



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE MISIONES



FACULTAD
DE INGENIERÍA
UNaM

2024 - año de la defensa de la vida, la libertad y la propiedad

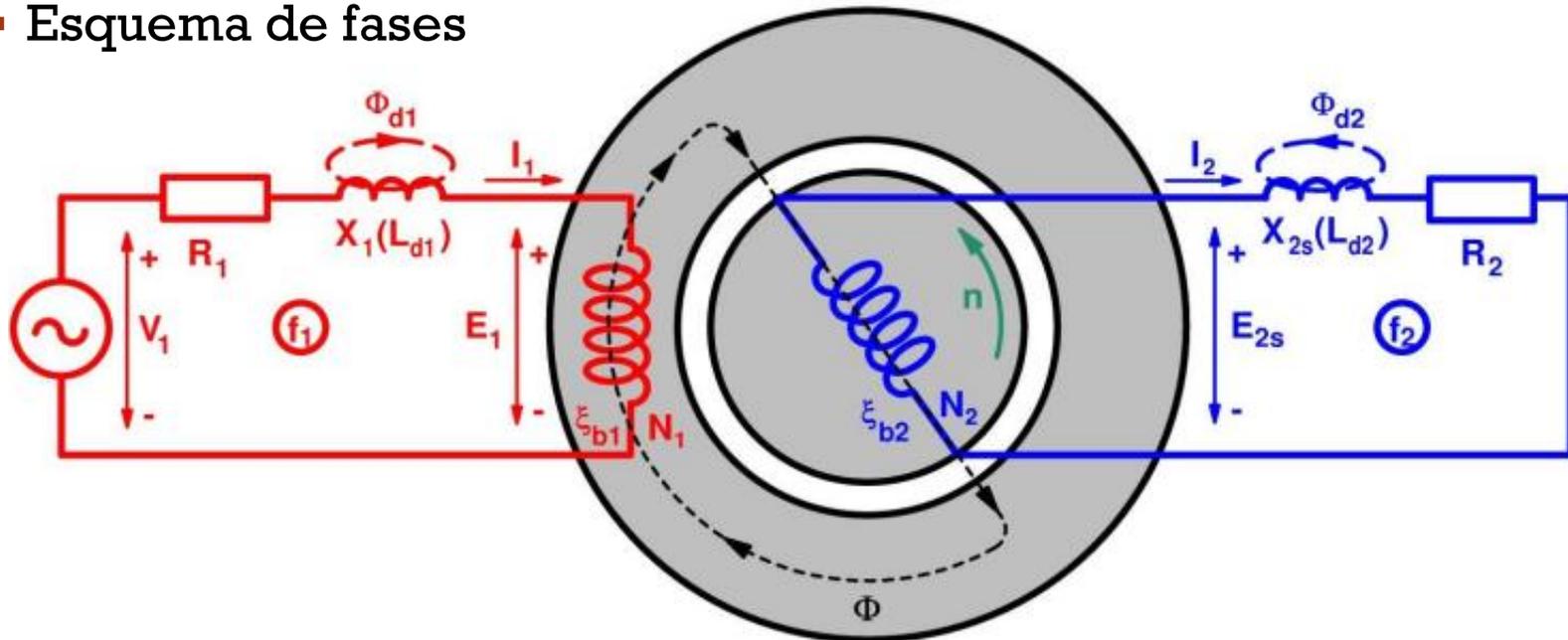
ACTUADORES ELECTROMECAÑICOS

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Esquema de fases

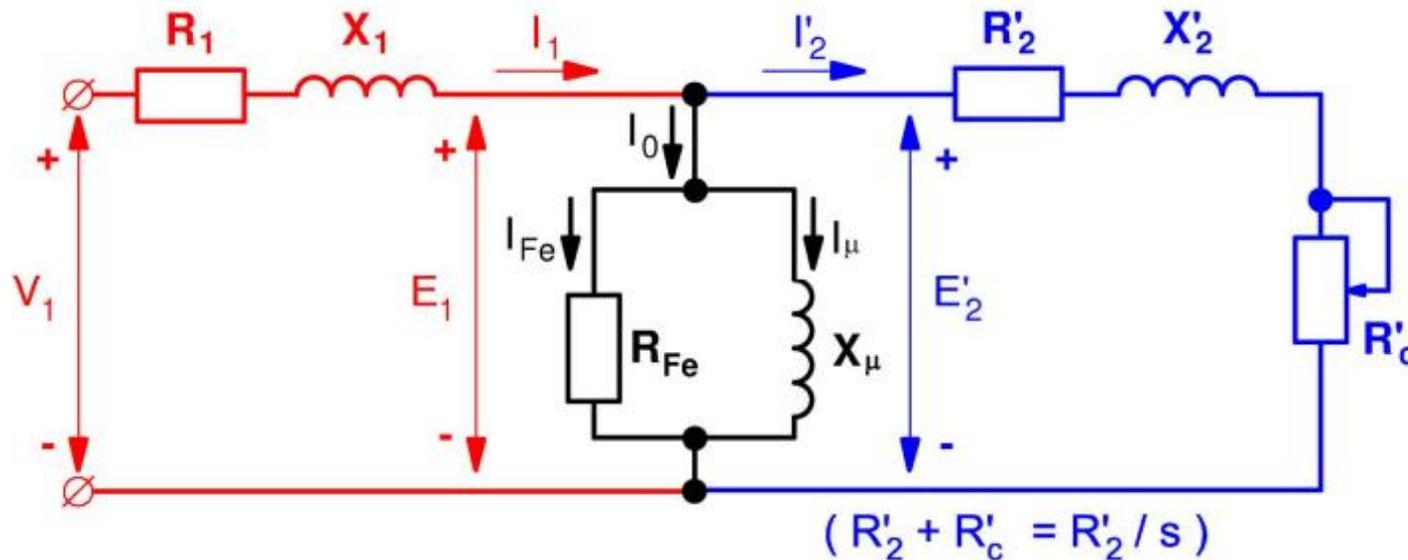


las magnitudes del rotor f_2 , E_{2s} y X_{2s} son funciones del deslizamiento s y, en consecuencia, varían con la velocidad de giro n de la máquina. En el caso de que el motor esté parado, estas magnitudes pasan a ser, f_1 , E_2 y X_2 , respectivamente.



CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito equivalente exacto

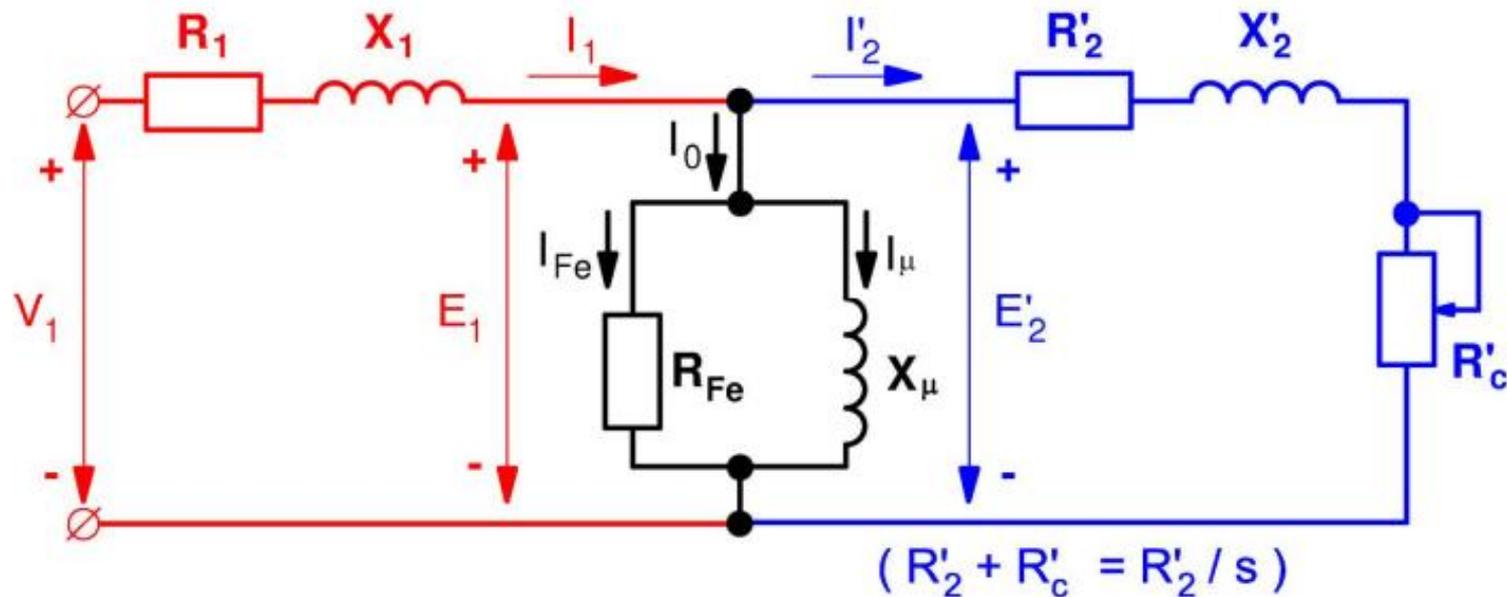


El rotor equivalente se elige de forma que su devanado sea idéntico al del estator; es decir, con el mismo número de fases m_1 , número de espiras efectivas N_1 y factor de bobinado ξ_{b1} que el estator, e inmóvil para que sus corrientes tengan la misma frecuencia f_1 que las del estator. Este rotor equivalente se denomina rotor reducido al estator.



CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito equivalente exacto

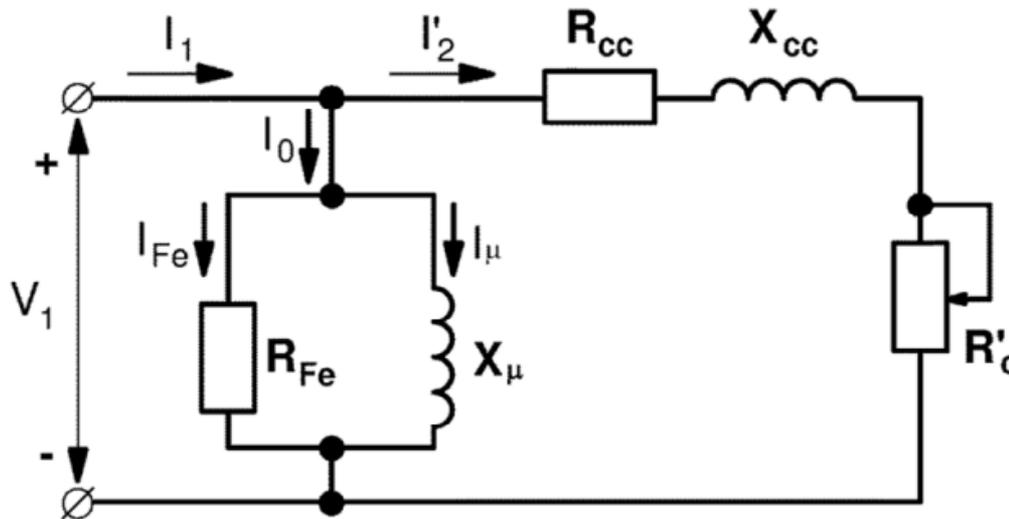


- La corriente de vacío I_0 de un motor asíncrono no es tan pequeña como la de un transformador (para motores de potencia superior a 10 kW la corriente de vacío I_0 toma valores del 20 al 50% de la corriente asignada I_{1N}), porque el circuito magnético de un motor tiene mayor reluctancia debido a la existencia de entrehierro



CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito Equivalente Aproximado



Debe hacerse constar que este circuito arroja cálculos superiores a los reales.

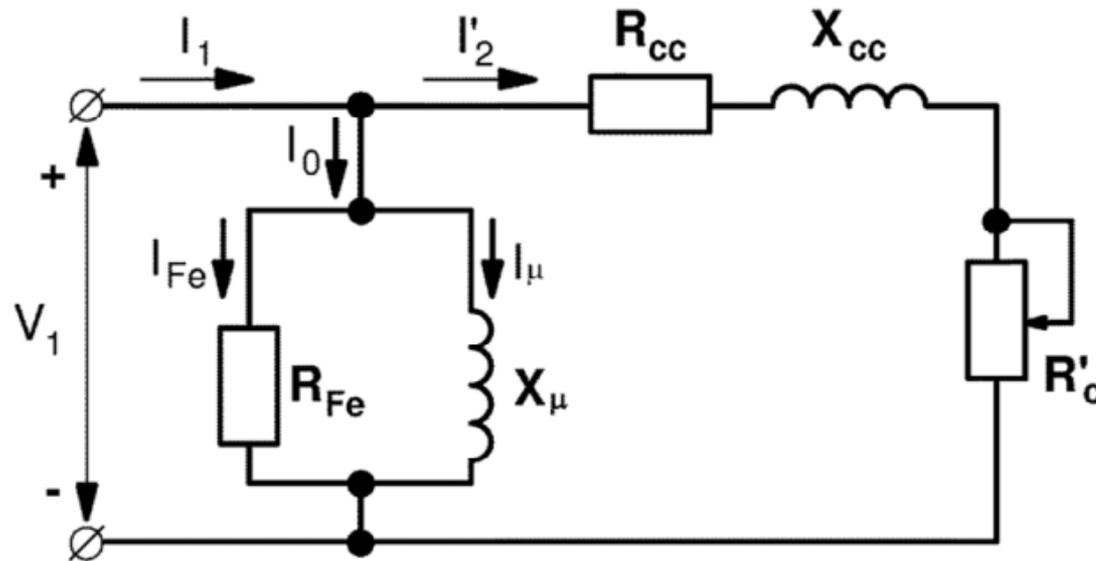
$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{cc} + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

$$R'_c = R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right)$$



CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito Equivalente Aproximado



$$R'_c = R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right)$$

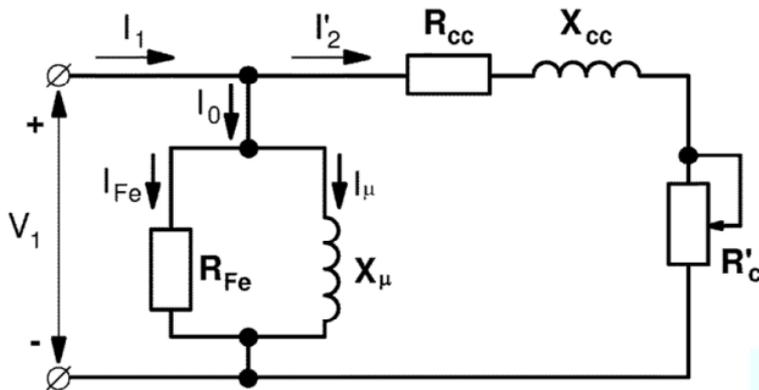
$$P_{mi} = m_1 R'_c I_2'^2 = m_1 R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2 = m_1 R'_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) I_2'^2$$

$$P_u = P_{mi} - P_m$$



CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Par de Rotación



$$T = \frac{P_u}{2\pi \frac{n}{60}}$$

$$T = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n}{60}}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \Rightarrow n = n_1 (1 - s)$$

$$T = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n_1}{60} (1 - s)}$$

$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

$$T = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

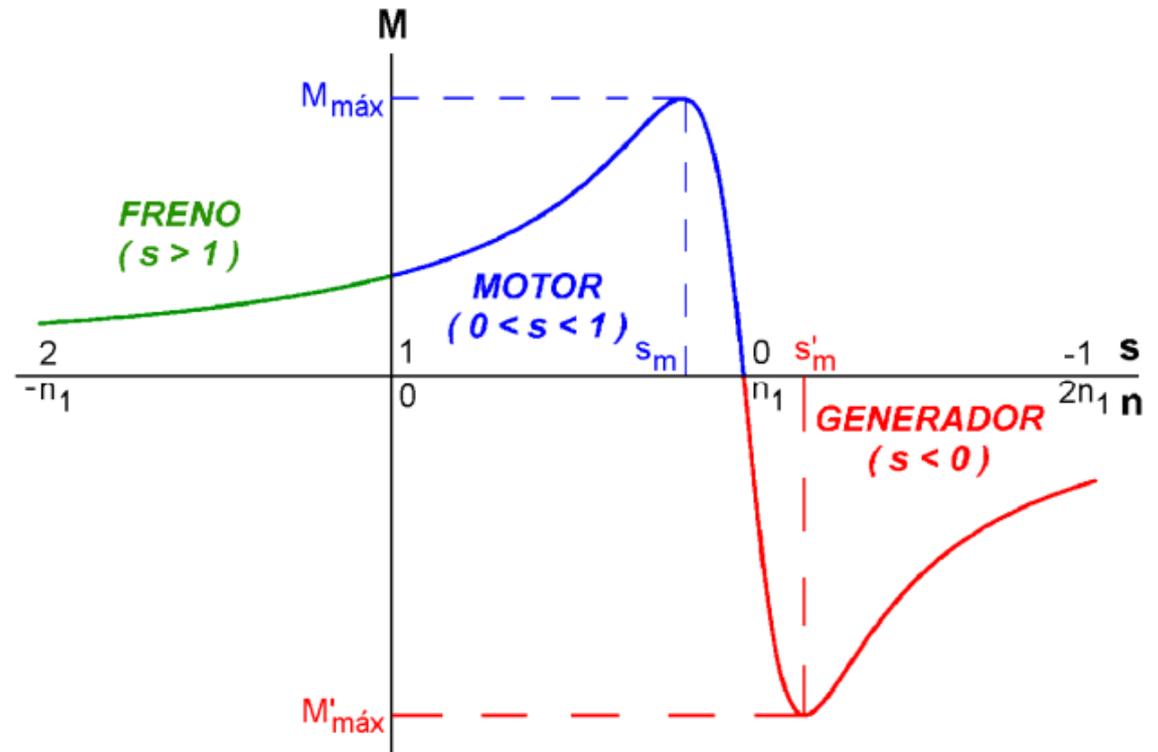
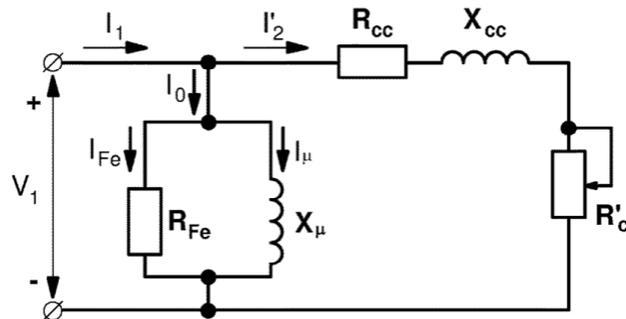


CURVA PAR-VELOCIDAD

- Par de Rotación

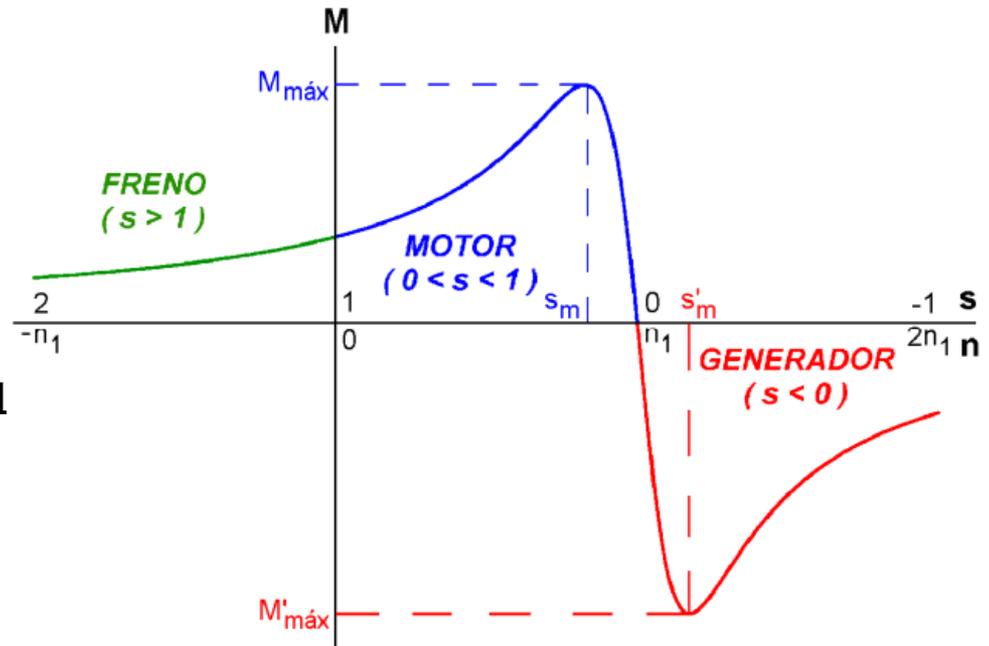
(Curva par-velocidad de una máquina asíncrona polifásica a V_1 y f_1 constantes)

$$T = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$



CURVA PAR-VELOCIDAD

- Motor:** En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor varía entre 0 y la de sincronismo n_1 , lo que quiere decir que el deslizamiento s varía entre 1 y 0. Por lo tanto, funcionando como motor la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de menor valor que ésta.

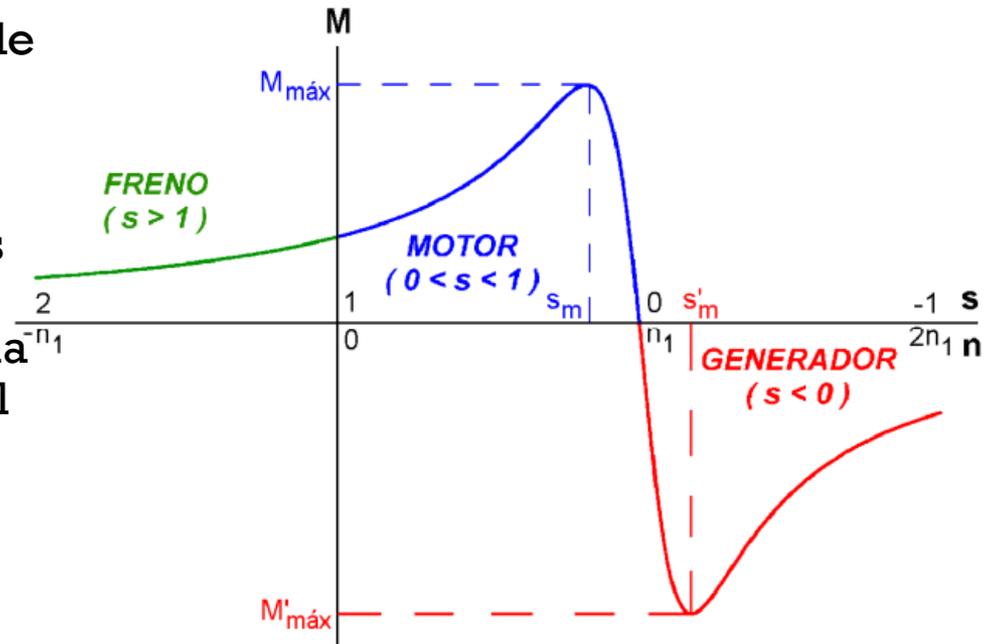


En este caso tanto el par como la velocidad tienen signo positivo. Por lo tanto, el par está a favor de la velocidad y se trata de un par motor. Es este par el que provoca el giro de la máquina.



CURVA PAR-VELOCIDAD

- Generador:** En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor es superior a la de sincronismo n_1 , lo que quiere decir que el deslizamiento s es negativo. Por lo tanto, funcionando como generador la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de mayor valor que ésta.



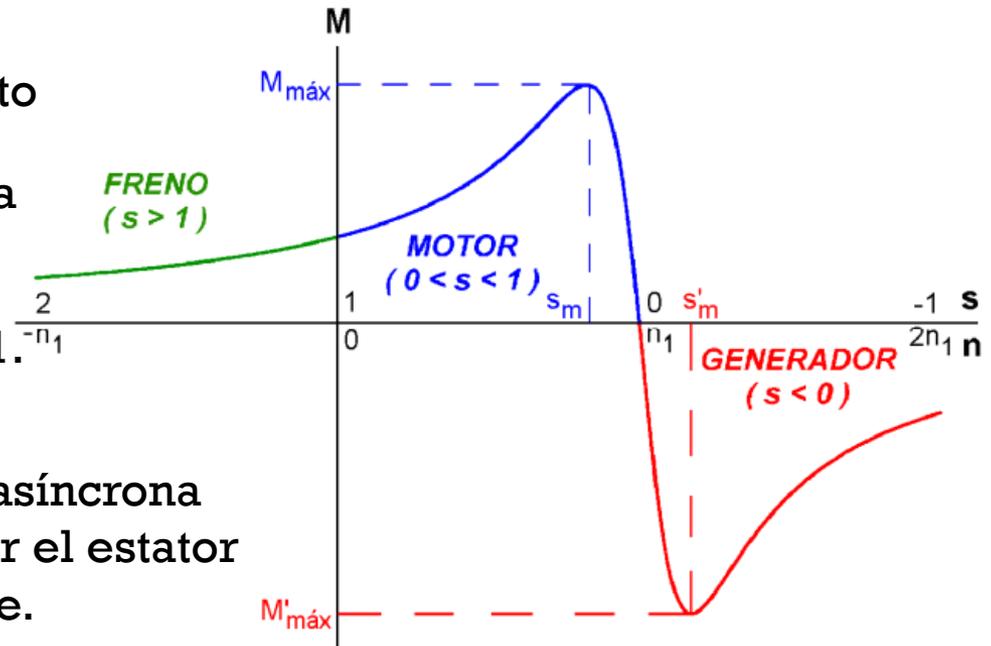
En este caso el par es negativo y la velocidad es positiva. Por lo tanto, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se trata de un par de frenado. Deberá existir otro par, por ejemplo el producido por un motor de gasolina acoplado al mismo eje que la máquina asíncrona, que mueva al grupo y sea el que lo esté obligando a girar a una velocidad superior a la de sincronismo.



CURVA PAR-VELOCIDAD

- **Freno a contracorriente:** En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor es negativa, de sentido contrario a la de sincronismo n_1 , lo que quiere decir que el deslizamiento s es mayor que 1.

funcionando como freno a contracorriente una máquina asíncrona absorbe potencia eléctrica por el estator y potencia mecánica por su eje.



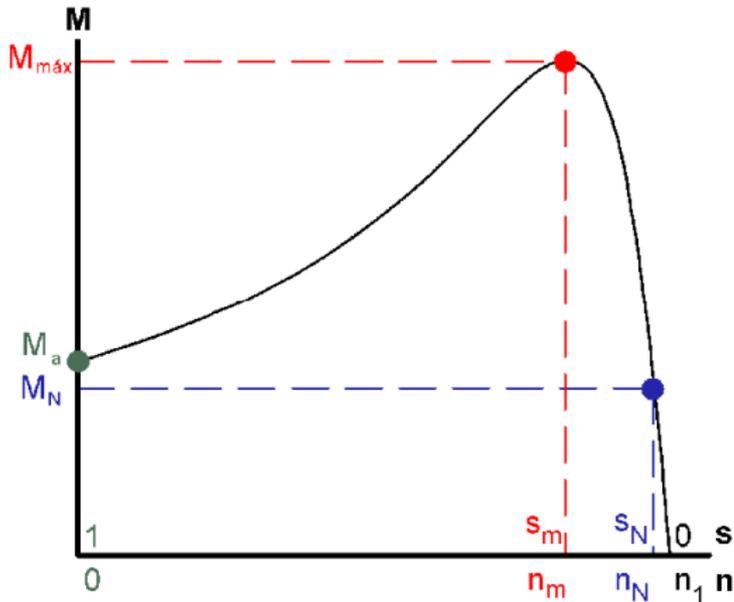
La totalidad de la suma de estas dos potencias absorbidas se disipa en forma de calor entre todas las pérdidas de la máquina, la cual se puede llegar a calentar excesivamente.

En este caso el par es positivo y la velocidad negativa



CURVA PAR-VELOCIDAD

Curva de par - velocidad



$$M = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s}}{\frac{2\pi}{60} n_1 \left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right)}$$

42

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

43

$$M_{\text{máx}} = \pm \frac{m_1}{\frac{2\pi}{60} n_1} \frac{V_1^2}{2 \left(\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right)}$$

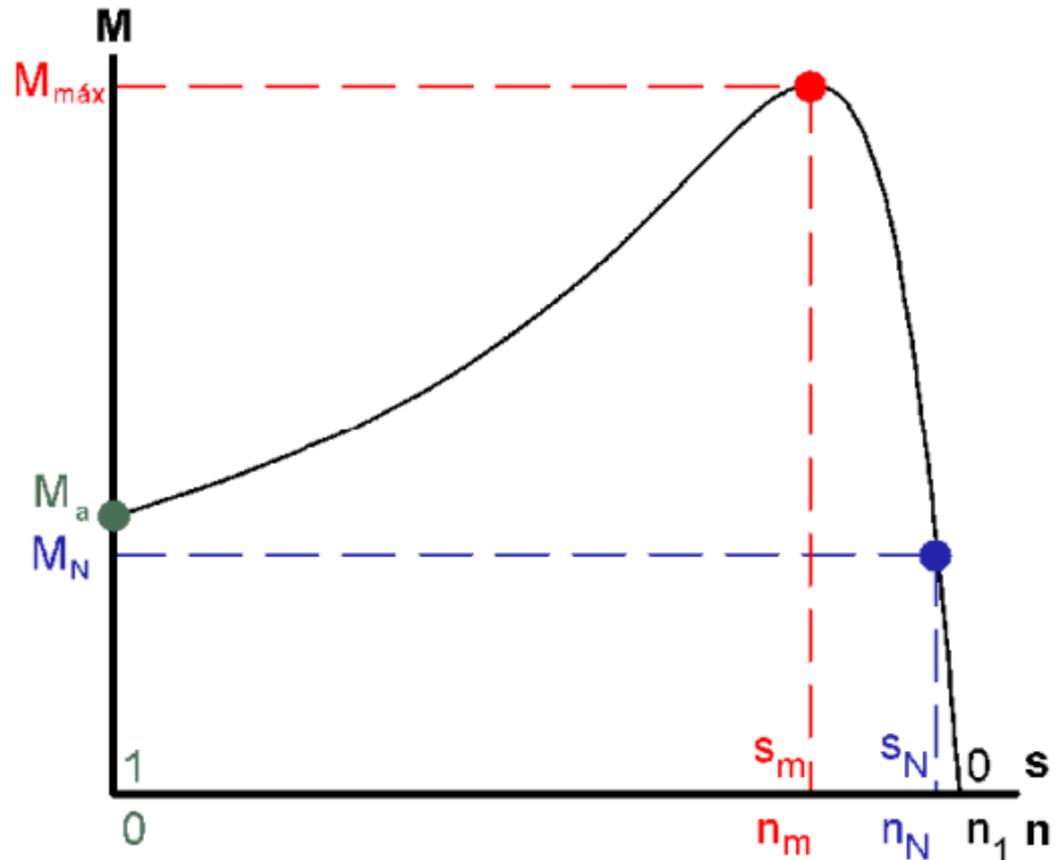
44



CURVA PAR-VELOCIDAD

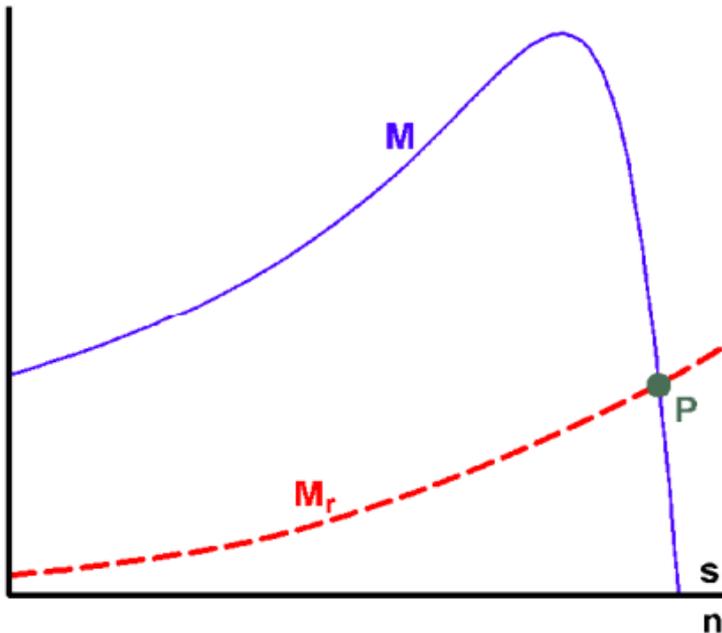
Curva de par - velocidad

El par máximo viene dado por la relación (44) y se produce para el deslizamiento s_m dado por (43). s_m suele tomar valores entre el 15% y el 30%. El par asignado se puede calcular mediante (42) dando al deslizamiento el valor s_N de la marcha asignada. s_N suele tomar valores entre el 3% y el 8%. par de arranque M_a .

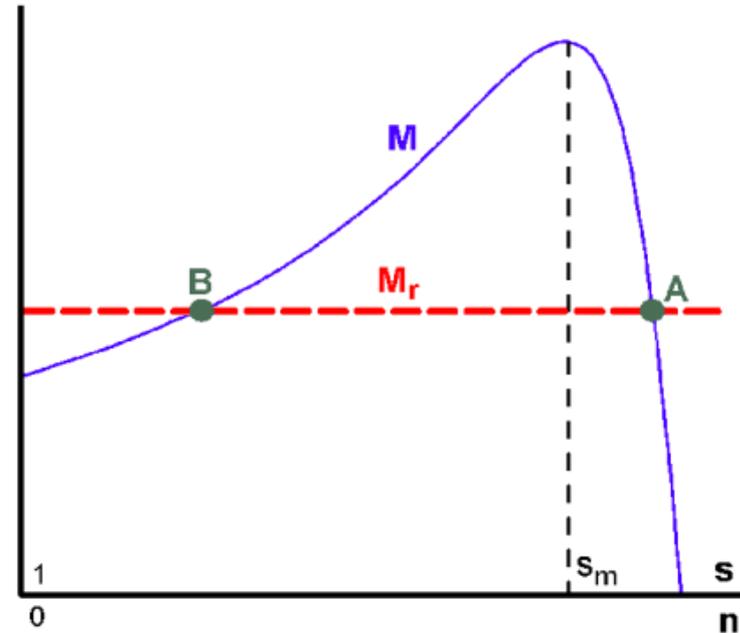


CURVA PAR-VELOCIDAD

- Punto de funcionamiento



- Estabilidad

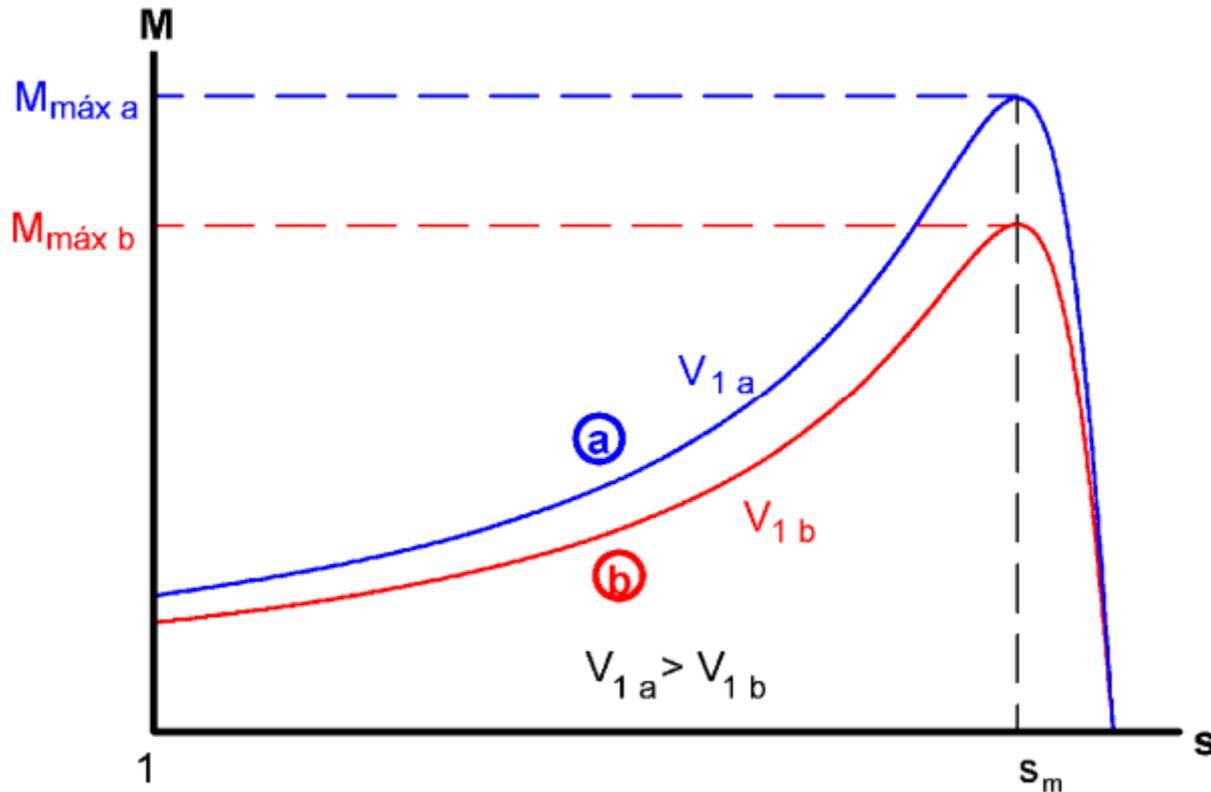


Se demuestra que el punto con un deslizamiento superior al par máximo (B) está en una situación inestable, mientras el que tiene un deslizamiento inferior a s_m (punto A) es estable. Por lo tanto el punto de funcionamiento del sistema será el A.



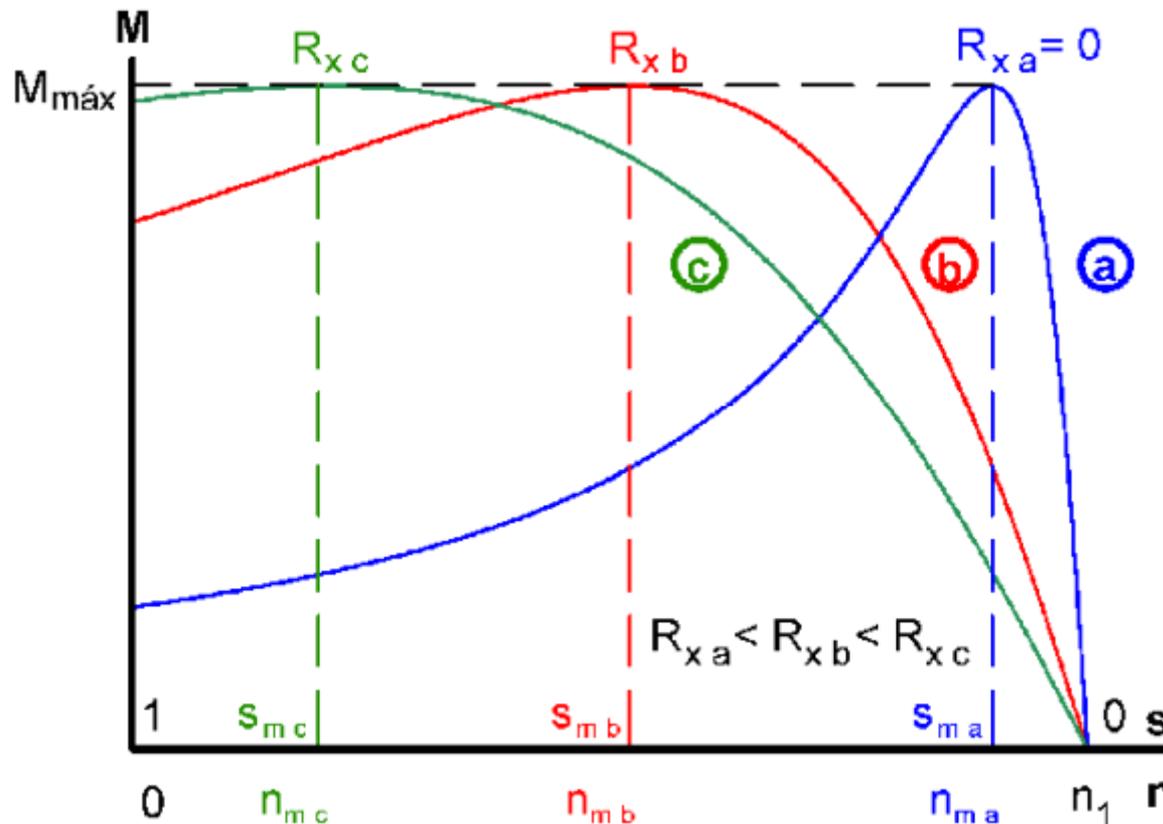
CURVA PAR-VELOCIDAD

- Efectos de variar V_1 y de introducir resistencias en serie con el rotor



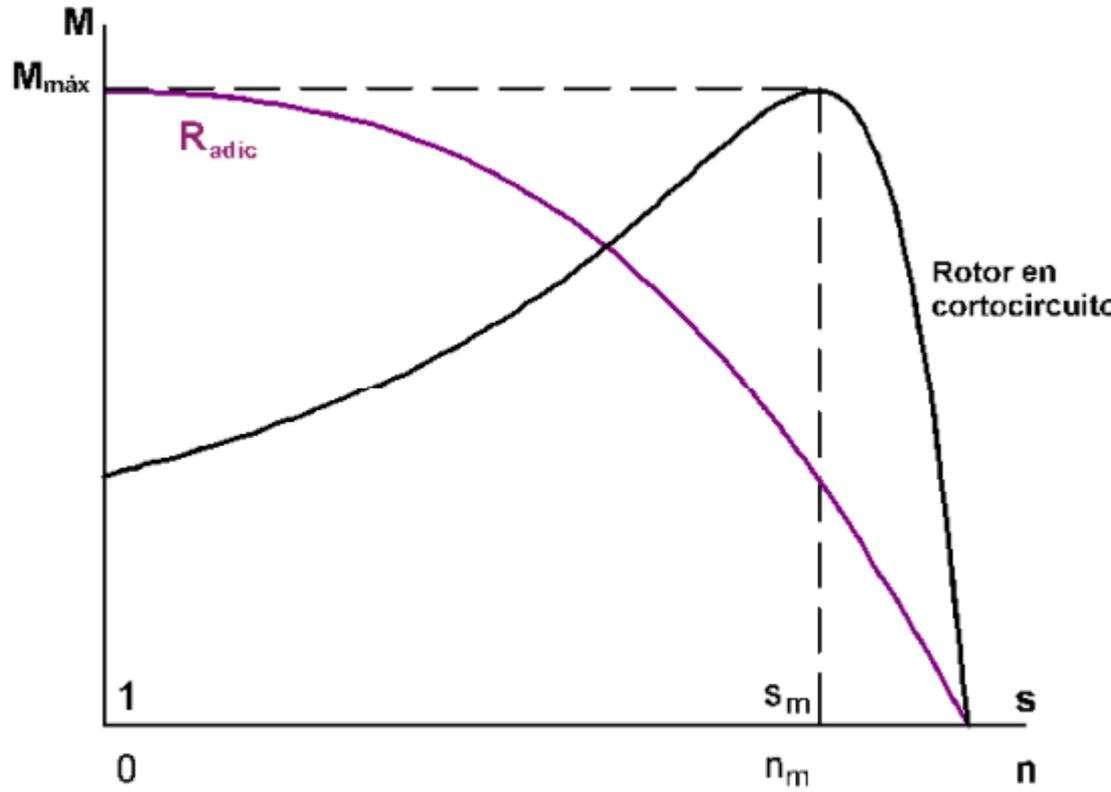
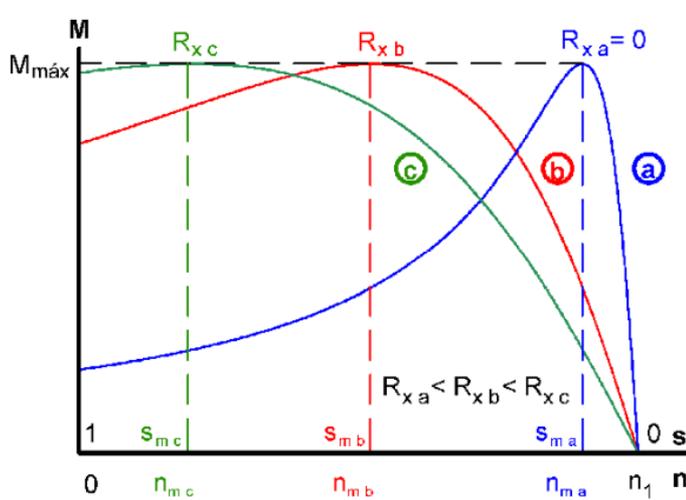
CURVA PAR-VELOCIDAD

- Efectos de variar V_1 y de introducir resistencias en serie con el rotor



CURVA PAR-VELOCIDAD

- Efectos de variar V_1 y de introducir resistencias en serie con el rotor



$$s_m = 1 = \frac{R'_2 + R'_{adic}}{\sqrt{R_1'^2 + X_{cc}^2}}$$

$$R'_{adic} = \sqrt{R_1'^2 + X_{cc}^2} - R'_2$$

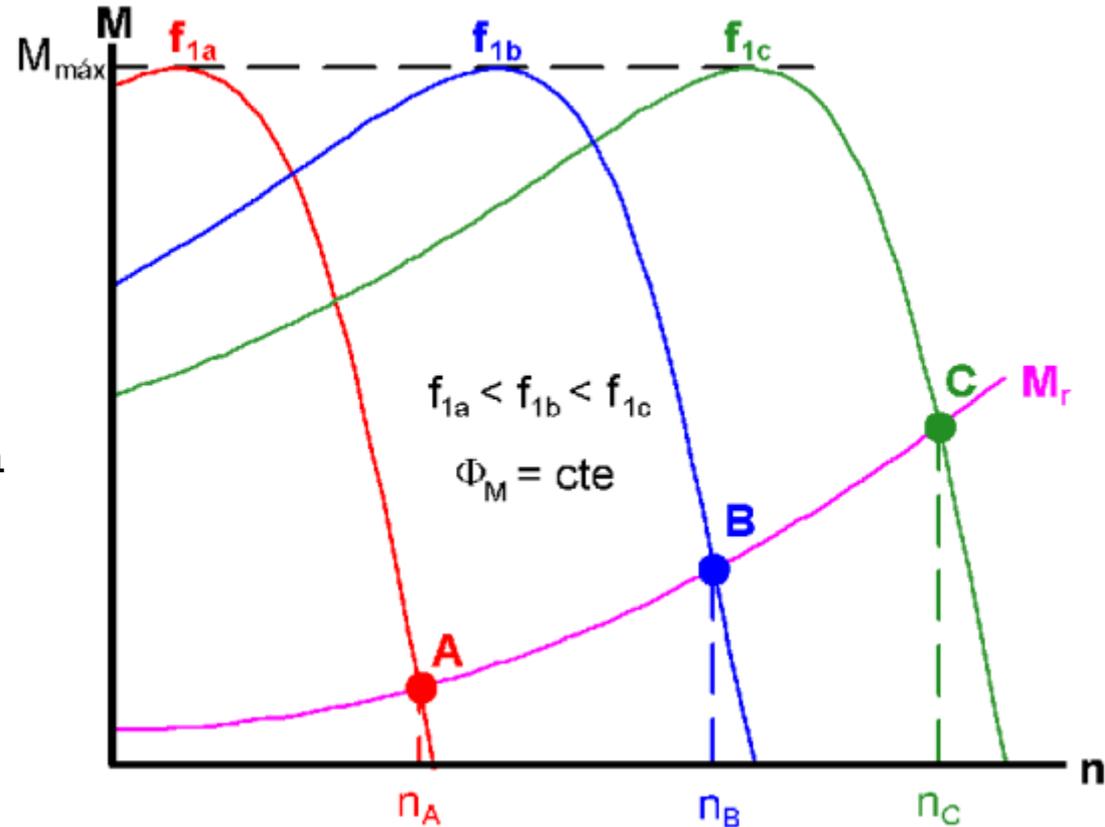
Par máximo en el arranque



CURVA PAR-VELOCIDAD

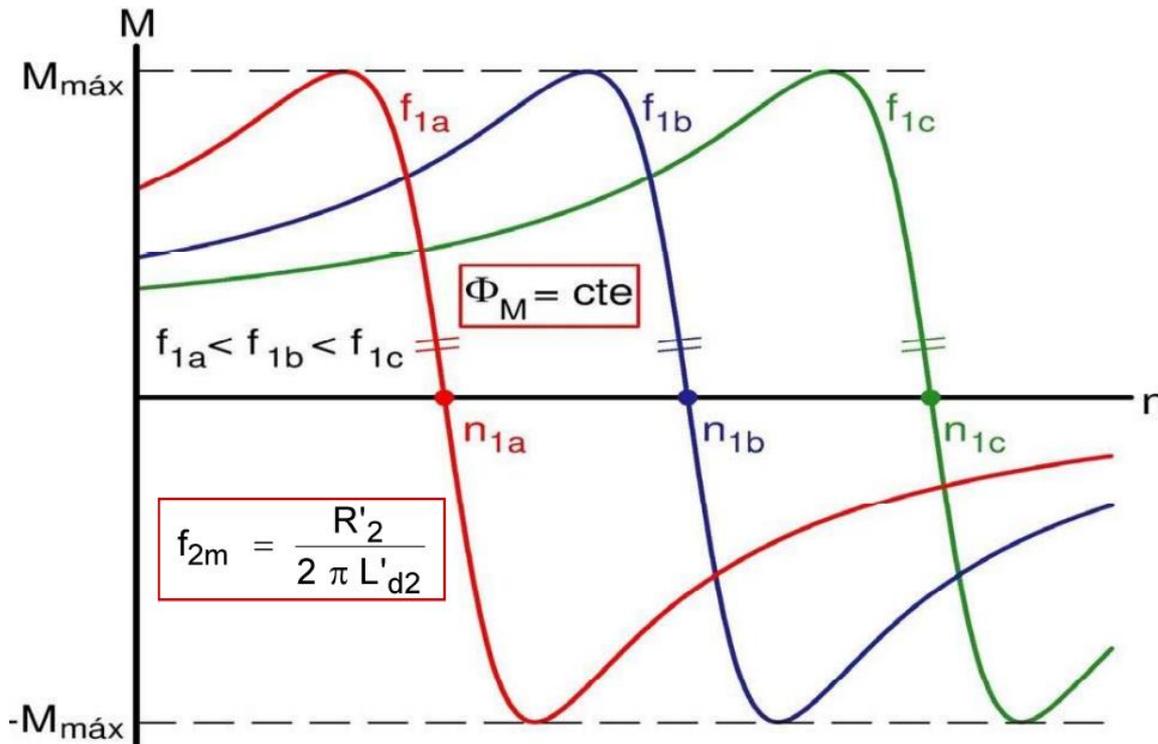
■ Efectos de variar V_1 y f_1

Para frecuencias f_1 por debajo de la asignada interesa variar la tensión V_1 del estator en función de la frecuencia de forma que el flujo por polo Φ_M sea el mismo para todas las frecuencias. De esta manera se consigue que para todas las frecuencias el par que suministra la máquina a la corriente asignada sea el mismo (el par asignado) y que también a todas las frecuencias el par máximo sea el mismo



CURVA PAR-VELOCIDAD

- Efectos de variar V_1 y f_1 manteniendo el flujo constante



$$M = C_{MI} \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_2'^2} f_1 \Phi_M^2$$

$$M_{\text{máx}} = \pm \left(\frac{C_{MI}}{4 \pi} \right) \frac{\Phi_M^2}{L'_{d2}}$$

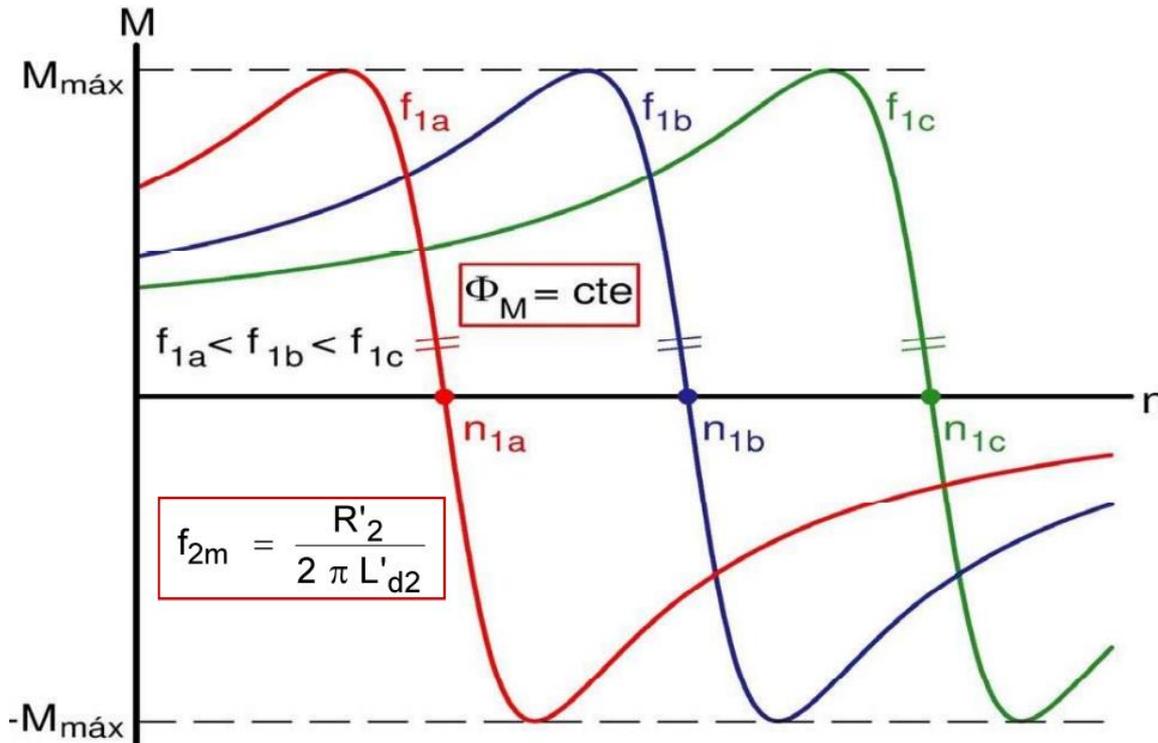
$$\Phi_m = \frac{1}{4,44 k_1 N_1} \cdot \frac{E_1}{f_1}$$

$$\approx \frac{1}{4,44 k_1 N_1} \cdot \frac{V_1}{f_1}$$



CURVA PAR-VELOCIDAD

- Efectos de variar V_1 y f_1 manteniendo el flujo constante



$$M = C_{MI} \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_2'^2} f_1 \Phi_M^2$$

$$M_{\text{máx}} = \pm \left(\frac{C_{MI}}{4 \pi} \right) \frac{\Phi_M^2}{L'_{d2}}$$

$$\Phi_m = \frac{1}{4,44 k_1 N_1} \cdot \frac{E_1}{f_1}$$

$$\approx \frac{1}{4,44 k_1 N_1} \cdot \frac{V_1}{f_1}$$



PAR RESISTENTE

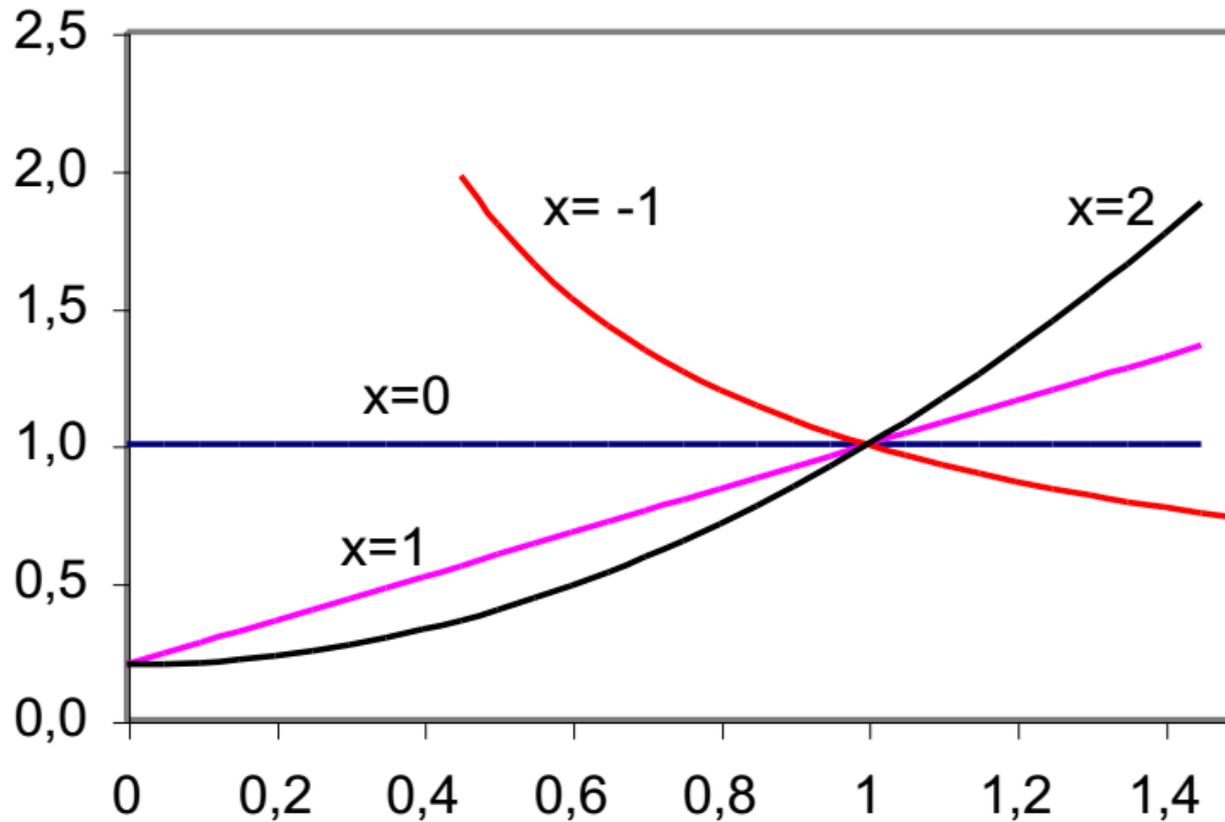
- Las máquinas accionadas poseen diferentes curvas de par resistente como función de la velocidad, según sea su naturaleza o principio de funcionamiento. Así algunas ofrecen un par constante a cualquier velocidad, mientras que otras aumentan o disminuyen con la velocidad siguiendo una cierta ley. Una expresión matemática adecuada por su simplicidad es:

$$M_r(\omega) = M_0 + (M_{rn} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x$$

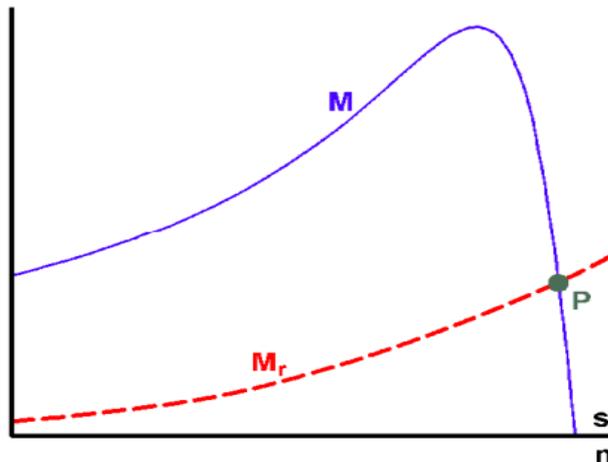
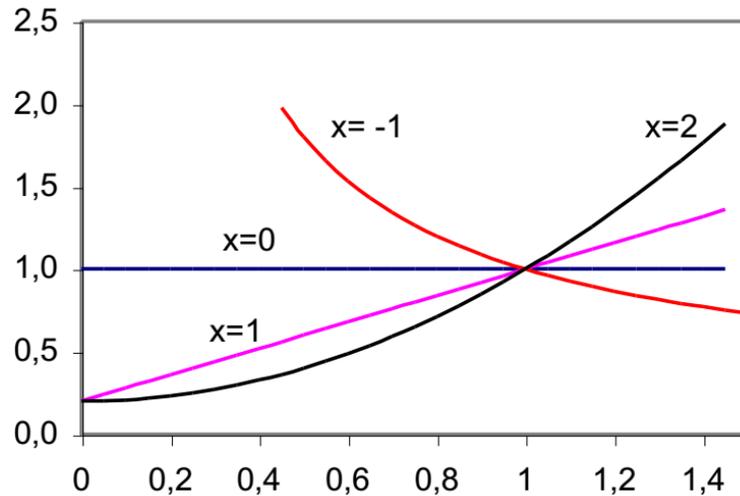
- $M(\omega)$ Par resistente a la velocidad ω
- M_0 Par resistente a la velocidad $\omega = 0$ (debido al rozamiento en partes móviles del mecanismo)
- M_{rn} Par resistente a la velocidad nominal ω_n
- ω_n Velocidad nominal
- x Coeficiente característico de la variación del par resistente



PAR RESISTENTE



PAR RESISTENTE



$x=0$

Par resistente de la velocidad

Ejemplos:

- Grúas
- Ascensores
- Cabre-estantes
- Cintas transportadas
- Bombas de embolo

$x=1$

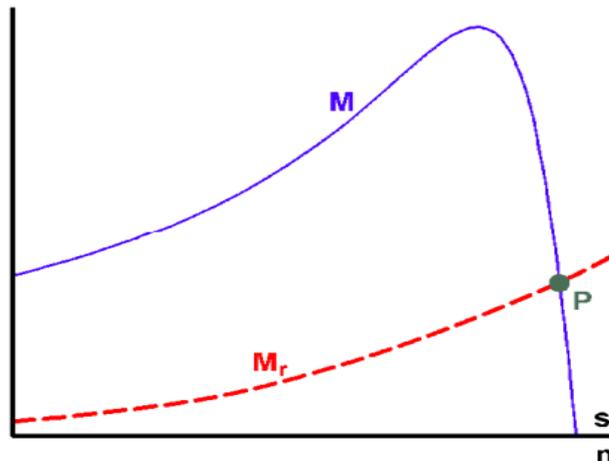
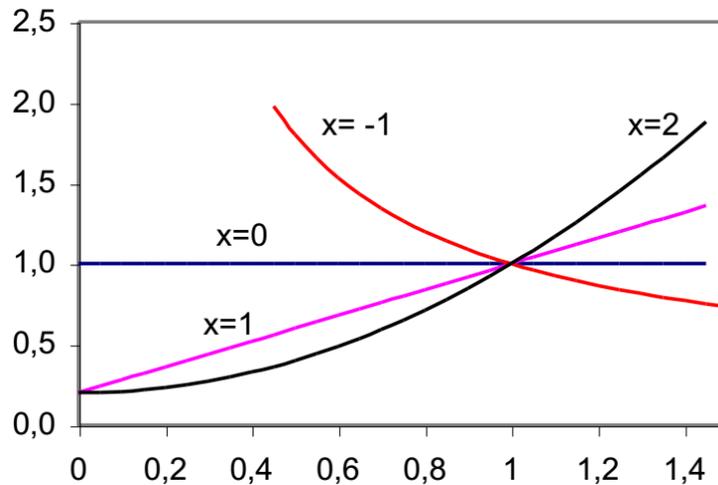
Par resistente creciente linealmente con la velocidad

Ejemplos:

- Generador de DC con excitación independiente con una resistencia fija como carga



PAR RESISTENTE



$x = -1$

Par resistente decrece hiperbólicamente con la velocidad

Mecanismos que requieren que la potencia permanezca constante

Ejemplos:

- Bobinadoras
- Fresadoras
- Herramientas de corte

$x=2$

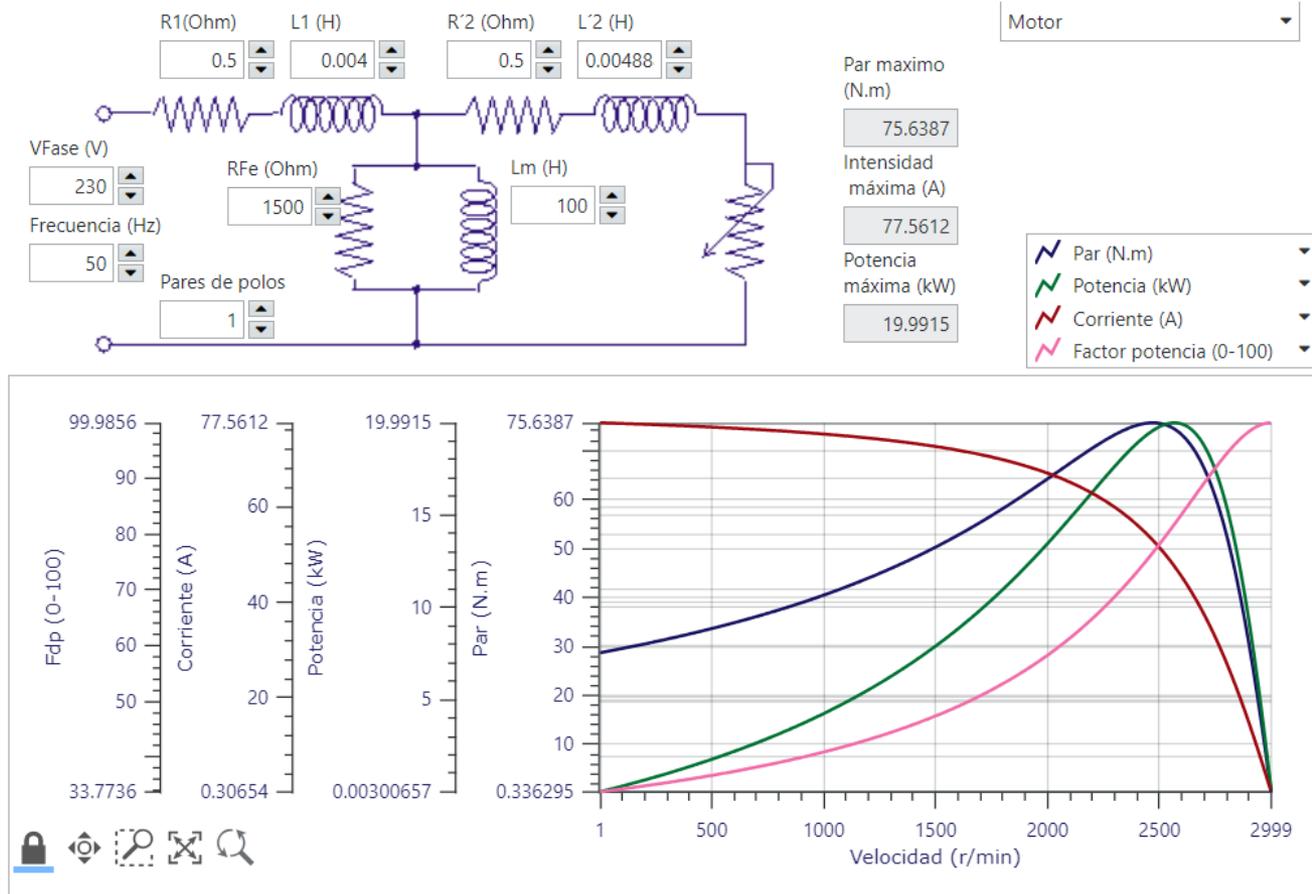
Par resistente creciente cuadráticamente con la velocidad

Ejemplos:

- Bombas centrífugas
- Hélices



CURVAS CARACTERISTICAS



MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

Bibliografía y material audiovisual:

- Jesus Fraile Mora. Maquinas Eléctricas. 5ta edición 2003
- Maquinas Eléctricas II, Tema 4. 2018, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta
- Máquinas y Accionamientos Eléctricos (3M4) - Métodos de arranque. Característica mecánica de la carga
- <https://salamoisian.uva.es/asincrona/>

