

PRÁCTICA 1: Modelado estático de máquinas de inducción con control FOC (Field Oriented Control).

OBJETIVOS: En esta práctica los alumnos hallarán las curvas de funcionamiento estáticas de dos tipos diferentes de máquinas de inducción, tanto en el punto de operación nominal, como en puntos de operación mucho más allá de la velocidad nominal, que se obtienen aplicando una estrategia de control FOC indirecto (*indirect Field Oriented Control*). Asimismo, se hallarán las curvas de funcionamiento correspondientes al máximo par en la máquina que se puede conseguir mediante el control FOC.

Se trabajará con dos máquinas de inducción. La primera de ellas es una máquina de tracción de gran potencia en un tren eléctrico y la otra una máquina de pequeña potencia. Los devanados de estator de ambas máquinas se conectan en estrella, por lo que la tensión de excitación del estator es la tensión fase-neutro generada por un VSI trifásico, que trabaja a partir de una fuente de tensión DC de valor V_{dc} . Se dan tanto los valores nominales de la máquina, como los de su circuito equivalente visto desde el estator, recogidos en la siguiente tabla:

DATOS MÁQUINA 1: Máquina de tracción de tren eléctrico	DATOS MÁQUINA 2: Máquina de baja potencia
- $P_{nom}=1,6785$ MW (2250 Hp)	- $P_{nom}=2,238$ kW (3 Hp)
- $N_{r_nom}=1786$ rpm.	- $N_{r_nom}=1718$ rpm.
- $V_{ff_nom}=2300$ V _{rms} → $V_{s_nom}=1328$ V _{rms}	- $V_{ff_nom}=220$ V _{rms} → $V_{s_nom}=127$ V _{rms}
- $f_{e_nom}=60$ Hz	- $f_{e_nom}=60$ Hz
- PP= 2	- PP= 2
- $R_s=29$ mΩ, $L_{ls}=599,6$ μH	- $R_s=435$ mΩ, $L_{ls}=2$ mH
- $L_m=34,59$ mH	- $L_m=69,31$ mH
- $R_r=22$ mΩ, $L_{lr}=599,6$ μH	- $R_r=816$ mΩ, $L_{lr}=2$ mH
- $V_{dc}=4200$ V	- $V_{dc}=400$ V
- Inercia de la máquina: $J_m=63,87$ kg·m ²	- Inercia de la máquina: $J_m=0,089$ kg·m ²

NOTA: Como ejemplo de las gráficas que hay que obtener, se ha representado en el enunciado de la práctica las curvas de una máquina NEMA tipo A de 22 kW.

1. Obtención de curvas de funcionamiento estáticas en el punto de operación nominal

1.1. Obtener las siguientes curvas en los siguientes puntos de operación (OPs) de las máquinas 1 y 2:

- Curvas T_{em} - N_r para f_{e_nom} y V_{s_nom}
- Curvas T_{em} - N_r para variaciones de f_e con $V_s=V_{s_nom}$
- Curvas T_{em} - N_r para variaciones de V_s con $f_e=f_{e_nom}$
- Curvas T_{em} - N_r para un control $V_s/f_e=cte=V_{s_nom}/f_{e_nom}$

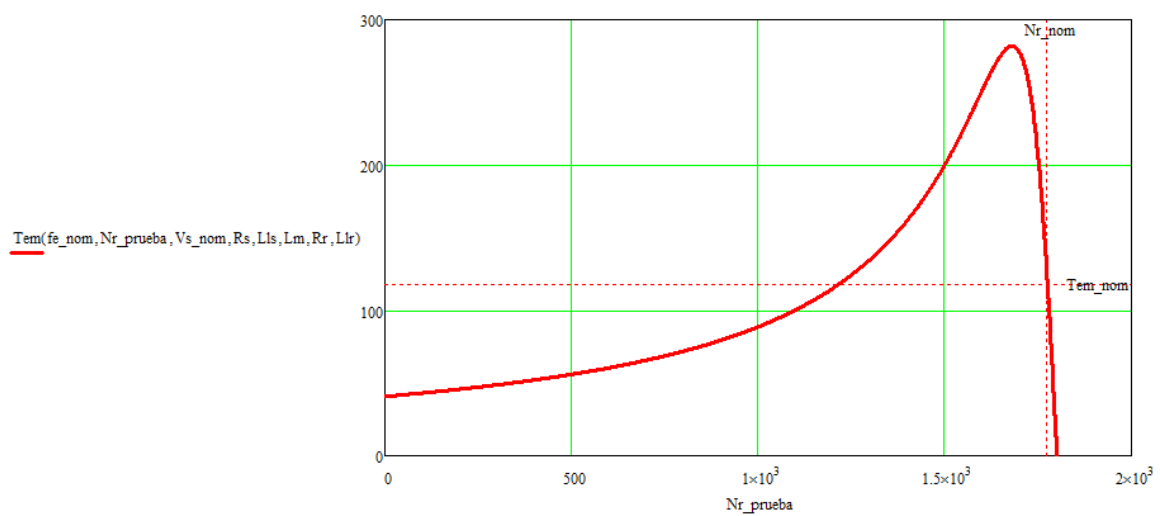


Fig.1.1. Curvas T_{em} - N_r para f_{e_nom} y V_{s_nom}

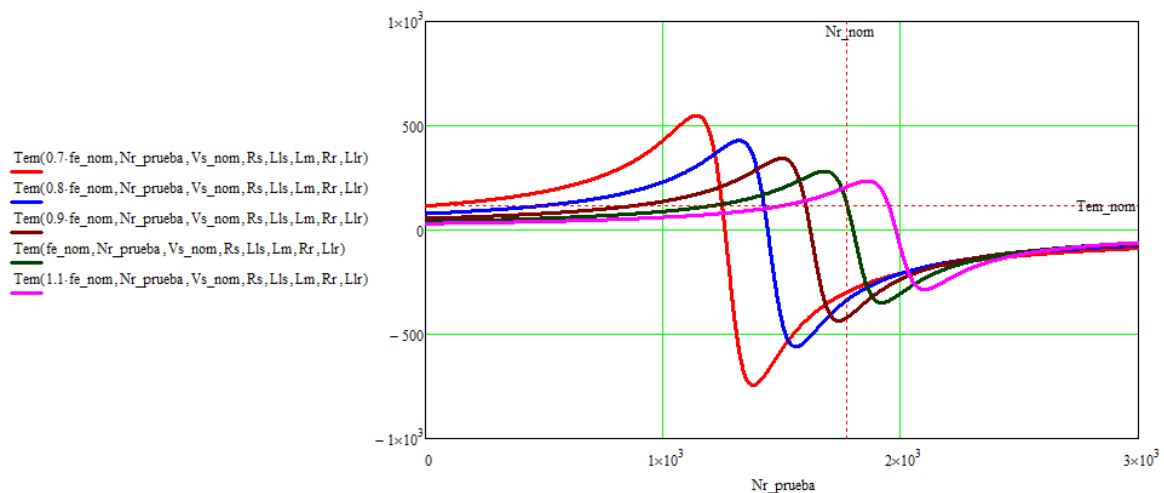


Fig. 1.2. Curvas T_{em} - N_r para variaciones de f_e con $V_s=V_{s_nom}$

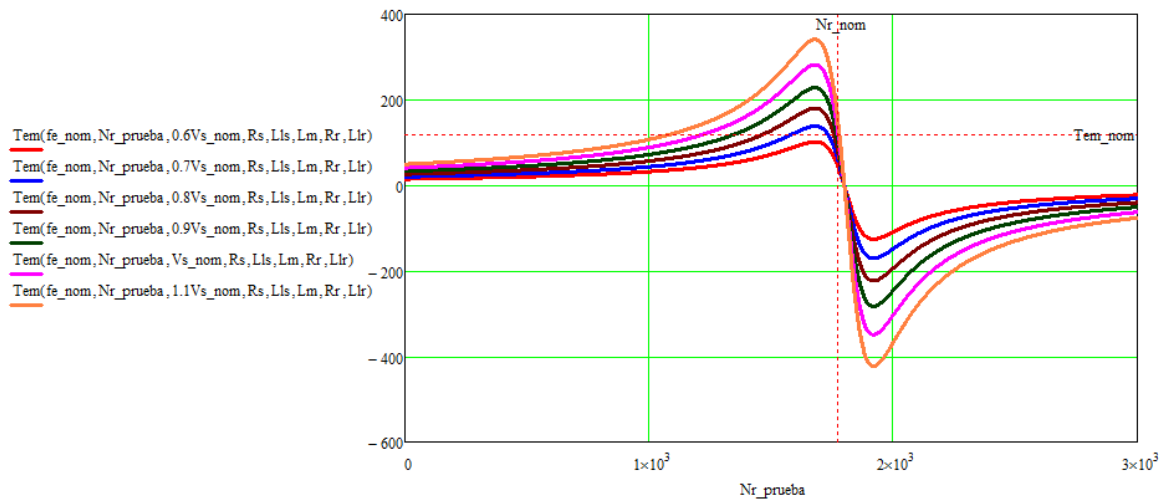


Fig. 1.3. Curvas T_{em} - N_r para variaciones de V_s con $f_e=f_{e_nom}$

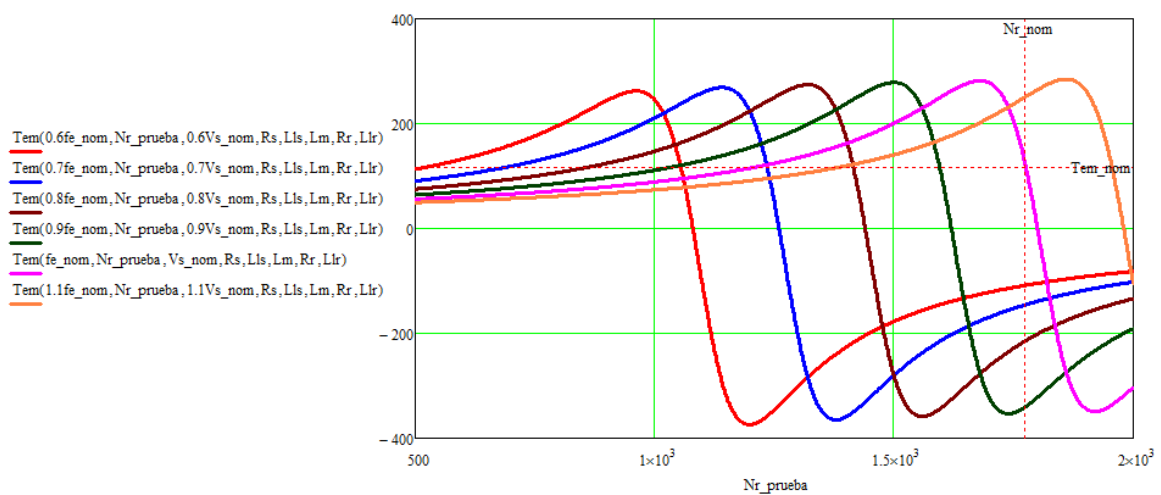


Fig. 1.4. Curvas T_{em} - N_r para un control $V_s/f_e=cte=V_{s_nom}/f_{e_nom}$

1.2. Obtener las siguientes curvas en los siguientes puntos de operación (OPs) de las máquinas 1 y 2:

- Curvas T_{em} - N_r y FP_s - N_r (factor de potencia visto desde el estator) para f_{e_nom} y V_{s_nom}
- Curvas T_{em} - N_r y P_{mec} - N_r (potencia mecánica) para f_{e_nom} y V_{s_nom}
- Curvas T_{em} - N_r , I_s - N_r e I_r - N_r (corriente eficaz de estator y rotor) para f_{e_nom} y V_{s_nom}
- Curvas T_{em} - N_r y E_m - N_r (tensión magnetizante) para f_{e_nom} y V_{s_nom}
- Curvas T_{em} - N_r y λ_m - N_r (enlace de flujo magnetizante) para f_{e_nom} y V_{s_nom}

- **Calcular** para ambas máquinas los valores nominales: T_{em_nom} , FP_{s_nom} , P_{mec_nom} , I_{s_nom} , I_{r_nom} , f_{r_nom} , S_{nom} , f_{slip_nom} , E_{m_nom} , λ_{nom}

- ¿Qué clasificación NEMA asignarías a las máquinas 1 y 2?

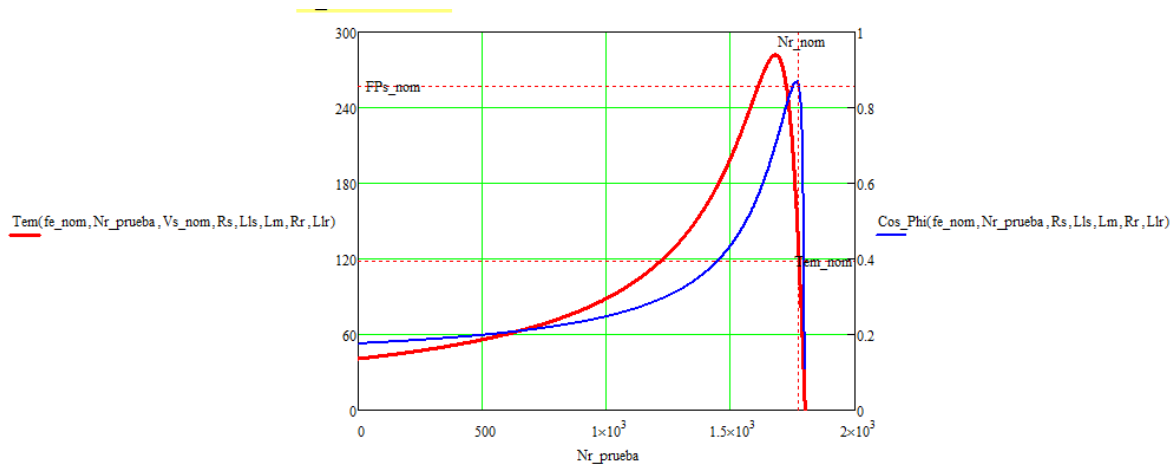


Fig. 1.5. Curvas T_{em} - N_r y FP_s - N_r (factor de potencia visto desde el estator) para $f_{e,nom}$ y $V_{s,nom}$

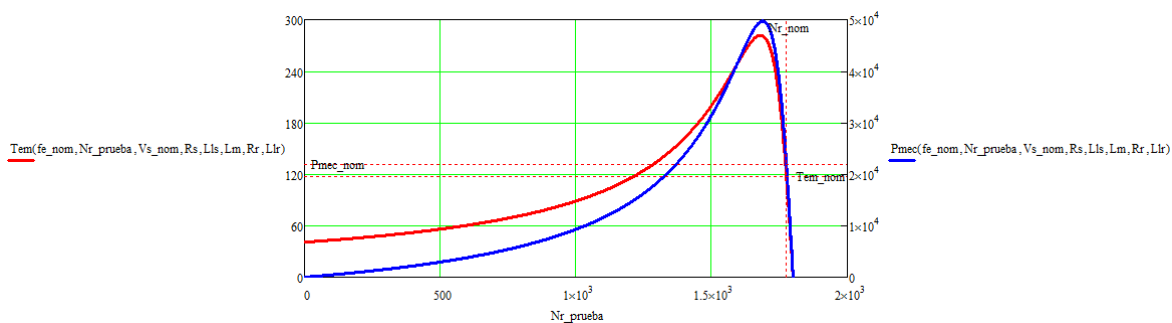


Fig. 1.6. Curvas T_{em} - N_r y P_{mec} - N_r (potencia mecánica) para $f_{e,nom}$ y $V_{s,nom}$

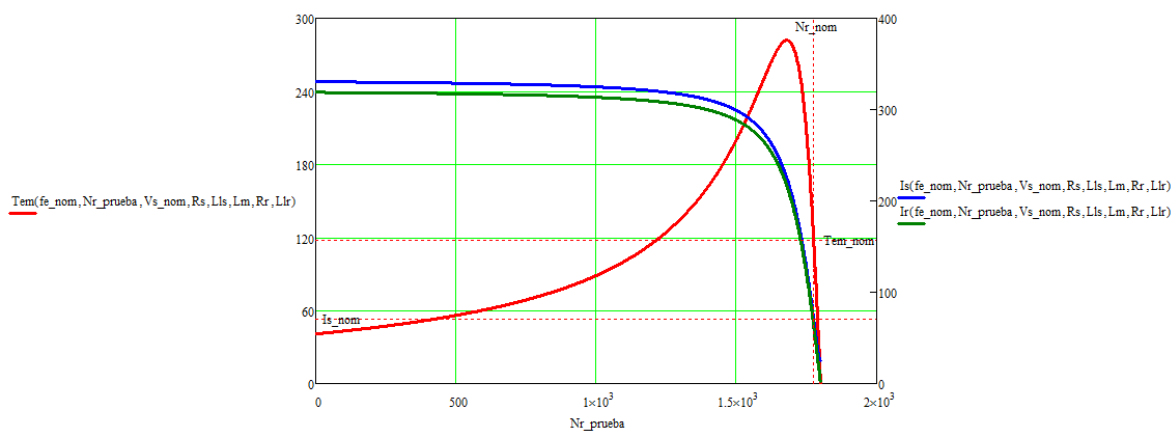


Fig. 1.7. Curvas T_{em} - N_r , I_s - N_r e I_r - N_r (corriente eficaz de estator y rotor) para $f_{e,nom}$ y $V_{s,nom}$

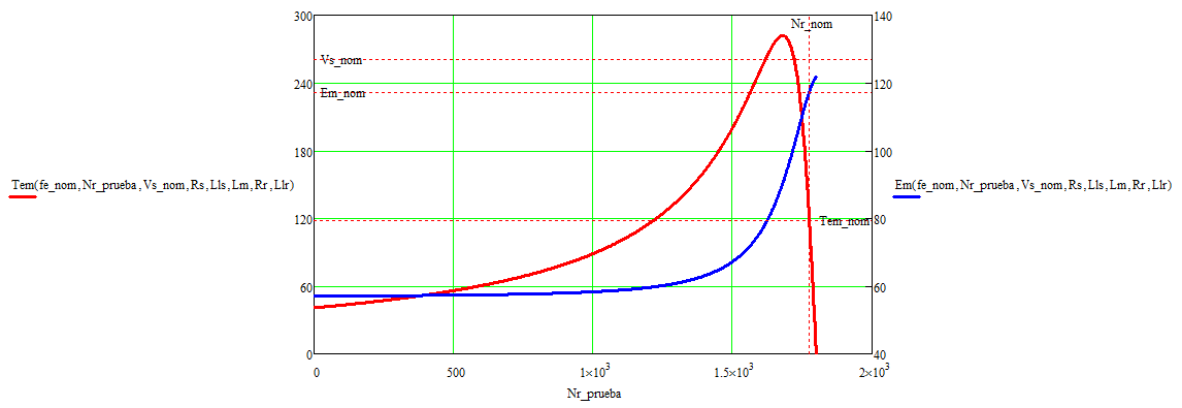


Fig. 1.8. Curvas T_{em} - N_r y E_m - N_r (tensión magnetizante) para $f_{e,nom}$ y $V_{s,nom}$

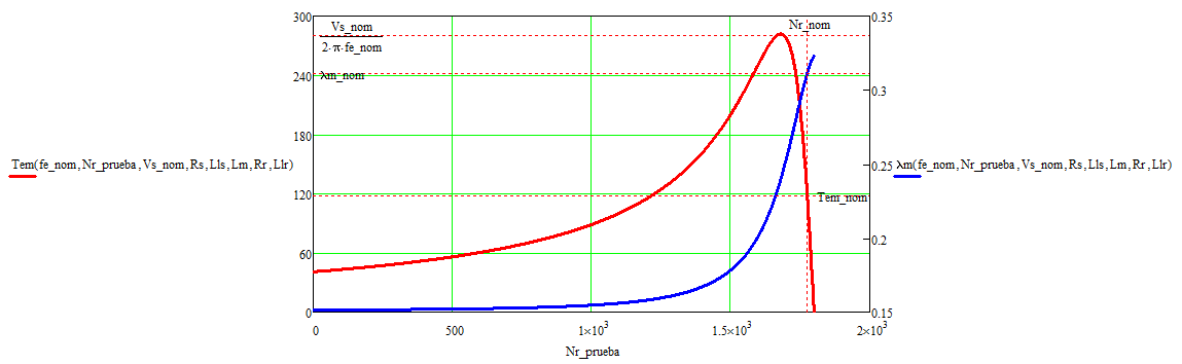


Fig. 1.9. Curvas T_{em} - N_r y λ_m - N_r (enlace de flujo magnetizante) para $f_{e,nom}$ y $V_{s,nom}$

2. Obtención de curvas de funcionamiento estáticas en las 3 zonas de funcionamiento del control FOC

La figura 2.1 muestra las regiones de funcionamiento que se obtienen al aplicar el control FOC a una máquina de inducción limitando la tensión eficaz de estator a un cierto valor V_{s_lim} y la corriente eficaz de estator a un valor I_{s_lim} . Notar que el valor de I_{s_lim} varía con f_e :

- si $f_e \leq f_1 \rightarrow I_{s_lim} = I_{s_lim0} = \text{cte}$
- si $f_e > f_1 \rightarrow I_{s_lim} = I_{s_lim}(f_e) = I_{s_lim0} \cdot f_1 / f_e$

De esta manera se consigue la ZONA 3 de la máquina de inducción, donde se puede aumentar la velocidad aumentando f_e , pero manteniendo $f_{slip} = f_{slip_1} = \text{cte}$ (y $V_s = V_{s_lim} = \text{cte}$), de manera que el par de la máquina no sobrepase el par máximo (*pull-out torque* o *breaking torque*). El efecto de este control es que en la zona 3 la potencia mecánica disminuye proporcionalmente a f_e ($P_{mec} \propto 1/f_e$) y que el par disminuye proporcionalmente a f_e^2 ($T_{em} \propto 1/f_e^2$).

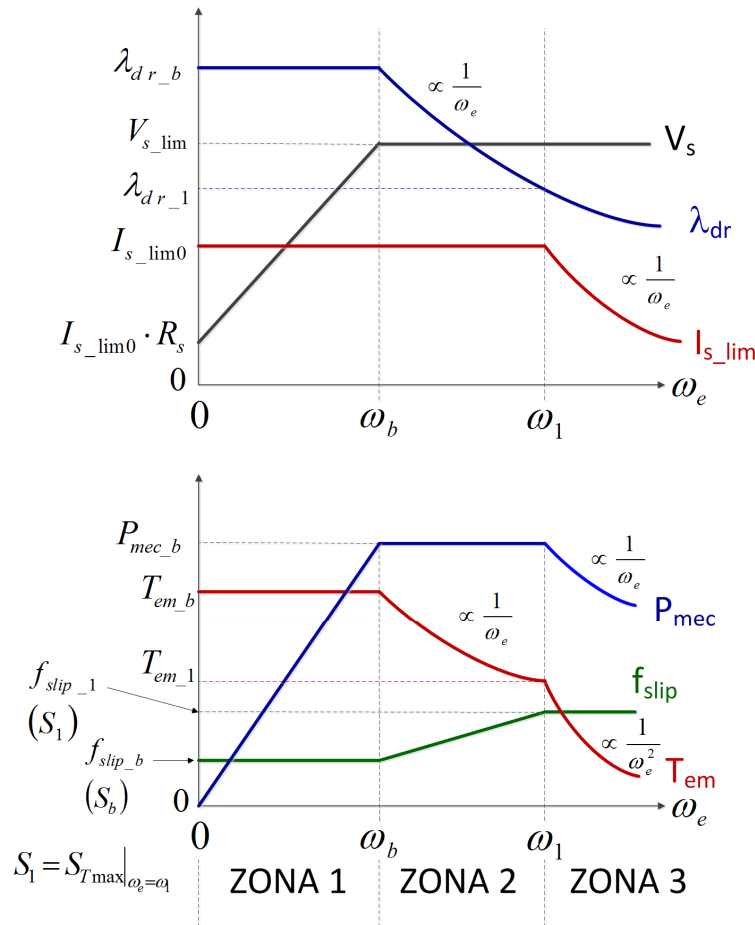


Fig. 2.1. Zonas de funcionamiento de la máquina de inducción con FOC.

2.1. Calcular los siguientes valores que definen las zonas de funcionamiento con control FOC en las máquinas 1 y 2, sometidas a los límites: $I_{s_lim0}=1,5 \cdot I_{s_nom}$, $V_{s_lim}=1,1 \cdot V_{s_nom}$

- λ_{r_b} y λ_{r_1} (valores de enlace de flujo en el rotor)
- f_b y f_1 (frecuencias eléctricas aplicadas al estator que delimitan las zonas)
- f_{slip_b} y f_{slip_1} (frecuencias de deslizamiento que delimitan las zonas)
- S_b y S_1 (valores del deslizamiento en los límites de las zonas)
- N_{r_b} y N_{r_1} (valores de velocidad del rotor en r.p.m. en los límites de las zonas)
- T_{em_b} y T_{em_1} (par electromecánico en los límites de las zonas)
- P_{mec_b} y P_{mec_1} (potencia mecánica en los límites de las zonas)

2.2. Obtener las curvas de las siguientes magnitudes en función de f_e en las máquinas 1 y 2, resultantes de aplicar el control FOC:

- Curva de $\lambda_r(f_e)$
- Curva de $I_{s_lim}(f_e)$
- Curva de $T_{em}(f_e)$ para $I_s=I_{s_lim}$ (máximo par permitido en la máquina)
- Curva de $f_{slip}(f_e)$ con control FOC para $I_s=I_{s_lim}$ (f_{slip} para el máximo par permitido en la máquina).
- Curva de $N_{slip}(f_e)$ con control FOC para $I_s=I_{s_lim}$ (N_{slip} para el máximo par permitido en la máquina).
- Curva de $S(f_e)$ con control FOC para $I_s=I_{s_lim}$ (S para el máximo par permitido en la máquina).
- Curva de $N_r(f_e)$ con control FOC para $I_s=I_{s_lim}$ (N_r para el máximo par permitido en la máquina).
- Curva de $V_s(f_e)$ con control FOC para $I_s=I_{s_lim}$ (V_s para el máximo par permitido en la máquina).

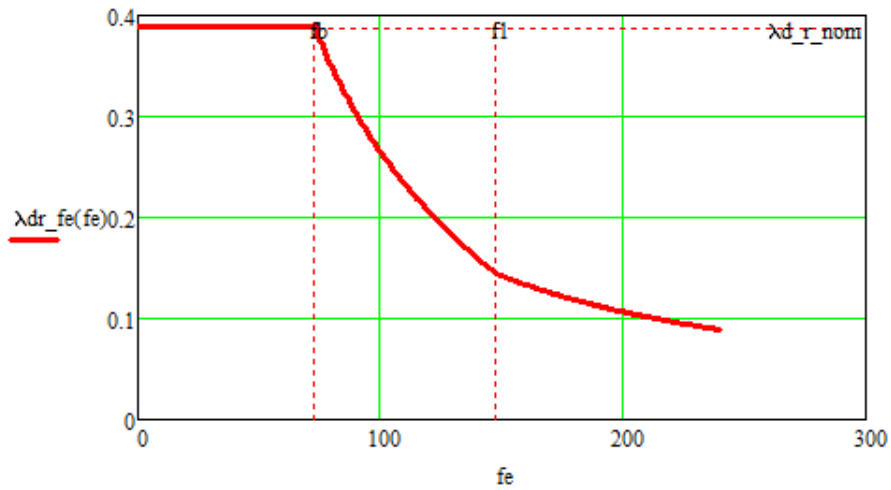


Fig. 2.2. Curva de $\lambda_r(f_e)$ con FOC

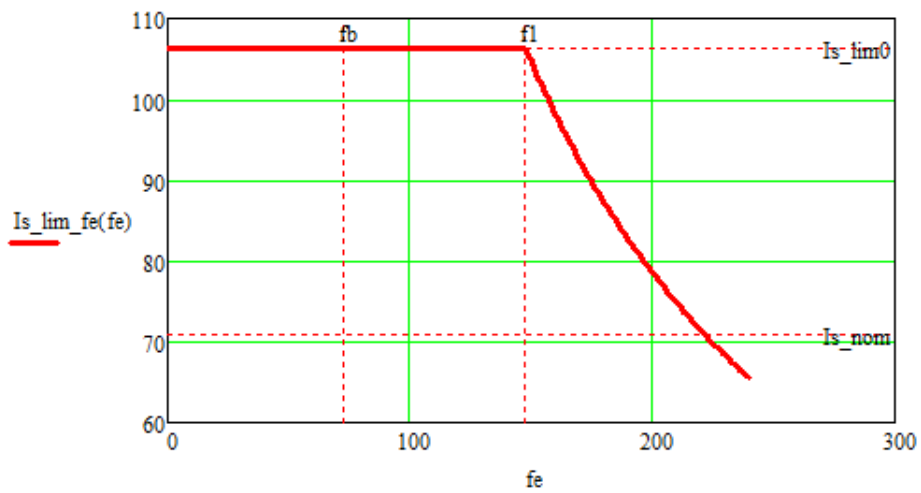


Fig. 2.3. Curva de $I_{s_lim}(f_e)$ con control FOC

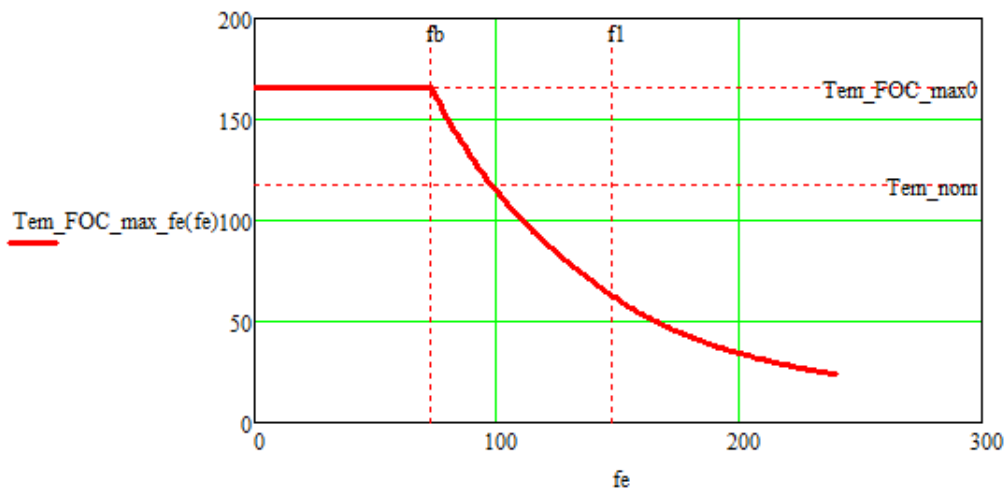


Fig. 2.4. Curva de $T_{em}(f_e)$ con control FOC para $I_s=I_{s_lim}$ (máx. par permitido en la máquina)

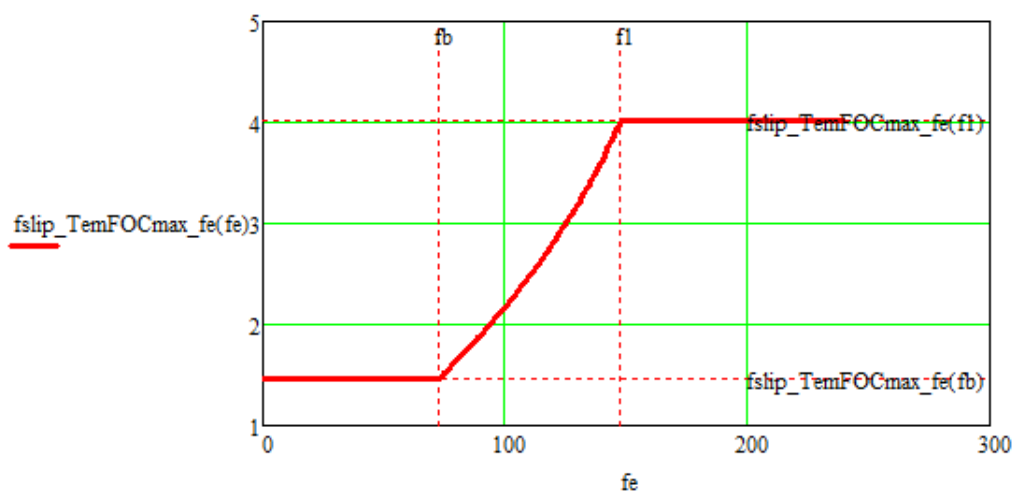


Fig. 2.5. Curva de $f_{slip}(f_e)$ con control FOC para $I_s = I_{s_lim}$ (f_{slip} para el máx. par permitido en la máquina)

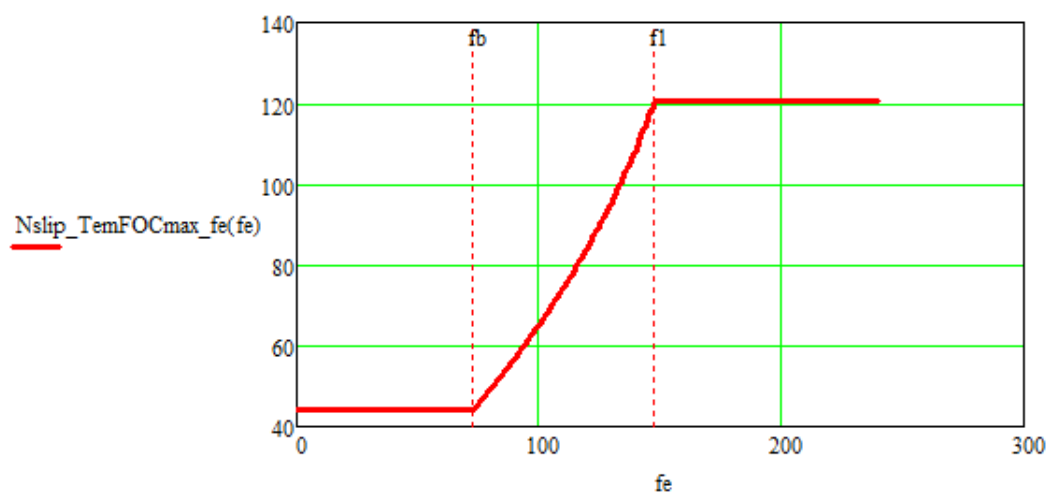


Fig. 2.6. Curva de $N_{slip}(f_e)$ con control FOC para $I_s = I_{s_lim}$ (N_{slip} para el máx. par permitido en la máquina)

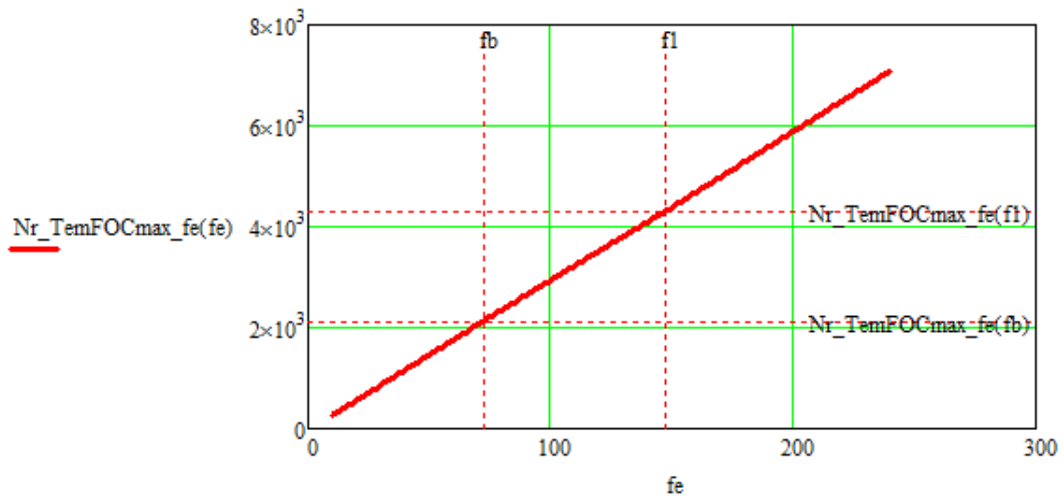


Fig. 2.7. Curva de $N_r(f_e)$ con control FOC para $I_s = I_{s_lim}$ (N_r para el máx. par permitido en la máquina)

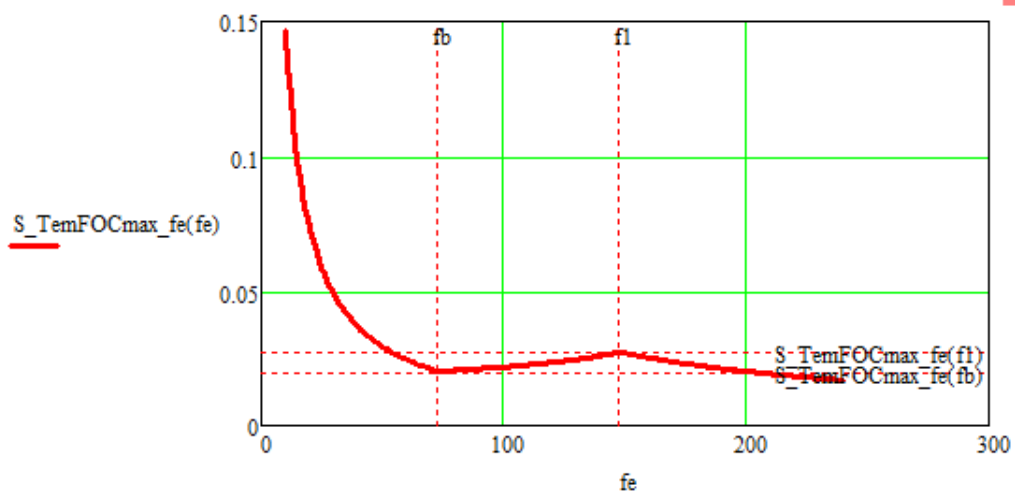


Fig. 2.8. Curva de $S(f_e)$ con control FOC para $I_s = I_{s_lim}$ (S para el máx. par permitido en la máquina)

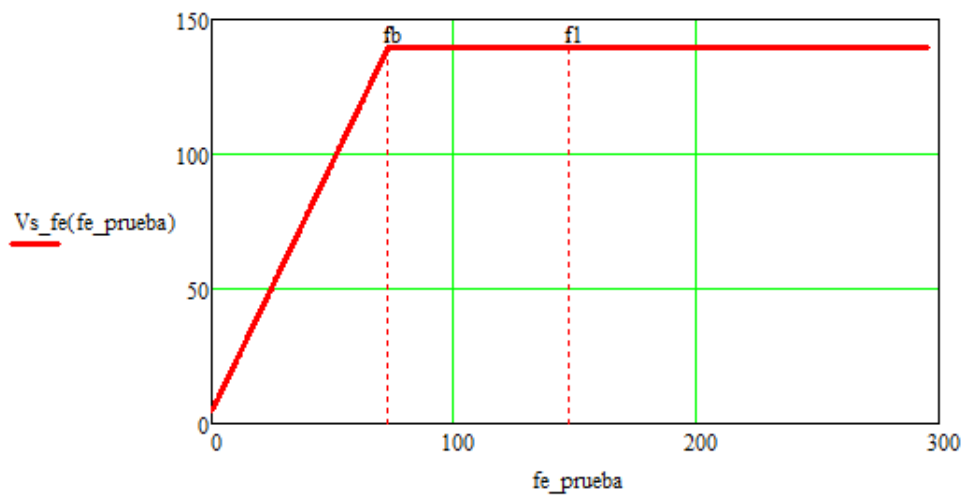


Fig. 2.9. Curva de $V_s(f_e)$ con control FOC para $I_s = I_{s_lim}$ (V_s para el máx. par permitido en la máquina)

2.3. Obtener las curvas de las siguientes magnitudes en función de N_r en las máquinas 1 y 2, resultantes de aplicar el control FOC:

- Curvas de $T_{em}(N_r)$ para $I_s=I_{s_lim}$ (par en la máquina) en las zonas 1 y 2. Superponer a estas curvas la curva que limita el par máximo, $T_{em_max}(N_r)$.
- Curvas de $\lambda_m(N_r)$ (valor eficaz del enlace de flujo magnetizante en la máquina) en las zonas 1 y 2. Superponer a estas curvas la curva de $\lambda_m(N_r)$.
- Curvas de $P_{mec}(N_r)$ (potencia mecánica ejercida por la máquina) en las zonas 1 y 2.

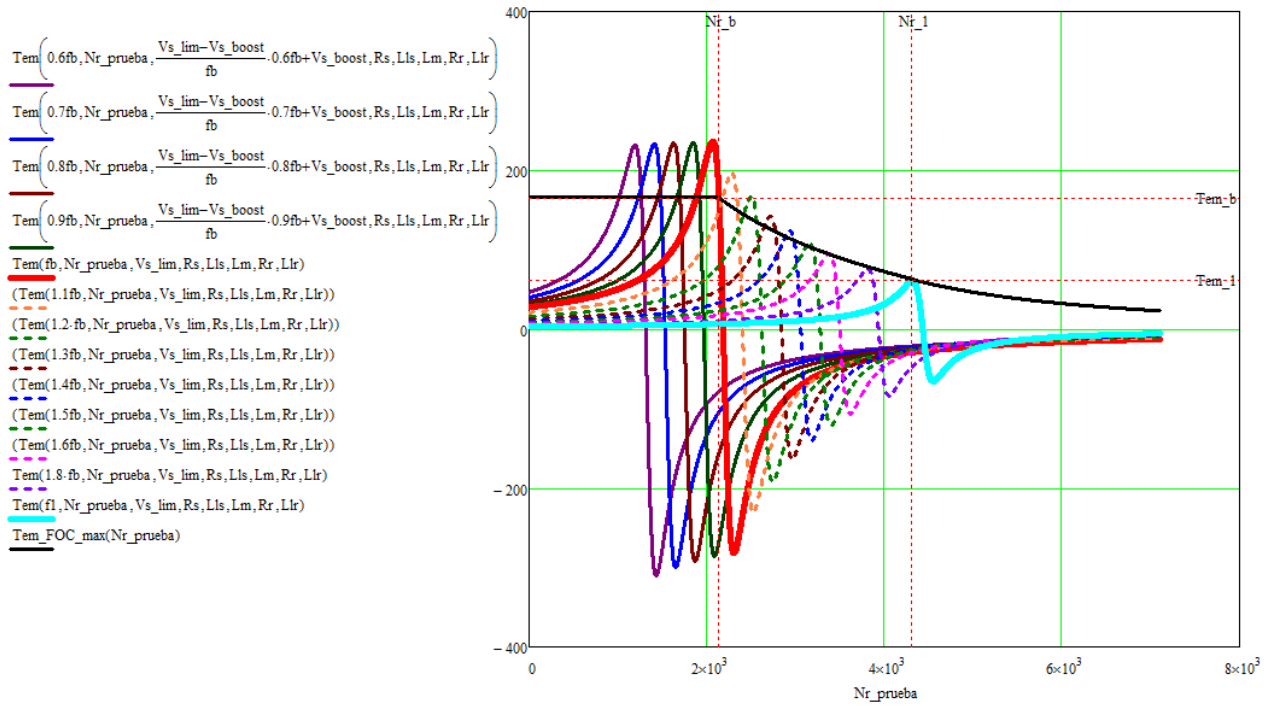


Fig. 2.10. Curvas de $T_{em}(N_r)$ para $I_s=I_{s_lim}$ (par en la máquina) en las zonas 1 y 2. Se superpone a estas curvas la curva que limita el par máximo, $T_{em_max}(N_r)$.

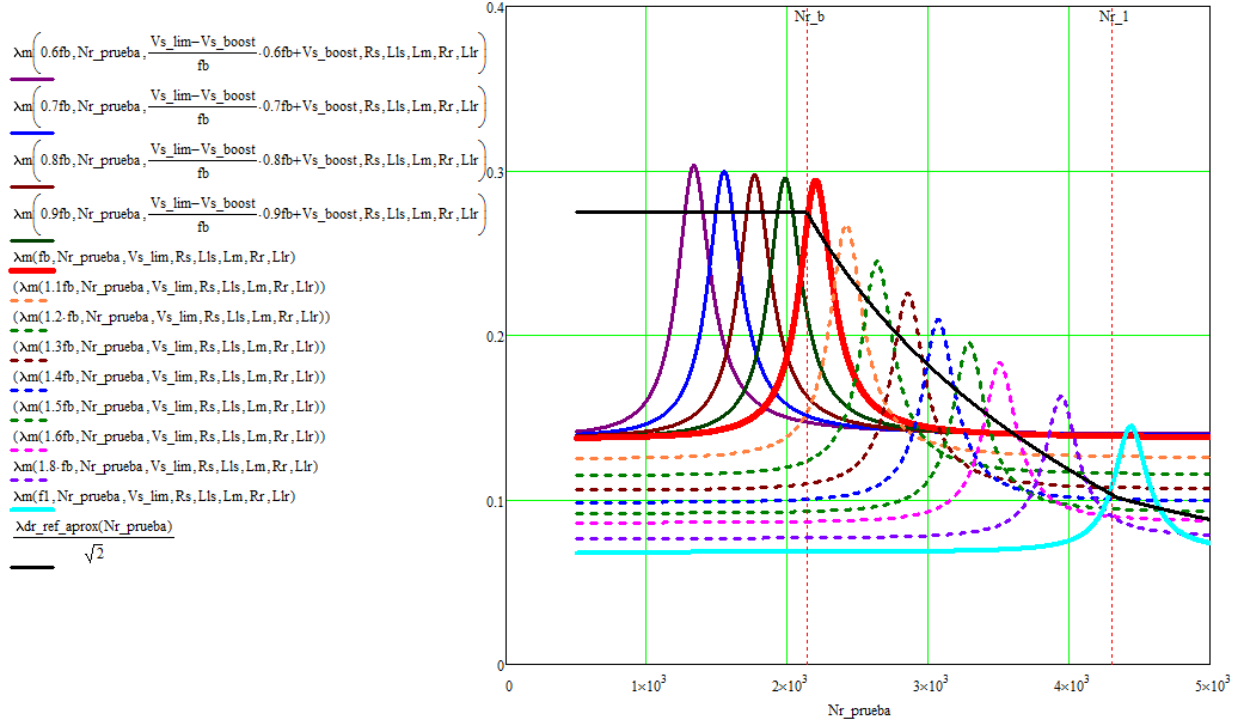


Fig. 2.11. Curvas de $\lambda_m(N_r)$ (valor eficaz del enlace de flujo magnetizante en la máquina) en las zonas 1 y 2. Superponer a estas curvas la curva de $\lambda_m(N_r)$.

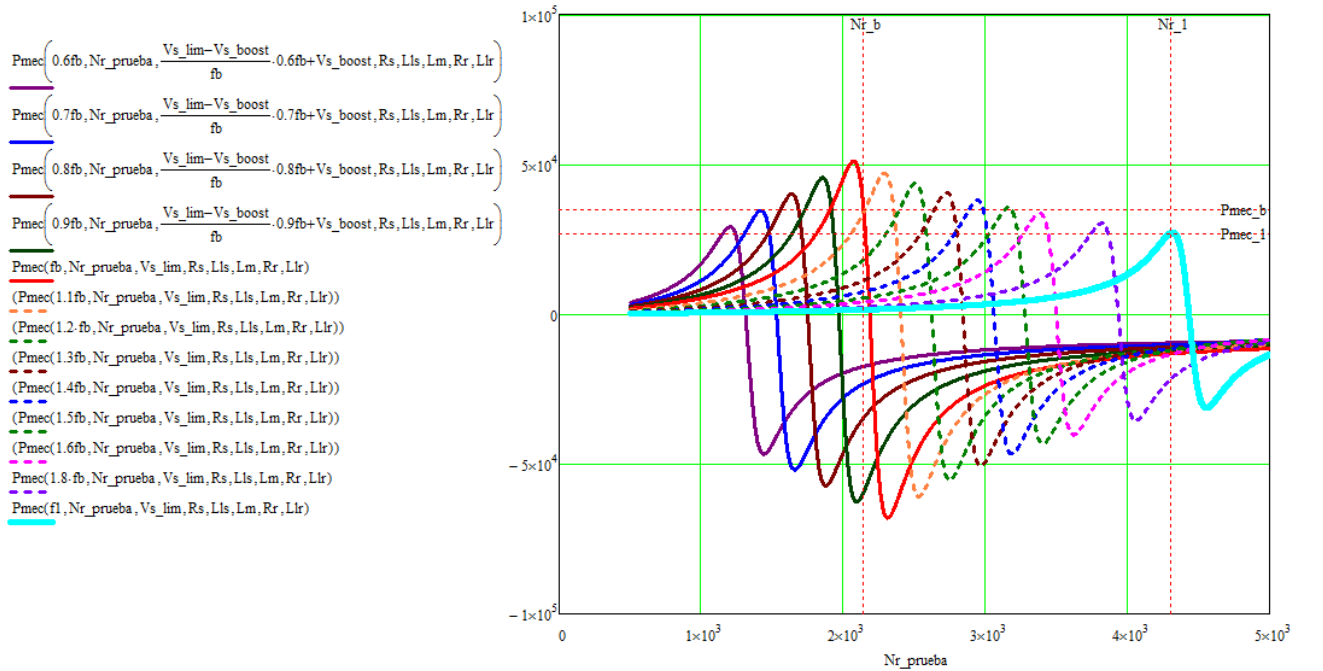


Fig. 2.12. Curvas de $P_{mec}(N_r)$ (potencia mecánica ejercida por la máquina) en las zonas 1 y 2.