruptor de frenado, si bien la mayor resistencia del diodo hace que la mayor parte de la corriente circule a través del interruptor de frenado
- Asimismo, la corriente que circula por la rama inferior retorna, de forma preferente, a la fuente de energía, cerrando así el circuito, debido a la mayor resistencia eléctrica del diodo D1
- Por los diodos D1 y D2 circula corriente, aunque en menor cantidad que por la rama principal

MOTORES DC (SERIE)

- En el modo propulsión el tiristor regula la cantidad de corriente que circula por la rama superior derecha del circuito
- De esta manera, la cantidad de corriente que se demanda de la fuente de corriente continua queda limitada por la corriente de retorno a través del diodo D2, lo que limita a su vez la potencia del motor y la energía consumida

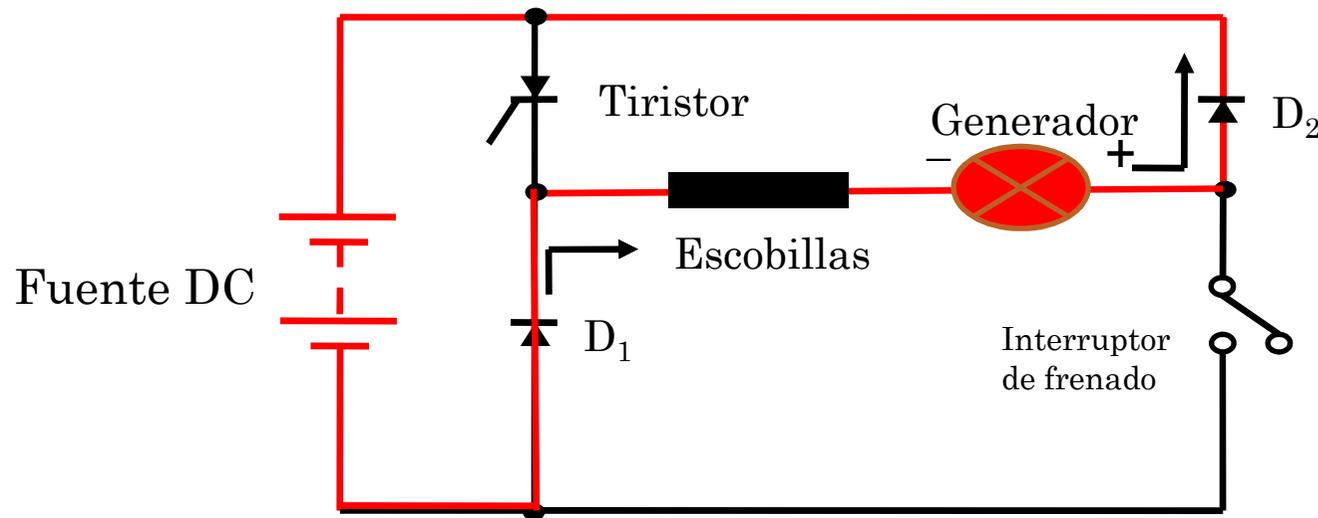
MOTORES DC (SERIE)



- El sistema de bobinado en serie puede actuar como generador de energía, invirtiendo la polaridad, por medio de un interruptor de frenado
- De esta forma cuando se activa el freno, el sistema permite la recuperación de energía

MOTORES DC (SERIE)

- En el circuito anterior, el interruptor de frenado abierto impide que la corriente circule por la rama inferior del circuito

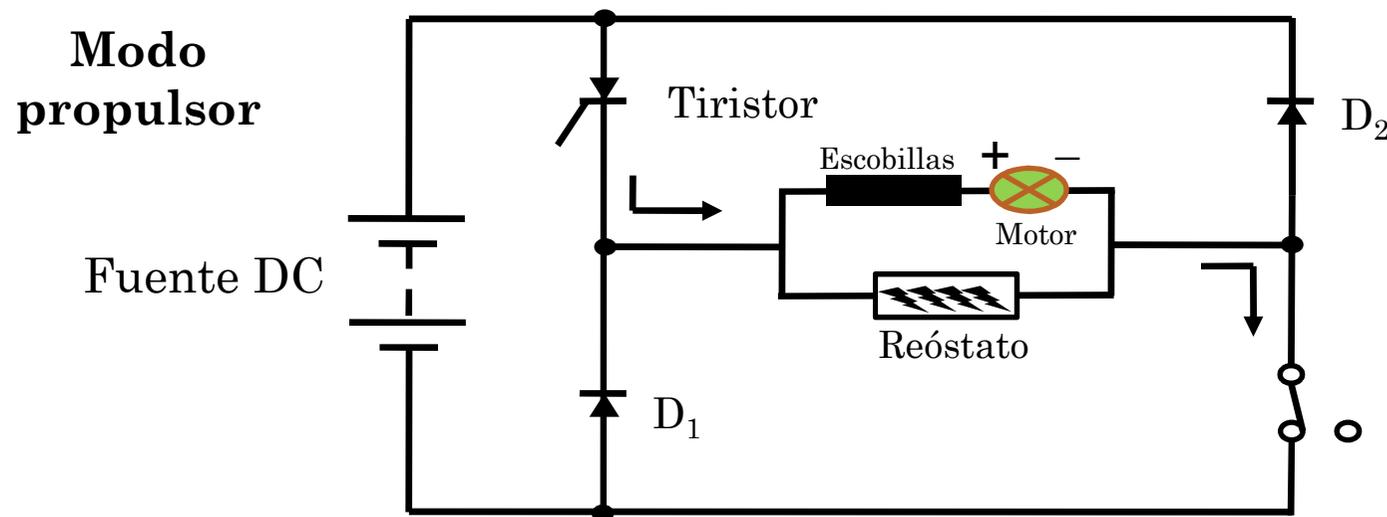


MOTORES DC (SERIE)

- Al encontrarse el interruptor de frenado abierto, la corriente circula únicamente por el diodo D2, alimentando la fuente de energía (modo generador)
- En este caso, se observa que la polaridad se ha invertido, siendo compatible con la propia fuente de energía
- El tiristor en este caso evita el paso de corriente a través suyo dirigiendo la corriente desde el generador hasta la fuente de energía

MOTORES DC (PARALELO)

- La configuración en paralelo es similar a la serie, pero con las escobillas en paralelo

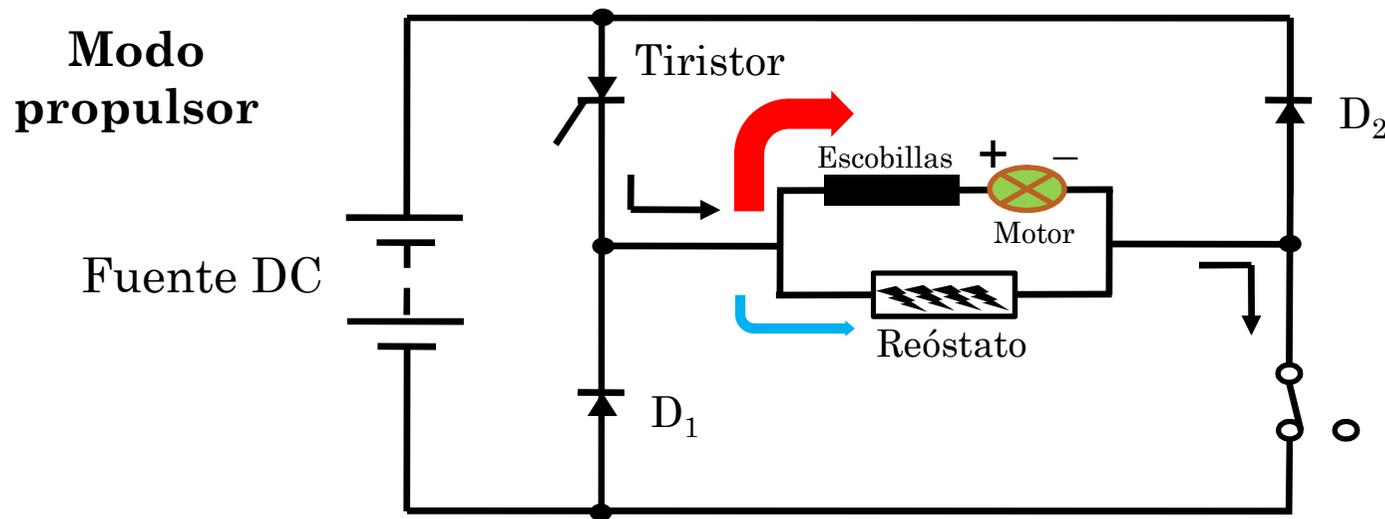


MOTORES DC (PARALELO)

- La corriente que circula se puede controlar mediante un reóstato, de manera que la corriente que circule por las escobillas sea mayor o menor
- Al variar la corriente que circula también se cambia el campo generado en las escobillas, lo que hace que la potencia del motor cambie de manera proporcional
- En este tipo de configuración el arranque requiere un torque muy elevado que debe ser regulado mediante un sistema de control

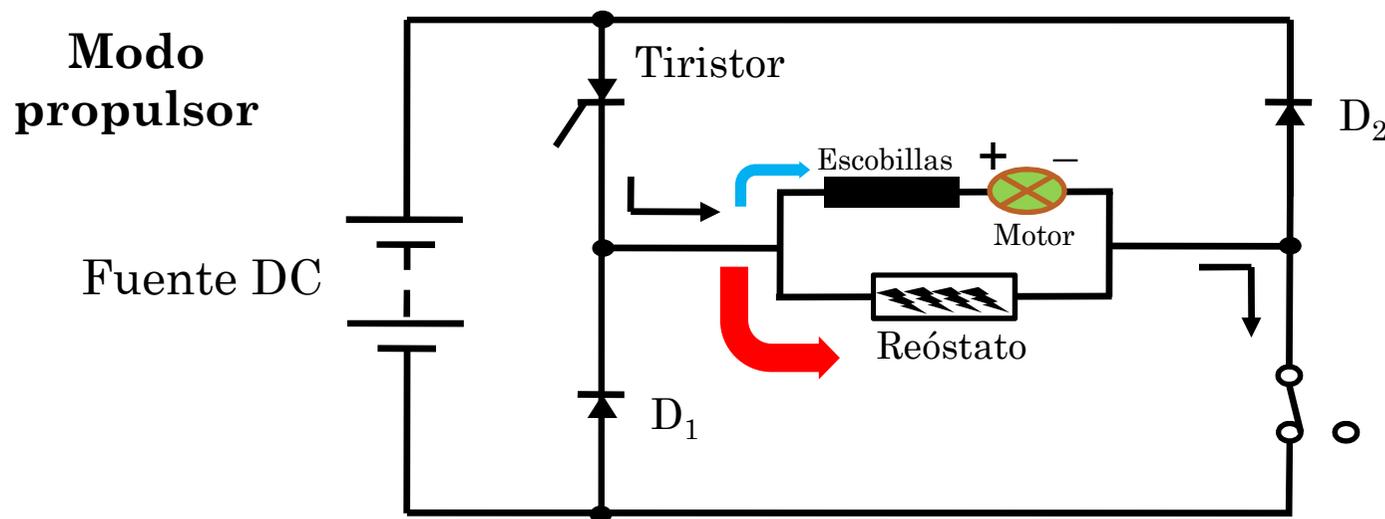
MOTORES DC (PARALELO)

- Cuando se quiere incrementar la velocidad, se aumenta la resistencia en el reóstato, lo que hace pasar mayor corriente por las escobillas, generando más campo y, por tanto, más potencia



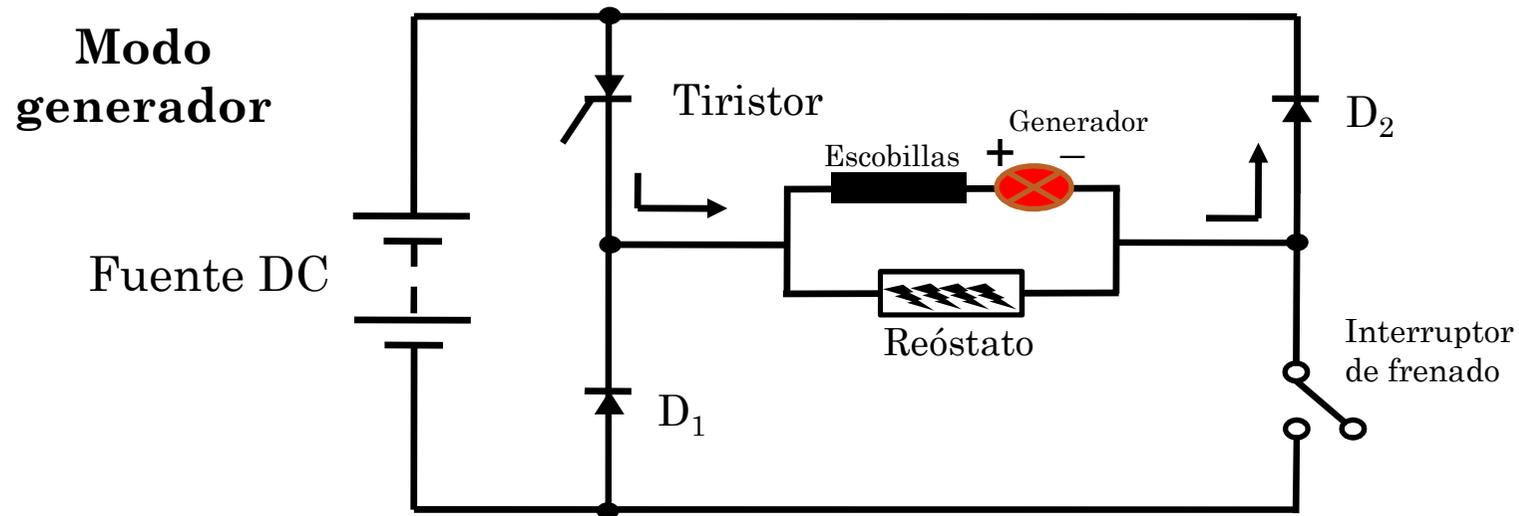
MOTORES DC (PARALELO)

- En caso que se quiera reducir la velocidad, hay que disminuir la potencia generada por el motor, lo que se consigue reduciendo el campo generado en las escobillas haciendo pasar menos corriente por ellas, lo que implica reducir la resistencia en el reóstato



MOTORES DC (PARALELO)

- La configuración en paralelo también puede trabajar de forma inversa, esto es en modo generador

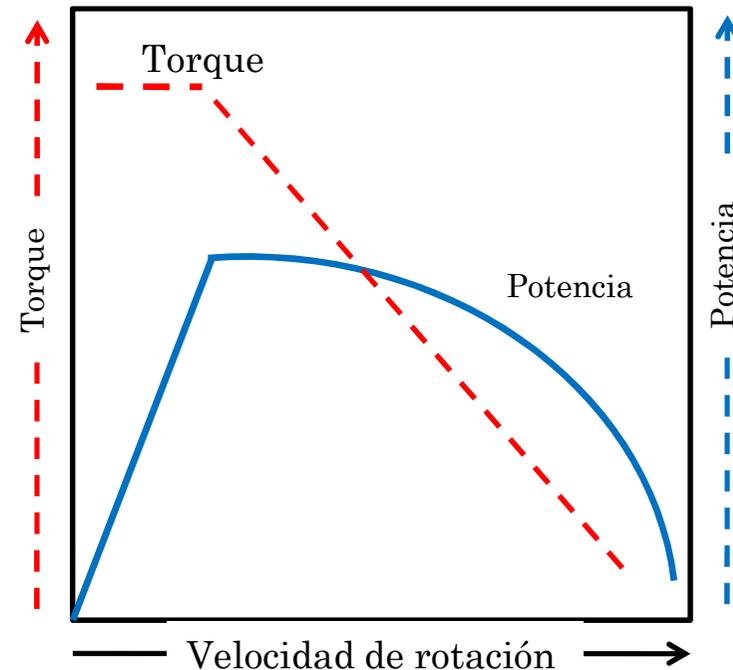


MOTORES DC (PARALELO)

- Cuando el sistema actúa en modo regenerativo, es preciso incrementar la potencia generada por el motor en modo generador al máximo, lo que hace necesario que la resistencia en el reóstato sea máxima
- Este proceso debe ser realizado en el momento apropiado, por lo que hay que incorporar un sistema de control que regule el valor de la resistencia y la haga variar en función de la potencia regenerativa

MOTORES DC (PARALELO)

- El motor opera en 3 regiones diferentes en función de la velocidad del vehículo:
- La primera región, de torque constante, limitada por la potencia nominal del motor, se corresponde a un intervalo de velocidades bastante reducido
- En la segunda región el motor opera a potencia constante. En dicha región el torque varía linealmente, disminuyendo
- En la tercera región el torque sigue disminuyendo linealmente, en tanto la potencia disminuye, pero de forma potencial, con el cuadrado de la velocidad



MOTORES DC (PARALELO)

- Es fácil observar las diferencias entre ambas configuraciones en relación al comportamiento del torque y la potencia con la velocidad
 - El sistema serie permite un torque más duradero durante el arranque y soporta mejor los procesos de aceleración sostenida
 - El sistema paralelo tiene un mejor comportamiento en regímenes por encima del par motor máximo, el que corresponde a la potencia máxima del vehículo

MOTORES DC

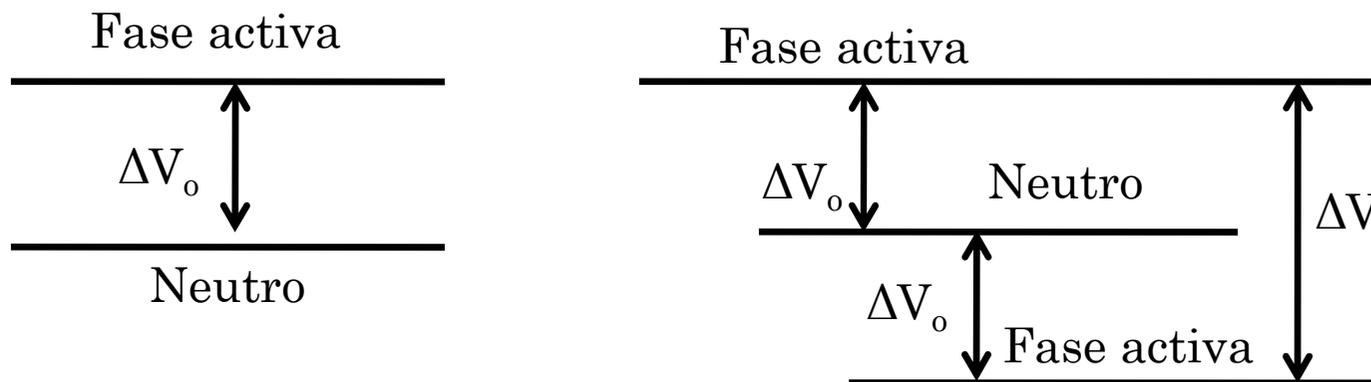
- **Clasificación y aspectos generales**
- **Principios de funcionamiento**
- **Motores DC**
 - **Bobinado y circuito equivalente**
 - **Propiedades mecánicas y eléctricas**
 - **Torque**
 - **Potencia**
- **Motores AC**
 - **Características generales**
 - **Inducción magnética: Propiedades. Leyes**
 - **Circuito equivalente**
 - **Tipos de motor**
 - **Asíncronos**
 - **Síncronos**
- **Sistemas de control**

MOTORES AC

- Los motores de corriente alterna pueden operar bajo dos modalidades: monofásico y trifásico
- Los motores monofásicos son muy parecidos en su estructura a un motor DC, aunque operando en corriente alterna, mientras que los trifásicos tienen una configuración diferente
- La principal ventaja de un motor trifásico es el mayor voltaje de operación con el que trabaja, lo que reduce la intensidad de corriente que circula, disminuyendo las pérdidas óhmicas

MOTORES AC

- Debido a esta característica, su mayor voltaje, los motores trifásicos se han impuesto como fuerza motriz en los vehículos eléctricos



MOTORES AC

- En la figura anterior podemos ver que, mientras un sistema monofásico trabaja con un voltaje ΔV_o , en un sistema de dos fases se podría alcanzar un voltaje $\Delta V=2\Delta V_o$ y un voltaje $3\Delta V_o$ para un trifásico
- Estos valores no son reales porque la suma de las tensiones en corriente alterna es vectorial y no escalar, lo que reduce el voltaje real a un valor más reducido dado por la relación $\Delta V=(\sqrt{n})\Delta V_o$ donde n es el número de fases

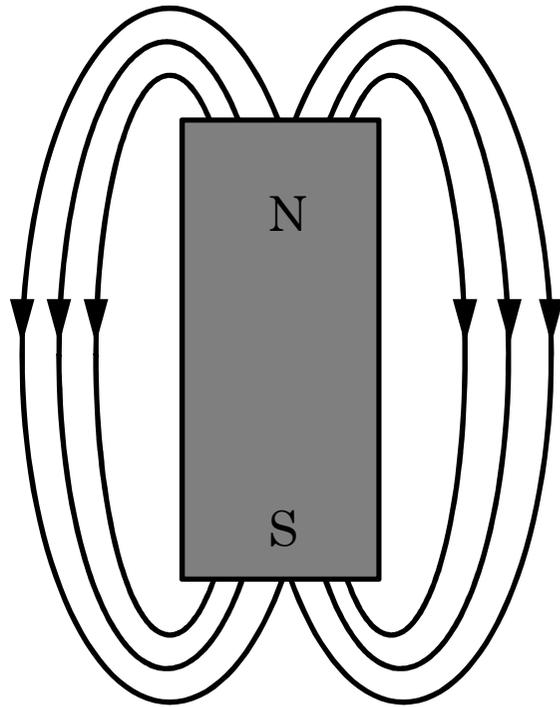
MOTORES AC

- Además de un voltaje superior de operación, los motores AC tienen algunas otras ventajas respecto a los de corriente continua
 - Menor tamaño
 - Mayor eficiencia
 - Mayor facilidad de control
 - Mejor torque
- Los motores de corriente alterna trabajan por el principio de inducción electromagnética, por lo que necesitan de la existencia de un campo magnético para generar la corriente eléctrica

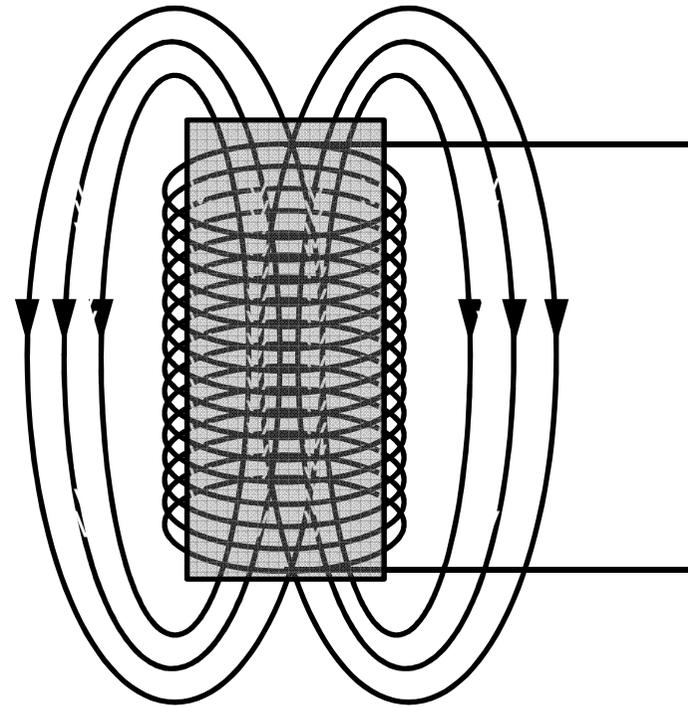
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- El campo magnético puede ser generado de diversas formas:
 - Por imanes permanentes (PM)
 - Por la circulación de corriente a través de un conductor arrollado en espiral (solenoides)
- Por otro lado, cuando un conductor es atravesado por un campo magnético, se genera una corriente a través suyo; a este proceso se le conoce como inducción magnética y es la base del funcionamiento de los motores eléctricos

INDUCCIÓN MAGNÉTICA



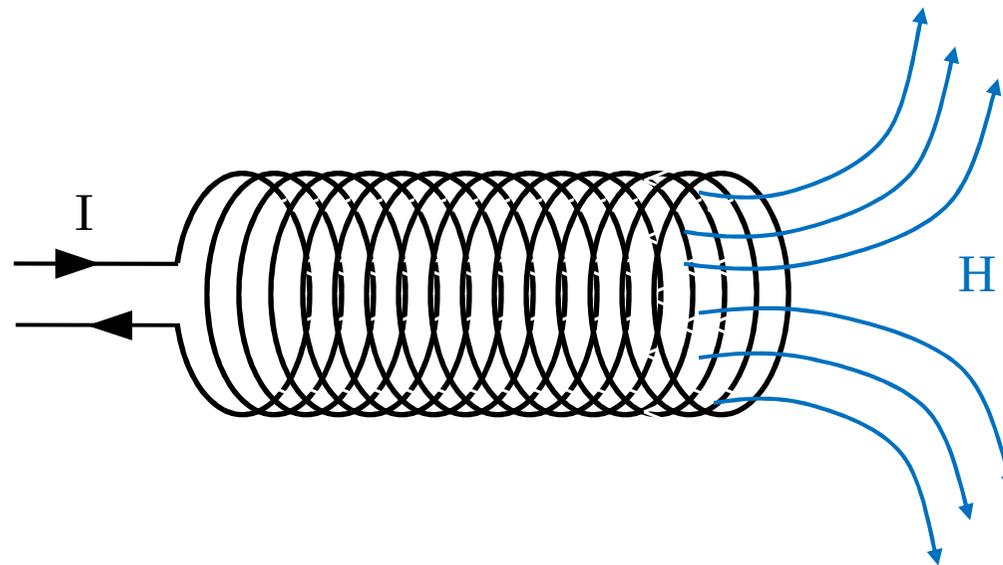
Imán permanente



Solenoid

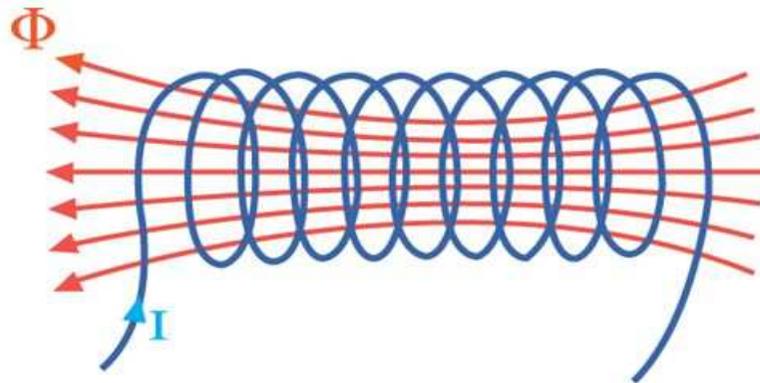
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- El principio de inducción magnética establece que cuando una corriente eléctrica circula por un arrollamiento (bobinado) se crea un campo magnético inducido proporcional a la corriente circulante



INDUCCIÓN MAGNÉTICA

La **inducción magnética** es la medida de la capacidad de un dispositivo de almacenar energía en forma de campo magnético. Este campo es generado por un flujo de corriente por las espiras del solenoide.

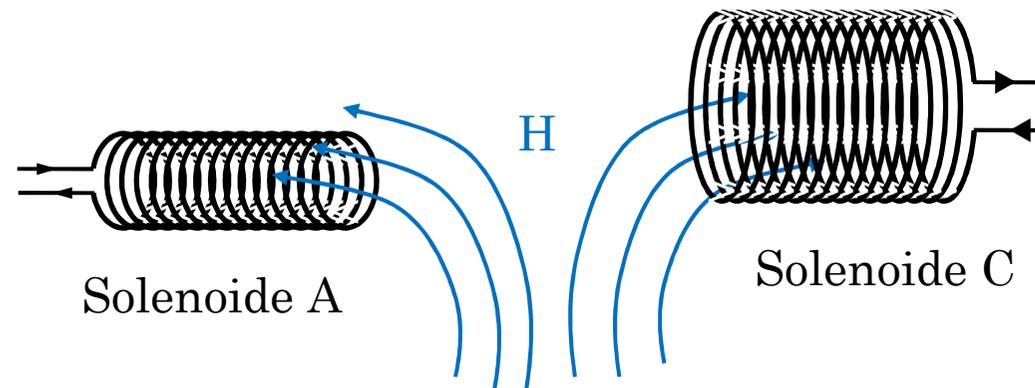


$$\Phi = L \cdot i$$

Φ : flujo magnético
 L : inductancia magnética
 i : corriente eléctrica

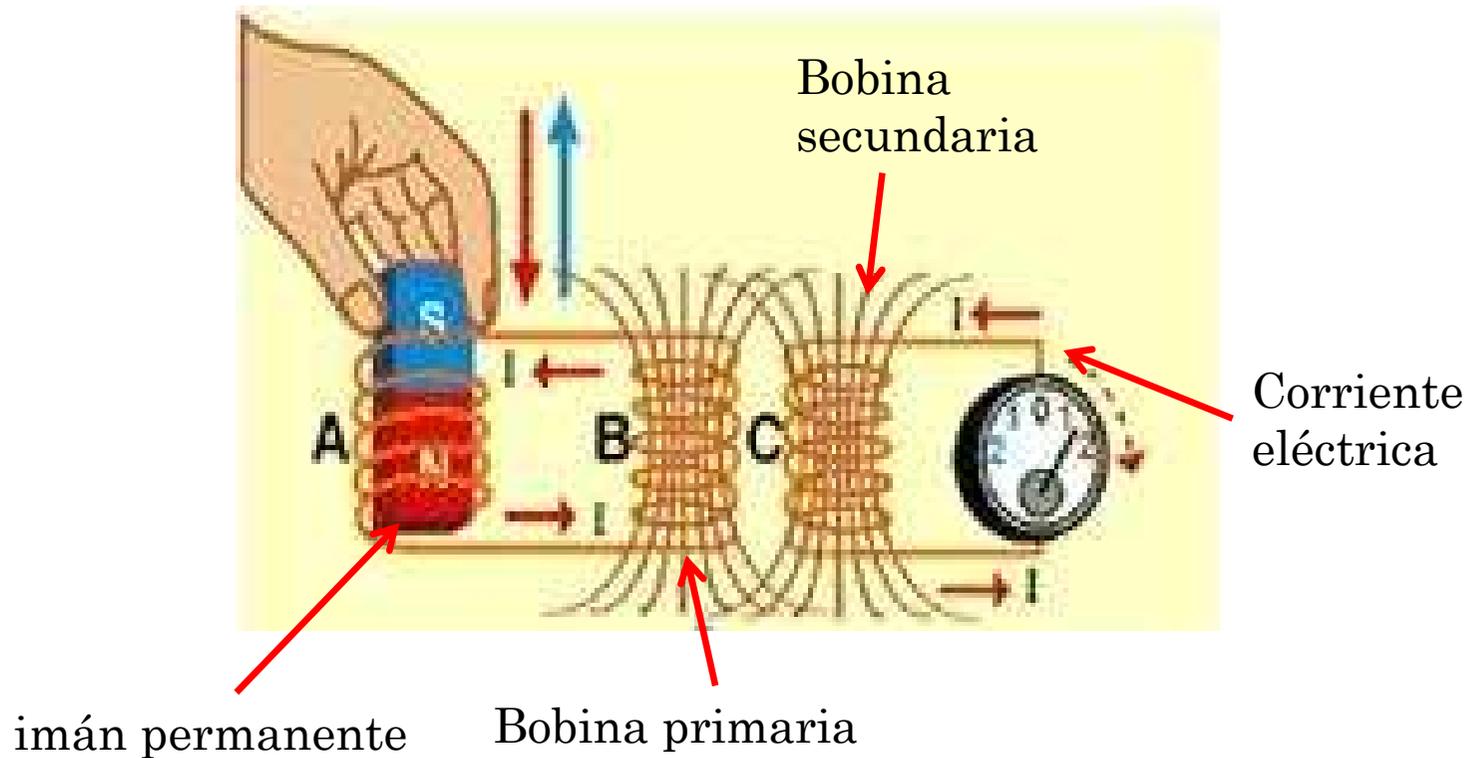
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- Asimismo, la corriente inducida es proporcional a la cantidad de flujo de campo magnético que se intercepta
- En el caso de la figura, el solenoide A genera menos corriente que el C ya que intercepta dos líneas de campo magnético mientras que el C intercepta tres



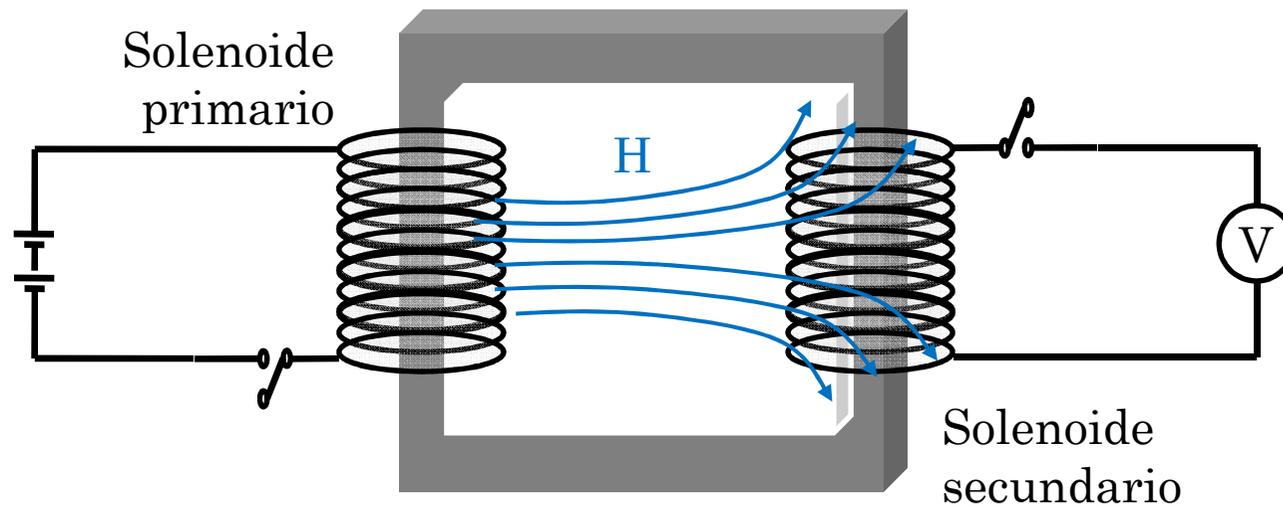
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- Igualmente, se puede generar una corriente inducida por medio de dos solenoides



INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- Se puede utilizar, igualmente, una fuente de corriente en lugar de un imán permanente para generar la corriente que circula por el primario



INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- En esta configuración el solenoide primario genera un campo magnético, a partir de la corriente que circula por él, que da lugar a un flujo que atraviesa el solenoide secundario, de manera que se genera una fem, y una corriente en el solenoide secundario
- Para conseguir esto es necesario que ambos solenoides estén arrollados en torno a un material ferromagnético, por ejemplo un núcleo de hierro
- Esta suele ser la forma más común de generar corriente y voltaje en sistemas de inducción magnética

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- La principal ventaja que tiene este sistema respecto al de imanes permanentes es que se puede regular la corriente inducida y el voltaje generado mediante el potencial de la fuente de origen, la que alimenta el solenoide primario, cosa que no es posible si se trata de un imán permanente
- Con esta configuración se puede modificar la potencia inducida, lo que es muy útil en aquellas aplicaciones, como el vehículo eléctrico, donde la potencia demandada no sea un valor constante

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- El flujo de campo magnético es función de la superficie que atraviesa el campo magnético
- La densidad de flujo de campo magnético es otro de los parámetros que tienen importancia en la generación de corriente
- Asimismo, la corriente inducida que se genera da lugar a un voltaje que es proporcional a la variación de flujo de campo magnético
- Por último, indicar que existe una relación entre la corriente inductora, el campo magnético inducido y la fuerza electromotriz (voltaje) a través de un parámetro característico conocido como *autoinducción*

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- Las relaciones que ligan las magnitudes antes definidas son las siguientes:

$$H = B/\mu_o \quad (\mu_o : \textit{permeabilidad magnética vacío})$$

$$B = H/\mu = H\mu \quad (\mu : \textit{permeabilidad magnética material})$$

$$\Phi = \mu HA \quad (A : \textit{área})$$

$$i = (V/R)(1 - e^{-Rt/L})$$

$(i : \textit{corriente}; R : \textit{resistencia}; V : \textit{voltaje}; L : \textit{autoinducción})$

$$[H] \rightarrow A/m^2 ; [B] \rightarrow \textit{Tesla} ; [\Phi] \rightarrow \textit{Wb} ; [L] \rightarrow \textit{henrio}$$

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- Desde un punto de vista aplicado, las magnitudes más importantes que controlan el comportamiento de un motor eléctrico, o un generador, son la corriente y el voltaje, que definen, a su vez, la potencia
- Matemáticamente (Ley de Ampère):

$$B = \mu H = \mu I \frac{N}{L} = \mu_o \mu_r I \frac{N}{L}$$

donde B es la intensidad de campo magnético, N el número de espiras del solenoide, L su longitud, e I la intensidad de corriente que circula a través de él

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- En cuanto a la fem generada, esta viene dada por la conocida Ley de Faraday

$$\xi = -\frac{d\lambda}{dt} \stackrel{\lambda=N\Phi}{=} -\frac{d(N\Phi)}{dt} = -\frac{d(NBS)}{dt}$$

donde ξ es la fem, N el número de espiras del solenoide, B la intensidad de campo magnético y S la superficie recta del solenoide

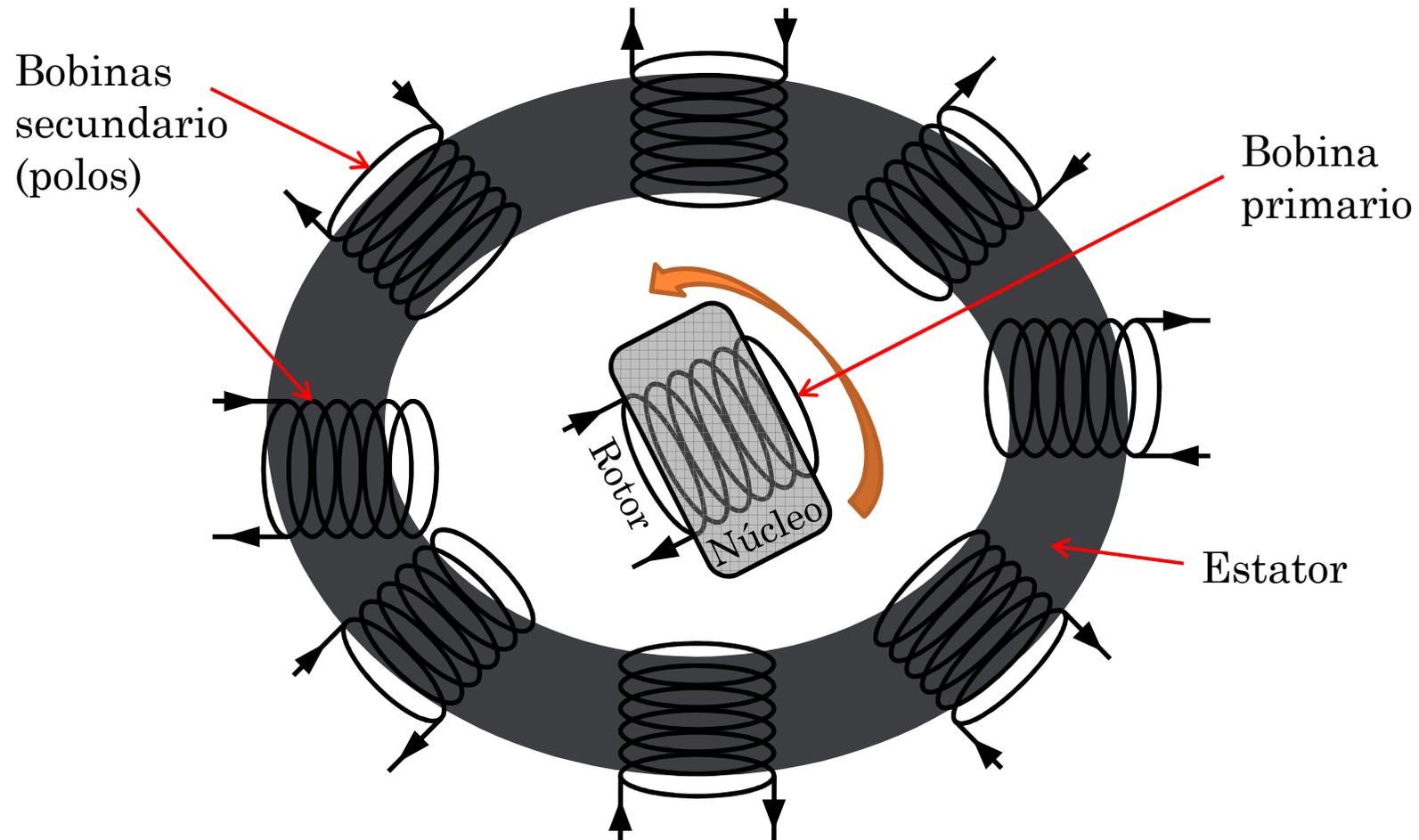
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- Como podemos ver, cualquier cambio que se produzca en el flujo de campo magnético genera una fem, la cual genera una corriente, dando lugar a una potencia
- Como ya vimos, estos valores pueden ser regulados si se trabaja con una configuración de dos solenoides
- Además, existe la posibilidad de variar de forma periódica los cambios de flujo, lo que significa que el voltaje se variará también de forma periódica
- Si este cambio se hace siguiendo una función senoidal obtenemos la conocida corriente alterna

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- Para conseguir que el flujo de campo magnético varíe de forma senoidal, es preciso una configuración especial, en la cual uno de los dos solenoides está fijo y el otro es móvil
- Al solenoide fijo se le conoce como *estator* y al móvil como *rotor*
- Se pueden dar, por tanto, tres tipos de configuración:
 - Solenoide primario fijo (estator) y solenoide secundario móvil (rotor)
 - Solenoide primario móvil (rotor) y solenoide secundario fijo (estator)
 - Ambos solenoides móviles

INDUCCIÓN MAGNÉTICA



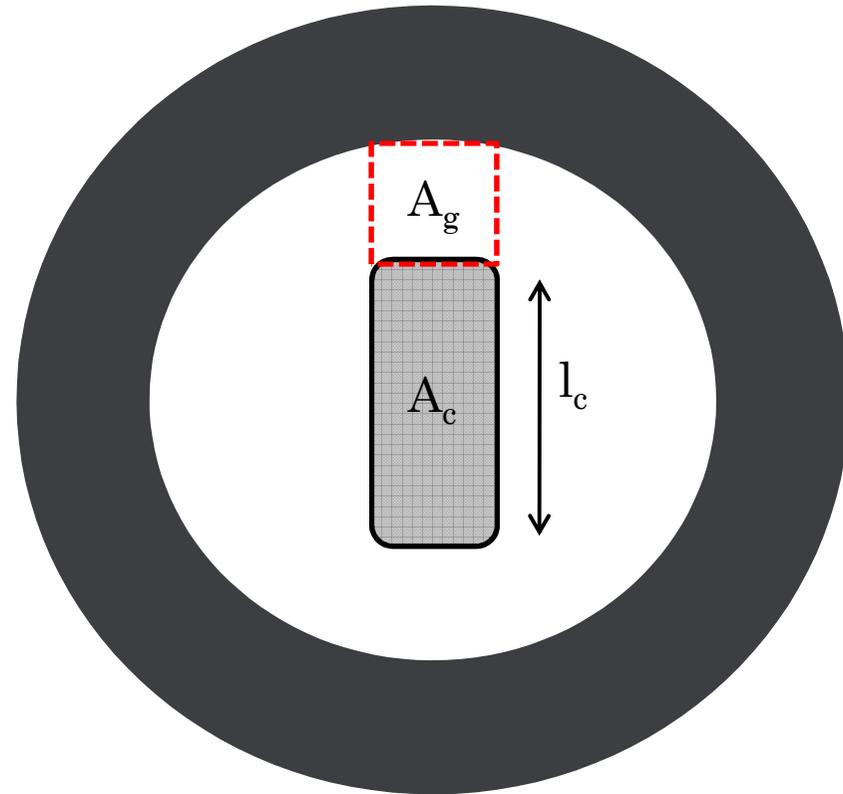
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- El flujo de campo magnético para un sistema formado por un rotor y un estator viene dado por la relación:

$$\Phi = \frac{N_i}{\frac{l_c}{\mu_r \mu_o A_c} + \frac{2g}{\mu_o A_g}}$$

A_c : área núcleo

A_g : área gap



INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- La reluctancia magnética mide la resistencia a generar un flujo de campo magnético por medio de un fuerza magnetomotriz (m.e.f.)
- Matemáticamente se define como:

$$\text{Re}_c = \frac{l_c}{\mu_r \mu_o A_c}$$

l_c : long. núcleo (punto medio)

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- La energía almacenada en el campo se expresa por medio de la relación:

$$E_m = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{A_g^2 \mu_o} \left(2gA_g \frac{r\theta}{l_c} \right)$$

- En tanto que el torque se define mediante:

$$Q_e = \frac{N^2 i^2 \mu_o}{4g^2} \left(\frac{2gA_g r}{l_c} \right) \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{r\theta}{l_c} \right)^2 \right]$$

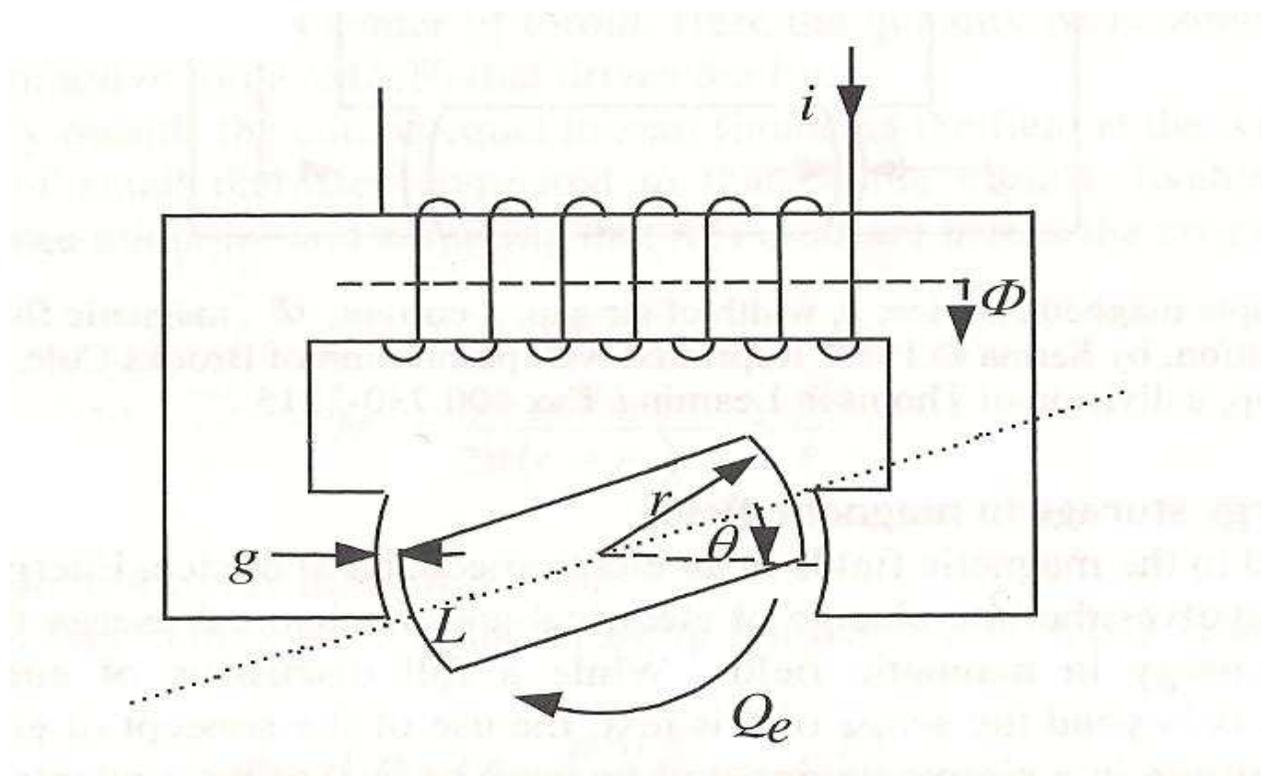
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

- El torque se hace mayor cuando el rotor está desalineado ($\theta \neq 0$)
- Cuando el rotor se alinea el torque se hace negativo
- Cuanto mayor el número de vueltas y el torque, mayor es la corriente
- Cuanto mayor es el gap mayor la reluctancia magnética y menor el torque

MOTOR RELUCTANCIA MAGNÉTICA

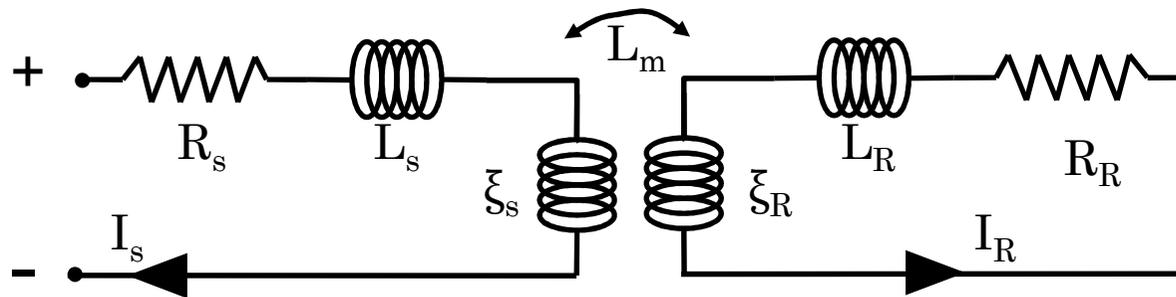
- El motor de reluctancia magnética (SRM) es muy parecido al motor DC sin escobillas
- La mayor diferencia es que no utiliza imanes permanentes
- Su estructura está formada por un rotor de hierro dulce que es atraído por el campo magnético del estator
- Una de las ventajas es que no se precisa de imanes de tierras raras, lo que reduce el coste de forma notable

MOTOR RELUCTANCIA MAGNÉTICA



CIRCUITO EQUIVALENTE

- Un sistema de inducción magnética puede reducirse a un circuito como el que se representa en el siguiente esquema



- El circuito anterior es el que usa un motor AC como el que se emplea en vehículos eléctricos
- El circuito representa únicamente una de las fases de la corriente, ya que todas son iguales

CIRCUITO EQUIVALENTE

- En el circuito anterior se cumple:

$$V_s = I_s R_s + j\omega L_s I_s + \xi_s$$

$$0 = I_R R_R + j\omega L_R I_R + \xi_R$$

- El subíndice R representa el rotor y s el estator
- j representa la parte compleja del fasor
- Este circuito es válido para cualquiera de las tres configuraciones planteadas, rotor fijo y estator móvil, o viceversa, o ambos móviles, sin más que establecer el correspondiente valor para ω en cada rama del circuito

CIRCUITO EQUIVALENTE

- Así pues, para cada configuración tenemos:

- Rotor fijo y estator móvil

$$V_s = I_s R_s + j\omega_s L_s I_s + \xi_s$$

$$0 = I_R R_R + \xi_R$$

- Rotor móvil y estator fijo

$$V_s = I_s R_s + \xi_s$$

$$0 = I_R R_R + j\omega_R L_R I_R + \xi_R$$

- Rotor y estator móviles

$$V_s = I_s R_s + j\omega_s L_s I_s + \xi_s$$

$$0 = I_R R_R + j\omega_R L_R I_R + \xi_R$$

CIRCUITO EQUIVALENTE

- Si consideramos la configuración de rotor y estator móviles, con un determinado número de polos, p , en el estator, se cumple:

$$\omega_R = ps\omega_s = s\omega$$

donde el valor de s viene definido por:

$$s = (n_s - n_R) / n_s$$

siendo n la velocidad de giro, en rpm

- El valor típico de s en un motor eléctrico de inducción está entre 1% y 3%
- Al factor s se le conoce como “deslizamiento”

CIRCUITO EQUIVALENTE

- La potencia que se transfiere entre estator y rotor viene dada, en este caso por:

$$P_t = \frac{mV_s^2}{\left(R_s + R'_R/s\right)^2 + \left(X_s + X'_R\right)^2} \frac{R'_R}{s}$$

Donde

$$R'_R = k^2 R_R \rightarrow k = s(\xi_s / \xi_R)$$

$$X'_R = k^2 (\omega_R / s) L_R ; X_s = \omega_s L_s$$

siendo m un factor que tiene en cuenta las pérdidas

CIRCUITO EQUIVALENTE

- La potencia puede también expresarse de la forma:

$$P_t = \frac{mV_s^2}{\left(R_s + R'_R/s\right)^2 + \left(X_s + X'_R\right)^2} \left[R'_R + \frac{(1-s)}{s} R'_R \right]$$

Donde el primer término del corchete representa las pérdidas y el segundo la parte útil

- De esta expresión podemos obtener el torque

$$T = \frac{m}{\omega_R} \frac{V_s^2}{\left(R_s + R'_R/s\right)^2 + \left(X_s + X'_R\right)^2} \frac{(1-s)}{s} R'_R$$

CIRCUITO EQUIVALENTE

- Como sabemos, el torque nos permite determinar la fuerza de tracción o propulsión con la que el motor transfiere la energía al eje motriz para impulsar el vehículo
- En función de las relaciones antes determinadas podemos representar, al igual que se hizo con el motor DC, la evolución de la potencia y el torque con la velocidad de giro del motor

MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- Ya hemos visto que para generar una corriente basta con un imán, o un solenoide, que actúa como generador de campo magnético, y otro solenoide que actúa como receptor sobre el que se genera la corriente inducida
- También hemos visto que para que se genere una fem es preciso que haya una variación de flujo de campo magnético. Esta variación se puede conseguir moviendo el rotor, el estator o ambos a la vez
- La mayor variación de flujo es la que se produce cuando ambos elementos, rotor y estator son móviles

MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- En función de la velocidad de giro de cada uno de los elementos alcanzaremos una fem más grande o más reducida y, por consiguiente, un mayor o menor voltaje de operación
- Por otro lado, la velocidad de giro da lugar a que se produzca una alternancia en la polaridad de la corriente generada (corriente alterna)
- En función de la velocidad de giro varía la frecuencia con la que la corriente alterna cambia de polaridad
- Por convenio, se adopta una frecuencia determinada, 50 Hz para el mercado europeo y 60 Hz para el mercado americano

MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- La relación que existe entre la frecuencia y la velocidad de giro viene dada por la expresión: $\omega=2\pi f$, siendo ω la velocidad de giro del motor, rotor o estator, y f la frecuencia de la corriente eléctrica generada, 50Hz o 60 Hz
- En general, la frecuencia de cualquiera de los dos elementos, rotor o estator, puede definirse en función de dicha frecuencia a través de la relación:

$$\omega_j = 2\pi \frac{n_j}{60} = 2\pi \frac{f}{p} = \frac{\omega}{p}$$

MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- La expresión anterior nos muestra la relación entre la velocidad de giro de cualquiera de los elementos y la frecuencia de la corriente, a partir del número de polos, o solenoides, que tenga el estator (p)
- Así pues, si se aumenta el número de polos, para mantener la frecuencia constante hay que incrementar la velocidad de giro
- Si se aumenta el número de polos el flujo de campo magnético es mayor y, por tanto, se incrementa la corriente eléctrica generada

MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- Por otro lado, con un mayor número de polos la variación de flujo de campo magnético también es mayor, lo que hace aumentar la fem y, por tanto, el voltaje de operación
- Parece ser, pues, que lo ideal sería tener un estator con un número de polos muy elevado. Sin embargo esta configuración presenta algunos problemas, a saber:
 - La velocidad de giro debería ser muy elevada para obtener el valor de frecuencia deseado
 - El torque se reduce
 - El diseño se hace más complejo y, por consiguiente, más caro

MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- La situación más adecuada, tanto desde el punto de vista estructural como de prestaciones es un sistema con una configuración de estator con un número de polos determinado y rotor y estator móviles, girando a una determinada velocidad
- En función de estas características, los motores AC se dividen en dos categorías fundamentales, síncronos y asíncronos
- La diferencia básica entre ambas categorías es la relación entre la velocidad del rotor y la del estator

MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- Cuando la velocidad del rotor y la del estator no coinciden, aparece lo que se llama *deslizamiento*, el cual está relacionado con la frecuencia de la corriente a través de la expresión:

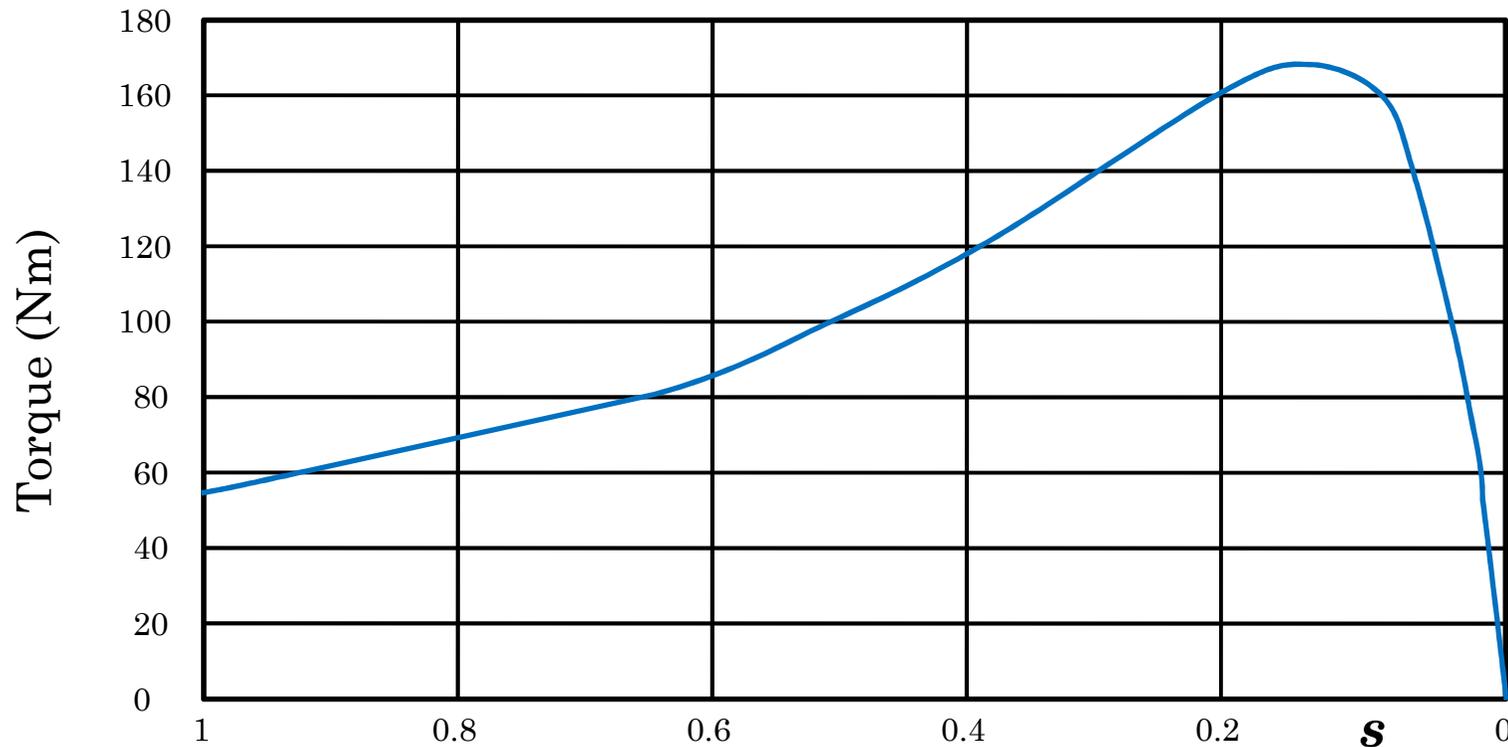
$$n = (1 - s) \frac{60f}{p}$$

siendo n la velocidad de giro del motor, en rpm

- Se puede comprobar que para una frecuencia dada, y un número de polos en el estator, se puede regular la velocidad de giro del motor variando el deslizamiento

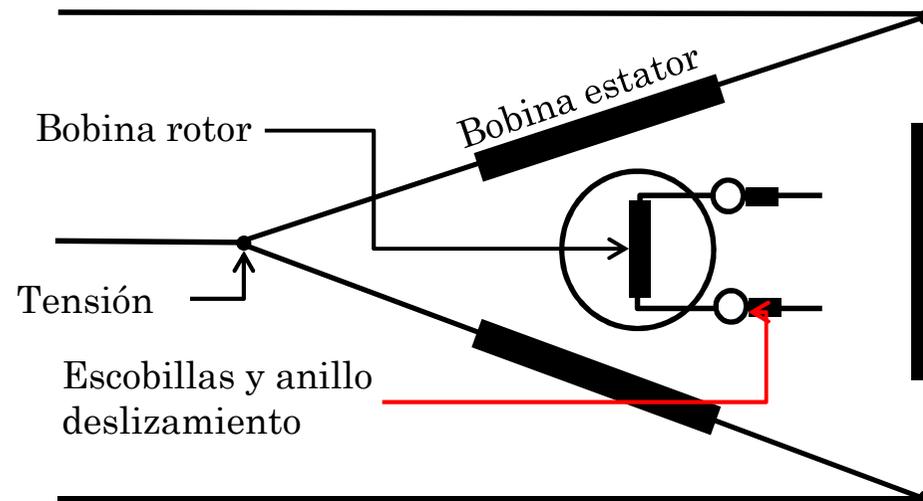
MOTORES AC: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS

- Por otro lado, el deslizamiento influye sobre el torque según muestra la siguiente figura



MOTORES AC SÍNCRONOS

- **Motor síncrono**
- Un motor síncrono responde a la siguiente configuración

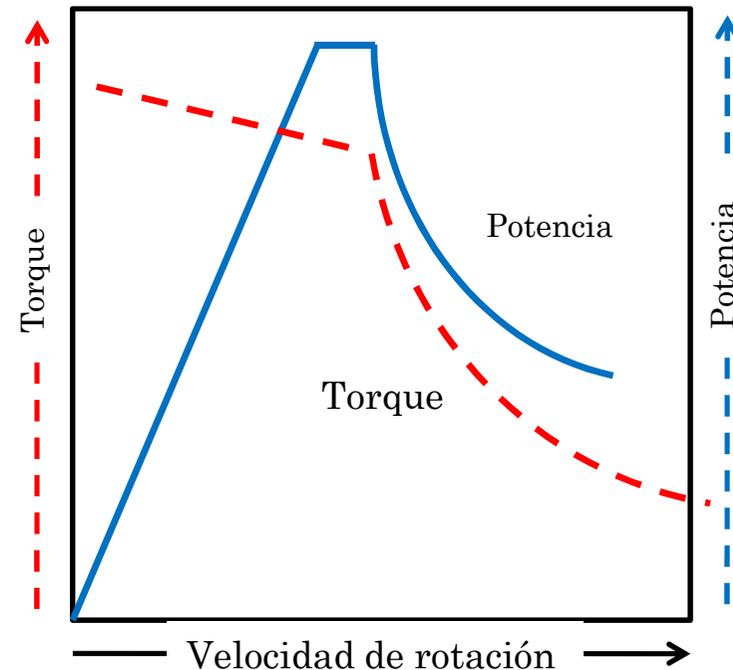


MOTORES AC SÍNCRONOS

- Un motor síncrono tiene un bobinado en el rotor
- Este bobinado está magnetizado por medio de una corriente continua, DC, a través de dos anillos de deslizamiento
- El campo magnético queda “anclado “ al rotor y genera un torque permanente
- Si la velocidad es inferior a la definida por la relación $n=(60f/p)$ el torque comienza a fluctuar y se genera un flujo de corriente muy elevado
- Esta configuración necesita ajustes especiales para el arranque
- Una ventaja es que, como generador, es ideal

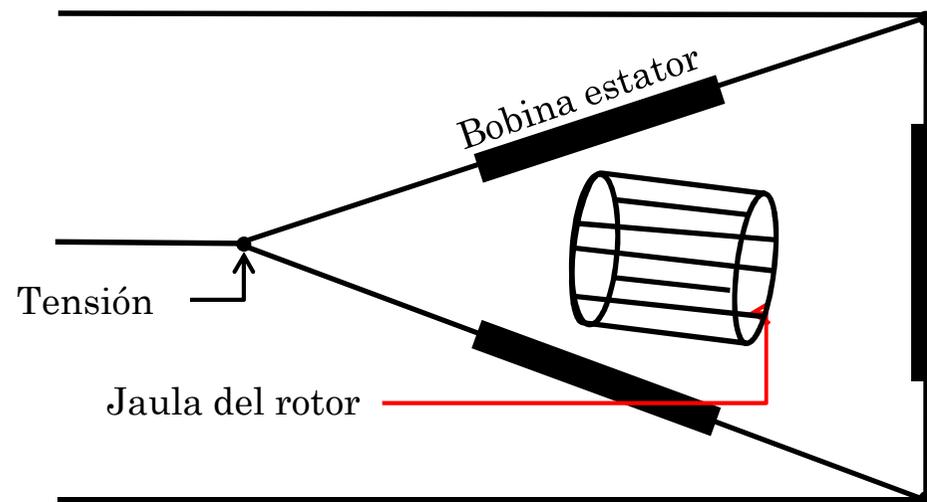
MOTORES AC SÍNCRONOS

- El motor síncrono opera en 3 regiones diferentes en función de la velocidad del vehículo:
- En la primera región el torque va disminuyendo linealmente de manera lenta hasta el punto de máxima potencia del motor (par máximo del motor)
- La segunda región corresponde a la zona hasta la velocidad máxima. En dicha región el motor opera a potencia constante
- La tercera región es el llamado “modo natural” donde el torque disminuye de forma cuadrática con el inverso de la velocidad



MOTORES AC ASÍNCRONOS

- **Motor asíncrono**
- Un motor asíncrono responde a la siguiente configuración

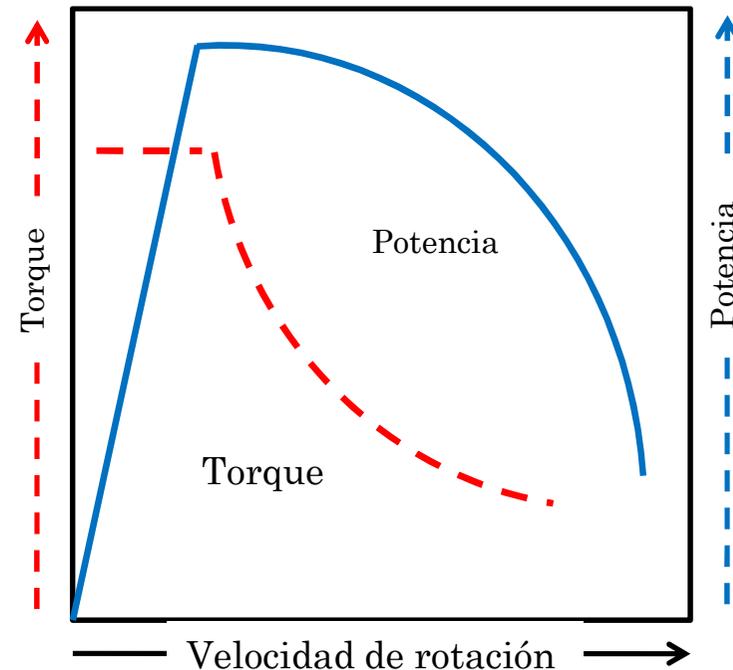


MOTORES AC ASÍNCRONOS

- Un motor asíncrono utiliza una “jaula” como rotor en la que están insertados un determinado número de pares de polos
- El estator suele ser trifásico y está configurado en forma de estrella o de triángulo
- El campo magnético rotatorio del estator induce un fem en el rotor que, al tratarse de un circuito cerrado, genera una corriente
- La corriente así generada da lugar a un campo magnético que interfiere con el creado en el estator provocando un giro del rotor
- El deslizamiento suele ser del 5% en el punto de máxima eficiencia del motor

MOTORES AC ASÍNCRONOS

- El motor asíncrono opera en 3 regiones diferentes en función de la velocidad del vehículo:
- En la primera región el torque se mantiene constante hasta el punto de máxima potencia del motor (par máximo del motor)
- La segunda región corresponde a la zona hasta la velocidad máxima. En dicha región el motor opera a potencia constante
- La tercera región es el llamado “modo natural” donde el torque disminuye de forma cuadrática con el inverso de la velocidad



MOTORES AC SÍNCRONOS Y ASÍNCRONOS

- Si se realiza un análisis comparado de la evolución del torque en motores síncronos y asíncronos, se extraen las siguientes conclusiones:
 - El torque del motor síncrono a bajas revoluciones, hasta el par motor máximo, no se mantiene constante. Esto es debido a las dificultades para ajustar la potencia durante el arranque y en períodos de bajas vueltas del motor
 - El torque del motor asíncrono a bajas revoluciones se mantiene constante en el régimen de bajo número de revoluciones, al igual que sucedía con los motores DC. Esto se debe a que, en este caso, sí se puede ajustar la potencia mediante el valor del deslizamiento

MOTORES AC SÍNCRONOS Y ASÍNCRONOS

- Si se realiza un análisis comparado de la evolución del torque en motores síncronos y asíncronos, se extraen las siguientes conclusiones:
 - El torque del motor síncrono a medias y altas revoluciones disminuye de manera proporcional al cuadrado de la velocidad de giro, igual que ocurría en un motor DC con bobinado serie
 - El torque del motor asíncrono a medias y altas revoluciones disminuye de manera proporcional al cuadrado de la velocidad de giro, igual que ocurría en un motor DC con bobinado serie y en motores AC síncronos

MOTORES AC SÍNCRONOS Y ASÍNCRONOS

- Si se realiza un análisis comparado de la evolución de la potencia en motores síncronos y asíncronos, se extraen las siguientes conclusiones:
 - La potencia del motor síncrono a bajas revoluciones, hasta el par motor máximo, crece de manera lineal igual que en el caso de motores DC
 - La potencia del motor asíncrono a bajas revoluciones muestra el mismo comportamiento que los motores DC y que el motor AC síncrono, con un crecimiento lineal hasta el par máximo

MOTORES AC SÍNCRONOS Y ASÍNCRONOS

- Si se realiza un análisis comparado de la evolución de la potencia en motores síncronos y asíncronos, se extraen las siguientes conclusiones:
 - La potencia del motor síncrono a altas revoluciones muestra el mismo comportamiento que los motores DC con bobinado serie
 - La potencia del motor asíncrono a altas revoluciones muestra el mismo comportamiento que los motores DC con bobinado paralelo

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- Seguidamente realizaremos un estudio comparativo entre motores DC y AC en los diferentes rangos de velocidad del motor, bajas, medias y altas revoluciones, tanto en lo relativo al torque como a la potencia
- Conviene recordar que la potencia y el torque están directamente relacionados entre sí a través de la expresión: $T=P_t/\omega$
- Por otro lado, recordemos que un torque más elevado proporciona mayor poder de aceleración, en tanto que una potencia mayor garantiza una velocidad de desplazamiento máxima más alta

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- Teniendo en cuenta las siguientes relaciones

$$P_t = Fv \quad ; \quad T = P_t / \omega \quad ; \quad a / \alpha = (I / M) (F / T)$$

Y suponiendo $F = \text{cte}$, tenemos dos casos:

a) Torque constante

- Si la potencia aumenta, lo hace la velocidad de giro del motor y la velocidad de desplazamiento. La aceleración se puede mantener

b) Potencia constante

- Si la potencia alcanza su valor máximo, a medida que la velocidad de giro del motor aumenta el torque disminuye y lo hace la aceleración. La velocidad de desplazamiento se puede mantener

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- Estudiando las características de los motores AC con relación al comportamiento de los motores DC podemos concluir, en relación al torque
 - A bajas revoluciones los motores DC con bobinado serie muestran el mejor comportamiento, con un rango de revoluciones de giro más amplio que cualquiera de sus competidores (DC bobinado en paralelo y motores AC)
 - En bajas revoluciones tanto el motor DC con bobinado paralelo como el motor AC asíncrono muestran un buen comportamiento, con un torque constante, lo que garantiza una buena aceleración
 - En bajas revoluciones el motor AC síncrono es el que peores prestaciones presenta, con un torque que decrece con las revoluciones

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- Asimismo,
 - En medias y altas revoluciones el torque disminuye inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad de giro del motor para todos los casos excepto par el motor DC con bobinado paralelo
 - Esta situación permite concluir que esta última configuración sería la más apropiada para vehículos que quisieran mantener un nivel alto de aceleración en regímenes de altas revoluciones del motor
 - El comportamiento del torque es similar en el resto de los casos, con la única diferencia que la caída se comienza a producir más tarde en los motores DC con bobinado serie

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- Estudiando las características de los motores AC con relación al comportamiento de los motores DC podemos concluir, en relación a la potencia
 - Todos los motores presentan, por debajo del punto donde se alcanza la máxima potencia, una evolución lineal
 - El mejor comportamiento lo muestra el motor AC cuya evolución de potencia es más rápida
 - Dentro de los motores AC, el régimen de máxima potencia se alcanza antes en la versión asíncrona que en la síncrona
 - Igualmente, el motor DC serie alcanza el punto de máxima potencia antes que el paralelo

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- Asimismo,
 - El valor de potencia que se alcanza en motores AC es mayor que en los DC para la misma velocidad de giro, en régimen de bajas revoluciones
 - En medias y altas revoluciones el comportamiento de los motores DC serie y AC síncrono es similar, con una evolución de la potencia inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad de giro
 - La variación en estos dos casos es más acusada en el motor AC síncrono, si bien el valor de potencia máxima también es mayor
 - La evolución de la potencia para los motores DC paralelo y AC asíncrono es muy parecida

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- Asimismo,
 - Esta variación, para estos dos casos, es de tipo potencial, lo que hace que la potencia disminuya más lentamente que en el caso cuadrático a medida que aumenta la velocidad de giro del motor
 - La evolución de la potencia con la velocidad de giro es más notoria en los motores AC asíncronos, aunque su potencia máxima es mayor que en los DC paralelo

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- En resumen,
 - No existe un motor que proporcione las mejores prestaciones en cuanto a torque y potencia para cualquier régimen de revoluciones del motor
 - Para bajas revoluciones y arranque, el motor DC serie sería el que mostrara mejor comportamiento en cuanto a aceleración
 - Para respuesta de potencia en bajo régimen de revoluciones, el motor AC asíncrono es el que da mejores resultados
 - Para medias y altas revoluciones el mejor torque, y por tanto capacidad de aceleración, lo presenta el motor DC paralelo
 - Para respuesta de potencia en medias y altas revoluciones el motor AC asíncrono es el mejor

MOTORES AC VS. MOTORES DC

- En resumen,
 - Los motores AC operan a mayor voltaje, lo que reduce la intensidad de corriente y, por tanto, las pérdidas de energía y potencia, reduciéndose también el desgaste de conmutadores, interruptores y otros accesorios
 - Para alcanzar los voltajes de operación de un motor AC con un motor DC sería necesario una fuente de corriente continua de alto voltaje, lo que implica un número de elementos en la batería muy considerable. Esto complica el diseño, incrementa el coste y eleva el riesgo de averías

EFICIENCIA

- La eficiencia de los motores eléctricos suele ser muy elevada, en torno al 80% para potencias de 1 kW y del 95% para potencias elevadas, 90 kW
- Se define la eficiencia de un motor eléctrico de la siguiente manera: $\eta = P_{\text{eje}} / P_{\text{el}}$
- Las principales pérdidas son debidas a resistencias en las bobinas (solenoides) aunque también se producen pérdidas por imantación remanente y por fricción entre los elementos

SISTEMAS DE CONTROL

- Todos los procesos que conducen a que el motor eléctrico trabaje en las condiciones de operación establecidas, o en el punto óptimo cuando sea necesario se tienen que regular mediante un complejo sistema de control
- Este sistema de control incluye una serie de elementos electrónicos y sensores que reciben la información de los parámetros principales, potencia, velocidad de giro, voltaje, intensidad, etc., de manera que puedan hacer variar las condiciones de trabajo para adaptar el funcionamiento del motor a los requerimientos tanto energéticos como de potencia

SISTEMAS DE CONTROL

- Un sistema de control apropiado debe regular los siguientes elementos o subsistemas:
 - Motor/generador
 - Inversor
 - Rectificador
 - Convertidor DC/DC: sistema regenerativo
 - Convertidor DC/DC: subsistema
 - Subsistemas DC
 - Batería de alto voltaje
 - Control de batería
 - Control del motor
 - MCI

SISTEMAS DE CONTROL

- El objetivo del control de cada uno de los elementos o subsistemas anteriores es:

| Elemento/sistema | Objetivo |
|------------------|---|
| Motor/generador | Proporciona potencia y energía al sistema motriz (ruedas) o genera corriente eléctrica cuando el vehículo está decelerando o frenando |
| Inversor | Convierte la corriente continua, DC, en corriente alterna AC |
| Rectificador | Transforma la corriente alterna, AC, en corriente continua DC |

SISTEMAS DE CONTROL

- El objetivo del control de cada uno de los elementos o subsistemas anteriores es:

| Elemento/sistema | Objetivo |
|--------------------------------|--|
| Convertidor DC/DC regenerativo | Convierte la corriente alterna, AC, del motor durante el proceso de frenado, después de haber pasado por el rectificador para adquirir el voltaje adecuado que sea compatible con el voltaje de la batería |
| Convertidor DC/DC: subsistema | Convertir el voltaje de la corriente DC generada por el motor, de alto voltaje, en el voltaje adecuado para alimentar los servicios del vehículo, generalmente 12 V |
| Batería (alto voltaje) | Almacenamiento de energía |

SISTEMAS DE CONTROL

- El objetivo del control de cada uno de los elementos o subsistemas anteriores es:

| Elemento/sistema | Objetivo |
|--------------------|---|
| Control de batería | Regular la carga y descarga de este elemento, típicamente NiMH o Li-ion |
| Control del motor | Controlar los distintos modos de operación del vehículo durante la conducción, arranque, aceleración, navegación, deceleración, frenado y marcha en vacío o ralentí |
| MCI | Generar energía y potencia a partir de un combustible fósil. Este dispositivo se utiliza sólo en HEV y PHEV |

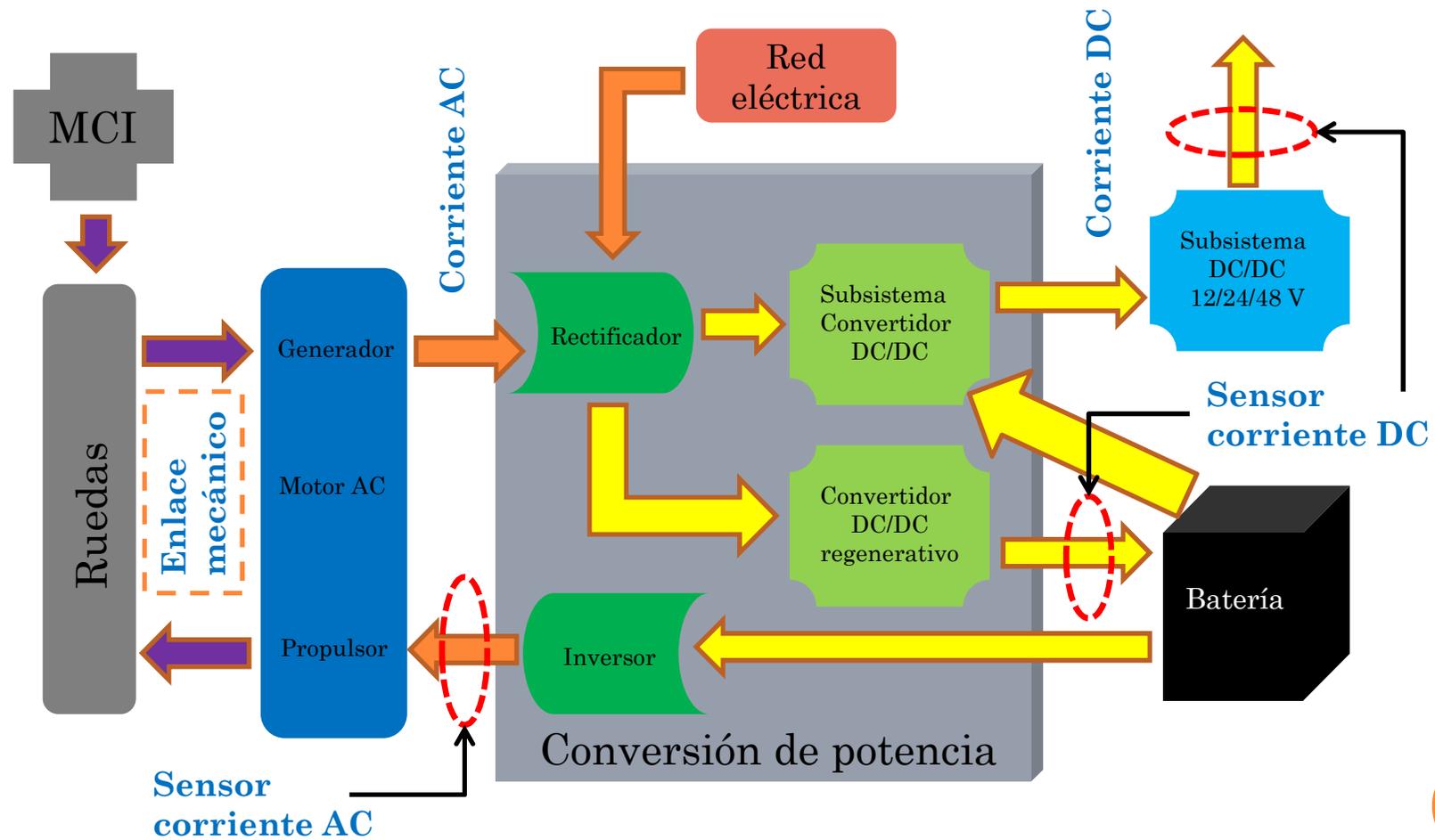
SISTEMAS DE CONTROL

- El objetivo del control de cada uno de los elementos o subsistemas anteriores es:

| Elemento/sistema | Objetivo |
|-------------------------|---|
| MCI | Alimentar un generador de corriente para la carga de la batería de alto voltaje en vehículos de rango extendido REV |

- En la siguiente diapositiva podemos ver el esquema general de un sistema de control

SISTEMAS DE CONTROL



SISTEMAS DE CONTROL

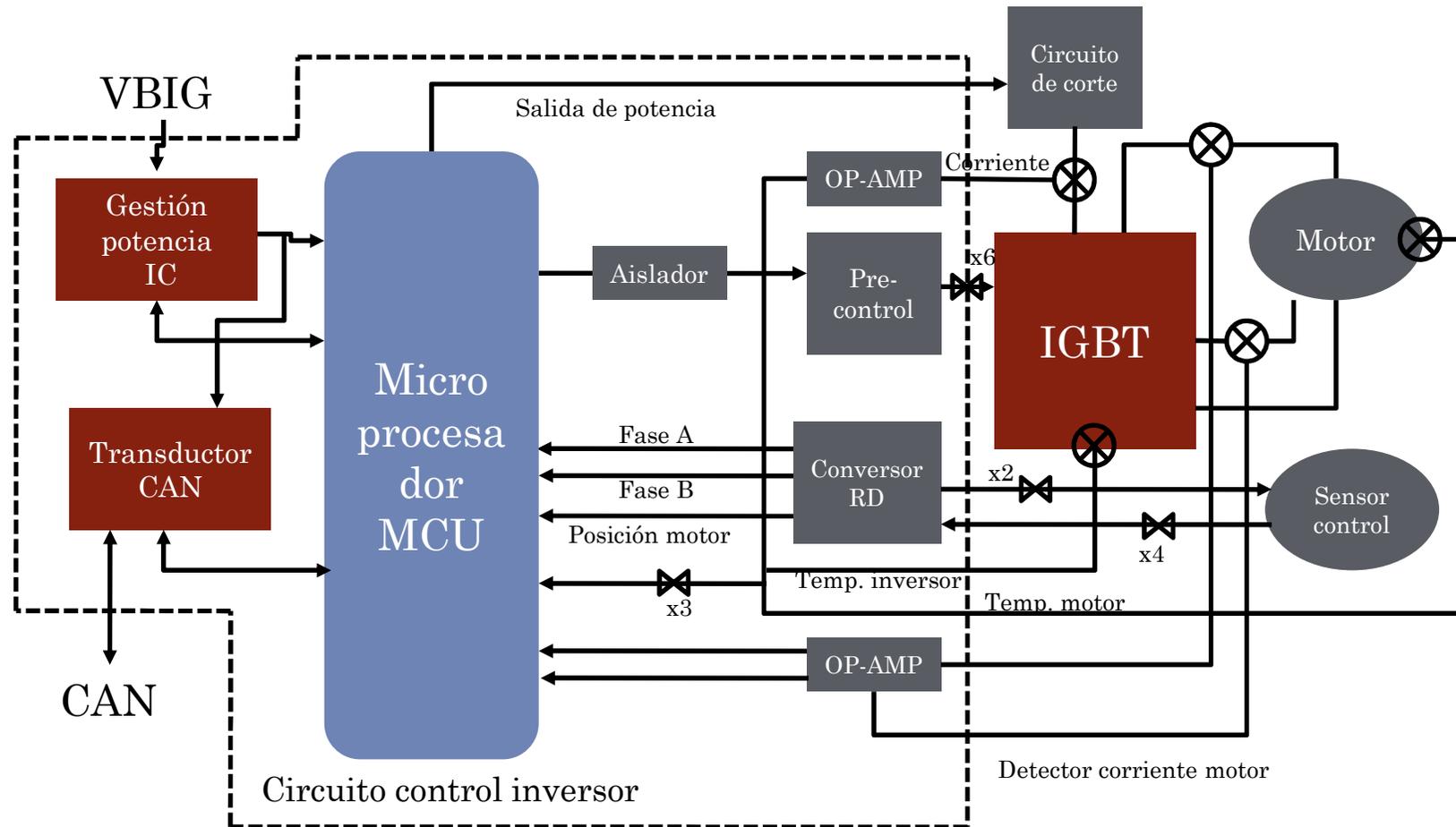
- El esquema anterior responde a un sistema de control de un vehículo PHEV que opera con red eléctrica, motor de combustión y motor eléctrico
- Si el vehículo no es enchufable, esto es no tiene conexión a la red eléctrica, pero es híbrido, basta eliminar el bloque de red eléctrica y su conexión
- Si el vehículo es puramente eléctrico, PEV, tan sólo es preciso eliminar el bloque MCI y su conexión para obtener el sistema de control deseado

SISTEMAS DE CONTROL

Motor/generador

- El sistema de control del motor/generador regula el funcionamiento de este elemento, en su doble versión, como elemento propulsor cuando proporciona fuerza motriz a la ruedas, y cuando actúa como generador en caso de deceleración o frenado
- Este proceso se controla a través de un microprocesador que regula el inversor por medio de un circuito previo de regulación, cuyo esquema se muestra seguidamente

SISTEMAS DE CONTROL



SISTEMAS DE CONTROL

Motor/generador

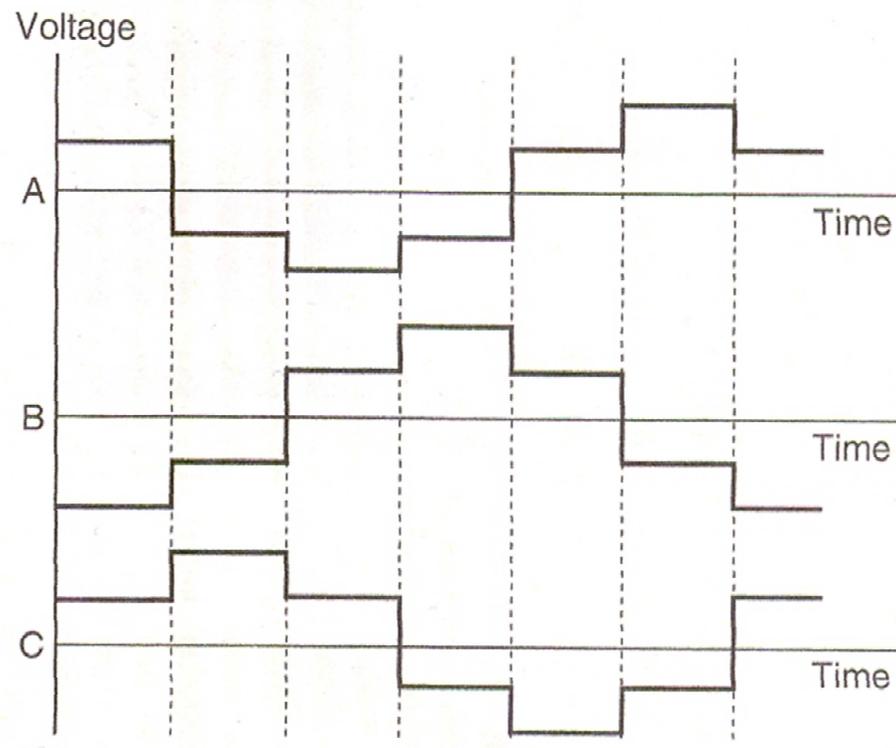
- El microprocesador controla la secuencia a la cual el inversor es conmutado y el ritmo de dicha conmutación. Esto determina el torque y la velocidad de giro del motor
- El transistor bipolar (IGBT) es un dispositivo de potencia de 3 fases que se emplea como sistema electrónico de conmutación rápida de alta eficiencia. Se utiliza para conmutar la potencia eléctrica

SISTEMAS DE CONTROL

Inversor

- Utiliza un circuito electrónico para convertir la corriente continua en alterna DC→AC
- Un aspecto importante de este tipo de motor y su sistema asociado de control es que trabaja como generador durante la recuperación de energía con el freno regenerativo
- El proceso se controla con el microprocesador, que actúa sobre el controlador del motor
- El circuito de pre-control genera una señal que permite conmutar el inversor con la frecuencia adecuada

SISTEMAS DE CONTROL

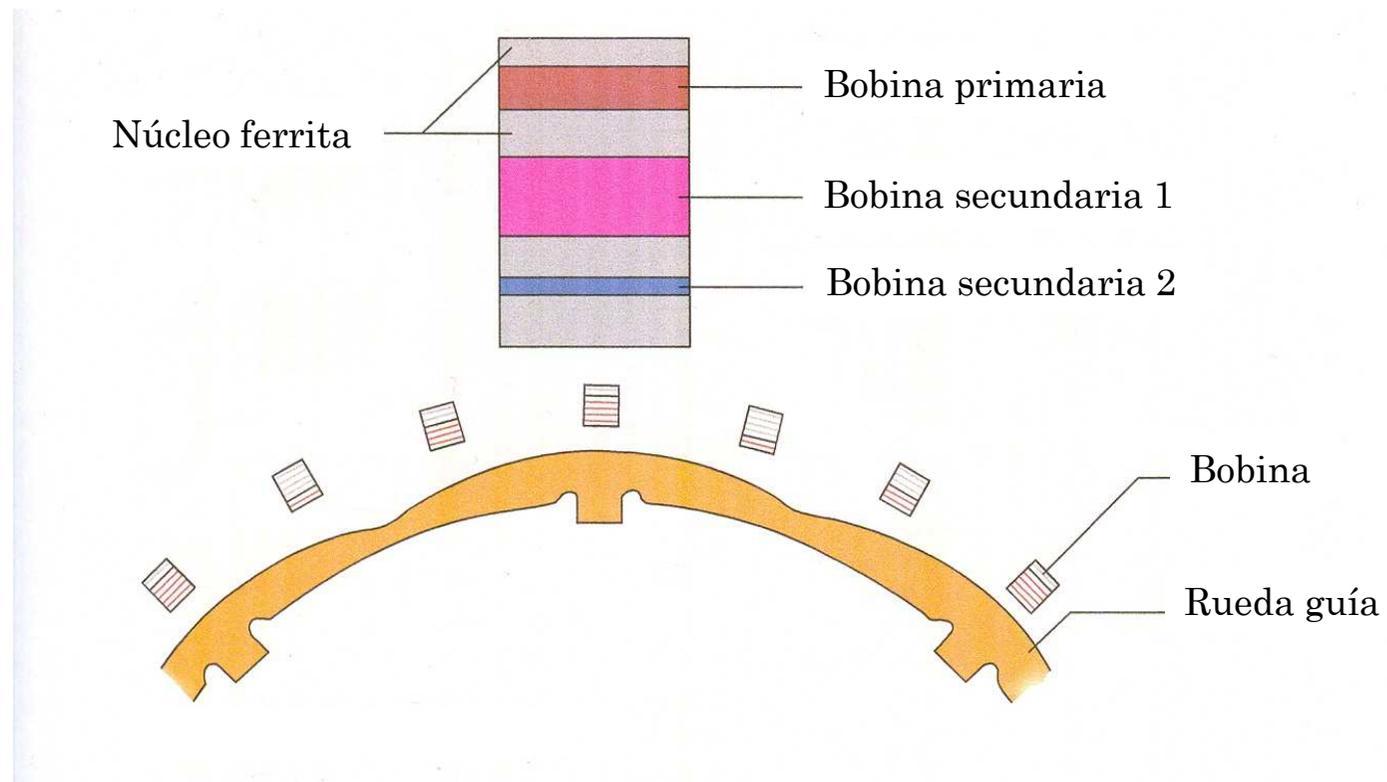


SISTEMAS DE CONTROL

Sensores

- Para poder controlar adecuadamente cuando el motor actúa como propulsor y cuando como generador el control electrónico de potencia necesita conocer la posición y velocidad de giro del motor con precisión
- Los datos de posición y velocidad de giro son proporcionados por un conjunto de sensores que actúan conjuntamente con el anillo de reluctancia magnética, cuyo esquema se muestra a continuación

SISTEMAS DE CONTROL

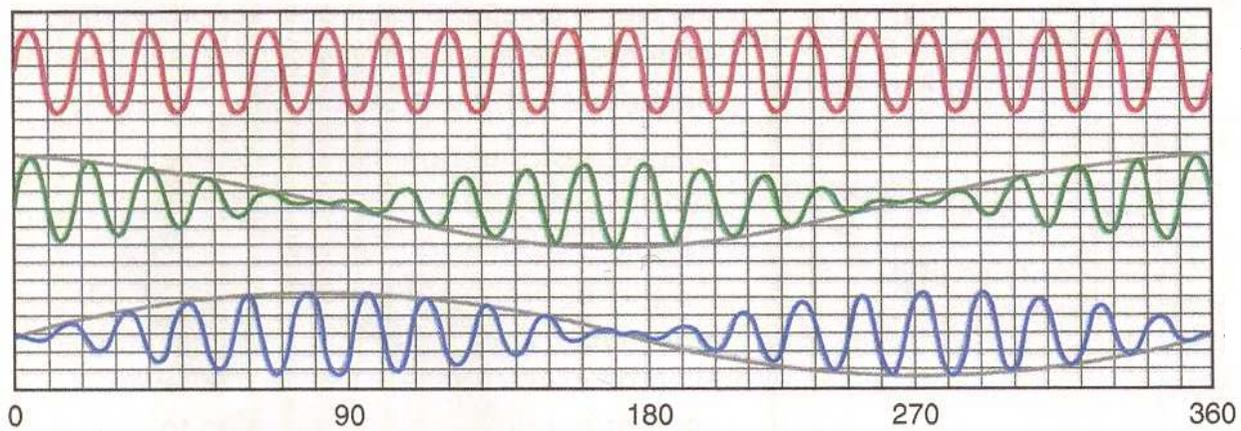


SISTEMAS DE CONTROL

Sensores

- La señal de salida cambia a medida que el anillo se aproxima a las bobinas, lo que es detectado por el sistema de control
- Las bobinas están conectadas en serie y consisten en una bobina primaria y dos secundarias que generan una cierta señal, tal y como se puede ver a continuación
- En función de la amplitud de la señal se puede conocer la posición del rotor
- La frecuencia de la señal permite conocer la velocidad de giro

SISTEMAS DE CONTROL



Voltaje excitación

Bobina secundaria 1

Bobina secundaria 2

SISTEMAS DE CONTROL

Sensores

- Complementariamente se utilizan sensores de temperatura del motor e inversor para evitar daños físicos y averías si se sobrepasa una cierta temperatura de trabajo
- Los valores máximos de temperatura suelen estar en torno a 150° C, si bien se pueden alcanzar picos de 180° C
- Si la temperatura de operación supera estos valores, los sensores envían una señal y el sistema de control interrumpe el suministro de potencia

SISTEMAS DE CONTROL

Batería

- Como se ha visto en temas anteriores, la batería requiere de un control exhaustivo para evitar su sobrecarga o sobre-descarga
- Un cargador y un controlador DC/DC regulan la carga que entra a la batería desde el sistema de alimentación de corriente alterna, especialmente si se está cargando la batería desde la red eléctrica
- El microprocesador regula la potencia entregada y controla el proceso del circuito de carga