



Curso de vehículos híbridos y eléctricos

Tema: Motores eléctricos.

Ing. Federico Arismendi

23/07/2019



Temario

1. Historia de los motores eléctricos.
2. Introducción a los motores eléctricos.
3. Motores DC tipos y características.
4. Motores de Inducción o Asíncronos.
5. Motores Sincrónicos de rotor bobinado.
6. Motores Sincrónicos de Imanes Permanentes.
7. Motores DC sin escobillas.
8. Motores de Reluctancia Variable.
9. Clasificación de los motores eléctricos para la tracción.
10. Rendimiento de las máquinas eléctricas.
11. Criterios de selección de los motores eléctricos.



1. Historia de los motores

1. Historia de los motores

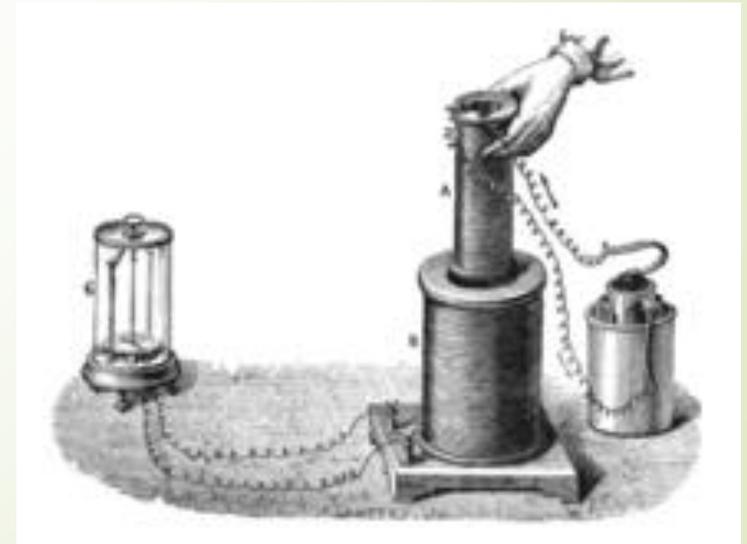
- Puede decirse que la ley de Faraday (1831) marca definitivamente el inicio de los motores eléctricos ya que es el principio fundamental en el cual se basan los motores para hacer la conversión de energía eléctrica a mecánica.

$$v_e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Donde:

v_e es la tensión inducida.

$\frac{d\phi}{dt}$ es a la variación del flujo magnético.



1. Historia de los motores



► Historia de los motores de CC y CA

La primer maquina eléctrica capaz de convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa fue la maquina dinamoétrica, construida por James Watt en 1852 a base de Electroimanes y no imanes permanentes.

Luego en el año 1893 Nicola Tesla patentó el Motor de Inducción (CA).

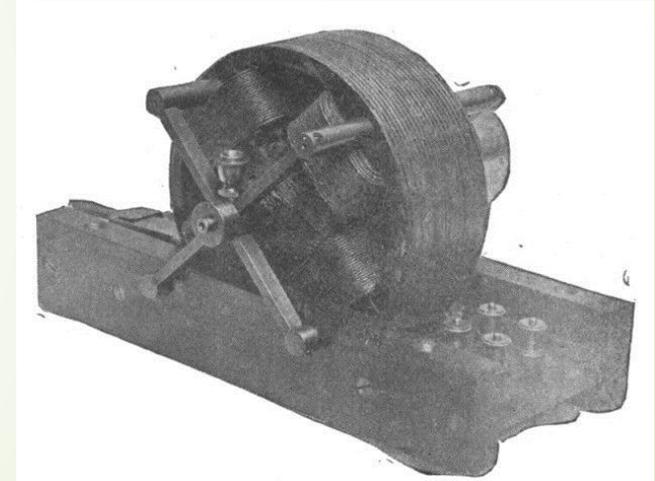


1. Historia de los motores

- Ventajas del MI frente a los MCC a fines del siglo XIX:
- Mayor robustez.
- No requieren de escobillas.
- El recambio tecnológico no significaban un costo relevante.

El proyecto Niagara como gran empuje...

- Transporte de energía eléctrica en CA (Niagara Falls Power Company), llevado adelante por la empresa Westinghouse en 1893, le dio el empuje final como para meterse definitivamente en el mercado.





2. Introducción a los motores eléctricos



2. Introducción a los motores

Leyes fundamentales que rigen el funcionamiento de los motores eléctricos:

- ▶ Ley de Ampere
- ▶ Ley de Faraday
- ▶ Ley de Lorentz

2. Introducción a los motores

Ley de Ampere

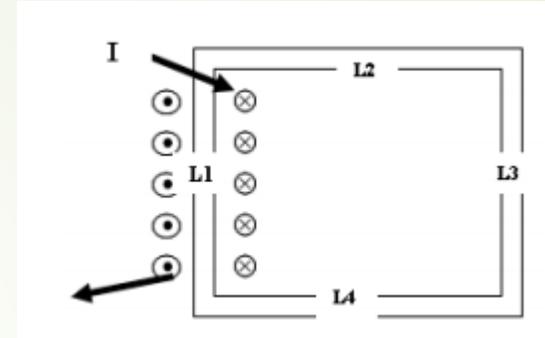
- Largos medios L_i y sección S .
- $L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = L$,

$$HL = NI \Rightarrow \phi L / S\mu = NI$$

$$H = B / \mu \quad (1)$$

Por definición llamamos reluctancia

$R = L / S\mu$; por lo tanto de la ley de Ampere se deduce la relación entre la fuerza Magnetomotriz y el Flujo Magnético como



$$\oint_C H \cdot dl = NI = F_{mm}$$

$$\phi = \frac{F_{mm}}{\mathcal{R}}$$

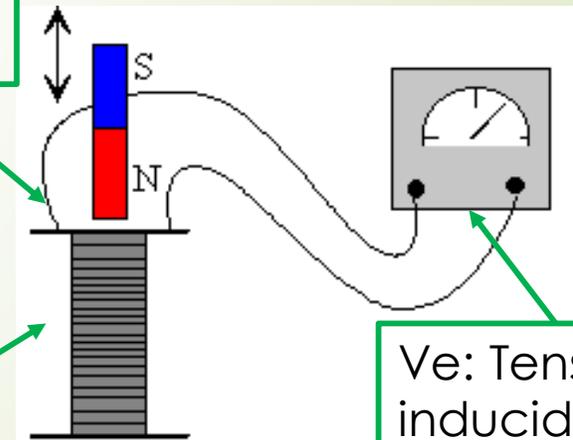
2. Introducción a los motores

Ley de Faraday

Si un conductor finito, es enlazado por un flujo magnético que varía en el tiempo, entonces se induce, en los bornes del conductor una tensión e dada por:

$$V_e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

ϕ : Flujo magnético



V_e : Tensión inducida

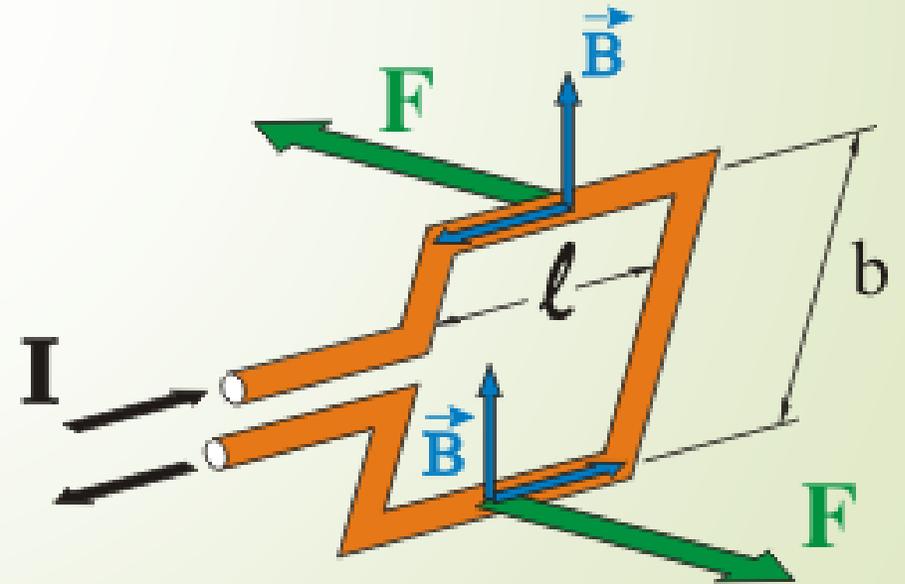
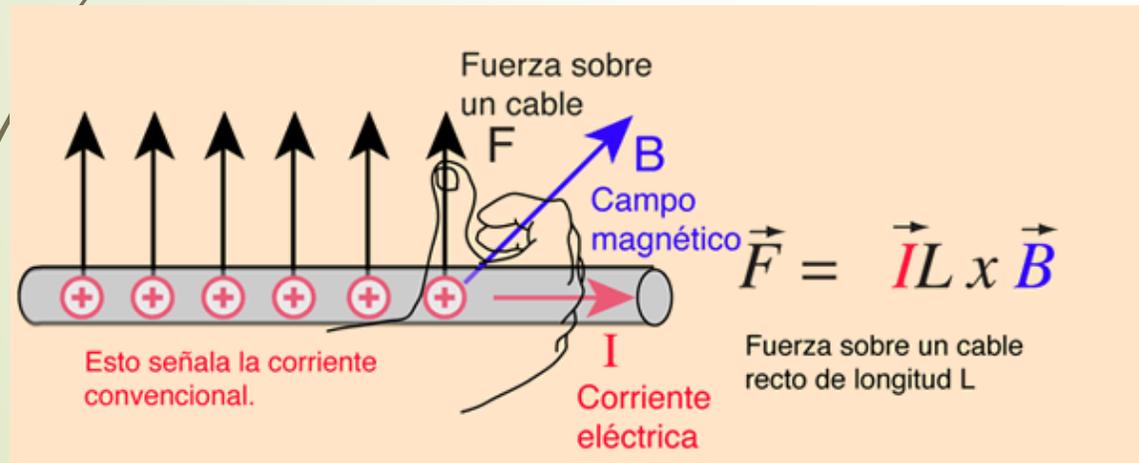
N = Número de vueltas

2. Introducción a los motores

Ley de Lorentz

Un campo magnético es un espacio de influencia donde cualquier carga eléctrica en movimiento experimenta una fuerza.

Si la carga eléctrica fluye en un conductor dando lugar a una corriente, y el conductor se encuentra inmerso en un campo magnético uniforme, entonces el dicho conductor experimentará una fuerza dada por la siguiente ecuación:

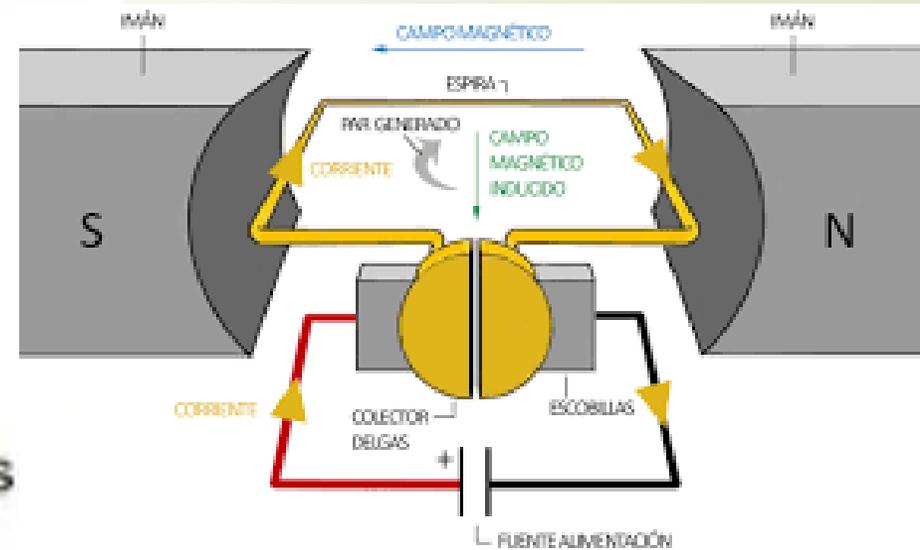
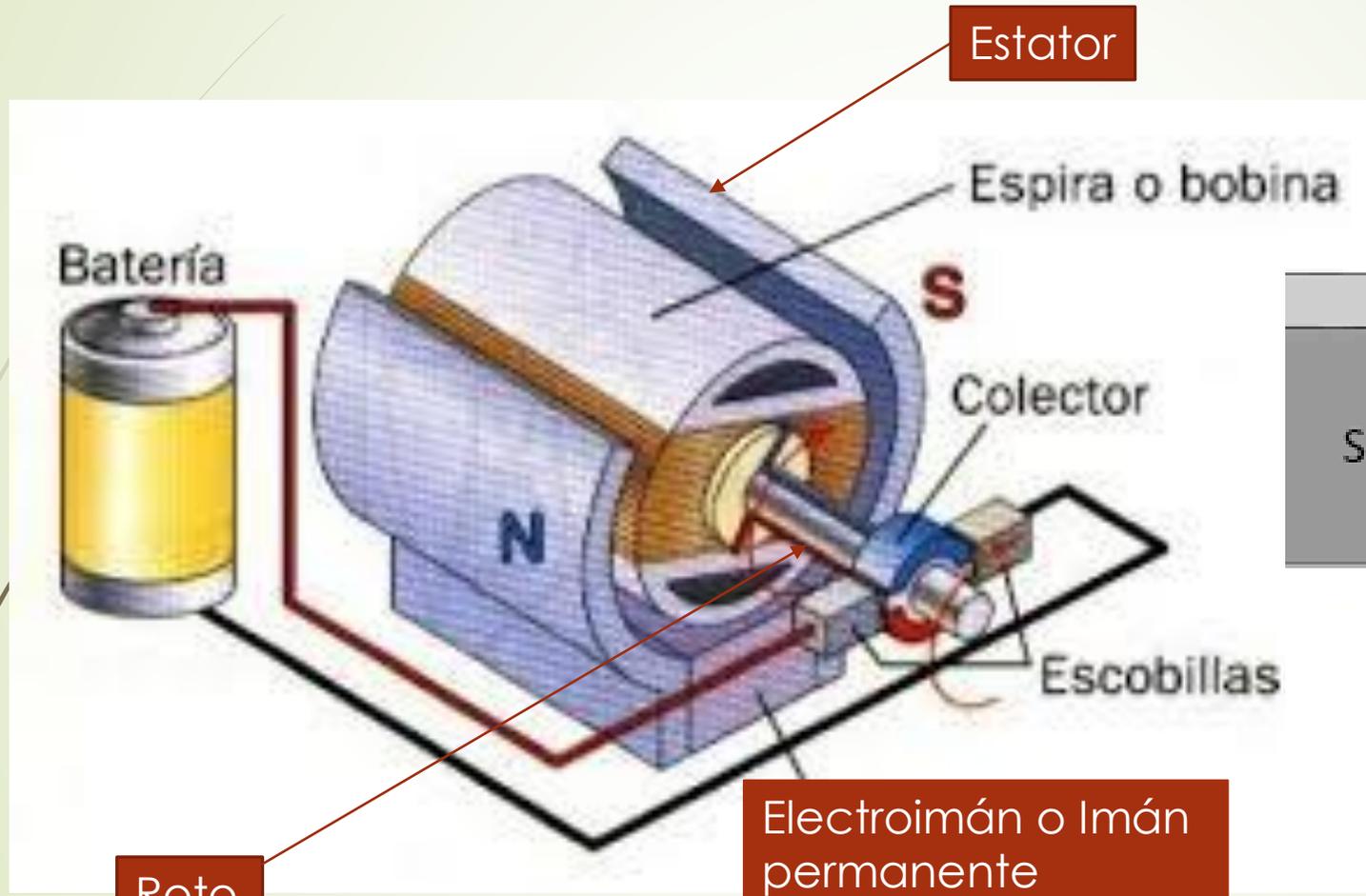




3. Motores DC

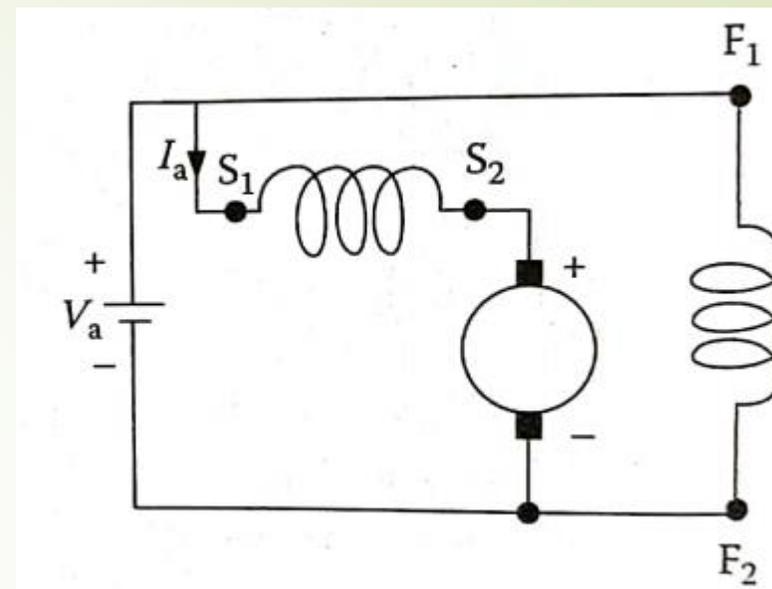
Tipos y características principales

Principio de funcionamiento del motor DC

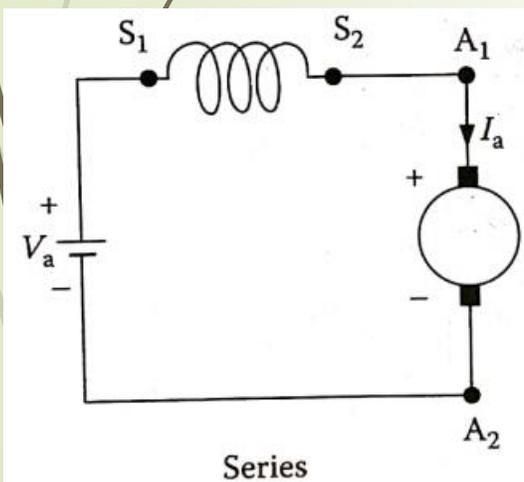


3. Modelado eléctrico Motor DC

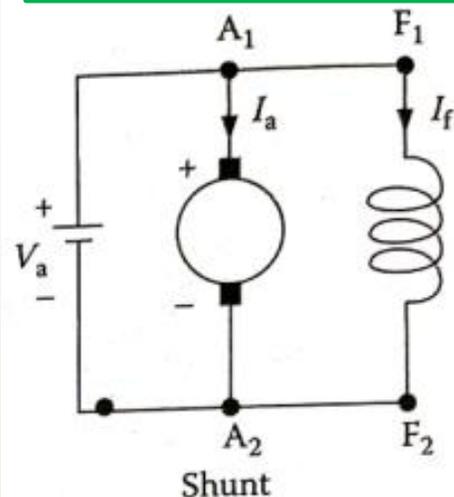
- Dependiendo de como se conecte el Inductor podemos tener 3 tipos de excitaciones diferentes: Independiente, Shunt (paralelo o Serie)



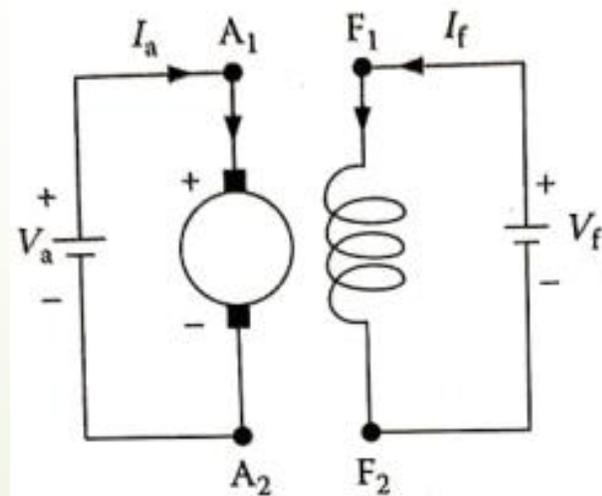
Conexión Serie



Conexión Paralelo



Conexión Independiente



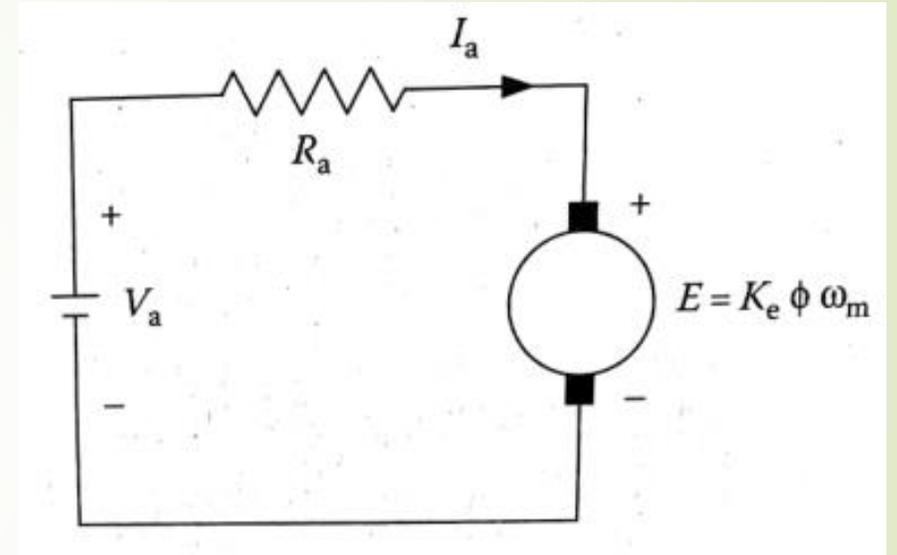
Conexión Combinada

3. Modelado eléctrico Motor DC

La tensión interna **E** depende linealmente de **K_e** (constante característica constructiva), del flujo magnético **ϕ** y la velocidad de eje **ω_m**

V_a es la tensión de alimentación del motor, **I_a** es la corriente de armadura y **R_a** es la resistencia de armadura, la cual modela las pérdidas Joule del motor.

El par entregado por el motor depende de la **K_e**, **I_a** y el flujo magnético **ϕ**



$$V_a = E + R_a I_a, \quad E = K_e \phi \omega_m$$
$$T = K_e \phi I_a,$$

Se deduce a partir de la ley de Lorentz

3. Curvas características de los Motores DC.

- +El motor serie, tiene un mayor par a bajas velocidades.
- +La zona de Torque cte es menor que el Paralelo.
- + IMPORTANTE: los motores serie no pueden operar sin carga mecánica.

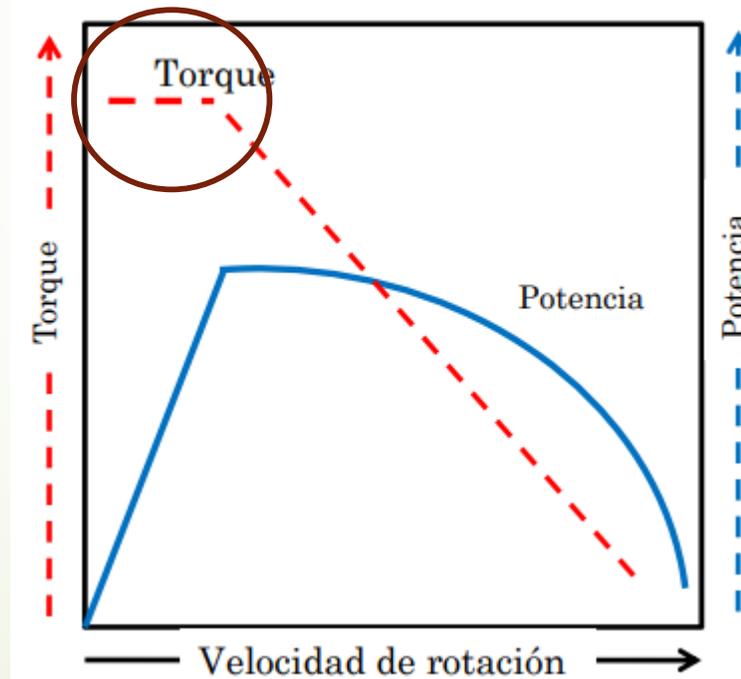
Ecuación de par:

$$T = \frac{K_e \phi}{R_a} V - \frac{(K_e \phi)^2}{R_a} \omega_m.$$

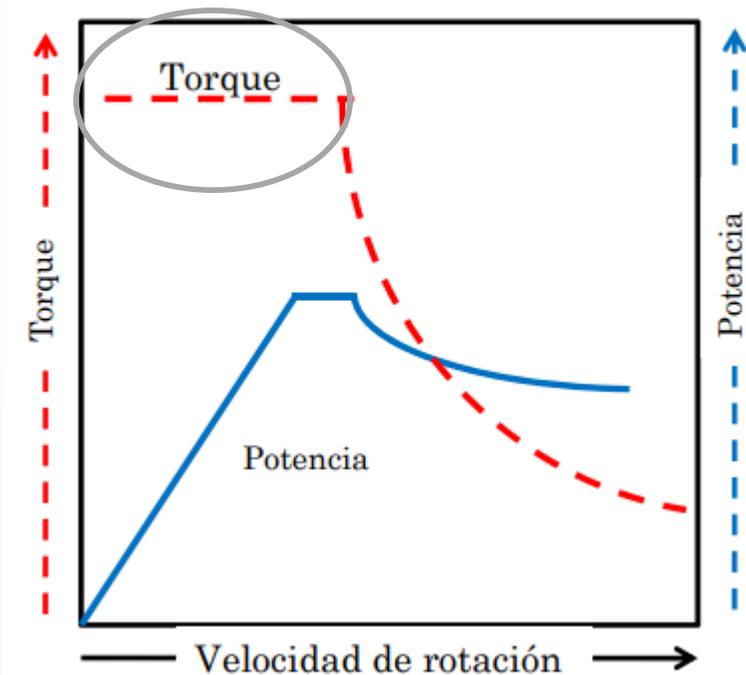
Ecuación de par en motor serie:

$$T = \frac{K_e K_f V_a^2}{(R_a + K_e K_f \omega_m)^2}$$

Conexión Paralelo



Conexión Serie



3. Curvas características de los Motores DC.

+El motor serie, una vez que llega a su potencia nominal comienza a decaer rápidamente debido a la reducción de flujo y el aumento de la velocidad.

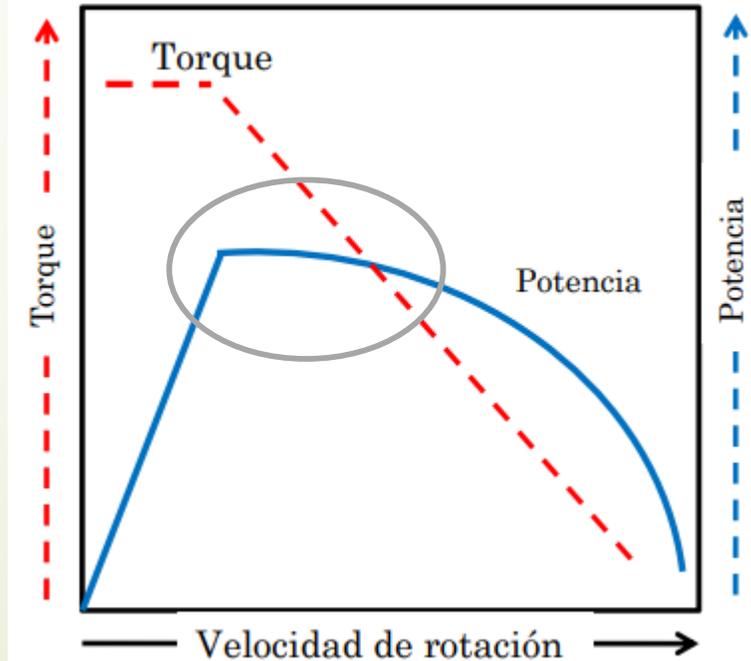
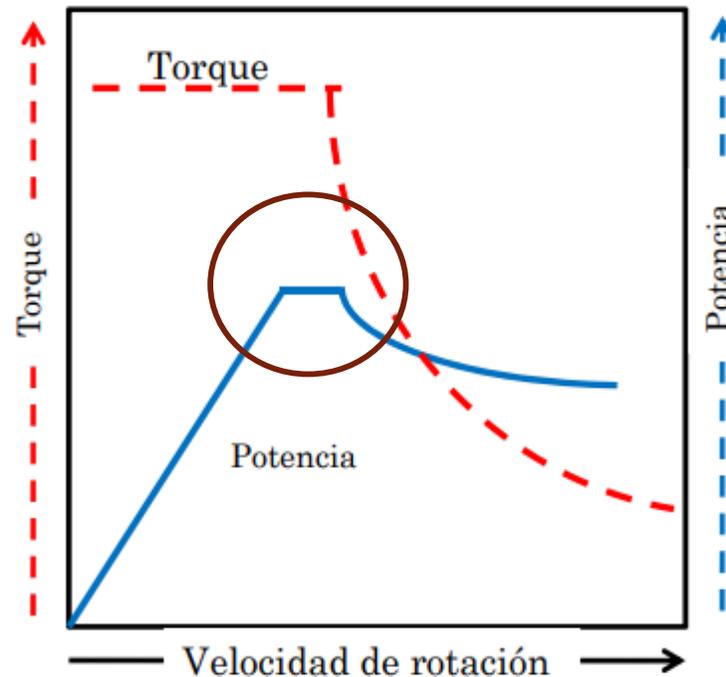
+El motor paralelo o independiente, pueden operar a potencia prácticamente cte aunque luego de superar cierto valor de velocidad también comienza a descender.

Conexión Serie

Conexión Paralelo

Relación Par vs Potencia:

$$Ckn=P$$





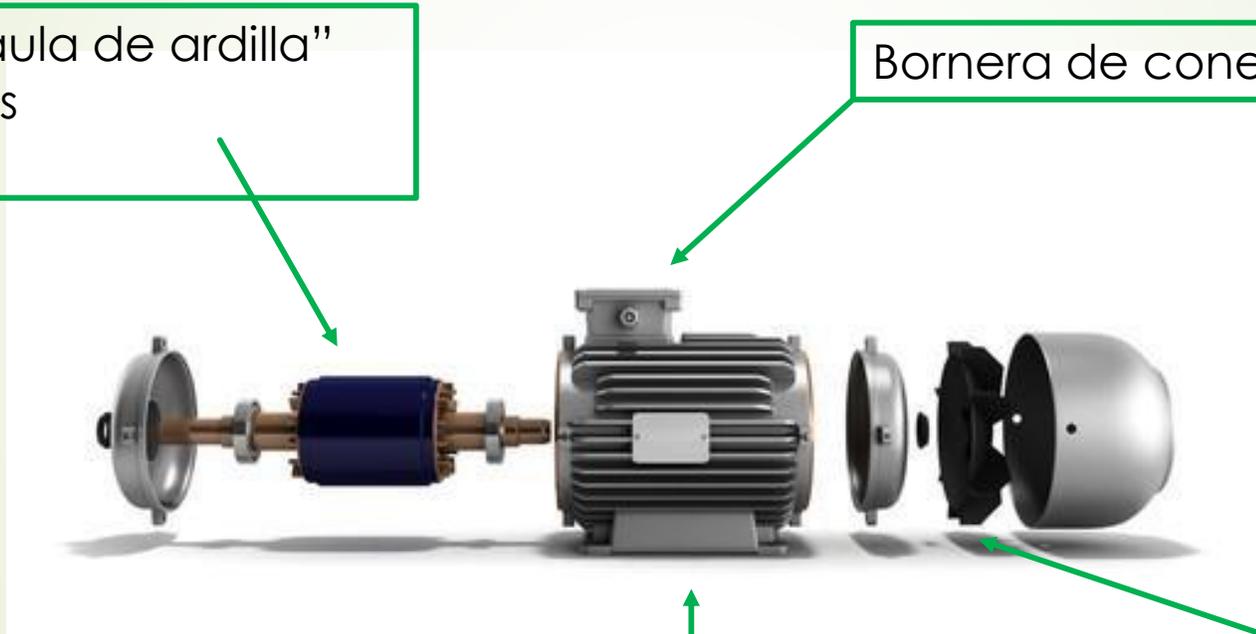
4. Motores de Inducción o Asíncronos

Tipos y características principales

4. Principio de funcionamiento del Motor de Inducción (AC)

Rotor del tipo "Jaula de ardilla" con los bobinados cortocircuitados

Bornera de conexión



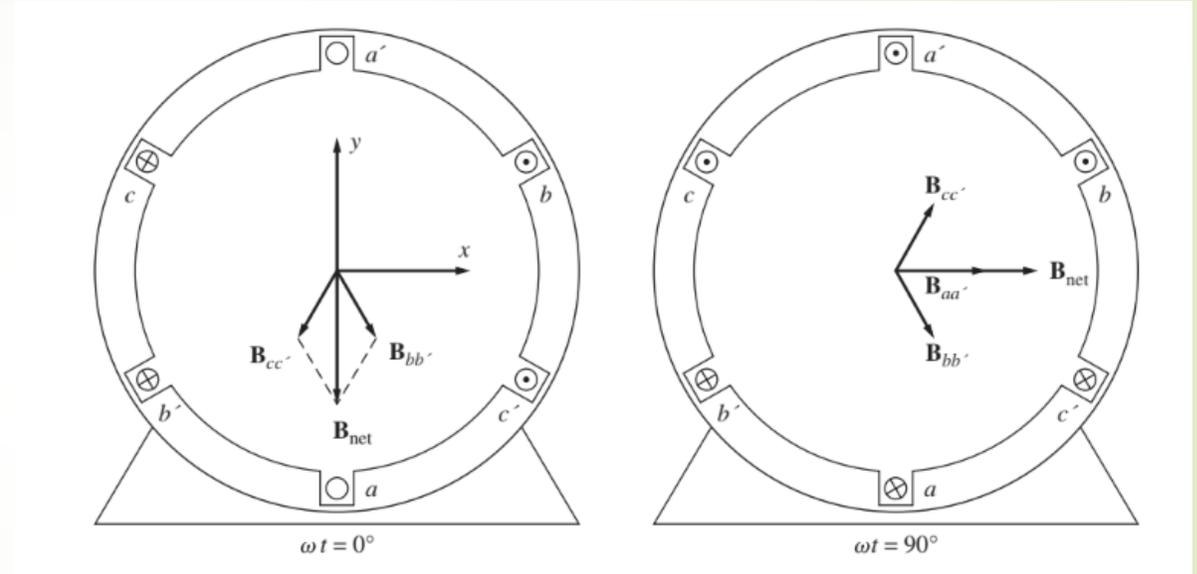
Ventilación solidaria al eje

Estator con los bobinados desfasados 120 grados mecánicos

4. Principio de funcionamiento del Motor de Inducción (AC)

Tal como su nombre lo dice, el motor de inducción basa su funcionamiento en la inducción que produce un campo magnético giratorio (desde el estator) sobre el rotor.

El estator está compuesto por 3 bobinados desfasados 120 grados mecánicos entre sí, mientras que a través de cada uno, circula una corriente eléctrica también desfasada 120 grados eléctricos.



EL resultado es un campo giratorio cte en módulo.

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_{\text{net}}(t) &= \mathbf{B}_{aa'}(t) + \mathbf{B}_{bb'}(t) + \mathbf{B}_{cc'}(t) \\ &= B_M \sin \omega t \angle 0^\circ + B_M \sin (\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + B_M \sin (\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ\end{aligned}$$

4. Principio de funcionamiento del Motor de Inducción (AC)

El campo giratorio del estator (B_S) induce una tensión en el rotor, esta tensión, produce una corriente debido a que las espiras del rotor se encuentran en cortocircuito.

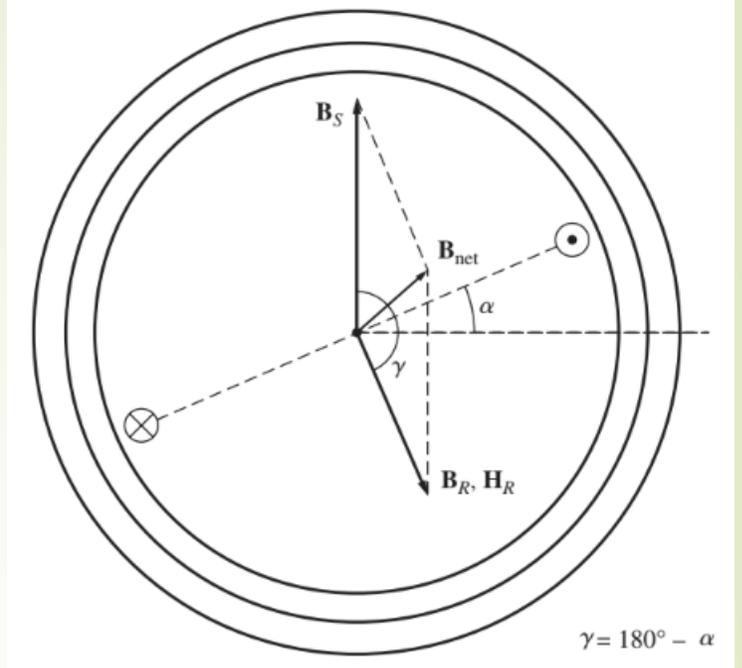
Dicha corriente, da lugar también a un campo magnético (B_R).

Este campo magnético intentará “seguir” al campo giratorio del rotor.

Por lo tanto, el par inducido sobre el rotor se basa en la siguiente expresión que tiene en cuenta la interacción de ambos campos:

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S$$

Donde k es una constante constructiva de la MI



$$\mathbf{B}_{net} = \mathbf{B}_R + \mathbf{B}_S$$

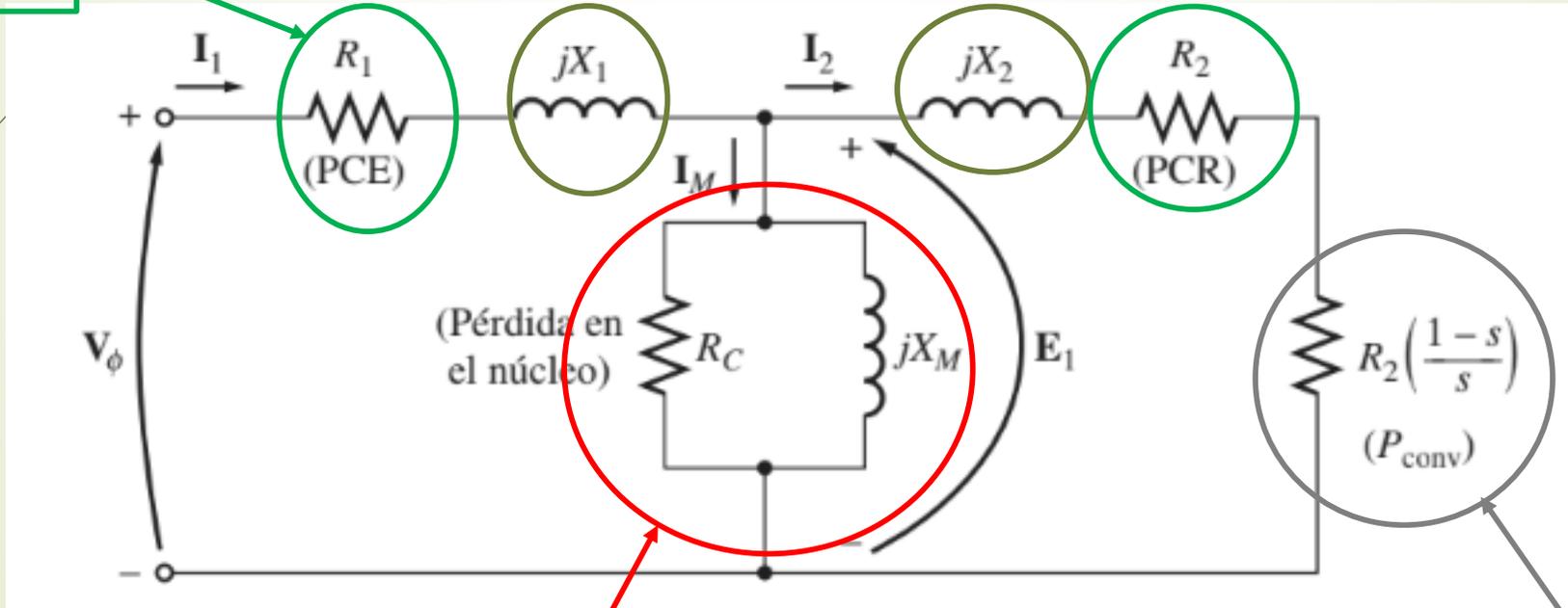
Nótese que en el caso que dichos vectores de campo coincidan, el par resultante será nulo. Por lo tanto, es necesario que exista una diferencia angular entre uno y otro. Este efecto se lo conoce como deslizamiento (s) y se define como: $s = \frac{n_s - n}{n_s}$, donde n_s es la velocidad de sincronismo dada por la relación entre la frecuencia eléctrica (f) y los pares de polos (p) ($n_s = \frac{60f}{p}$) de la MI y n es la velocidad de giro del rotor.

4. Modelado eléctrico

Pérdidas joule en estator y rotor

Pérdidas de flujo magnético en estator y rotor

$$P_{sal} = \frac{3R_2(1-s)I_2^2}{s}$$

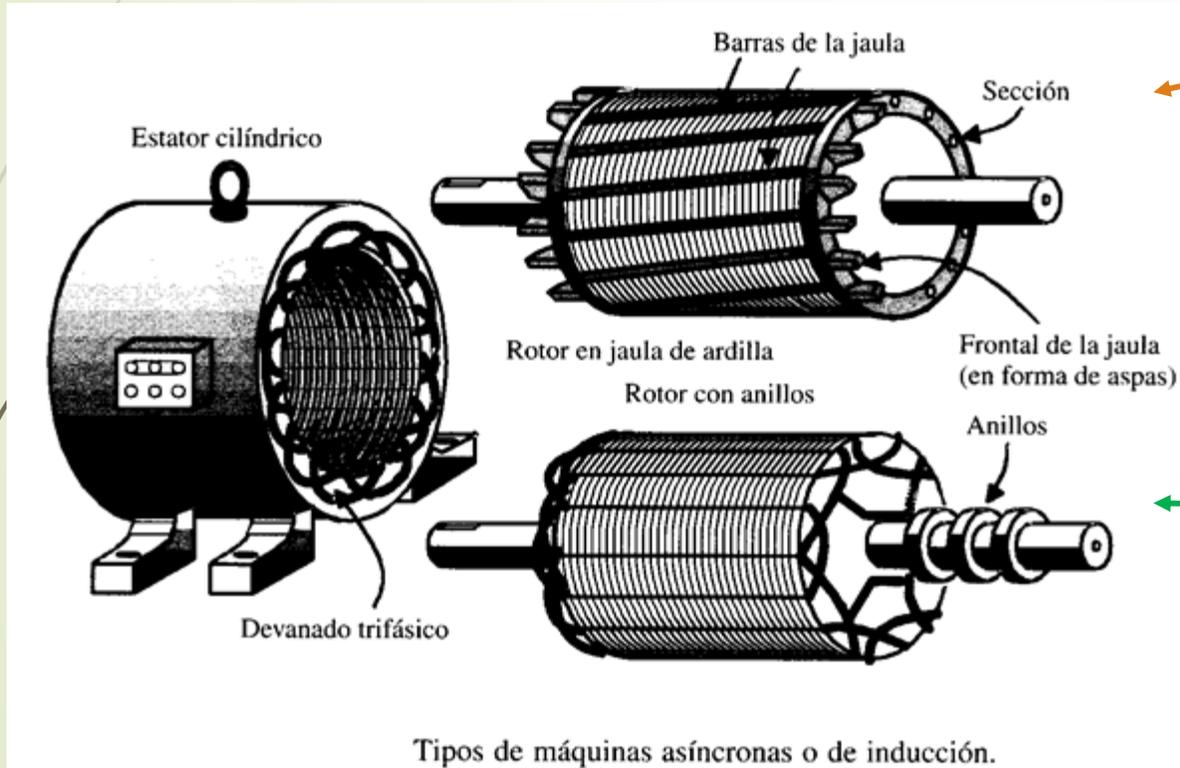


Pérdidas de vacío: Hierro y Foucault

Potencia Mecánica

4. Curva característica del Motor de Inducción

Rotor Jaula de ardilla y rotor bobinado



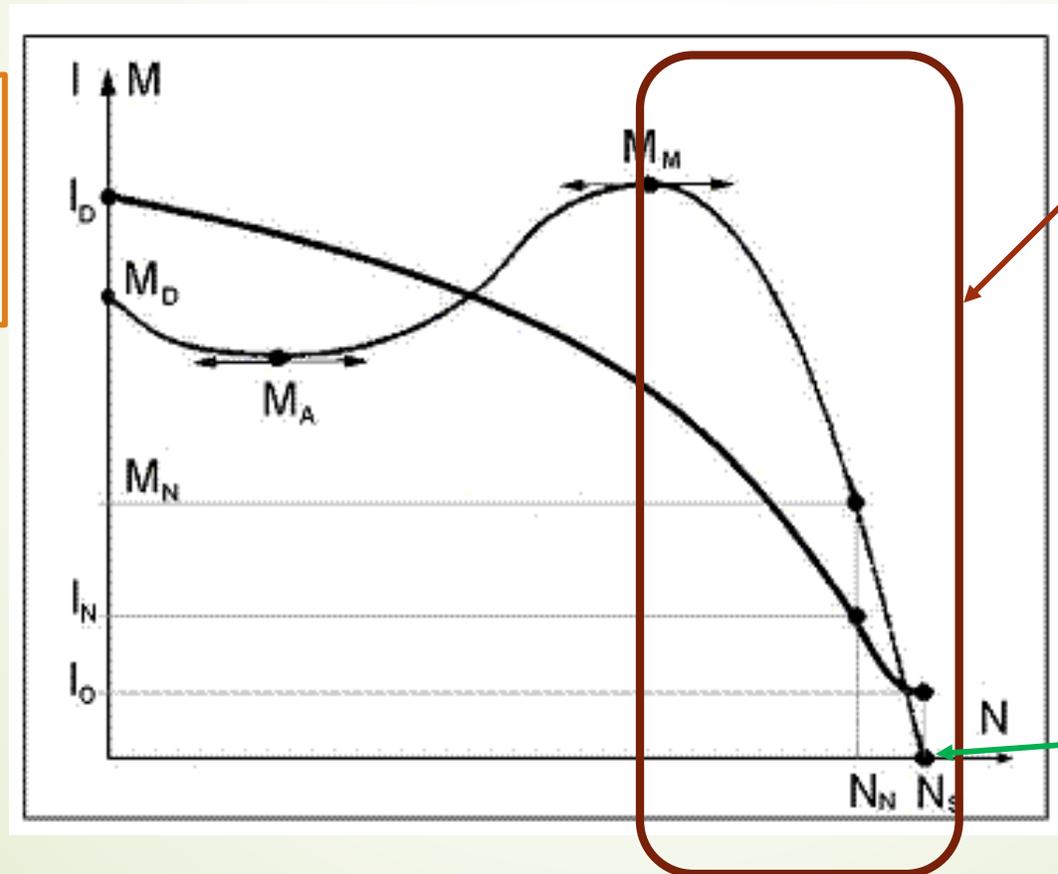
Rotor Jaula de ardilla:
El bobinado se encuentra en CC por lo que, para controlarlo es necesario recurrir a electrónica de potencia adicional.

Rotor bobinado:
Es posible controlar el motor a través del control de la corriente, por ejemplo agregando/quitando resistencias (reóstato rotórico). Requiere anillos rodante para su operación.

4. Curva característica del Motor de Inducción

Características de Par y corriente en función de la velocidad.

ID: Corriente de arranque
MD: Par de arranque



Rango típico de operación.

Velocidad nominal y de sincronismo



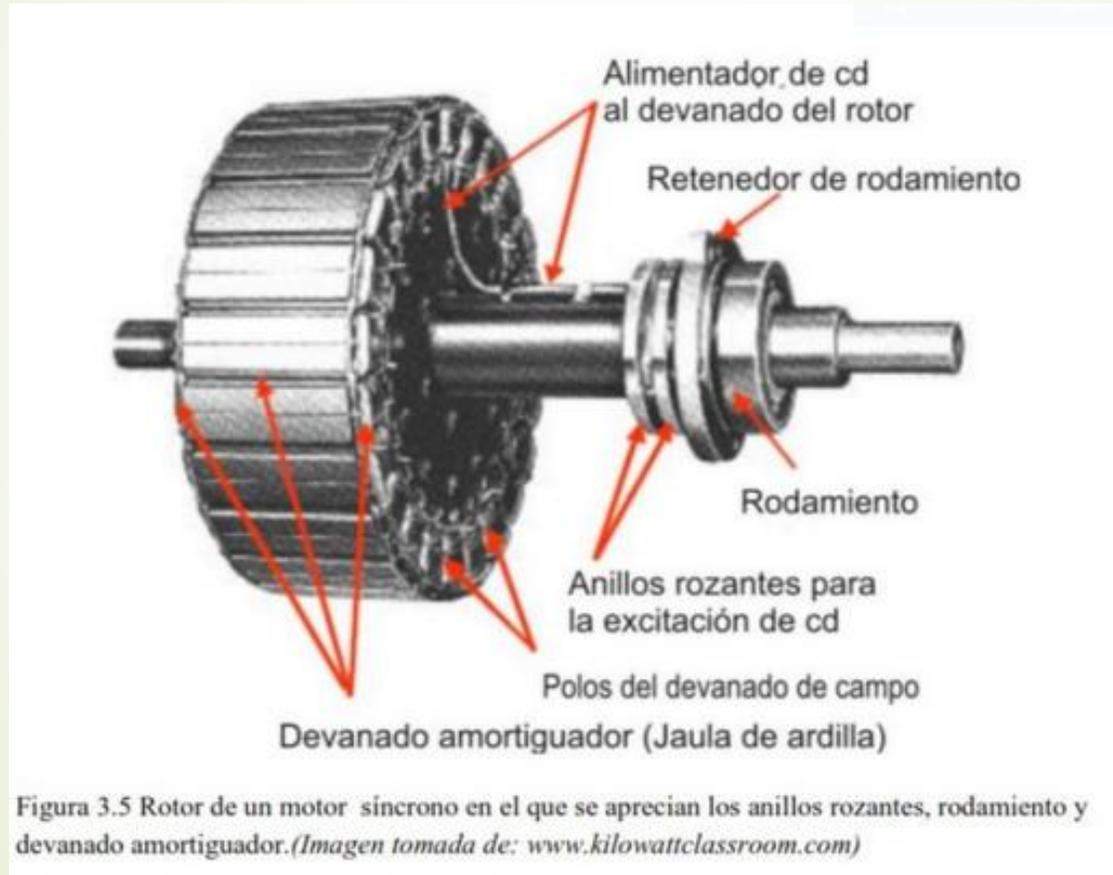
5. Motores sincrónicos

Tipos y características principales

5. Motores síncronos: rotor bobinado y de imanes permanentes

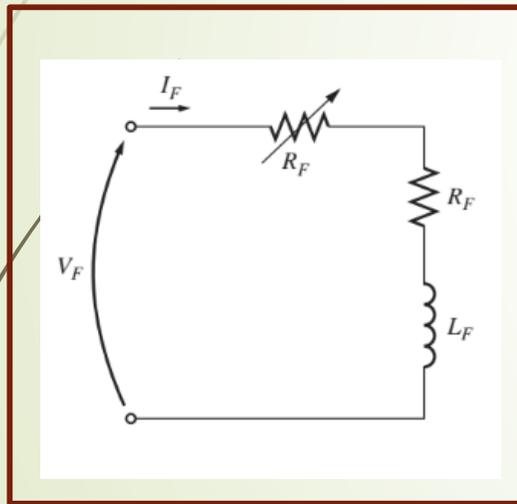


5. Motores síncronos: rotor bobinado

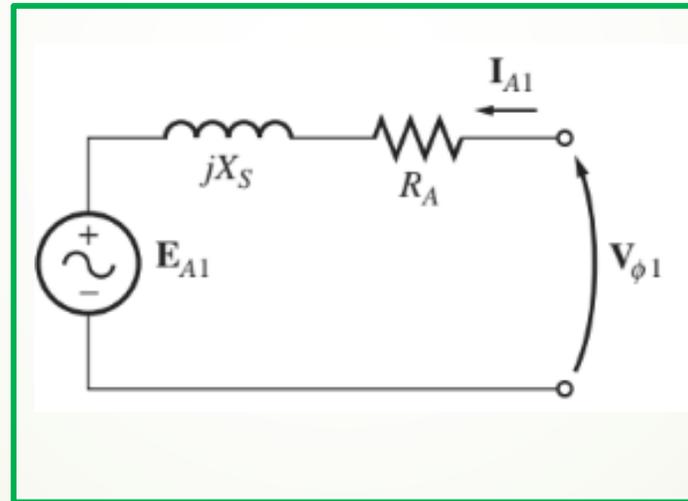


5. Motores síncronos: rotor bobinado y de imanes permanentes

- El modelo eléctrico de la MS, consta de una reactancia denominada sincrónica, una resistencia de armadura y una fuente de alterna llamada tensión interna al igual que en el modelo del motor DC.



Excitación del motor



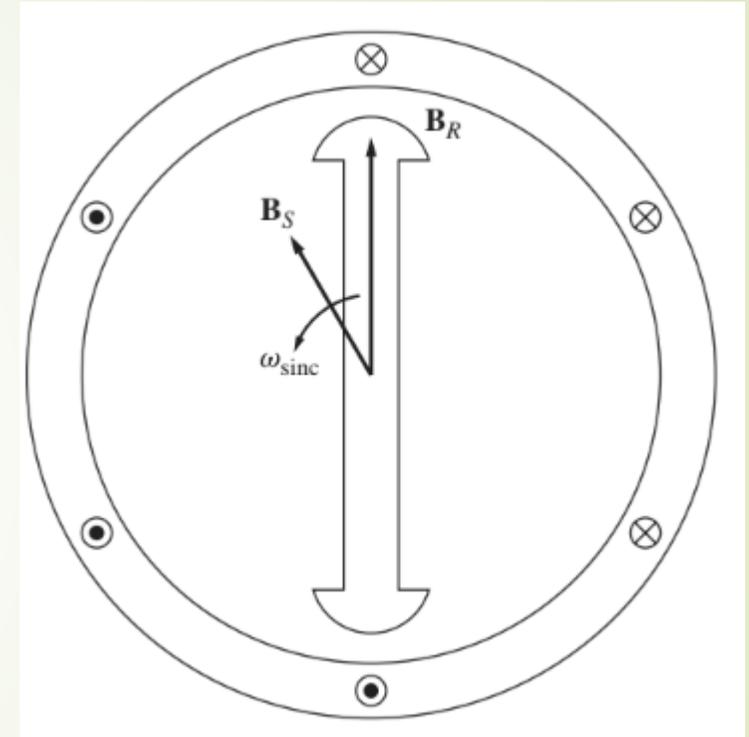
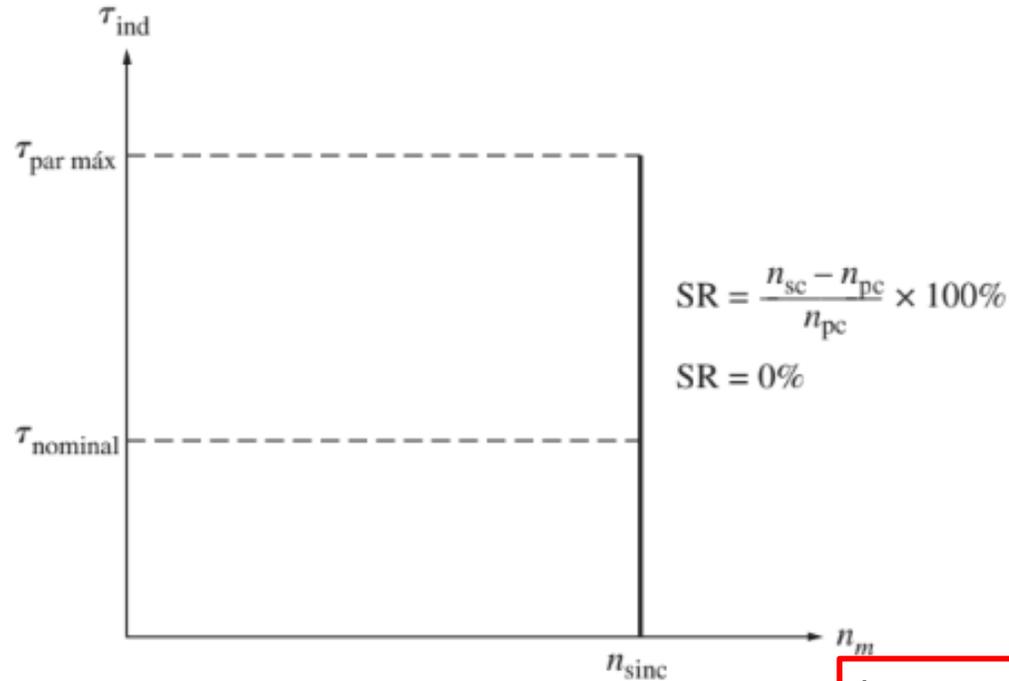
Bobinado de armadura

$$E_A = V_1 - (jX_S + R_A)I_S \quad (1)$$

$$E_A = KI_f \quad (2)$$

$$I_f = \frac{V_f}{(R_f + r_f)} \quad (3)$$

5. Motores síncronos: rotor bobinado y de imanes permanentes



$$\tau_{ind} = k B_R B_{net} \sin \delta$$

$$\tau_{ind} = \frac{3 V_\phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_S}$$

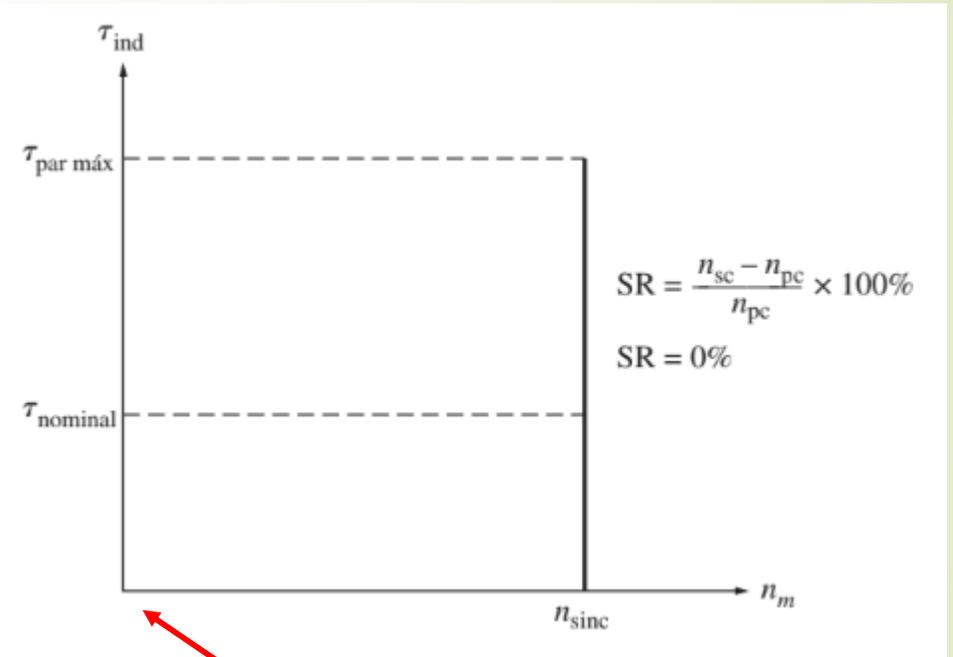
Los motores sincrónicos poseen la capacidad de variar el par sin variar la velocidad del eje.

Es decir que regulando la frecuencia de alimentación es posible regular el par entregado en un rango amplio.

5. Motores síncronos: rotor bobinado y de imanes permanentes

Métodos de arranque

1. Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor lo suficientemente bajo como para que el rotor pueda acelerar y fijarse a él durante un semi-ciclo de la rotación del campo magnético. Este objetivo se puede lograr con la reducción de la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada.
2. Utilizar un motor primario externo para acelerar el motor síncrono hasta velocidad síncrona, pasar por el procedimiento de entrada en sincronía y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagar o desconectar el motor principal para convertir la máquina síncrona en un motor.
3. Utilizar devanados de amortiguamiento. Esta técnica consta de la colocación de devanados en cortocircuito en el rotor en los cuales se induce una corriente y por consiguiente es posible arrancar el motor (similar a un MI).



Problema principal: ¡el Par de arranque es cero!



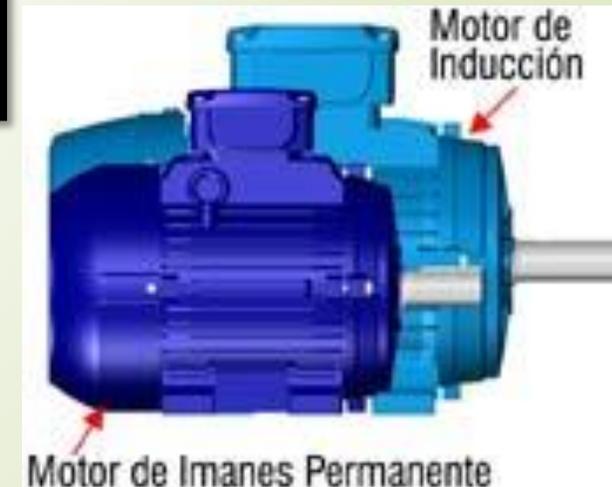
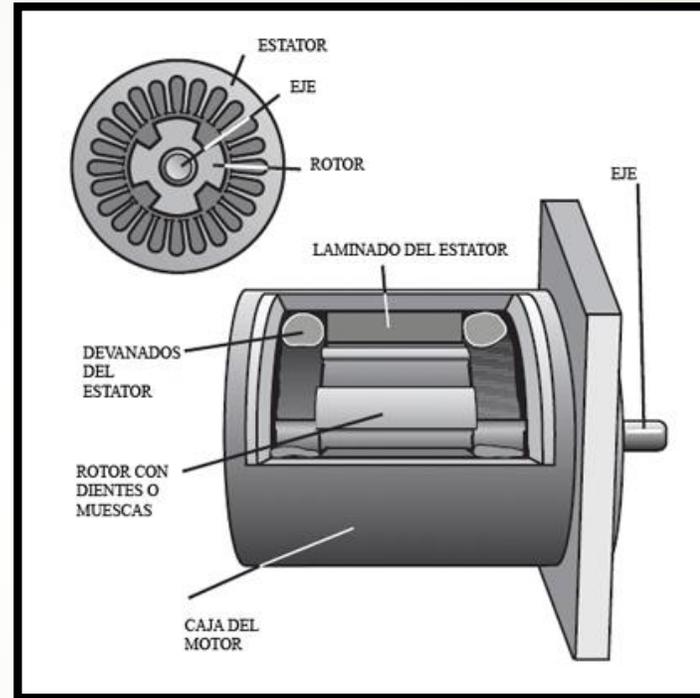
6. Motores sincrónicos de Imanes Permanentes

Tipos y características principales

6. Motores sincrónicos de Imanes Permanentes

La diferencia con el motor sincrónico anterior, radica en la formación del campo magnético del rotor. En este caso, el campo proviene de imanes permanentes (generalmente se utiliza neodimio).

Esto evita pérdidas de calentamiento en el rotor, por lo que es posible mejorar tanto su potencia específica como su densidad de potencia.

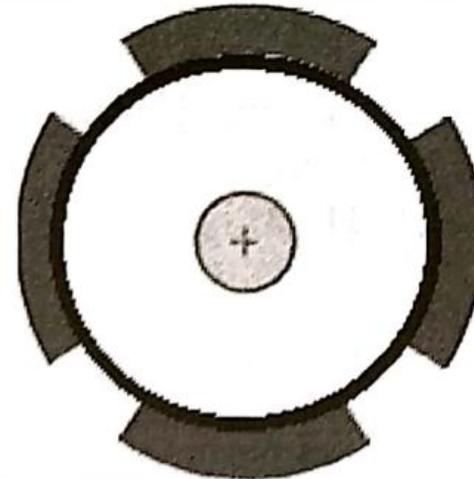


6. Motores sincrónicos de Imanes Permanentes

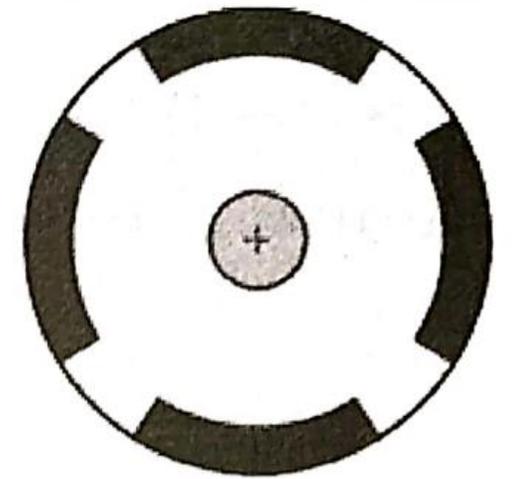
El principio de funcionamiento es similar al motor sincrónico anterior, con la diferencia que el flujo magnético queda determinado por la disposición de los IP.

Existen varias formas de introducir los imanes en el rotor, pueden ser de **montaje superficial** o de **montaje interior**

Montaje superficial



Montaje interior





6. Motores sincrónicos de Imanes Permanentes

Ventajas:

- Menor peso y tamaño por unidad de potencia.
- Bajo ruido.
- Buena eficiencia.

Desventajas:

- Los IP aumentan el costo y corren riesgo de desmagnetización.
- Necesita controlador para la operación ya que al igual que el motor sincrónico bobinado, necesita asistencia en el arranque.

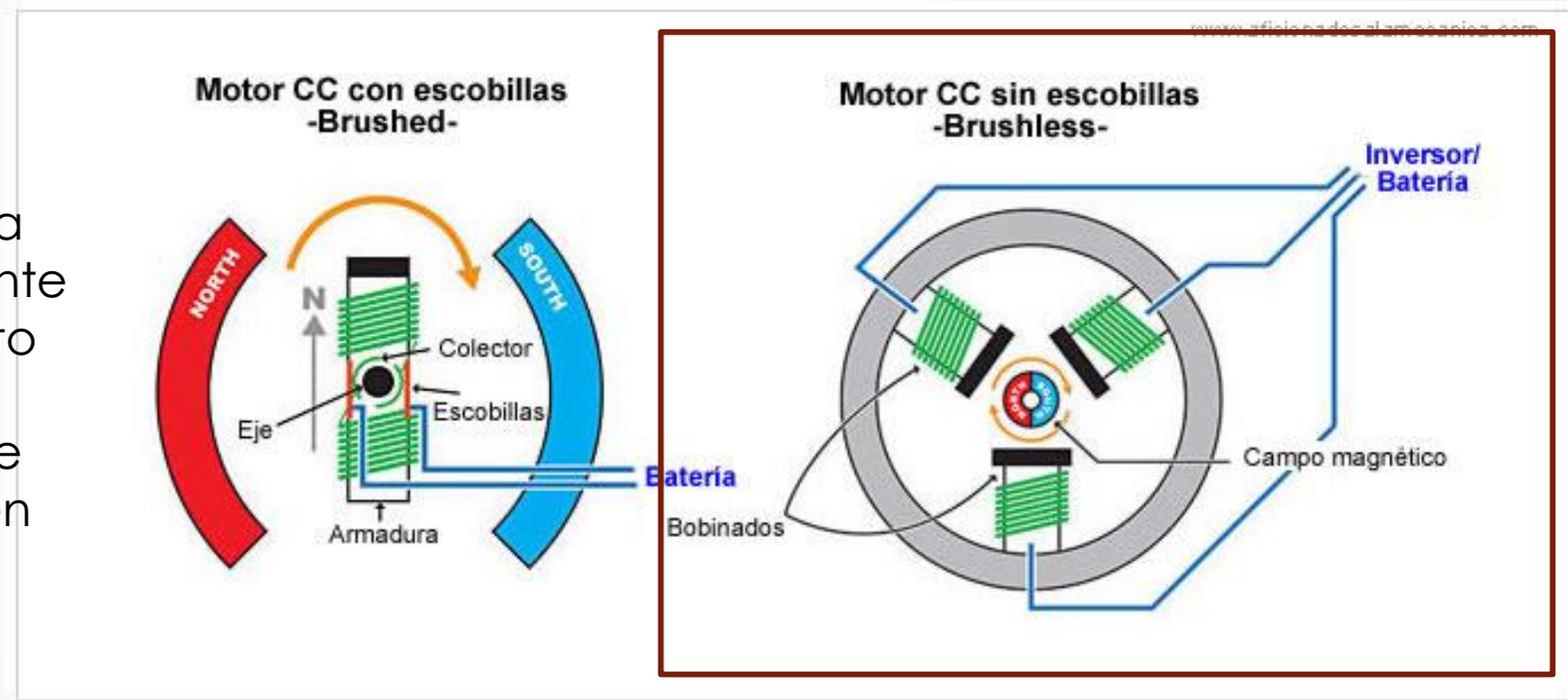


7. Motores DC sin escobillas

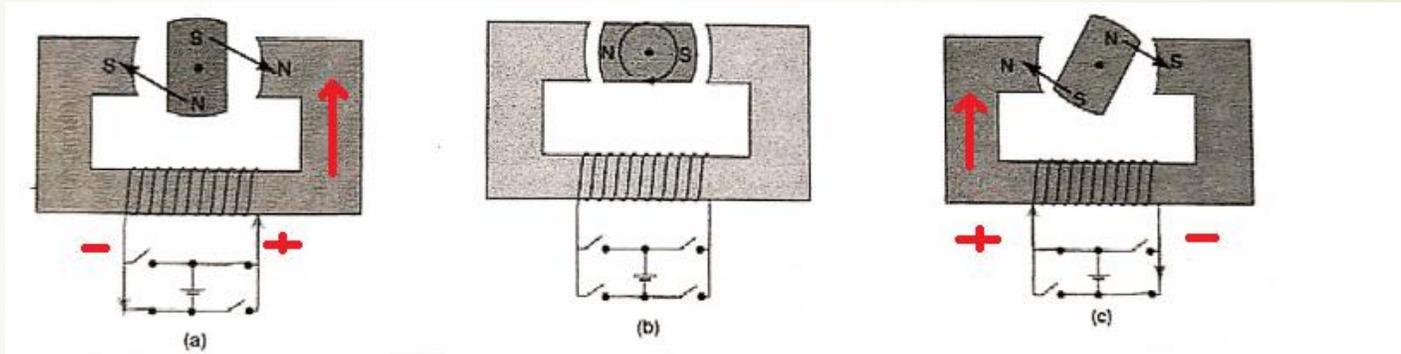
Características principales

7. Motores DC sin escobillas

El motor DC sin escobillas, es considerado de AC ya que el la corriente del estator es AC. Si bien la alimentación es a partir de una fuente DC, requiere para su funcionamiento un convertidor que controle la polaridad de la corriente y por ende del campo magnético resultante, en función de la posición del rotor.

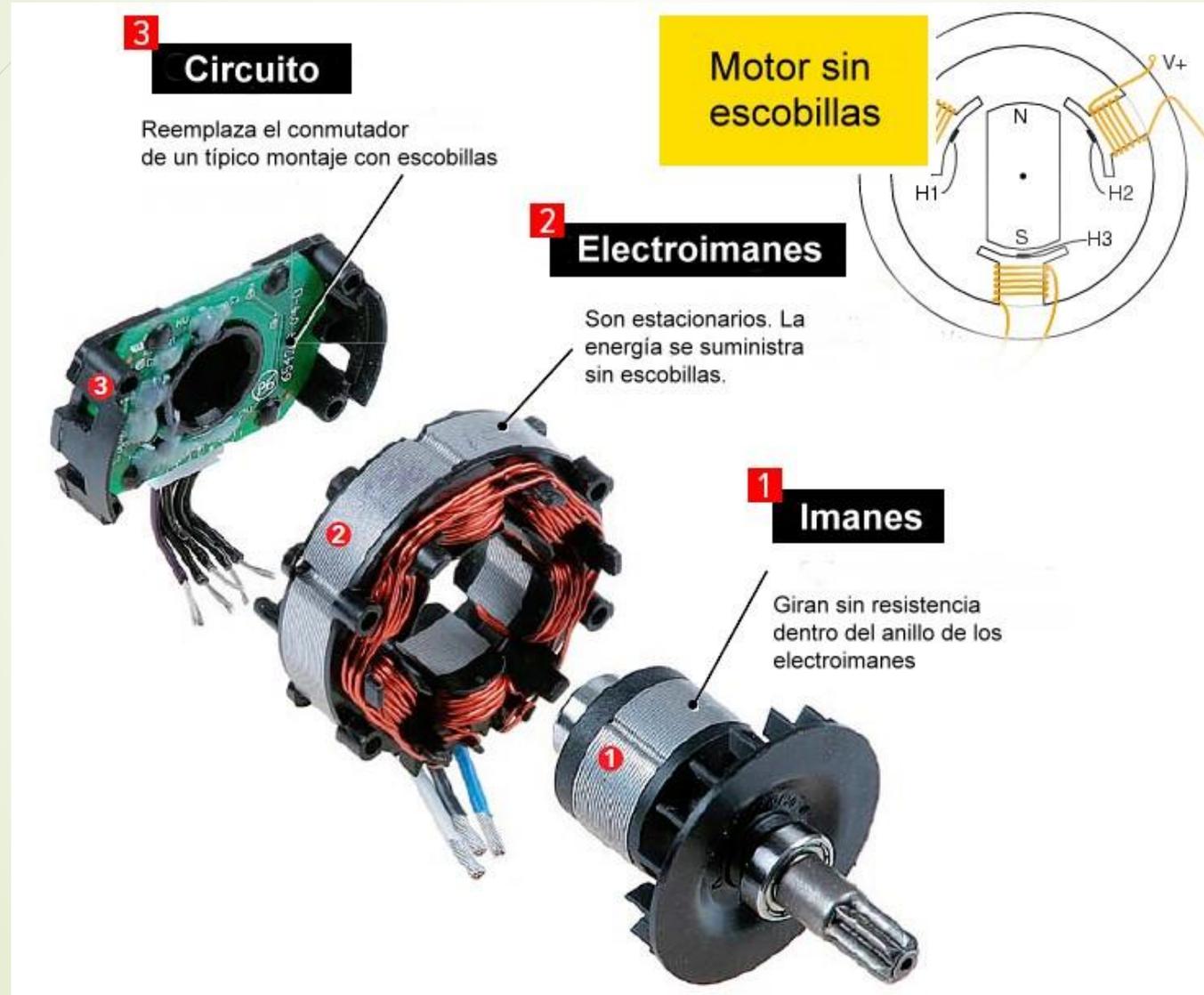


7. Motores DC sin escobillas



El convertidor controla el sentido del flujo magnético mediante el control de la apertura y cierre de los interruptores del convertidor.

7. Motores de continua sin escobillas



7. Motores de continua sin escobillas

Ventajas

- Alto rendimiento ya que los IP no consumen potencia a diferencia del Motor DC clásico.
- Alta densidad de potencia debido a la alta densidad de flujo magnético de los IP.
- Fácil refrigeración para la evacuación del calor generado en el rotor.
- Bajo mantenimiento, debido a que no tiene escobillas
- Fácil control, como un motor de continua.

Desventajas

- Alto costo debido a los IP
- Rango limitado de potencia cte.
- Riesgo de desmagnetización de los IP
- No logra alcanzar altas velocidades.



8. Motores de reluctancia variable

Características principales

8. Motores de reluctancia variable

El motor de reluctancia variable es uno de los tipos de motores más antiguos, se encuentra a la par con el motor DC. Pero el desarrollo de este último y posteriormente el MI, postergaron su evolución tecnológica hasta el año 1970 donde resurgen de la mano de la electrónica de potencia.

Los motores de reluctancia variable no requieren de un rotor bobinado ni la incorporación de imanes permanentes, su rotor está conformado únicamente con un material de hierro dulce de baja permeabilidad magnética.

Esta característica lo hace más económico y amigable con el medioambiente.



8. Motores de reluctancia variable

El número de polos del rotor tiene que ser tal que impida, para cualquier posición, la alineación completa con todos los polos estáticos, ya que siempre ha de existir algún polo rotórico que pueda alcanzar el alineamiento. Por lo tanto han de cumplirse las condiciones siguientes:

$$N_s = pm$$
$$N_r = p(m - 1)$$

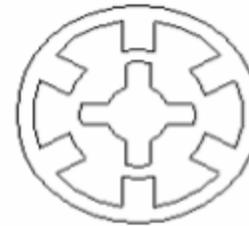
Donde:

N_s es el número de polos del estator

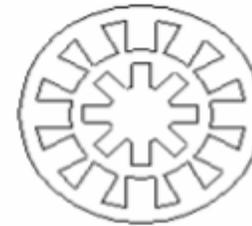
N_r es el número de polos del rotor

p es el par de polos del motor por fase

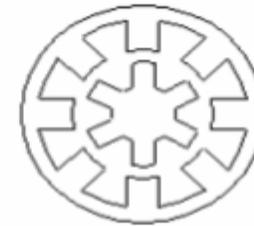
m es el número de fases de la máquina



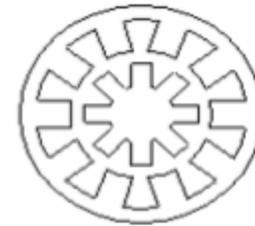
3 Fases 6/4



3 Fases 12/8



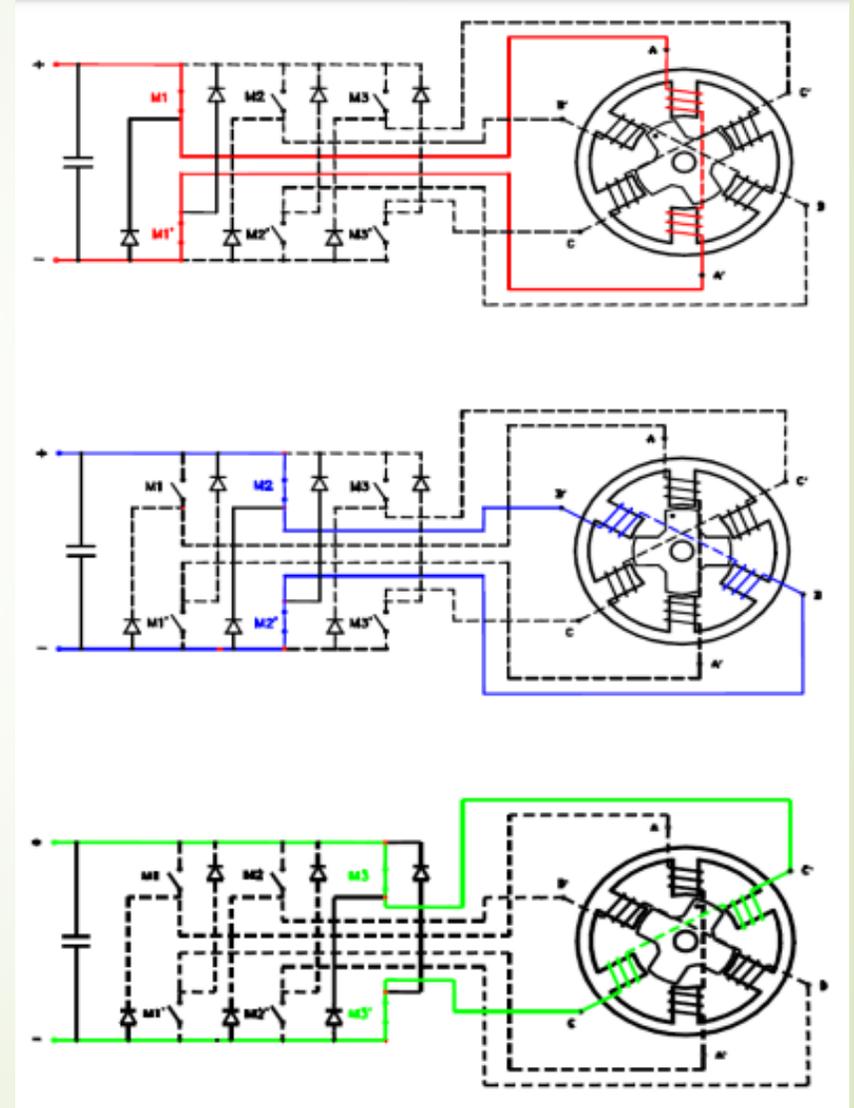
4 Fases 8/6



5 Fases 10/8

8. Motores de reluctancia variable

- En las MRCs, la producción del par y el consecuente movimiento se produce como consecuencia de la existencia de una reluctancia variable en el entrehierro existente entre el rotor y el estator de la máquina. Cuando una fase del estator se energiza, se genera un único campo magnético y aparece un par reluctante como consecuencia de la tendencia del rotor a desplazarse hacia la posición de mínima reluctancia. Este fenómeno es análogo, a la fuerza que atrae el hierro o el acero hacia un electroimán o un imán permanente. Estas máquinas se diferencian de las máquinas de inducción y los motores DC, en las que el movimiento se produce por la interacción de dos campos magnéticos, uno generado en el estator y otro generado en el rotor.



8. Motores de reluctancia variable

El par de MRV deriva fundamentalmente de la variación de reluctancia y depende cuadráticamente de la corriente.

T par

I corriente estática

Θ es la posición del rotor respecto al estator

L es la inductancia ($L = \frac{N^2}{R}$)

$$T = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \cdot i^2$$

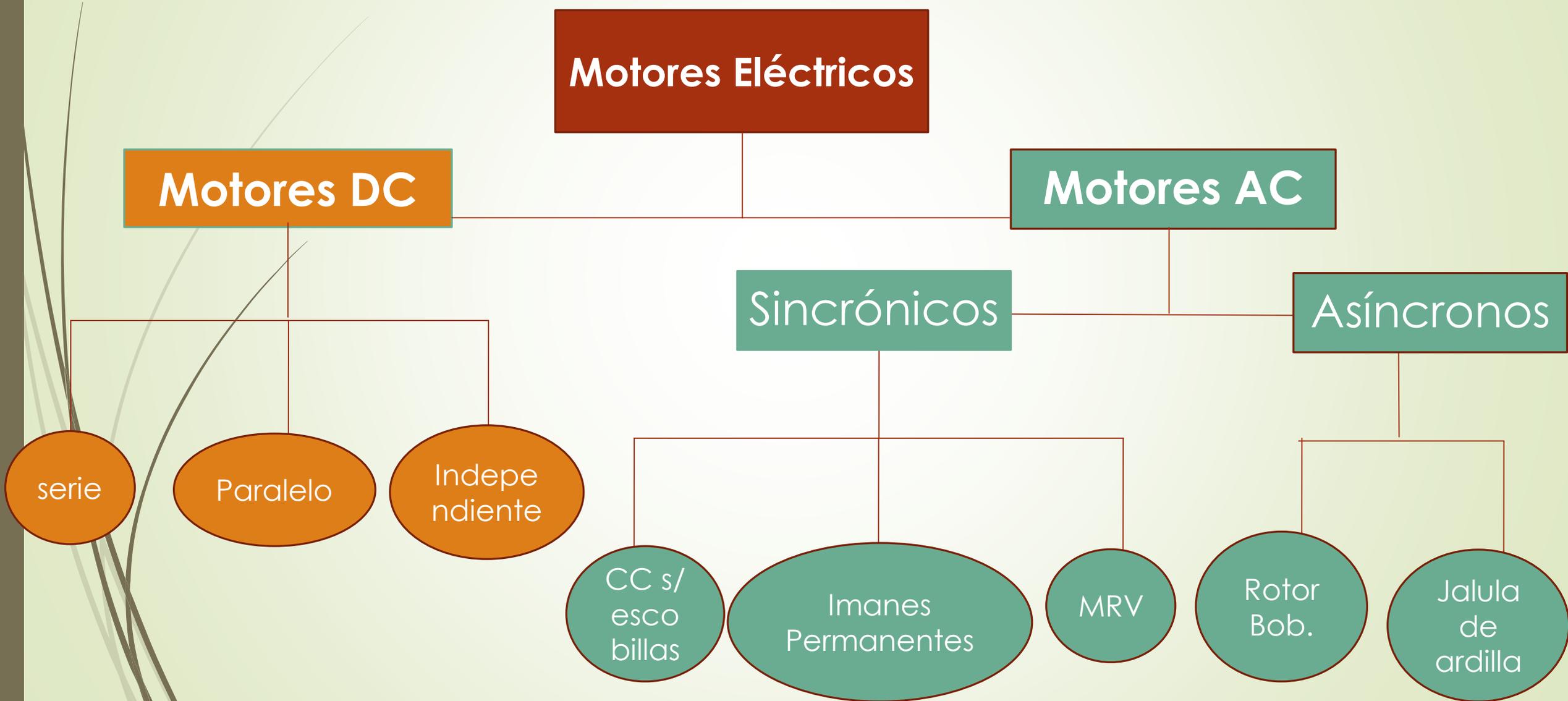
8. Motores de reluctancia variable

- ▶ El MRV, es una buena solución para aplicaciones como los VE (velocidad variable)
- ▶ Fundamentalmente por su bajo costo, estructura robusta, alto rendimiento en un amplio rango de velocidades y simplicidad en el control.
- ▶ Como desventajas se pueden destacar el ruido y las altas vibraciones.



9. Clasificación de motores eléctricos para la tracción

9. Clasificación de los motores eléctricos para la tracción



9. Ventajas y desventajas de cada tecnología

<i>Tipo de motor</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Motor DC	Control electrónico simple y de bajo costo	Incremento del volúmen debido a las escobillas
	Fácil control del flujo magnético con estator bobinado	Mayor mantenimiento
	Tecnología de fabricación madura	Baja potencia específica
		Baja velocidad máxima
		Emisiones electromagnéticas altas debido al conmutador
		Bajo rendimiento
Motor de Inducción	Robusto	Baja densidad de potencia
	Fácil fabricación	Dificultad en la evacuación del calor del rotor
	Bajo costo	Menor rendimiento respecto al motor sincrónico
	Bajo mantenimiento	
	Fiabilidad	

9. Clasificación de los motores eléctricos para la tracción.

SIP: Sincrónico de Imanes
Permanentes
SRB: Sincrónico de Rotor
Bobinado
MI: Motor de Inducción

**Actualmente el 76,5% utiliza
Motores sincrónicos de Imanes
Permanentes**

Marca	Modelo	Tipo de motor utilizado
BYD	E6	SIP
BYD	T3	SIP
BMW	I3	SIP
Chevrolet	Spark EV	SIP
Chevrolet	Bolt	SIP
Fiat	500e	SIP
Ford	Focus EV	SIP
Honda	Fit EV	SIP
JAC	S2	SIP
Kia	Sould EV	SIP
Mitsubishi	i-MiEV	SIP
Nissan	Leaf	SIP
Renault	Kangoo	SRB
Renault	Zoe	SRB
Tesla	Model S	MI
Toyota	RAV 4 EV	MI
Volkswagen	E-up!	SIP

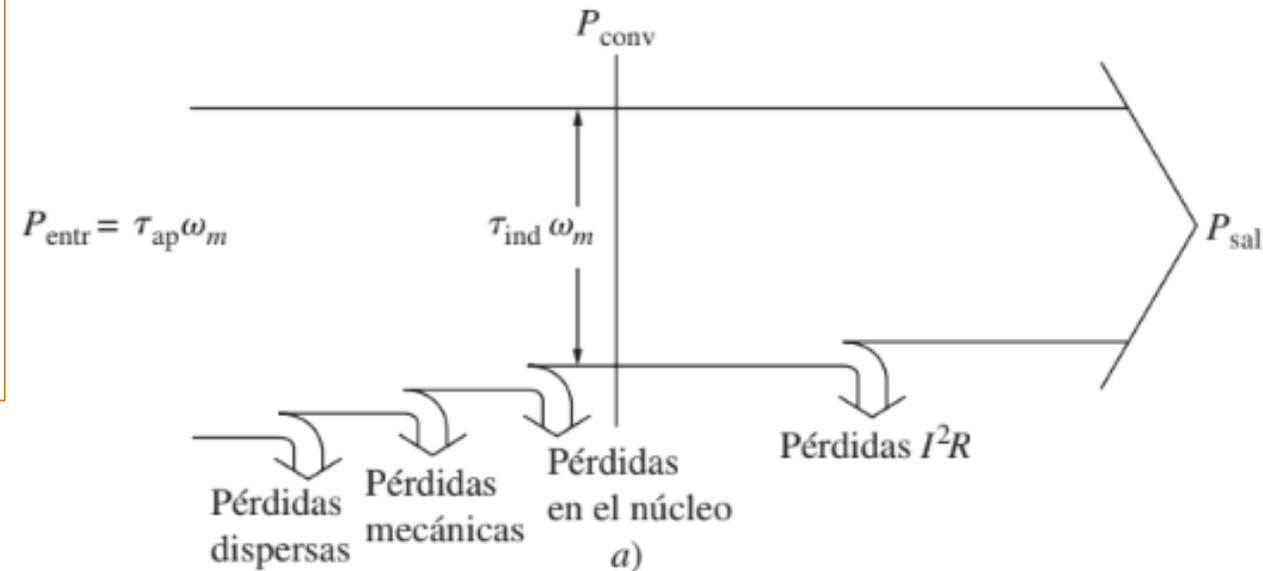


10. Rendimiento de las máquinas eléctricas

Factores pérdidas principales

10. Rendimiento de las máquinas eléctricas

- 1- Pérdidas Joule (calor)
- 2- Pérdidas en el núcleo (Hierro y Foucault)
- 3- Pérdidas mecánicas
- 4- Pérdidas dispersas



En cualquier caso la suma de estas pérdidas no supera el 15% del consumo total a carga nominal.

$$\eta = \frac{P_{\text{entr}} - P_{\text{pérd}}}{P_{\text{entr}}} \times 100\%$$

10. Rendimiento de las máquinas eléctricas

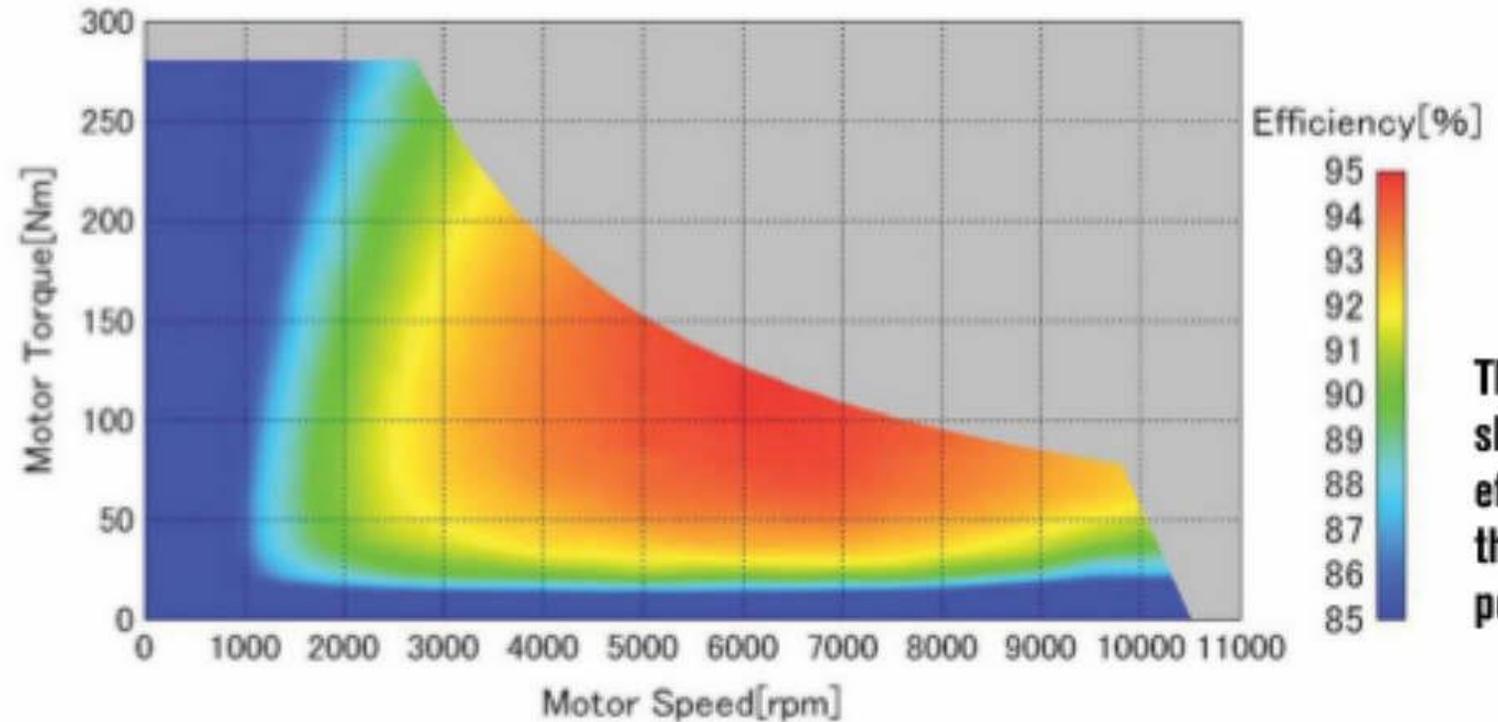
Tipo de motor	Eficiencia pico (%)	Eficiencia al 10% de carga (%)
Motor DC	85-90	80-85
Motor DC sin escobillas	>95	70-80
Motor de inducción	>90	>90
Motor sincrónico	>92	80-85
Reluctancia variable	<95	>90

10. Rendimiento de los motores eléctricos

Eficiencia del motor eléctrico del Nissan Leaf (SIP)

1- Eficiencia mínima de 85% para un amplio rango de carga.

2- la máxima eficiencia se consigue con cargas medias y altas a velocidades elevadas.



10. Rendimiento de los motores eléctricos

- Los vehículos híbridos alcanzan rendimientos de conversión del combustible en trabajo útil del 24% mejorando en un 42% el rendimiento de los vehículos tradicionales (17%)
- Por otro lado los VE consiguen un rendimiento de conversión global del 87%, prácticamente quintuplican el valor respecto a los Vehículos con motor de combustión interna y triplican a los Vehículos Híbridos.

VEHÍCULO MCIA MEP (gasolina)		RENDIMIENTO
MOTOR BASE (η_{mot})		0,18
RENDIMIENTO DE TRANSMISIÓN (η_{trans})		0,95
RENDIMIENTO DE CONVERSIÓN DEL COMBUSTIBLE EN TRABAJO ÚTIL		0,17
VEHÍCULO HÍBRIDO		
Ganancia de rendimiento por inyección directa (G_{ID})		0,30
Ganancia de rendimiento del ciclo Atkinson (G_{Atk})		0,15
Ganancia no mariposay fricción reducida (G_b)		0,15
Ganancia de rendimiento por optimización de la hibridación (G_{opt})		0,20
RENDIMIENTO DEL MOTOR TÉRMICO OPTIMIZADO ($\eta_{mot,hb}$)		0,37
RENDIMIENTO GENERADOR (η_{gen})		0,95
RENDIMIENTO CARGA BATERÍA ($\eta_{bat,car}$)		0,85
RENDIMIENTO DESCARGA BATERÍA ($\eta_{bat,descar}$)		0,85
MOTOR ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA (η_{me})		0,90
Ganacia rendimiento por frenada regenerativa (G_{reg})		0,20
RENDIMIENTO DE TRANSMISIÓN (η_{trans})		0,95
RENDIMIENTO DE CONVERSIÓN DEL COMBUSTIBLE EN TRABAJO ÚTIL		0,24
VEHÍCULO ELÉCTRICO		
RENDIMIENTO DESCARGA BATERÍA ($\eta_{bat,descar}$)		0,85
MOTOR ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA (η_{me})		0,90
Ganacia rendimiento por frenada regenerativa (G_{reg})		0,20
RENDIMIENTO DE TRANSMISIÓN (η_{trans})		0,95
RENDIMIENTO DE CONVERSIÓN DEL COMBUSTIBLE EN TRABAJO ÚTIL		0,87

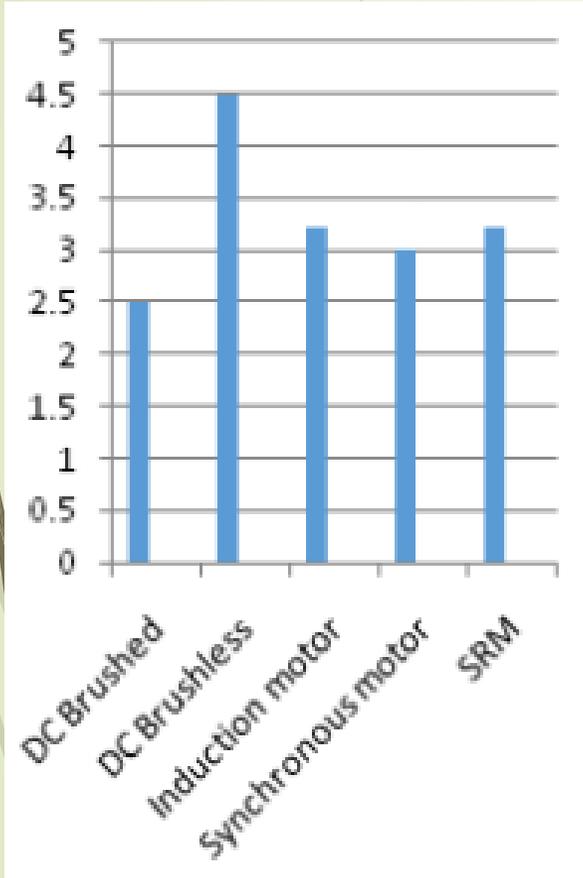


11. Criterios de selección de los motores eléctricos

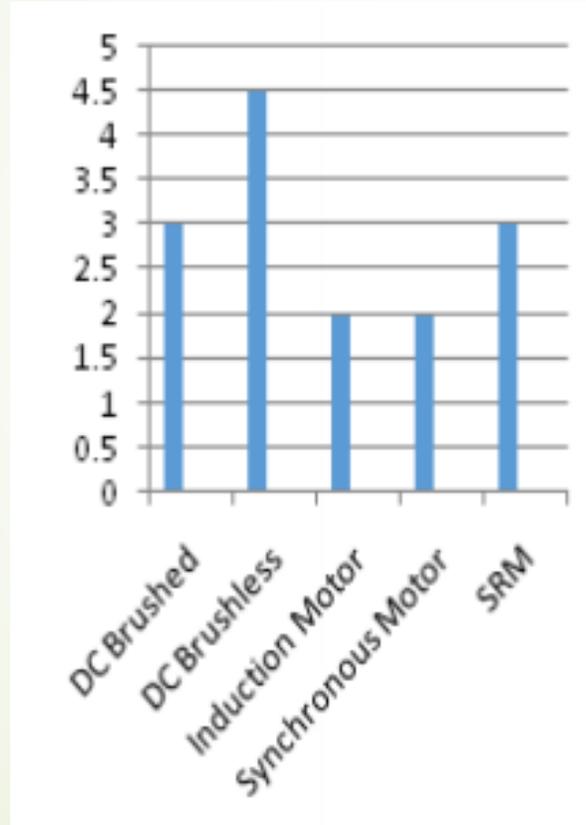
Criterios principales a la hora de seleccionar el motor adecuado para un determinado VE.

- Robustez
- Alta relación par/inercia, de forma de permitir buenas aceleraciones
- Alta densidad de par y de potencia
- Alto par en el arranque en pendiente y alta potencia en carretera.
- Amplio rango de velocidades, con potencia constante alrededor de 3 o 4 veces la velocidad de base siendo un buen compromiso entre el requerimiento de pico, de par y del valor nominal de tensión-intensidad del inversor.
- Alto rendimiento en un amplio rango de velocidades y de par, incluso a bajos pares.
- Bajo ruido, mantenimiento y coste.
- Bajas emisiones electromagnéticas
- Potencia constante en un amplio régimen de giro

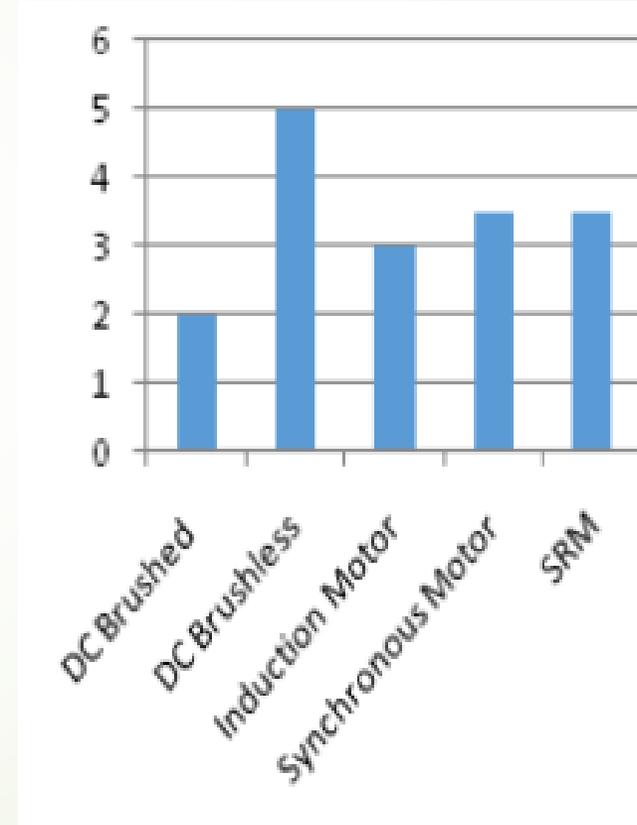
11. Criterios de selección de los motores eléctricos



Potencia específica



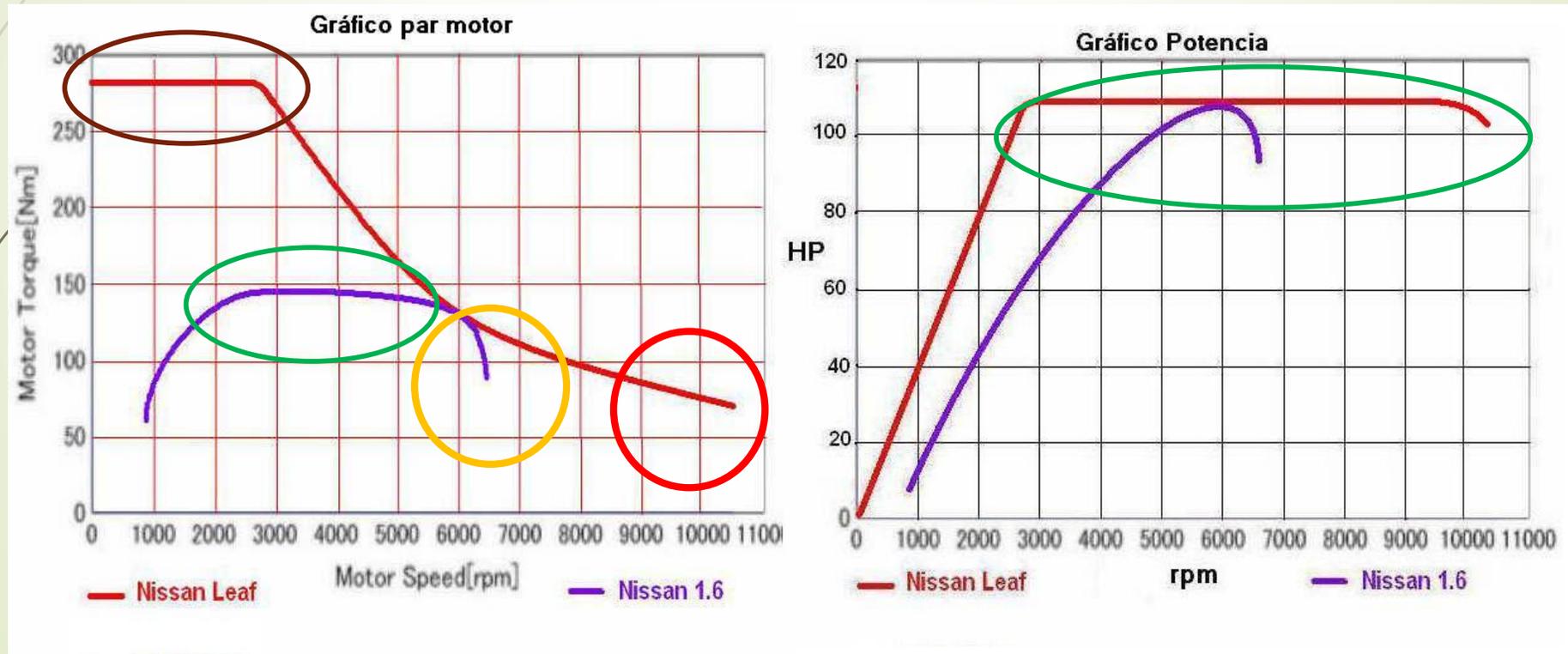
Costo del motor



Costo del controlador

11. Clasificación de los motores eléctricos para la tracción.

Comparación motor Nissan





¡ Muchas
Gracias !

Ing. Federico Arismendi