



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE MISIONES



FACULTAD  
DE INGENIERÍA  
UNaM

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

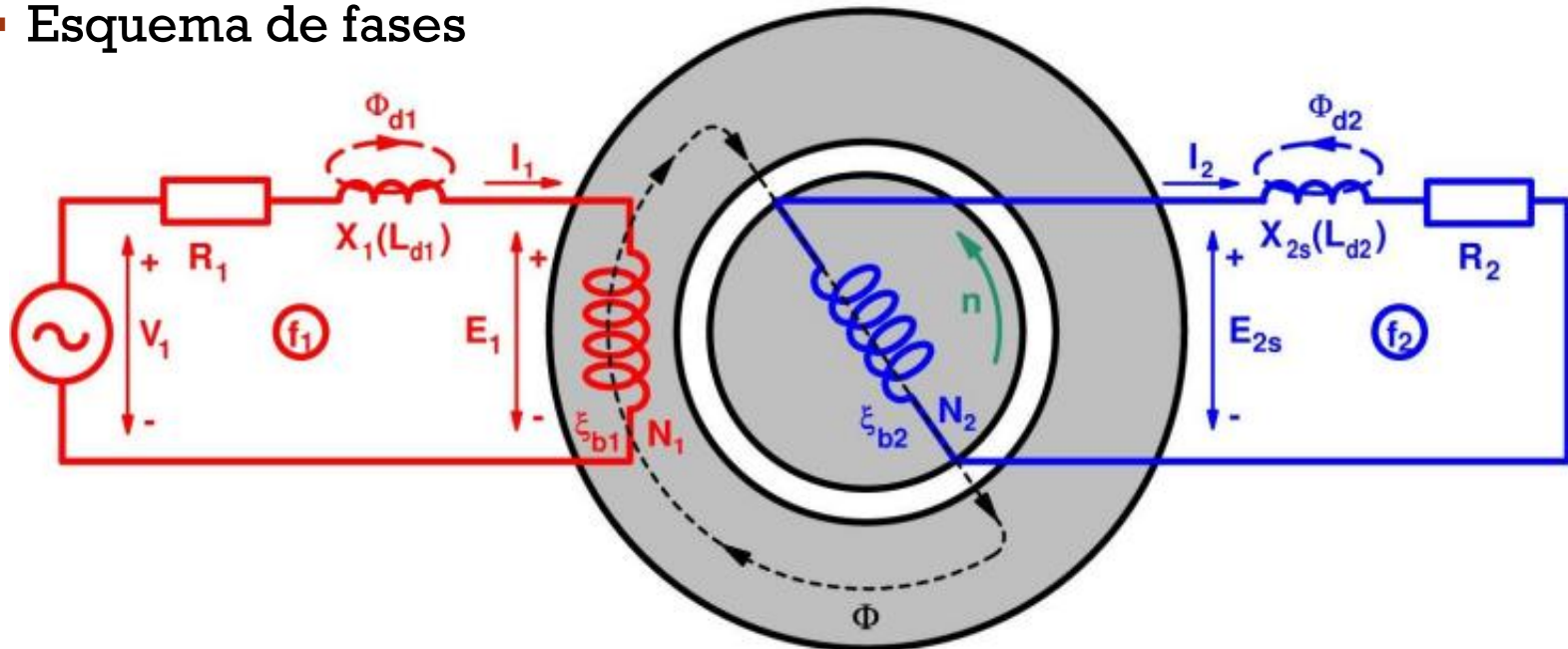
# ACTUADORES ELECTROMECAÑICOS

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Esquema de fases

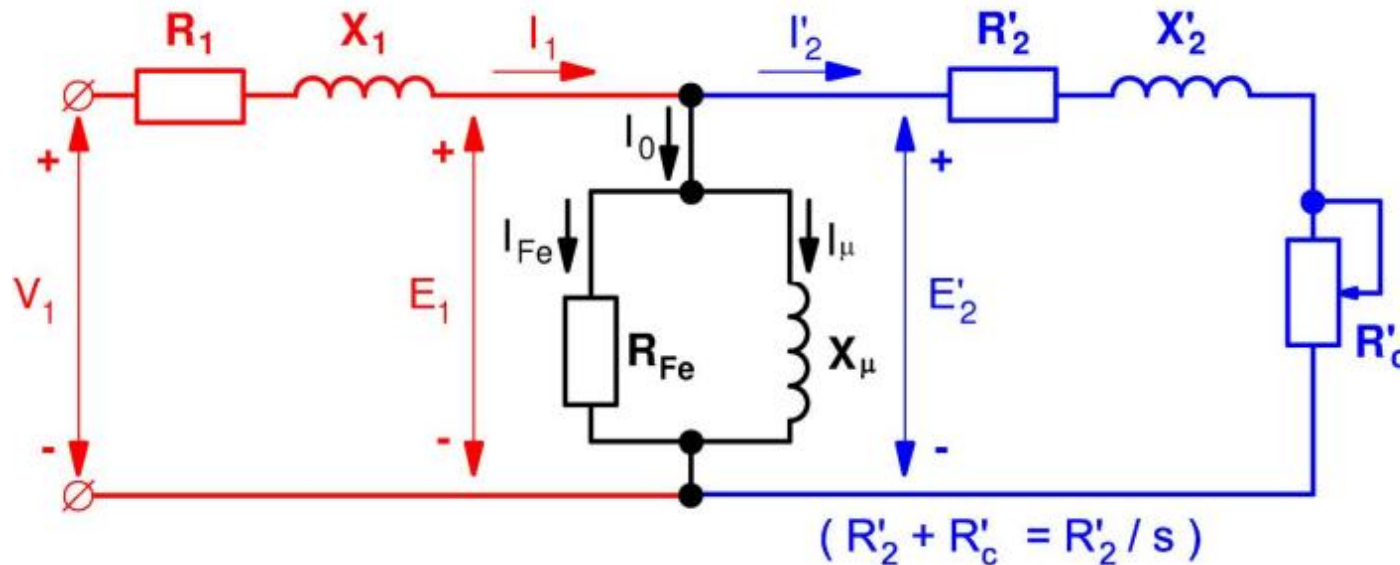


las magnitudes del rotor  $f_2$ ,  $E_{2s}$  y  $X_{2s}$  son funciones del deslizamiento  $s$  y, en consecuencia, varían con la velocidad de giro  $n$  de la máquina. En el caso de que el motor esté parado, estas magnitudes pasan a ser,  $f_1$ ,  $E_2$  y  $X_2$ , respectivamente.



# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito equivalente exacto

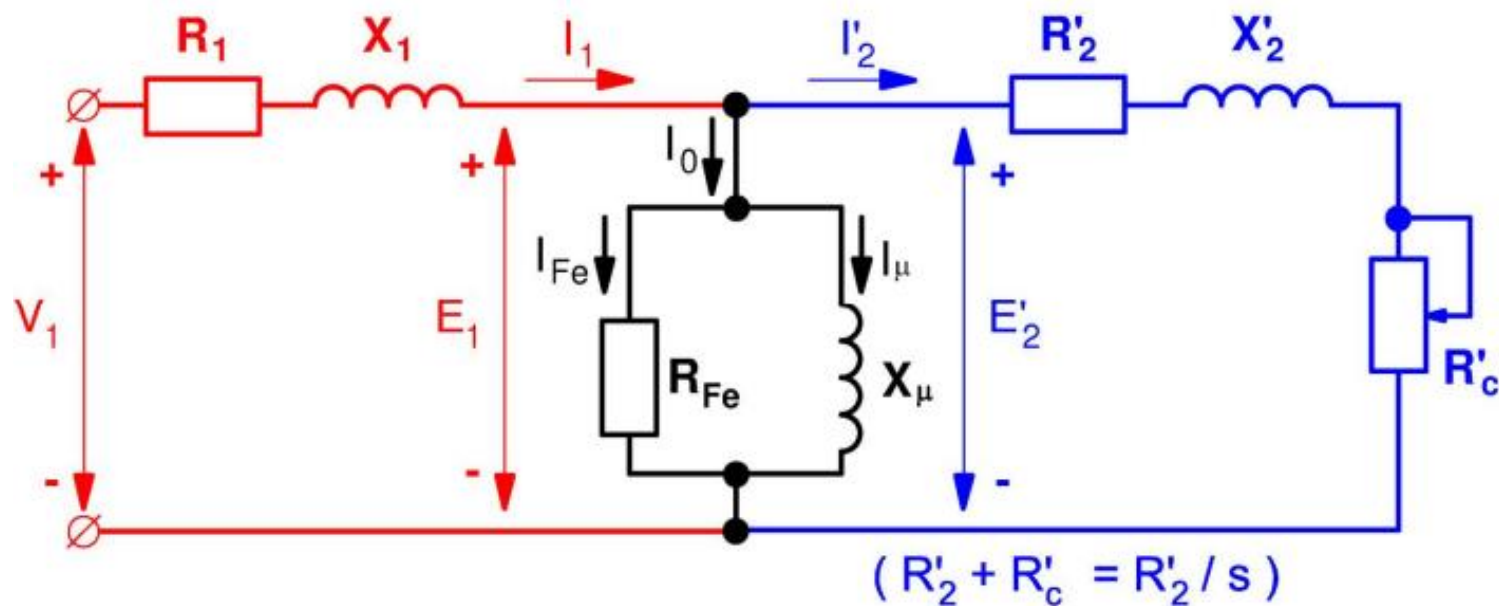


El rotor equivalente se elige de forma que su devanado sea idéntico al del estator; es decir, con el mismo número de fases  $m_1$ , número de espiras efectivas  $N_1$  y factor de bobinado  $\xi_{b1}$  que el estator, e inmóvil para que sus corrientes tengan la misma frecuencia  $f_1$  que las del estator.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



# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito equivalente exacto

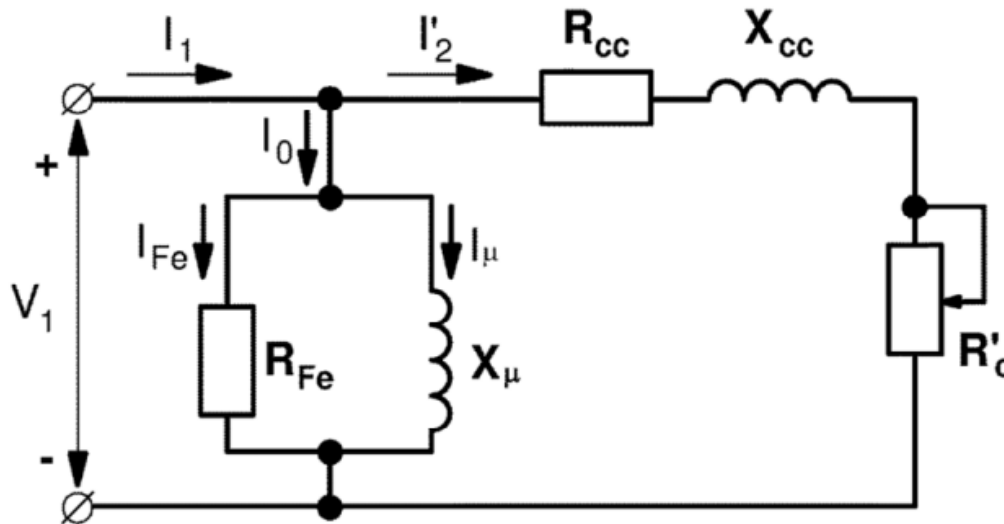


- La corriente de vacío  $I_0$  de un motor asíncrono no es tan pequeña como la de un transformador (para motores de potencia superior a 10 kW la corriente de vacío  $I_0$  toma valores del 20 al 50% de la corriente asignada  $I_{1N}$ ), porque el circuito magnético de un motor tiene mayor reluctancia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



# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito Equivalente Aproximado



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

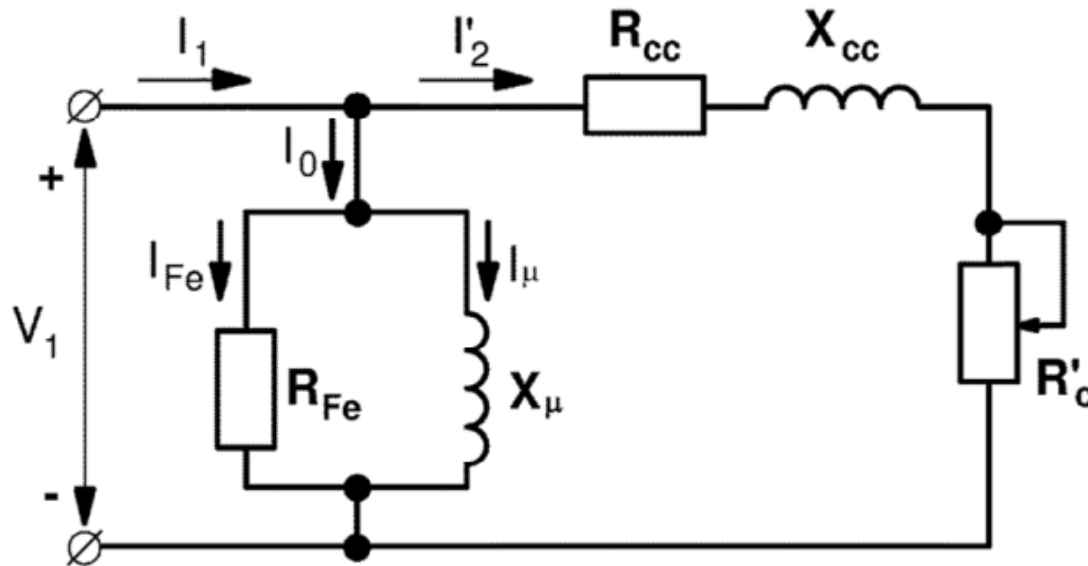
$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{cc} + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

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



# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Circuito Equivalente Aproximado



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

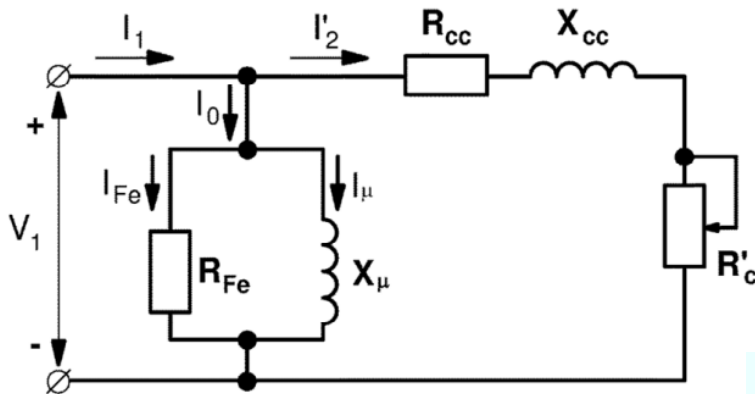
$$P_{mi} = m_1 R'_c I_2'^2 = m_1 R'_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2 = m_1 R'_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) I_2'^2$$

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



# CIRCUITOS EQUIVALENTES

- Par de Rotación



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

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

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

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

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

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

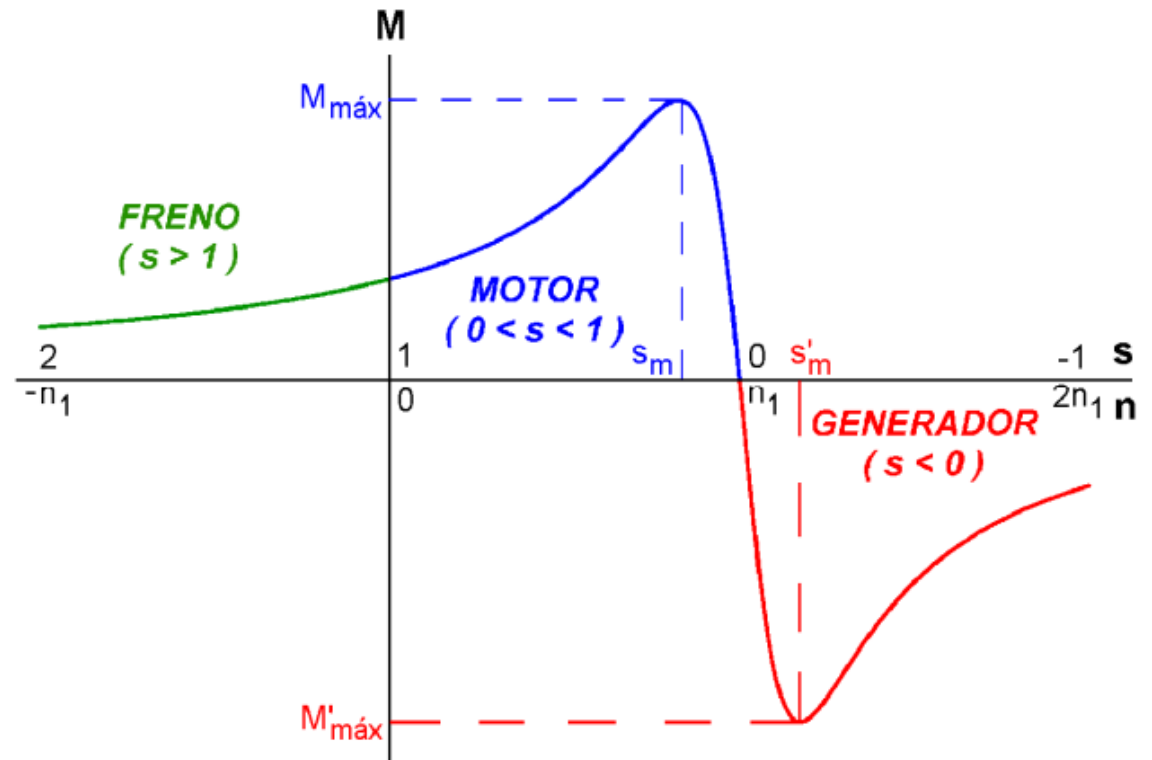
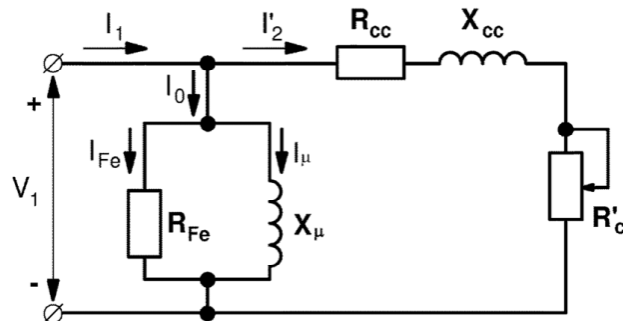


# CURVA PAR-VELOCIDAD

- Par de Rotación

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

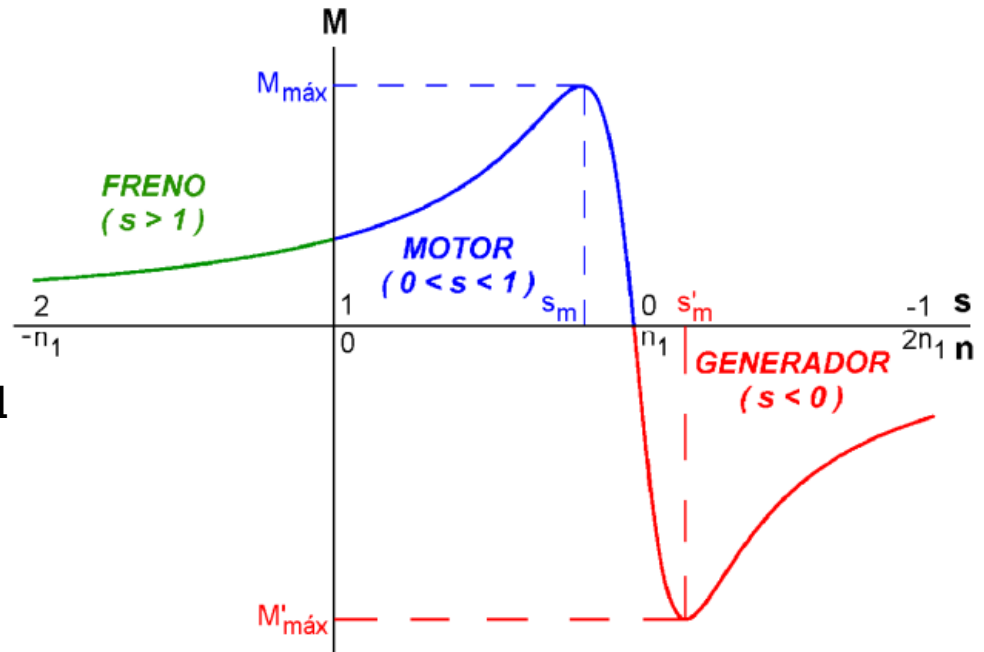
$$T = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$





# 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.

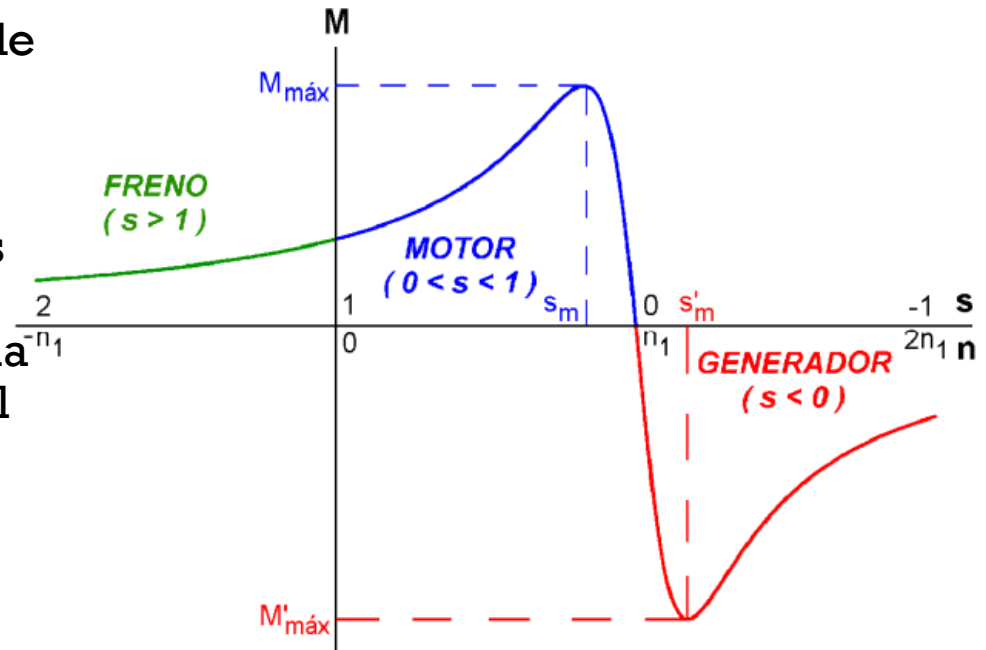


En este caso tanto el par como la velocidad tienen signo positivo. Por lo tanto, el par está a favor de la velocidad y se trata de un par motor. Es este par el que provoca el giro de la máquina.



# 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.



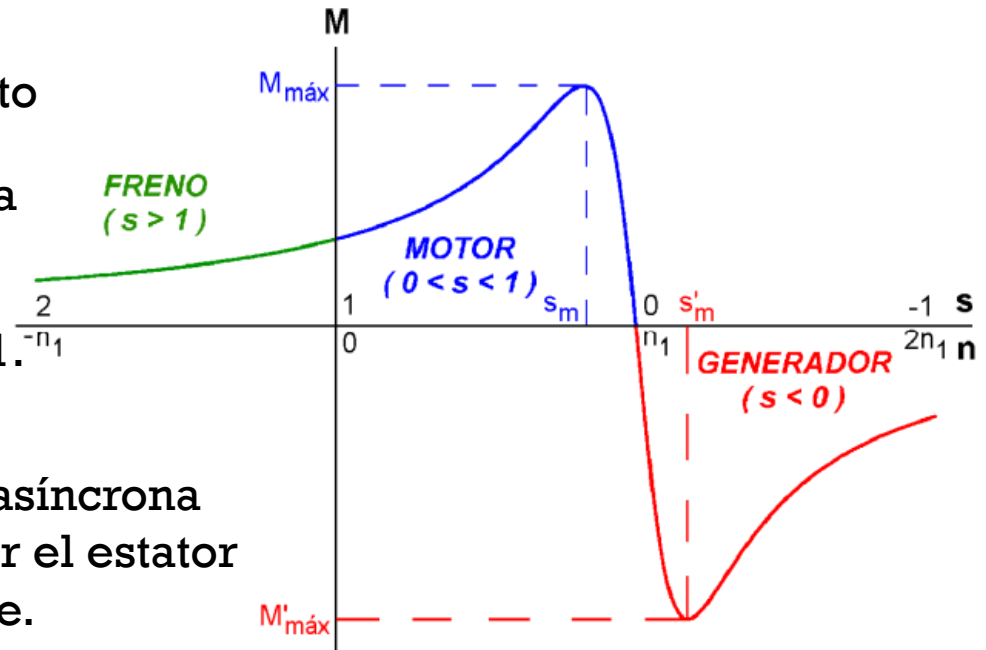
En este caso el par es negativo y la velocidad es positiva. Por lo tanto, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se trata de un par de frenado. Deberá existir otro par, por ejemplo el producido por un motor de gasolina acoplado al mismo eje que la máquina asíncrona, que mueva al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



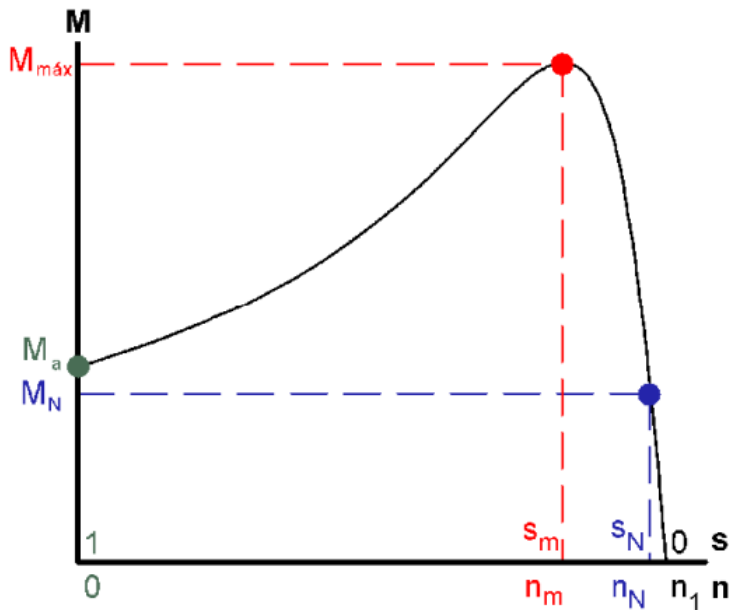
La totalidad de la suma de estas dos potencias absorbidas se disipa en forma de calor entre todas las pérdidas de la máquina, la cual se puede llegar a calentar excesivamente.

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

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

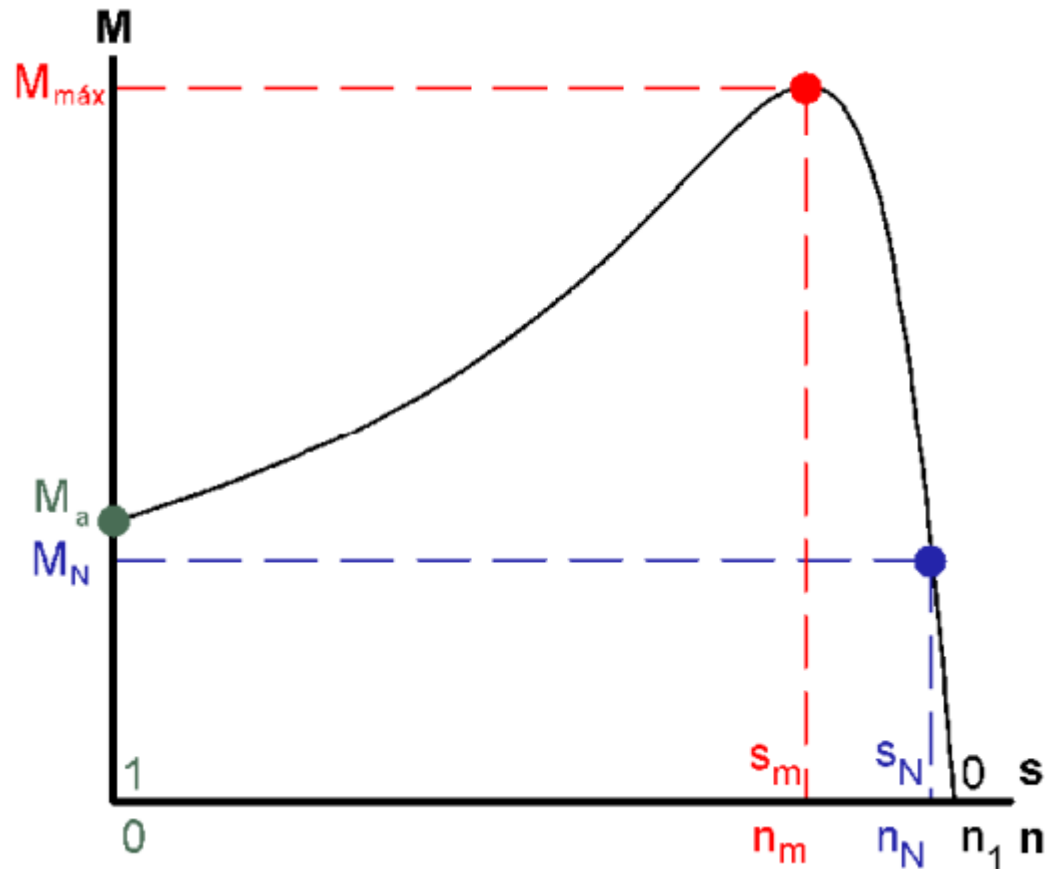
44



# CURVA PAR-VELOCIDAD

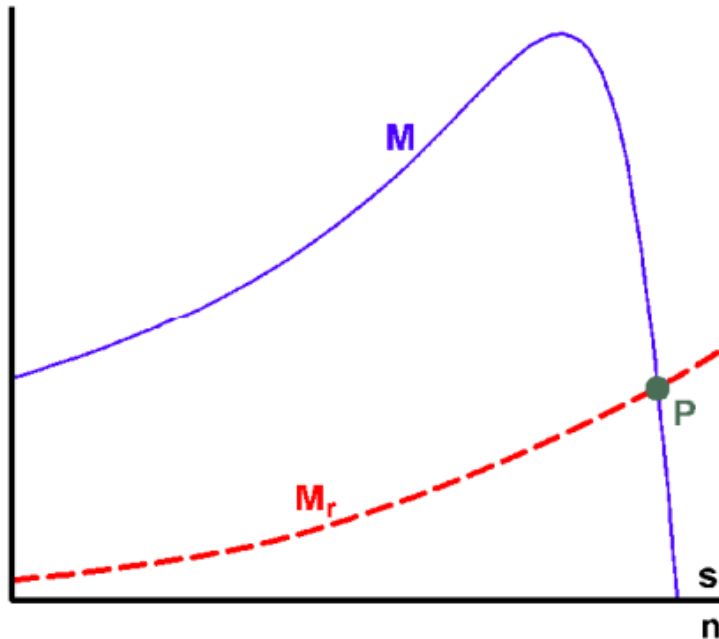
## Curva de par - velocidad

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  $M_a$ .

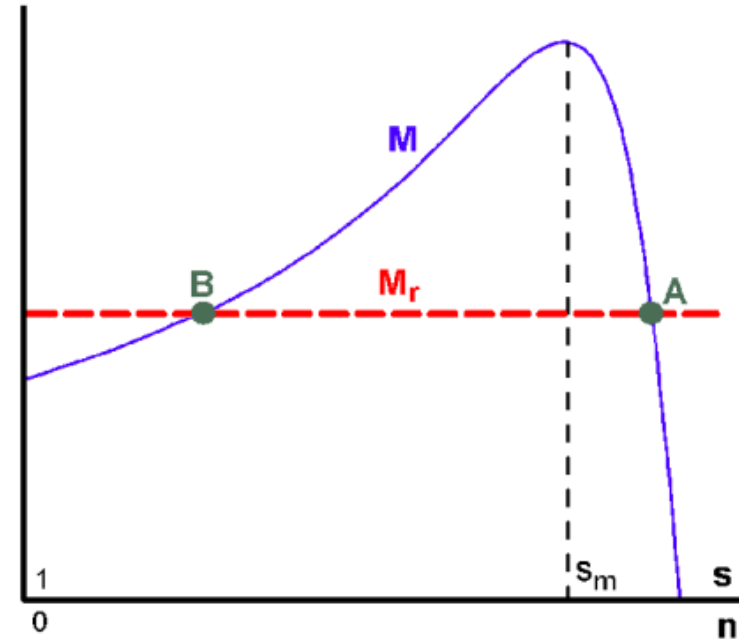


# CURVA PAR-VELOCIDAD

- Punto de funcionamiento



- Estabilidad

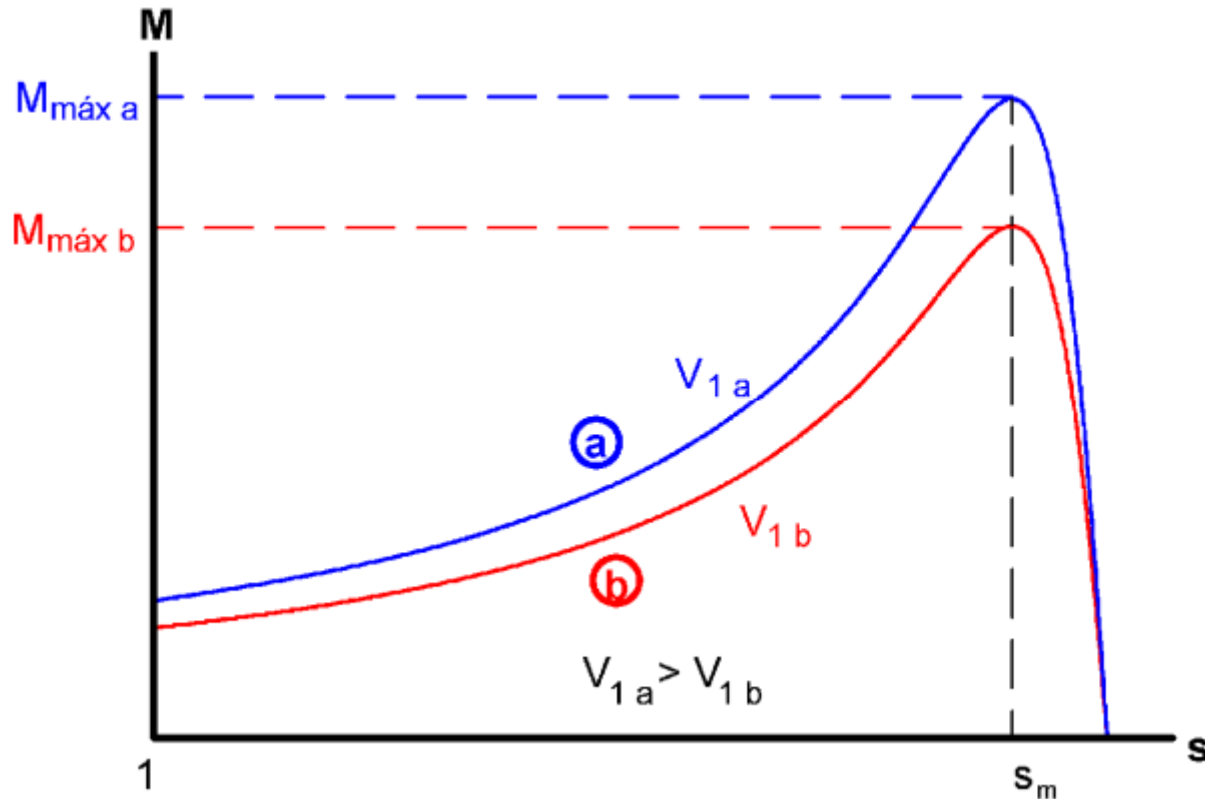


Se demuestra que el punto con un deslizamiento superior al par máximo (B) está en una situación inestable, mientras el que tiene un deslizamiento inferior a  $s_m$  (punto A) es estable. Por lo tanto el punto de funcionamiento del sistema será el A.



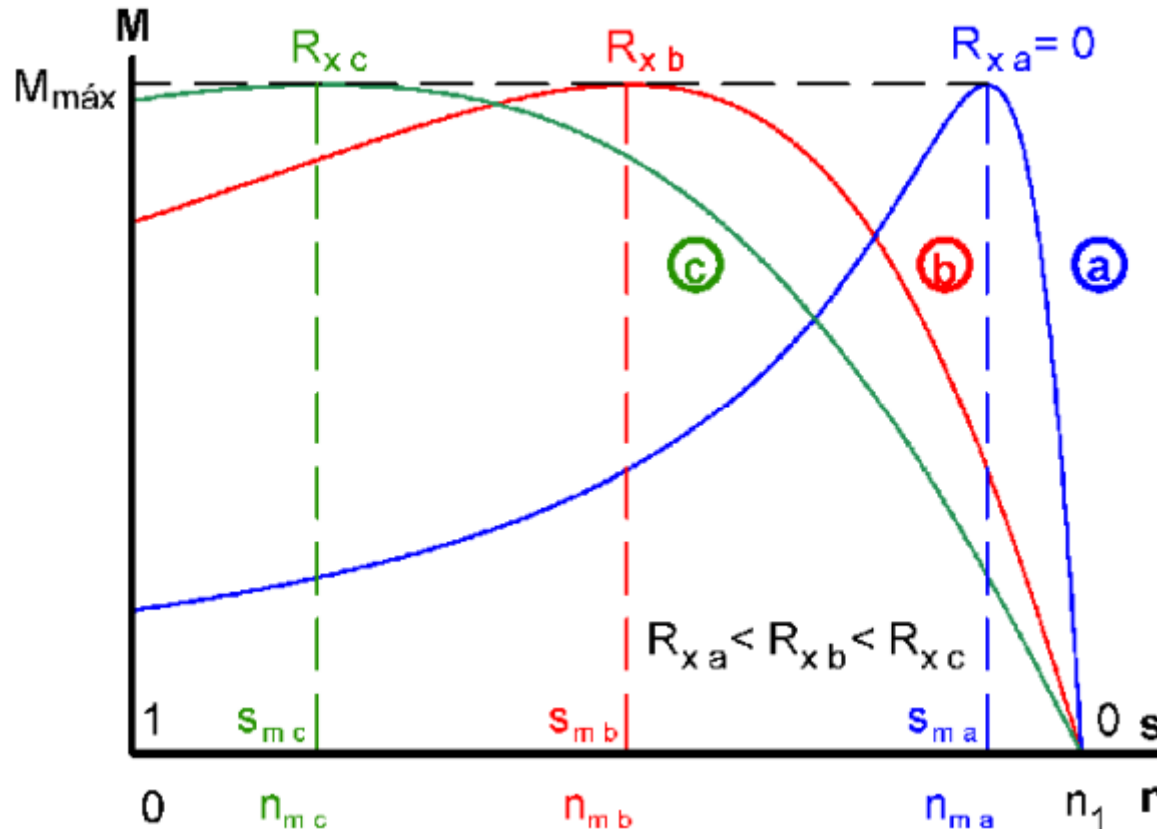
# CURVA PAR-VELOCIDAD

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



# CURVA PAR-VELOCIDAD

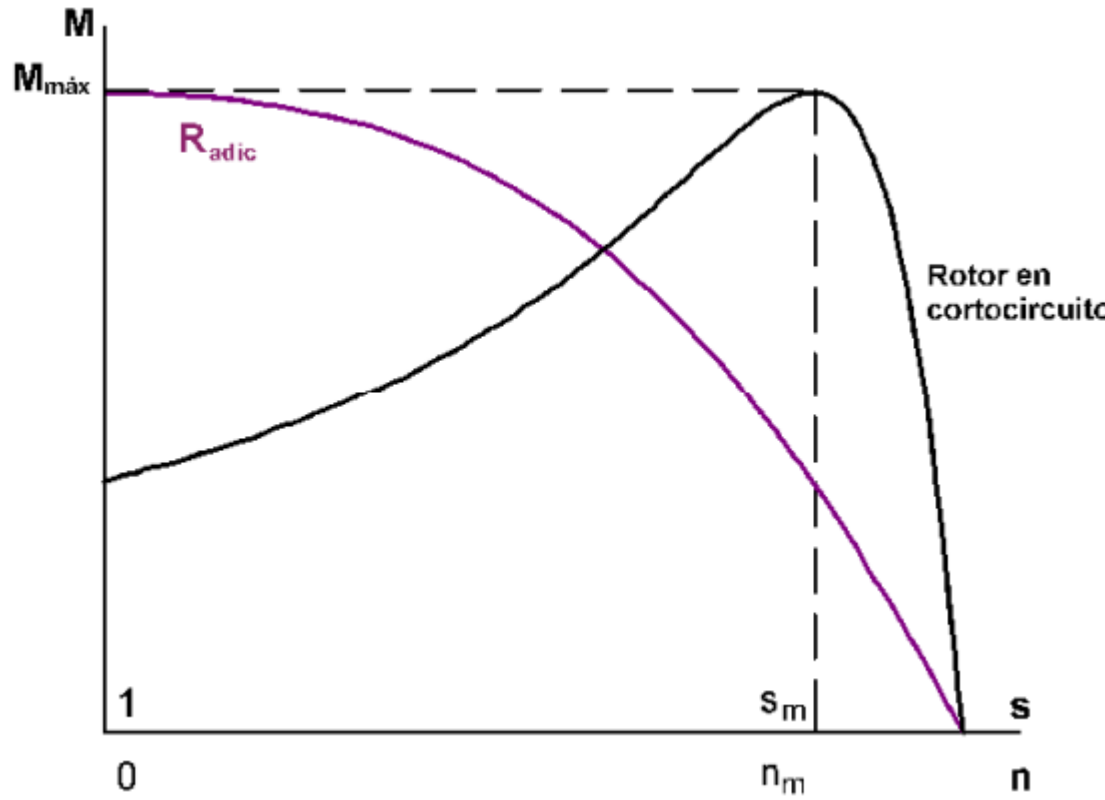
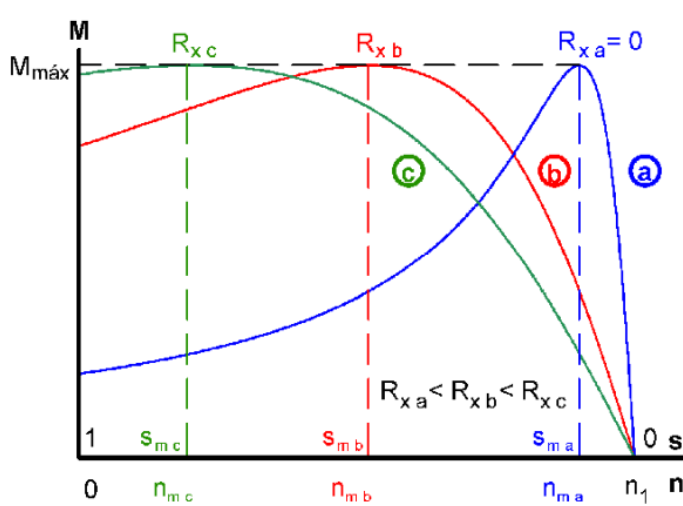
- Efectos de variar  $V_1$  y de introducir resistencias en serie con el rotor





# CURVA PAR-VELOCIDAD

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



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

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

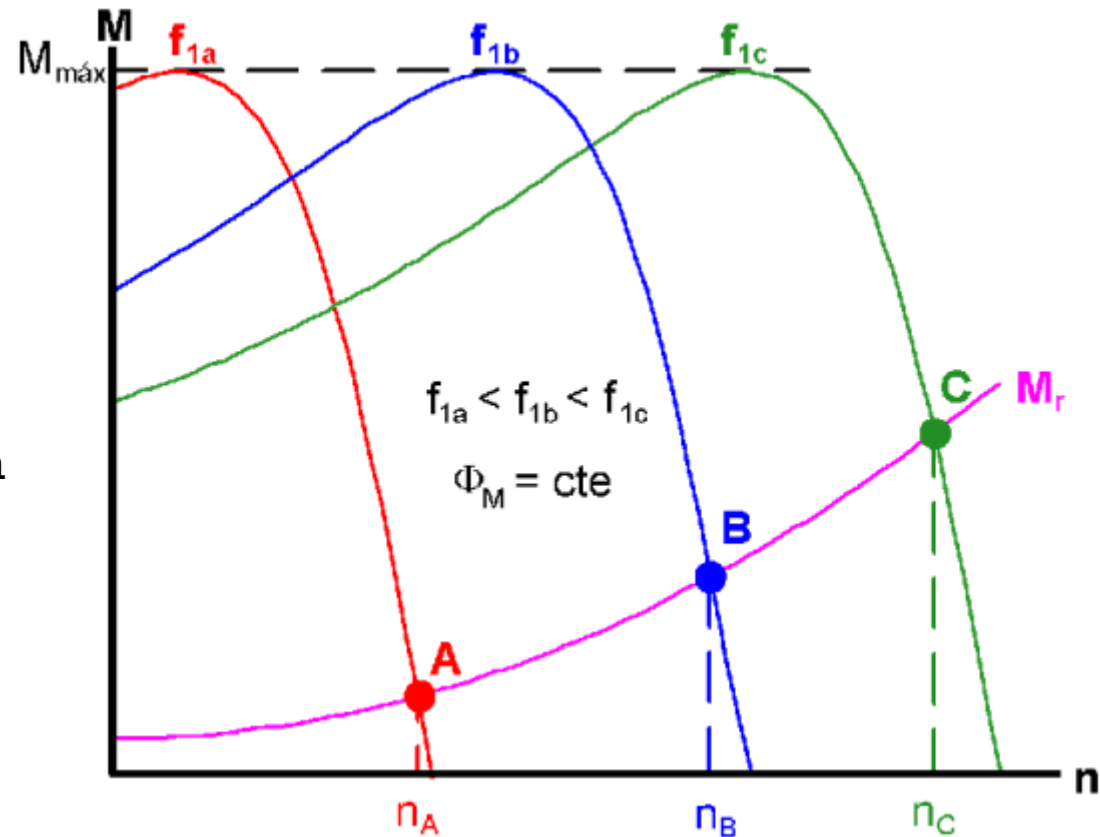
Par máximo en el arranque



# CURVA PAR-VELOCIDAD

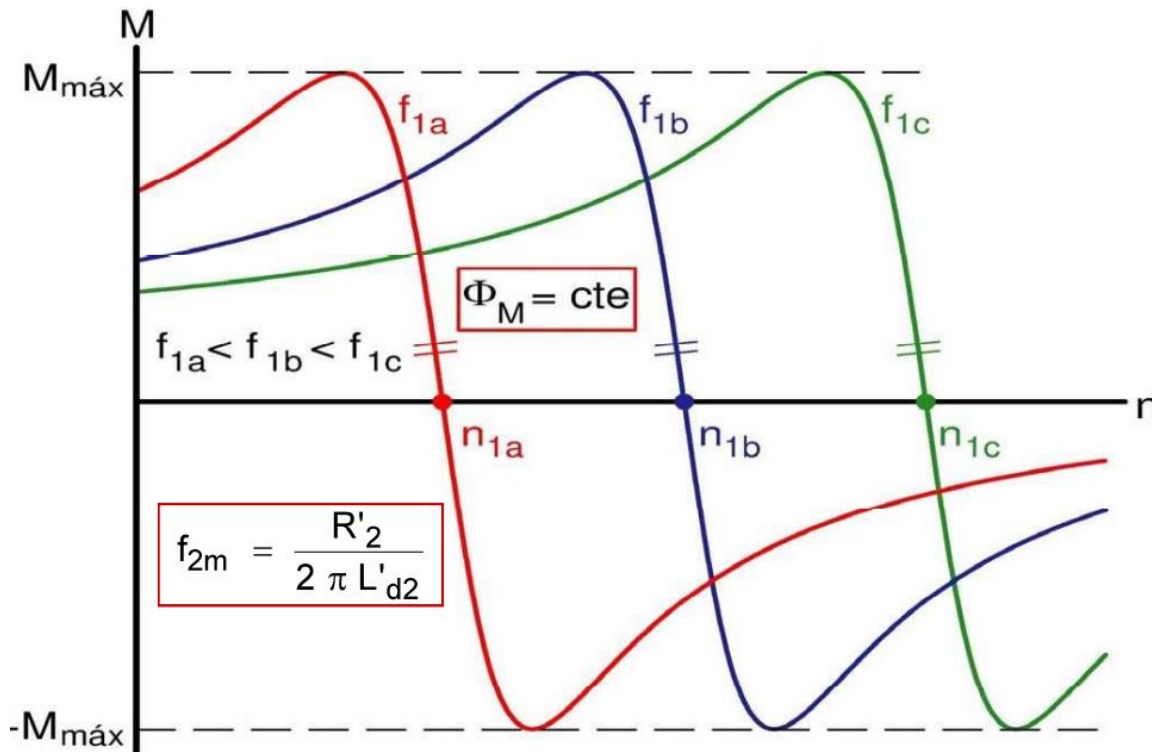
## ■ Efectos de variar $V_1$ y $f_1$

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  $\Phi_M$  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



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

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

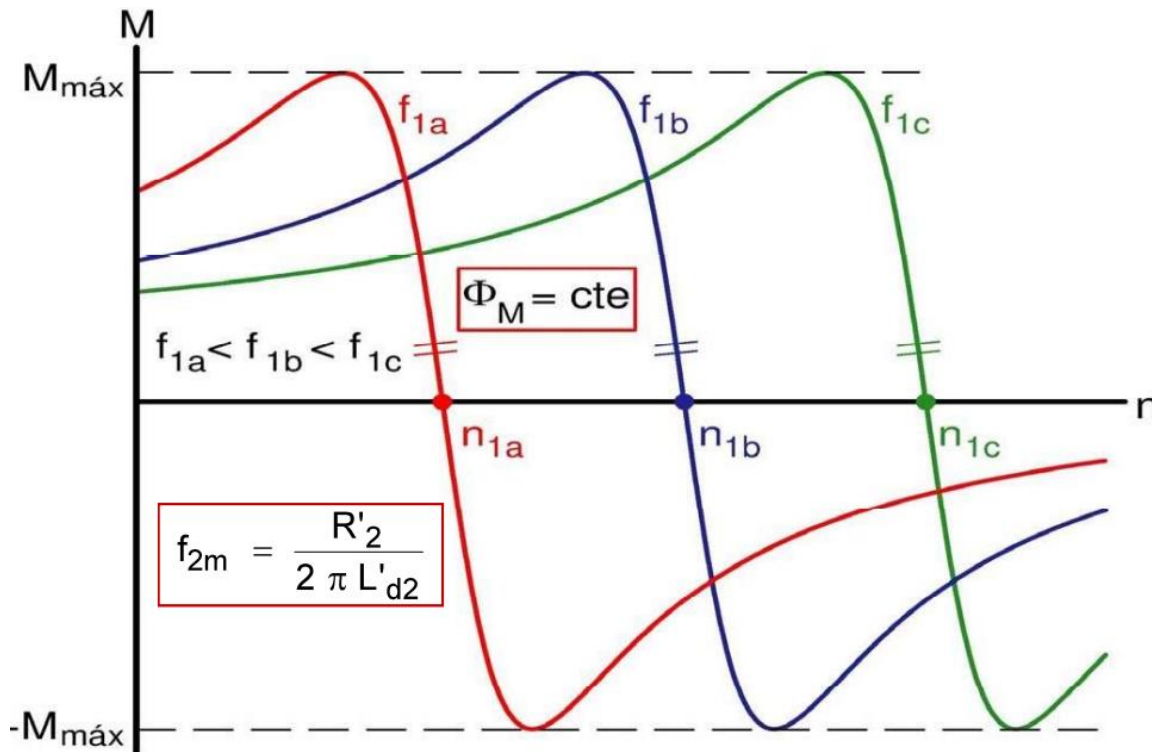
$$\Phi_m = \frac{1}{4,44 k_1 N_1} \cdot \frac{E_1}{f_1}$$

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



# 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

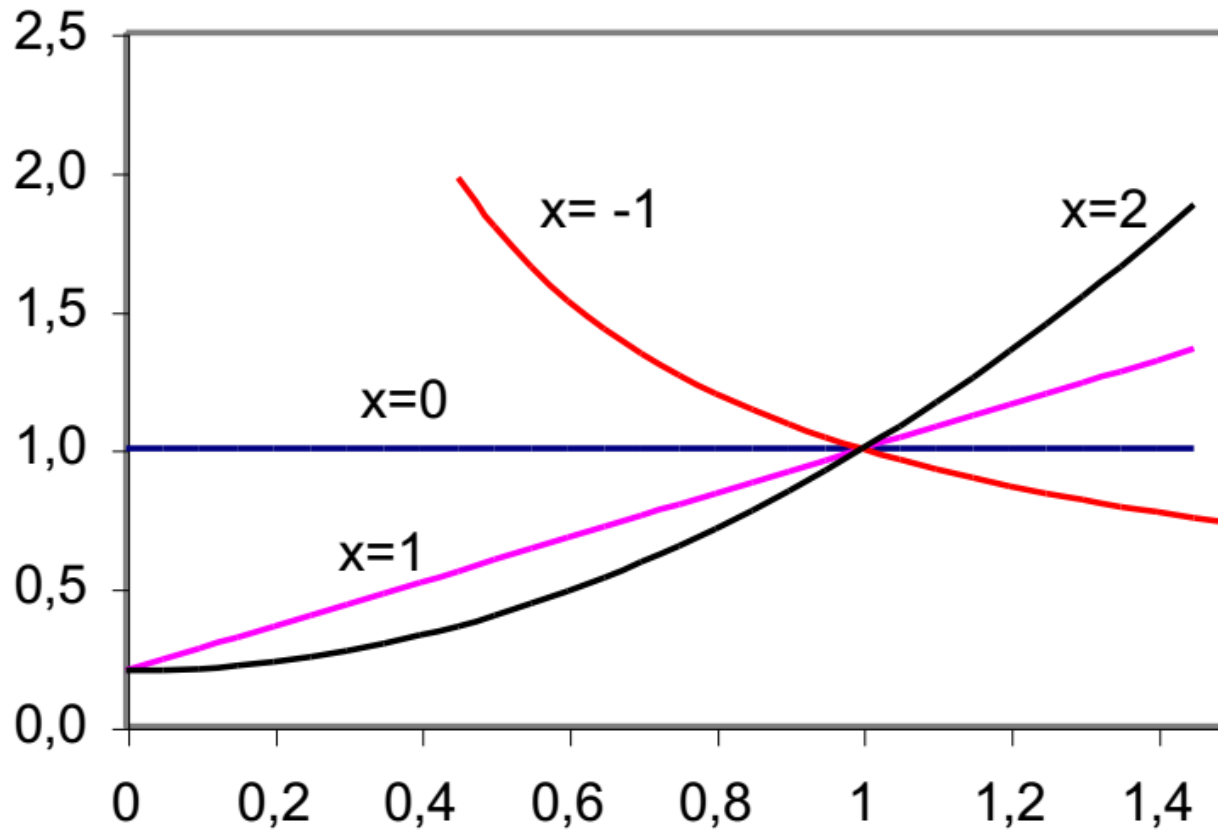
- Las máquinas accionadas poseen diferentes curvas de par resistente como función de la velocidad, según sea su naturaleza o principio de funcionamiento. Así algunas ofrecen un par constante a cualquier velocidad, mientras que otras aumentan o disminuyen con la velocidad siguiendo una cierta ley. Una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

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

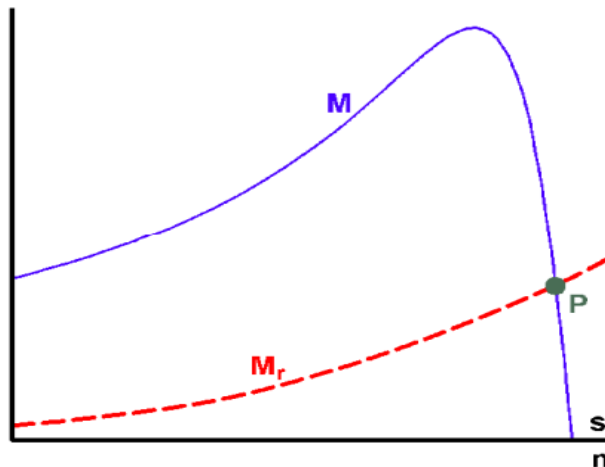
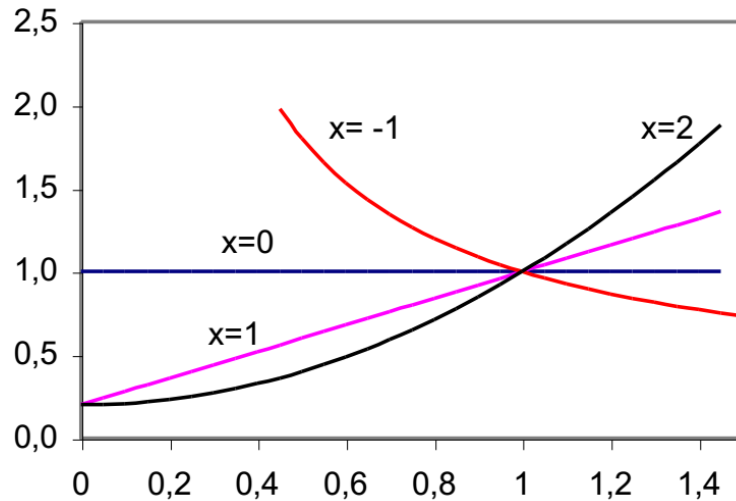
- $M(\omega)$  Par resistente a la velocidad  $\omega$
- $M_0$  Par resistente a la velocidad  $\omega = 0$  (debido al rozamiento en partes móviles del mecanismo)
- $M_{rn}$  Par resistente a la velocidad nominal  $\omega_n$
- $\omega_n$  Velocidad nominal
- $x$  Coeficiente característico de la variación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



# PAR RESISTENTE



# PAR RESISTENTE



$x=0$

## Par resistente de la velocidad

Ejemplos:

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

$x=1$

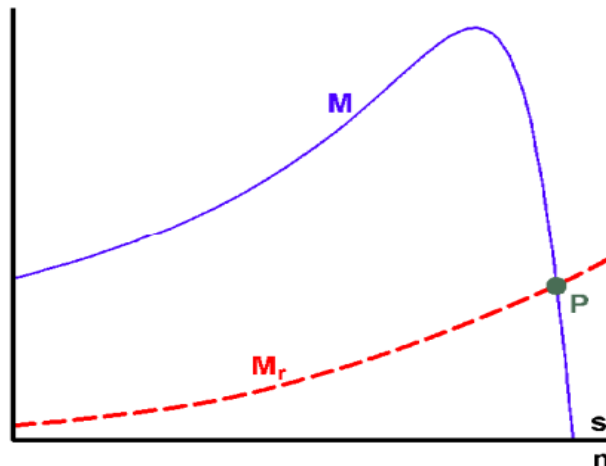
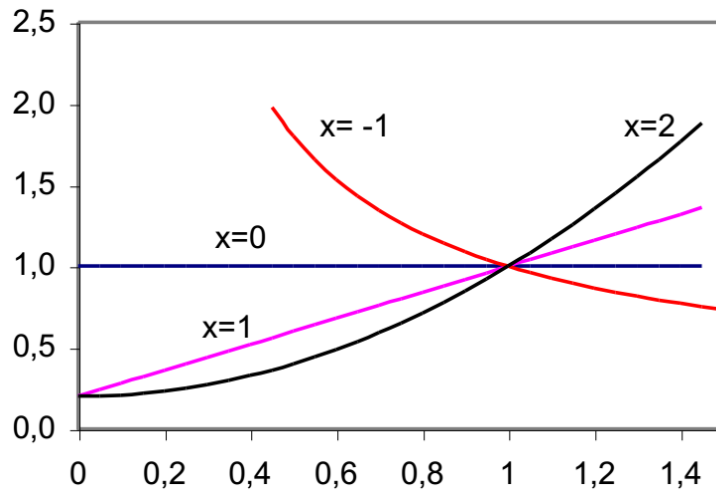
## Par resistente creciente linealmente con la velocidad

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

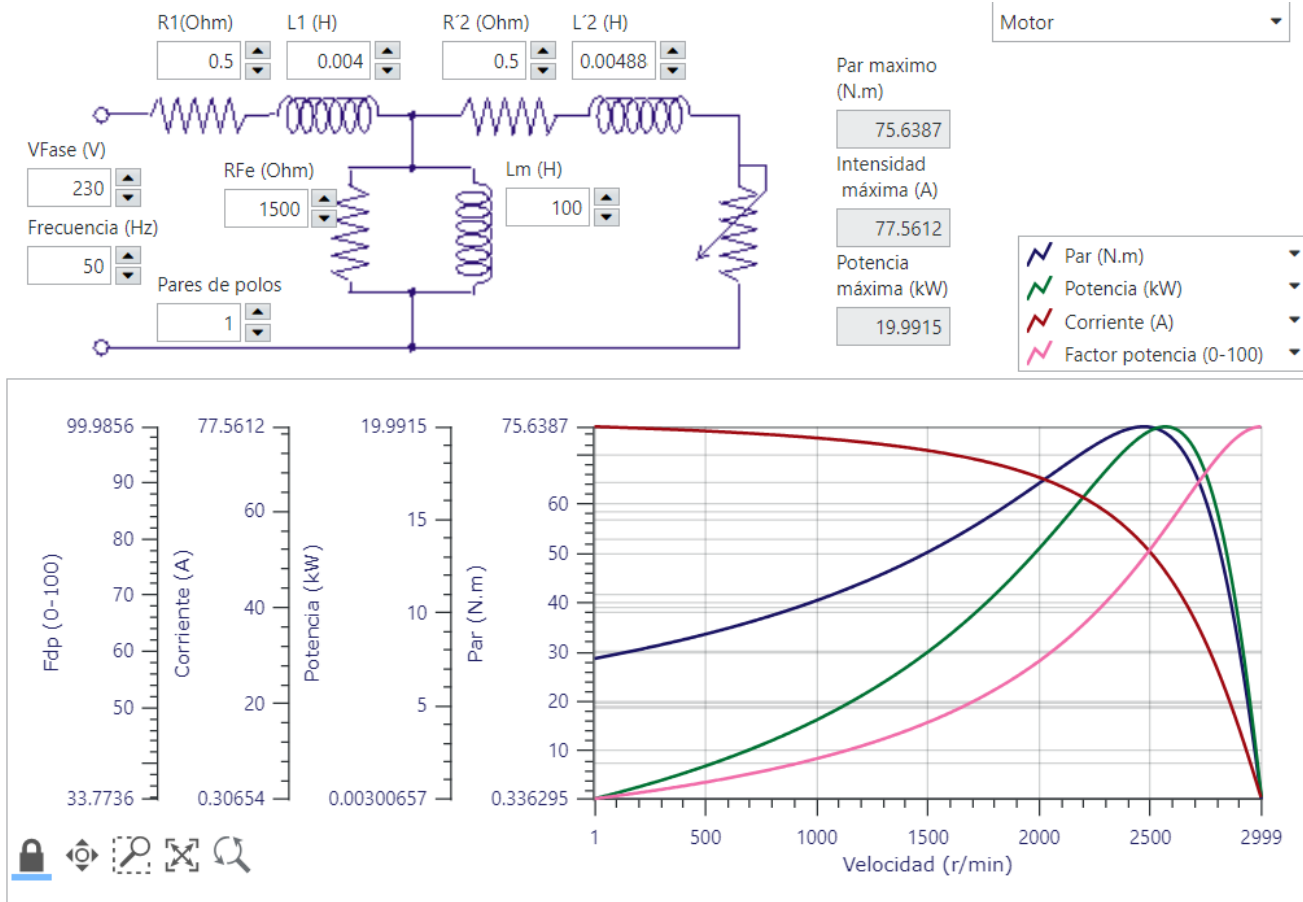
Ejemplos:

- 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/>

