PROYECTO FINAL INTEGRADOR

AUTOMÁTICA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

JONATHAN OBREDOR - 2017

TEMAS

- Modelo de la Máquina eléctrica de CA
- Lazo abierto
- Controlabilidad y observabilidad
- Control Vectorial: control desacoplado de par motor y flujo magnético
- Observador
- Simulación en tiempo continuo

ESQUEMA GENERAL

Tensión de alimentación CC

↓

Inversor trifásico — Máquina CA — Transmisión — Carga mecánica

MODELO: SISTEMA MECÁNICO

Carga

$$J_l \ddot{q}(t) = T_q(t) - b_l \dot{q}(t) - T_l(t)$$

Transmisión rígida - 1 GDL

$$\begin{cases} \dot{q}(t) = \frac{1}{r}\omega_m(t) \\ T_q(t) = rT_d(t) \end{cases}$$

En la máquina eléctrica

$$\begin{cases} J_m \dot{\omega_m}(t) = T_m(t) - b_m \omega_m(t) - T_d(t) \\ \dot{\theta_m}(t) = \omega_m(t) \end{cases}$$

Finalmente

$$J'_m = J_m + \frac{J_l}{r^2} \wedge b'_m = b_m + \frac{b_l}{r^2} \wedge T'_l = \frac{T_l}{r}$$

$$\begin{cases} J'_m \dot{\omega_m}(t) = T_m(t) - b'_m \omega_m(t) - T'_l(t) \\ \dot{\theta_m}(t) = \omega_m(t) \end{cases}$$

MODELO

S. electromagnético

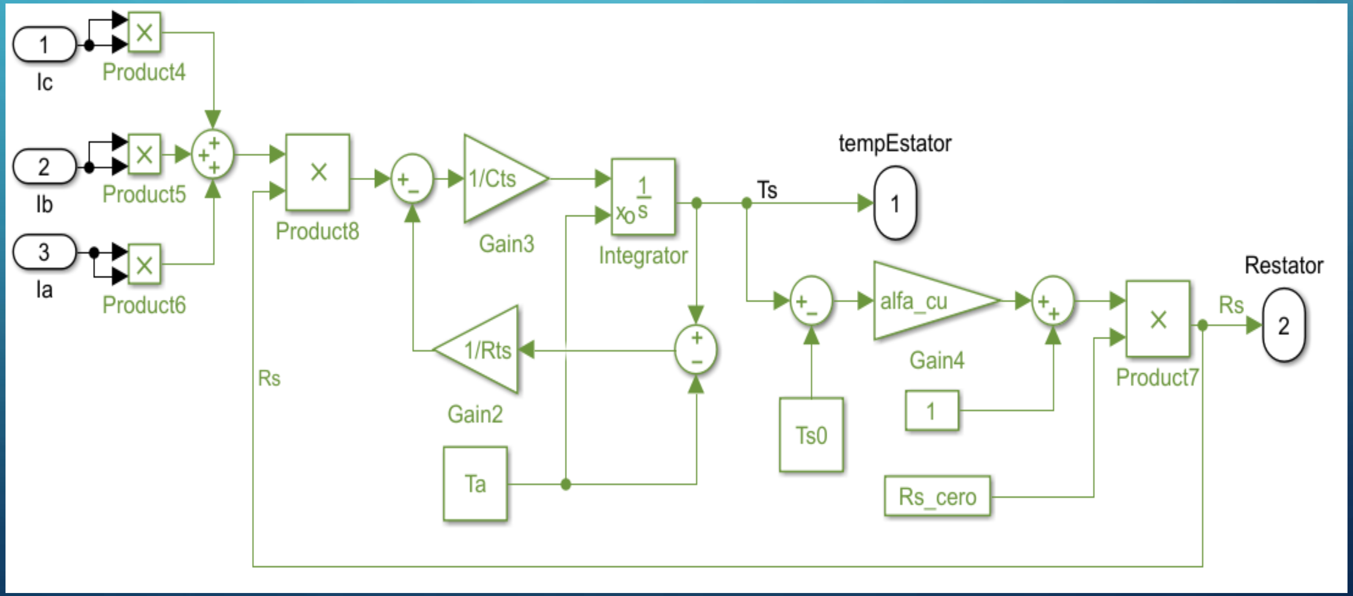
$$\begin{cases} T_m(t) = \frac{3}{2} P_p\left[\lambda_{af} + \left(L_d - L_q\right) i_d(t)\right] i_q(t) \\ \omega_r(t) = P_p\ \omega_m(t) \end{cases}$$

S. eléctrico del Estator

$$\begin{cases} V_q(t) = R_s i_q(t) + L_q \frac{d i_q(t)}{dt} + \left[\lambda_{af} + L_d i_d(t)\right] \omega_r(t) \\ V_d(t) = R_s i_d(t) + L_d \frac{d i_d(t)}{dt} - L_q i_q(t) \omega_r(t) \\ V_0(t) = R_s . i_{os}(t) + L_{ls} . \frac{d i_{os}(t)}{dt} = 0 \end{cases}$$

MODELO: SISTEMA TÉRMICO

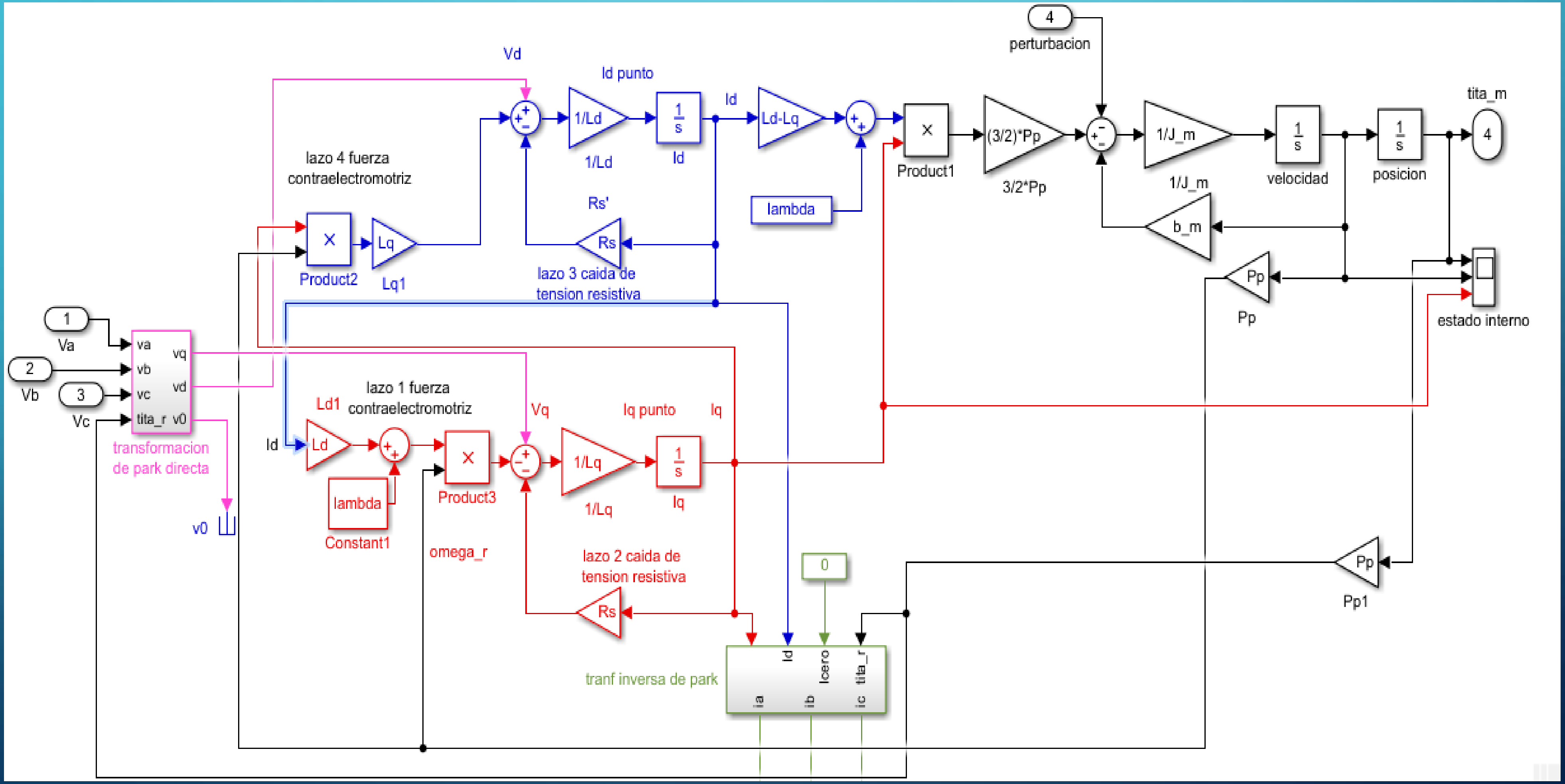
$$
\begin{cases}
P_{s\,perd}(t) = R_s\left(i_{as}(t)^2 + i_{bs}(t)^2 + i_{cs}{}^2(t)\right) \\
P_{s\,perd}(t) = C_{ts}\dfrac{d\,T_s(t)}{dt} + \dfrac{1}{R_{ts-amb}}\left(T_s(t) - T_{amb}(t)\right) \\
R_s = R_{s0}\left(1 + \alpha_{Cu}\left(T_s(t) - T_{s0}\right)\right)
\end{cases}
$$



MODELO GLOBAL NO LINEAL

- $$\begin{cases} \dot{\omega_m}(t) = \frac{3}{2} P_p\left[\lambda_{af} + \left(L_d - L_q\right) i_d(t)\right] \frac{i_q(t)}{J_m'} - \frac{b_m'}{J_m'} \omega_m(t) - \frac{1}{J_m'} T_l'(t) \\ \dot{\theta_m}(t) = \omega_m(t) \\ \dot{i_q}(t) = -\frac{R_s}{L_q} i_q(t) - \left[\lambda_{af} + L_d\, i_d(t)\right] \frac{P_p}{L_q} \omega_m(t) + \frac{V_q}{L_q}(t) \\ \dot{i_d}(t) = -\frac{R_s}{L_d} i_d(t) + \frac{L_q\, P_p}{L_d}\, i_q(t)\, \omega_m(t) + \frac{V_d}{L_d}(t) \\ \dot{i_0}(t) = \frac{1}{L_{ls}} V_0(t) - \frac{R_s}{L_{ls}} i_0(t) \\ \dot{T_s}(t) = \frac{1}{C_{ts}} \left\{ R_{s0}\left(1 + \alpha_{Cu}\left(T_s(t) - T_{s0}\right)\right) * \left(i_{as}(t)^2 + i_{bs}(t)^2 + {i_{cs}}^2(t)\right) - \frac{1}{R_{ts-amb}}\left(T_s(t) - T_{amb}(t)\right) \right\} \end{cases}$$

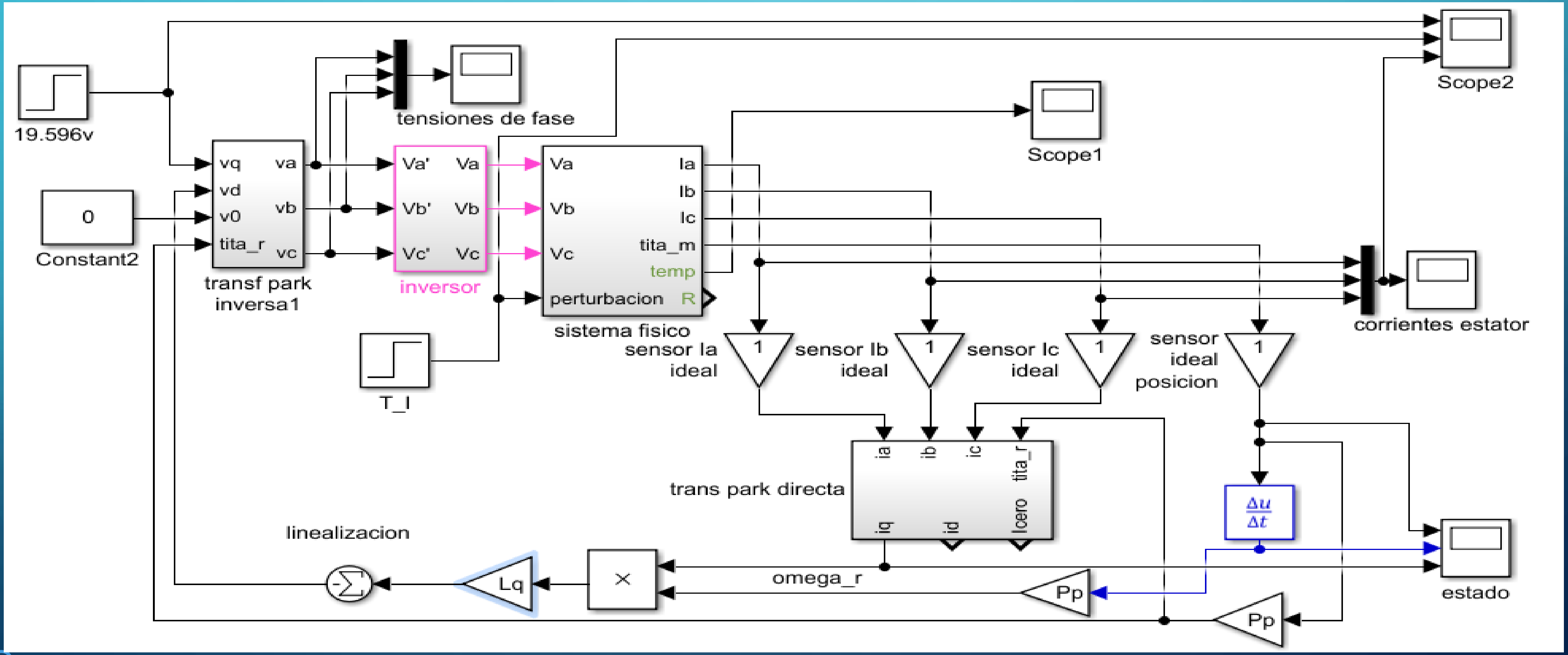
MODELO GLOBAL NO LINEAL



MODELO LTI

- La tensión en el eje directo es:
- $V_d(t) = R_s i_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} - L_q i_q(t)\omega_r(t)$
- $V_d(t) = -L_q\, i_q\, Pp\, \omega_m$

MODELO LTI



19.596v
Constant2
0
vq
vd
v0
tita_r
va
vb
vc
transf park
inversa1
tensiones de fase
Va'
Vb'
Vc'
Va
Vb
Vc
inversor
Va
Vb
Vc
perturbacion
Ia
Ib
Ic
tita_m
temp
R
sistema fisico
T_l
Scope1
Scope2
corrientes estator
sensor Ia
ideal
sensor Ib
ideal
sensor Ic
ideal
sensor
ideal
posicion
1
1
1
1
ia
ib
ic
tita_r
iq
id
Icero
trans park directa
linealizacion
Lq
omega_r
Pp
Pp
estado

MODELO LTI

Con la restricción el sistema queda:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega_m} \\ \dot{i_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dfrac{-b'_m}{J'_m} & \dfrac{3}{2}\dfrac{Pp\ \lambda_{af}}{J'_m} \\ 0 & -\dfrac{Pp\ \lambda_{af}}{L_q} & -\dfrac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_m \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{1}{L_q} \end{bmatrix} V_q + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dfrac{1}{J'_m} \\ 0 \end{bmatrix} T'_l = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dfrac{-b'_m}{J'_m} & \dfrac{3}{2}\dfrac{Pp\ \lambda_{af}}{J'_m} \\ 0 & -\dfrac{Pp\ \lambda_{af}}{L_q} & -\dfrac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_m \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{1}{J'_m} \\ \dfrac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ T'_l \end{bmatrix}$$

$$Y = [1\ \ 0\ \ 0] * \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_m \\ i_q \end{bmatrix}$$

MODELO LTI

- efecto sobre $i_{abcs}(t)$

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & sen(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & sen(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_q \\ 0 \\ i_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} i_{as=} \cos(\theta_r)\, i_q + i_0 \\ i_{bs} = \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) i_q + i_0 \\ i_{cs} = \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) i_q + i_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{as=} \cos(\theta_r)\, i_q \\ i_{bs} = \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) i_q \\ i_{cs} = \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) i_q \end{cases}$$

- $i_0 = 0$

DIFERENCIA CON EL MOTOR CC?

- Si Id=0 $\Rightarrow$

$$V_q(t) = R_s i_q(t) + L_q \frac{di_q(t)}{dt} + [\lambda_{af}] P_p\, \omega_m(t) \quad \Rightarrow \quad \mathrm{K}_e = \lambda_{af} P_p$$

$$T_m(t) = \frac{3}{2} P_p\, \lambda_{af}\, i_q(t) \quad \Rightarrow \quad K_t = \frac{3}{2} P_p\, \lambda_{af}$$

Kt ≠ Ke

MODELO LPV

asumir $z(t) = Z_{op}(t) + \Delta z(t)$

sistema $\begin{cases} \underline{\dot{X}} = f\left(\underline{x}(t), \underline{u}(t)\right) \\ y(t) = C.\underline{X}(t) \end{cases}$ $\Rightarrow$ $\dfrac{d\ \left(\underline{X_{op}(t)} + \underline{\Delta X(t)}\right)}{dt} = f\left(\underline{X_{op}}(t) + \underline{\Delta X}(t), \underline{u_{op}}(t) + \underline{\Delta u}(t)\right)$

Expandir serie de Taylor, se trunca al 1° termino, e igualar

- Se expande en serie de Taylor y se trunca en el término lineal

- $$f\left(\underline{X_{op}}(t) + \underline{\Delta X}(t), \underline{u_{op}}(t) + \underline{\Delta u}(t)\right) \cong f\left(\underline{X_{op}}(t), \underline{u_{op}}(t)\right) + \left[\left.\frac{\partial f}{\partial \underline{X}}\right|_{op} . \underline{\Delta X}(t) + \left.\frac{\partial f}{\partial \underline{u}}\right|_{op} . \underline{\Delta u}(t)\right]$$

- Finalmente

- $$\frac{d\,\underline{\underline{\boldsymbol{X_{op}}(\boldsymbol{t})}}}{\boldsymbol{dt}} + \frac{d\,\underline{\underline{\boldsymbol{\Delta X}(\boldsymbol{t})}}}{\boldsymbol{dt}} \cong \boldsymbol{f}\left(\underline{\boldsymbol{X_{op}}}(\boldsymbol{t}), \underline{\boldsymbol{u_{op}}}(\boldsymbol{t})\right) + \left[\left.\frac{\boldsymbol{\partial f}}{\boldsymbol{\partial \underline{X}}}\right|_{\boldsymbol{op}} . \underline{\boldsymbol{\Delta X}}(\boldsymbol{t}) + \left.\frac{\boldsymbol{\partial f}}{\boldsymbol{\partial \underline{u}}}\right|_{\boldsymbol{op}} . \underline{\boldsymbol{\Delta u}}(\boldsymbol{t})\right]$$

ESPACIO DE OPERACIÓN NO LINEAL

$$\frac{d\,\underline{X}_{op}(t)}{dt} + \frac{d\,\underline{\Delta X}(t)}{dt} \cong f\left(\underline{X}_{op}(t), \underline{u}_{op}(t)\right) + \left[\left.\frac{\partial f}{\partial \underline{X}}\right|_{op} . \underline{\Delta X}(t) + \left.\frac{\partial f}{\partial \underline{u}}\right|_{op} . \underline{\Delta u}(t)\right]$$

- $\frac{d\,\underline{X}_{op}(t)}{dt} = \underline{\dot{X}_{op}(t)} = f\left(\underline{X}_{op}(t), \underline{u}_{op}(t)\right) \cong 0$

ESPACIO DE OPERACIÓN NO LINEAL

$$
\begin{cases}
\dot{\theta}_{m_{op}}(t) = \omega_{m_{op}}(t) \cong cte \\
\dot{\omega}_{m_{op}}(t) = \dfrac{3}{2}\dfrac{P_p}{J'_m}\left[\lambda_{af} + \left(L_d - L_q\right) i_{d_{op}}(t)\right] i_{q_{op}}(t) - \dfrac{b'_m}{J'_m}\omega_{m_{op}}(t) - \dfrac{1}{J'_m} T'_{l_{op}}(t) \cong 0 \\
\dot{i}_{q_{op}}(t) = -\dfrac{R_s}{L_q} i_{q_{op}}(t) - \left[\lambda_{af} + L_d\, i_{d_{op}}(t)\right]\dfrac{P_p}{L_q}\omega_{m_{op}}(t) + \dfrac{1}{L_q} V_{q_{op}}(t) \cong 0 \\
\dot{i}_{d\,op}(t) = -\dfrac{R_s}{L_d} i_{d\,op}(t) + \dfrac{L_q\, P_p}{L_d}\, i_{q_{op}}(t)\,\omega_{m_{op}}(t) + \dfrac{1}{L_d} V_{d\,op}(t) \cong 0 \\
\dot{i}_{0_{op}}(t) = \dfrac{1}{L_{ls}} V_{0_{op}}(t) - \dfrac{R_s}{L_{ls}} i_{0_{op}}(t) \cong 0
\end{cases}
$$

MODELO LPV

$$\frac{d\,\underline{X_{op}(t)}}{dt} + \frac{d\,\underline{\Delta X(t)}}{dt} \cong f\left(\underline{X_{op}}(t), \underline{u_{op}}(t)\right) + \left[\left.\frac{\partial f}{\partial \underline{X}}\right|_{op} . \underline{\Delta X}(t) + \left.\frac{\partial f}{\partial \underline{u}}\right|_{op} . \underline{\Delta u}(t)\right]$$

- $\frac{d\,\underline{\Delta X(t)}}{dt} = \underline{\Delta \dot{X}(t)} = \left[\left.\frac{\partial f}{\partial \underline{x}}\right|_{op} . \underline{\Delta X}(t) + \left.\frac{\partial f}{\partial \underline{u}}\right|_{op} . \underline{\Delta u}(t)\right]$

- Con $\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \\ i_q(t) \\ i_d(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix}$ y $\underline{u}(t) = \begin{bmatrix} T_l'(t) \\ V_q(t) \\ V_d(t) \\ V_0(t) \end{bmatrix}$

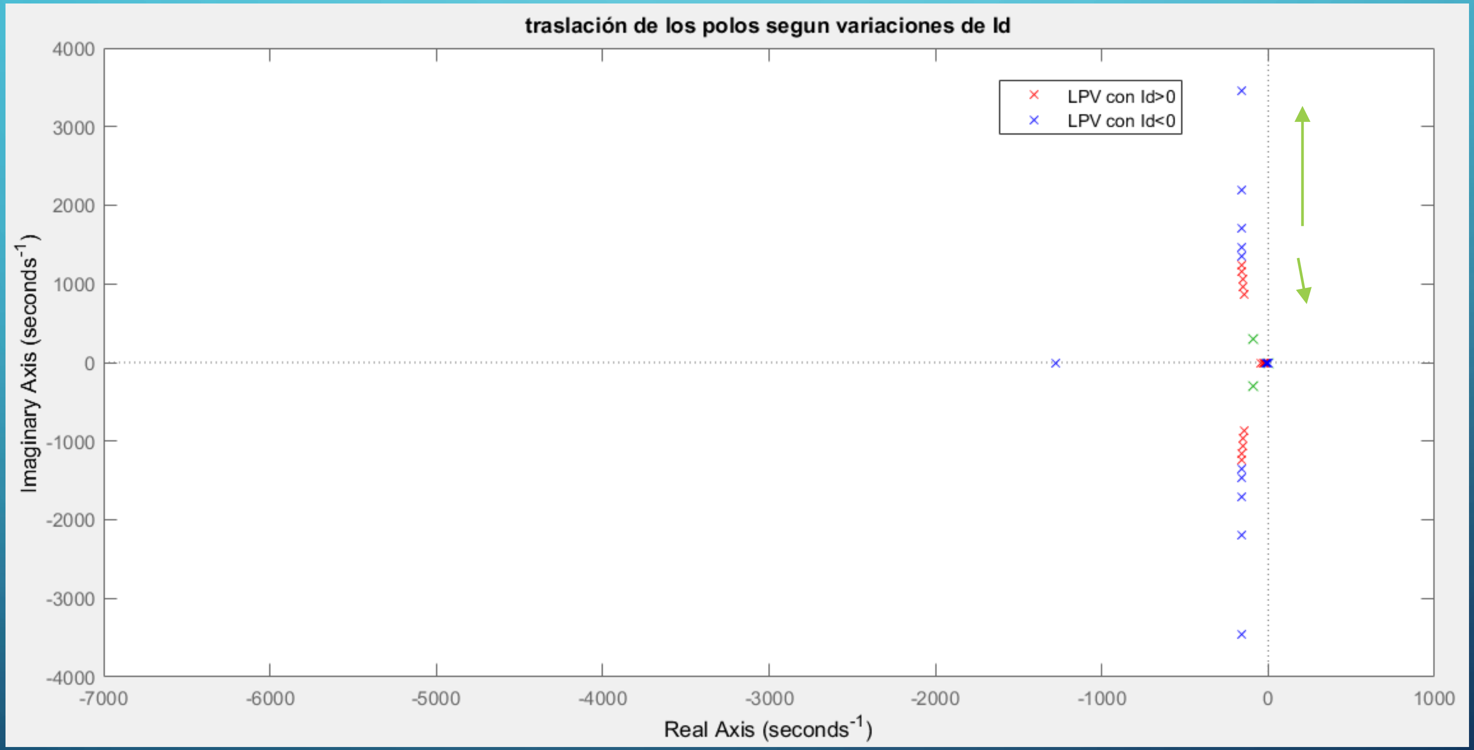
MODELO LPV

- Haciendo todas las derivadas parciales y reemplazando en el punto de operación:

$$
\begin{bmatrix} \Delta\dot{\theta}(t) \\ \Delta\dot{\omega}(t) \\ \Delta\dot{i}_q(t) \\ \Delta\dot{i}_d(t) \\ \Delta\dot{i}_0(t) \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\left(\frac{b'_m}{J'_m}\right) & \frac{3}{2}\frac{P_p\lambda_{af}}{J'_m} + \frac{3}{2}\frac{P_p\left(L_d - L_q\right)}{J'_m}\, i_{d_{op}}(t) & \frac{3}{2}P_p\left(L_d - L_q\right) i_{q_{op}}(t) & 0 \\
0 & -\frac{P_p}{L_q}\left[\lambda_{af} + L_d\, i_{d_{op}}(t)\right] & -\left(\frac{R_s}{L_q}\right) & -\frac{L_d\, P_p}{L_q}\,\omega_{m_{op}}(t) & 0 \\
0 & \frac{L_q\, P_p}{L_d}\, i_{q_{op}}(t) & \frac{L_q\, P_p}{L_d}\,\omega_{m_{op}}(t) & -\left(\frac{R_s}{L_d}\right) & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{R_s}{L_{ls}}\right)
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} \Delta\theta(t) \\ \Delta\omega(t) \\ \Delta i_q(t) \\ \Delta i_d(t) \\ \Delta i_0(t) \end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 \\
-\left(\frac{1}{J'_m}\right) & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{L_q} & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{L_d} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{ls}}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} \Delta T'_l(t) \\ \Delta V_q(t) \\ \Delta V_d(t) \\ \Delta V_0(t) \end{bmatrix}
$$

Con un estado inicial genérico $\Delta\dot{X}_0 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_0(t) \\ \Delta\omega_0(t) \\ \Delta i_{q_0}(t) \\ \Delta i_{d_0}(t) \\ \Delta i_{0_0}(t) \end{bmatrix}$

DEBILITAMIENTO Y REFUERZO DE CAMPO



ANÁLISIS A LAZO ABIERTO DEL LTI

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-b'_m}{J'_m} & \frac{3}{2}\frac{Pp\,\lambda_{af}}{J'_m} \\ 0 & -\frac{Pp\,\lambda_{af}}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_m \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J'_m} \\ \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ T'_l \end{bmatrix}$$

- $\theta_m(s) = G1\,V_q(s) + G2\,T_l'(s)$

- $G1 = \dfrac{\frac{3}{2}P_p\lambda_{af}}{\left[J_m'L_qs^2+(J_m'R_s+b_m'L_q)s+b_m'R_s+\frac{3}{2}(P_p\lambda_{af})^2\right]s}$

- $G2 = \dfrac{-(L_qs+R_s)}{\left[J_m'L_qs^2+(J_m'R_s+b_m'L_q)s+b_m'R_s+\frac{3}{2}(P_p\lambda_{af})^2\right]s}$

- *polos* :

  $-89.2582 + 301.573 * i$

  $-89.2582 - 301.573 * i$

  0

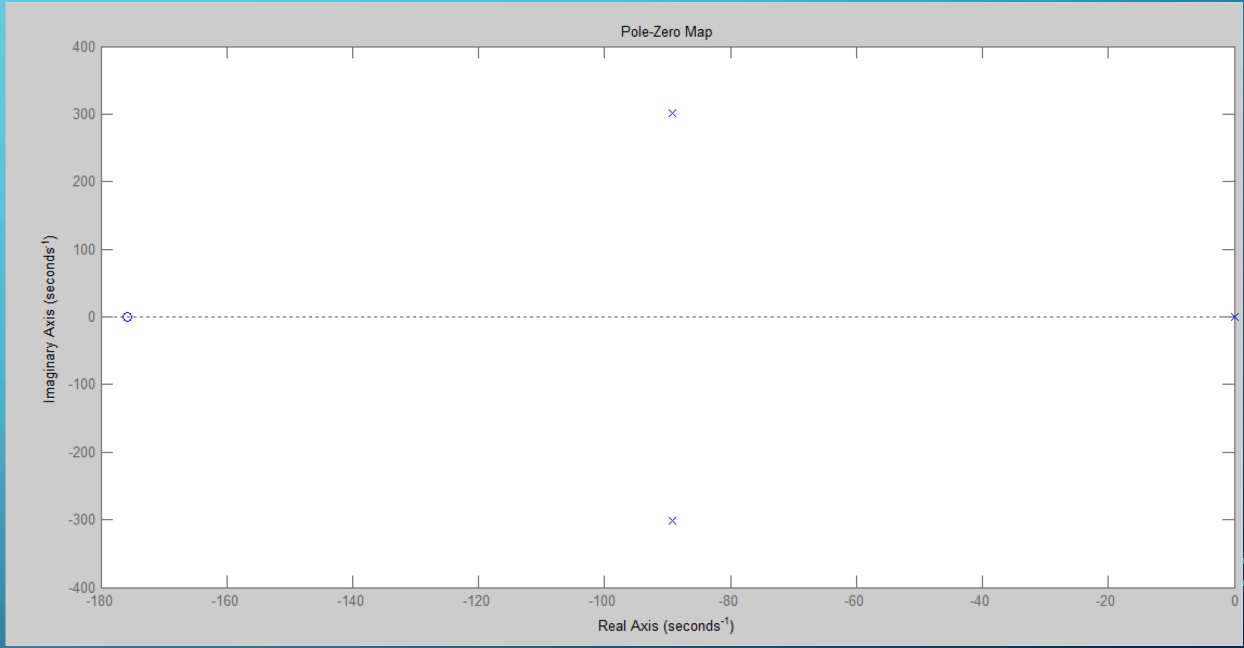
- *ceros*:

-175.8621 (perturbación)

ANÁLISIS A LAZO ABIERTO: ESTABILIDAD

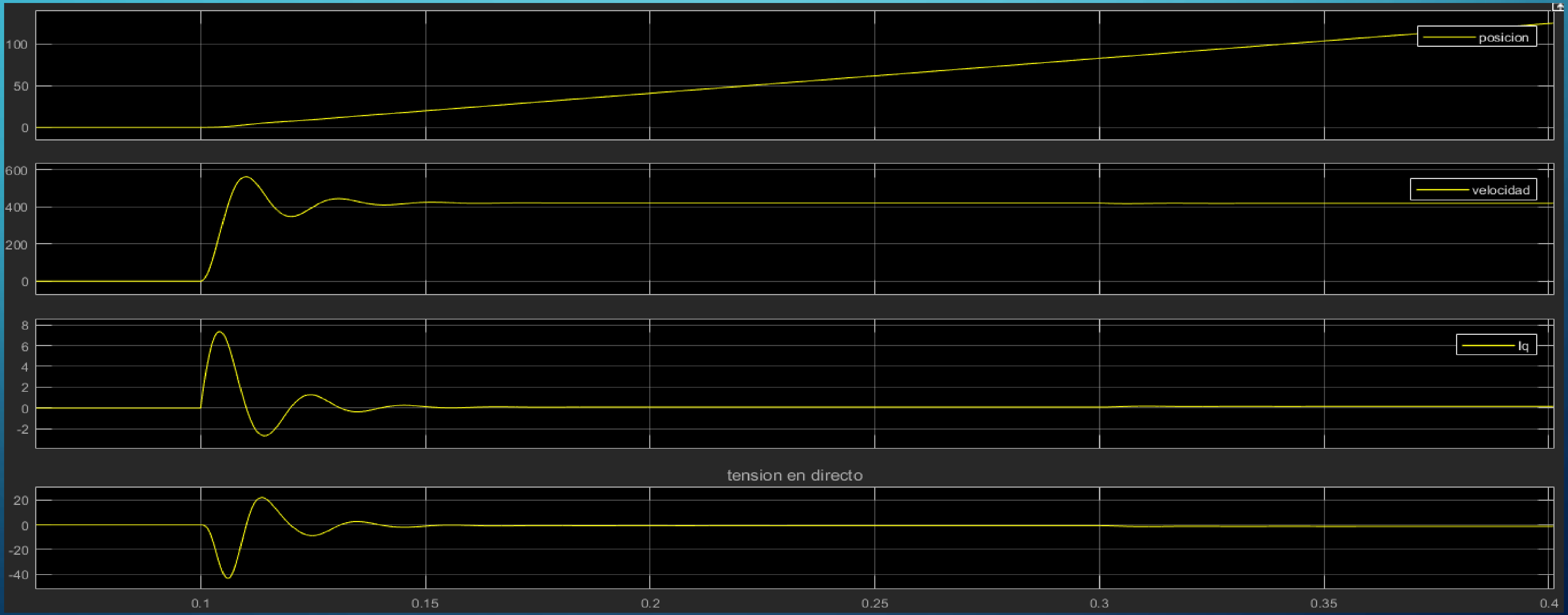
- $\omega_n = \sqrt{\dfrac{2b'_m R_s + \frac{3}{2}\left(P_p \lambda_{af}\right)^2}{2J'_m L_q}} = 314{,}5047 rad/s$

- $\xi = \dfrac{J'_m R_s + b'_m L_q}{2J'_m L_q \omega_n} = 0{,}2838$ subamortiguado

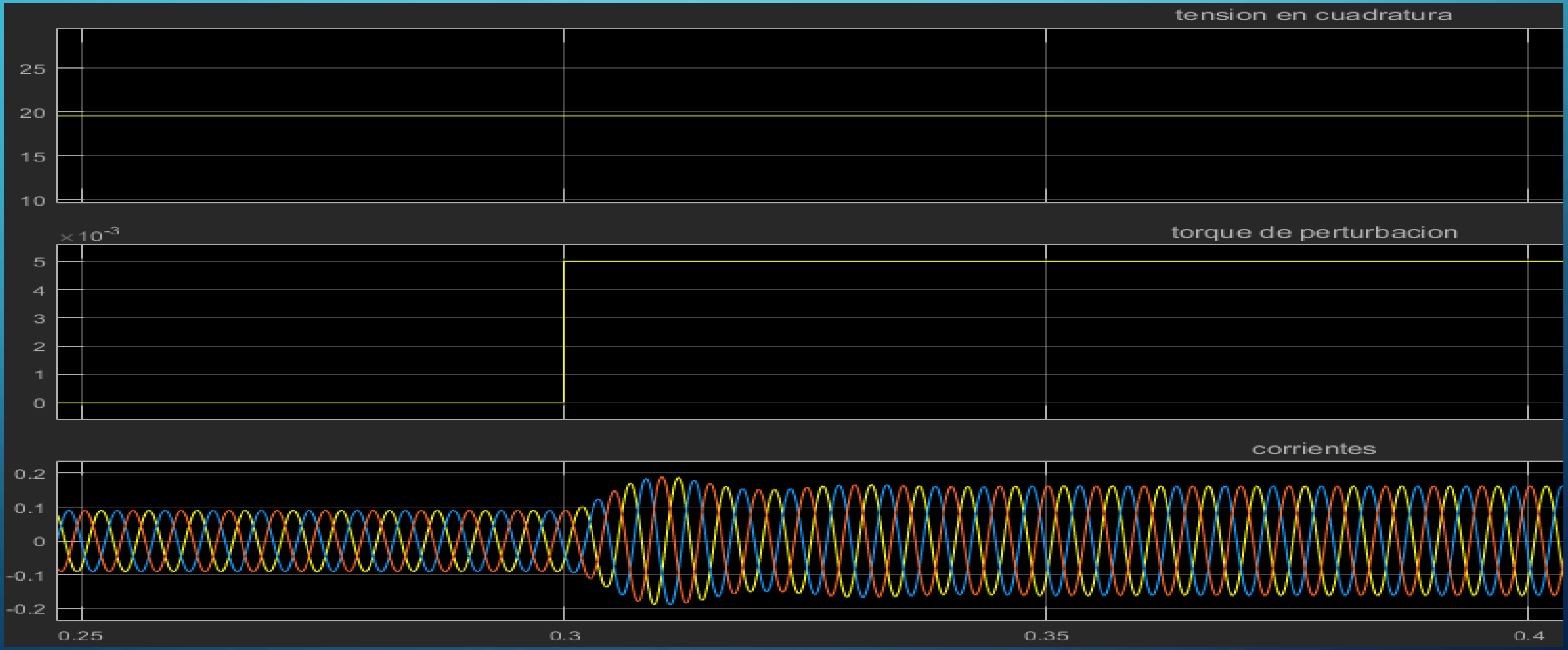


ESCALÓN DE TENSIÓN DE ESTATOR 19.596 Vcc EN 0.1 s ESCALÓN DE TORQUE DE CARGA 1.57 Nm EN 0.3 s

ESTADO INTERNO



TRANSITORIO AL APLICAR LA PERTURBACIÓN



PARÁMETROS DE ESTABLECIMIENTO

- **velocidad** angular es $419\frac{rad}{s}$
- la **corriente** en cuadratura $0{,}2\mathrm{A}$
- sobrepico Iq $= 7{,}32A$

CONTROLABILIDAD

$$\mathcal{C} = [B \mid AB \mid A^2B]$$

$$\mathcal{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{3Pp\lambda}{2J\prime mLq} \\ 0 & \frac{3Pp\lambda}{2J\prime mLq} & \frac{-3b\prime_m Pp\lambda}{2J\prime m^2Lq} - \frac{3Pp\lambda Rs}{2J\prime mLq} \\ \frac{1}{Lq} & \frac{-Rs}{Lq^2} & \frac{-3(Pp\lambda)^2}{2J\prime mLq} + \frac{Rs}{Lq^3} \end{bmatrix}$$

Encoder!

OBSERVABILIDAD

$$\mathcal{O} = [C \mid CA \mid CA^2]^{\mathrm{T}}$$

- Desde la posición es observable
- $$\mathcal{O}_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-b\prime_m}{J\prime_m} & \frac{3Pp\lambda}{2J\prime_m} \end{bmatrix}$$
- Desde la velocidad no es observable
- $\mathcal{O}_\omega =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-b\prime_m}{J\prime_m} & \frac{3Pp\lambda}{2J\prime_m} \\ 0 & (\frac{b\prime_m}{J\prime_m})^2 - \frac{3(Pp*\lambda)^2}{2J\prime mL_q} & -\frac{3b\prime_m Pp*\lambda}{2J\prime m^2} - \frac{3Pp\lambda R_s}{2J\prime mLq} \end{bmatrix}$$

CONTROLADOR DE MOVIMIENTO EN CASCADA

Control vectorial

Desacoplar lazos de realimentación ➡

1° regulador de corriente

2° modulador de torque

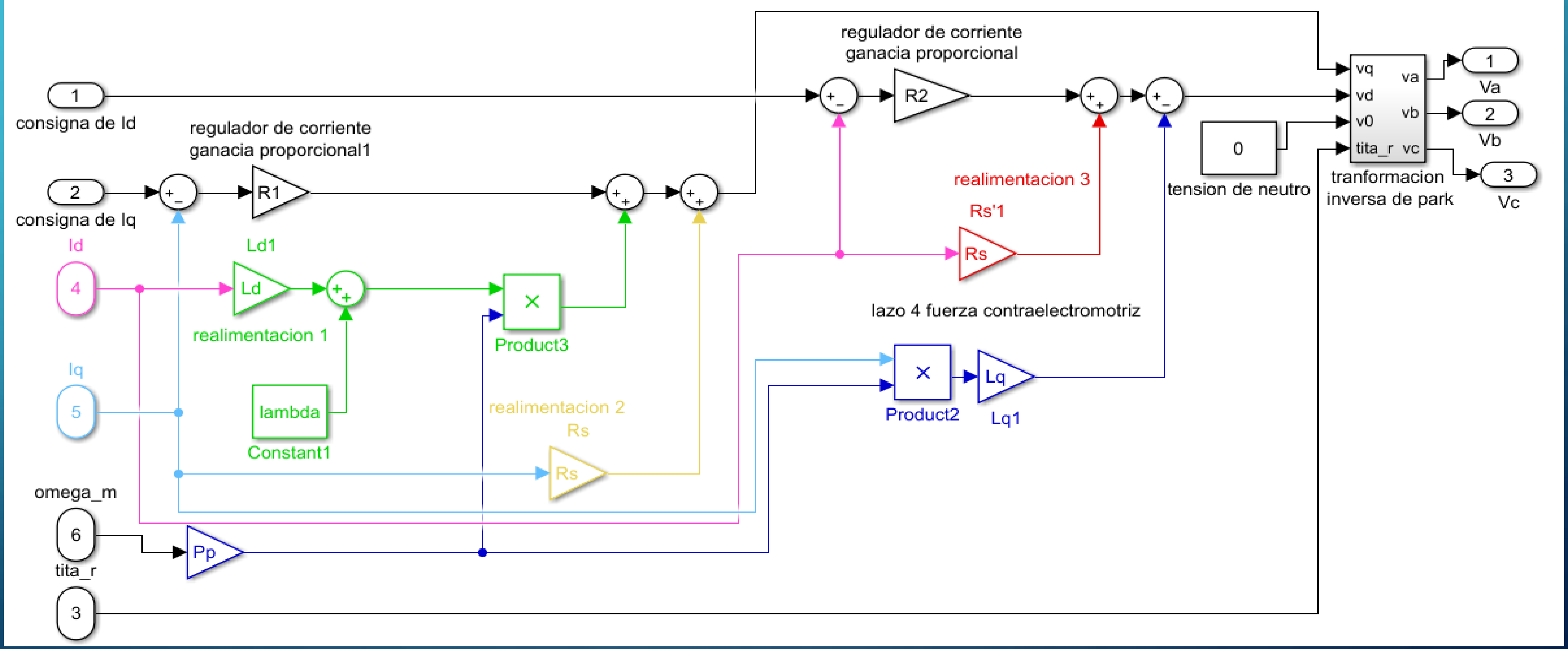
1° eje en cuadratura

- caídas resistivas, $Id.Rs$
- fuerza contraelectromotriz $\omega_m.Pp.(\lambda + L_d i_d)$

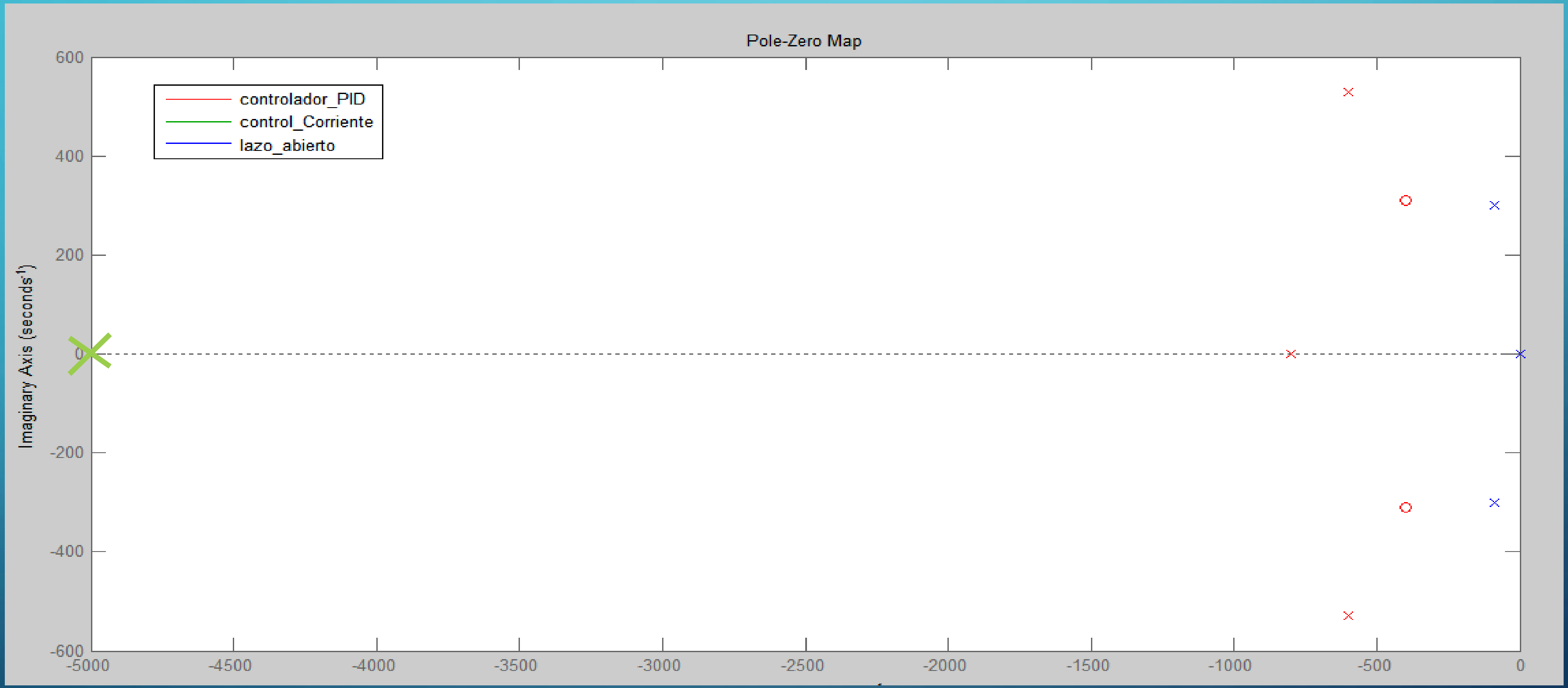
2° eje directo

- caída resistiva $Iq.Rs$
- fuerza contraelectromotriz $-\omega_m L_q i_q$

CONTROLADOR DE MOVIMIENTO: MANIPULACIÓN DE CORRIENTE



MANIPULACIÓN DE CORRIENTE

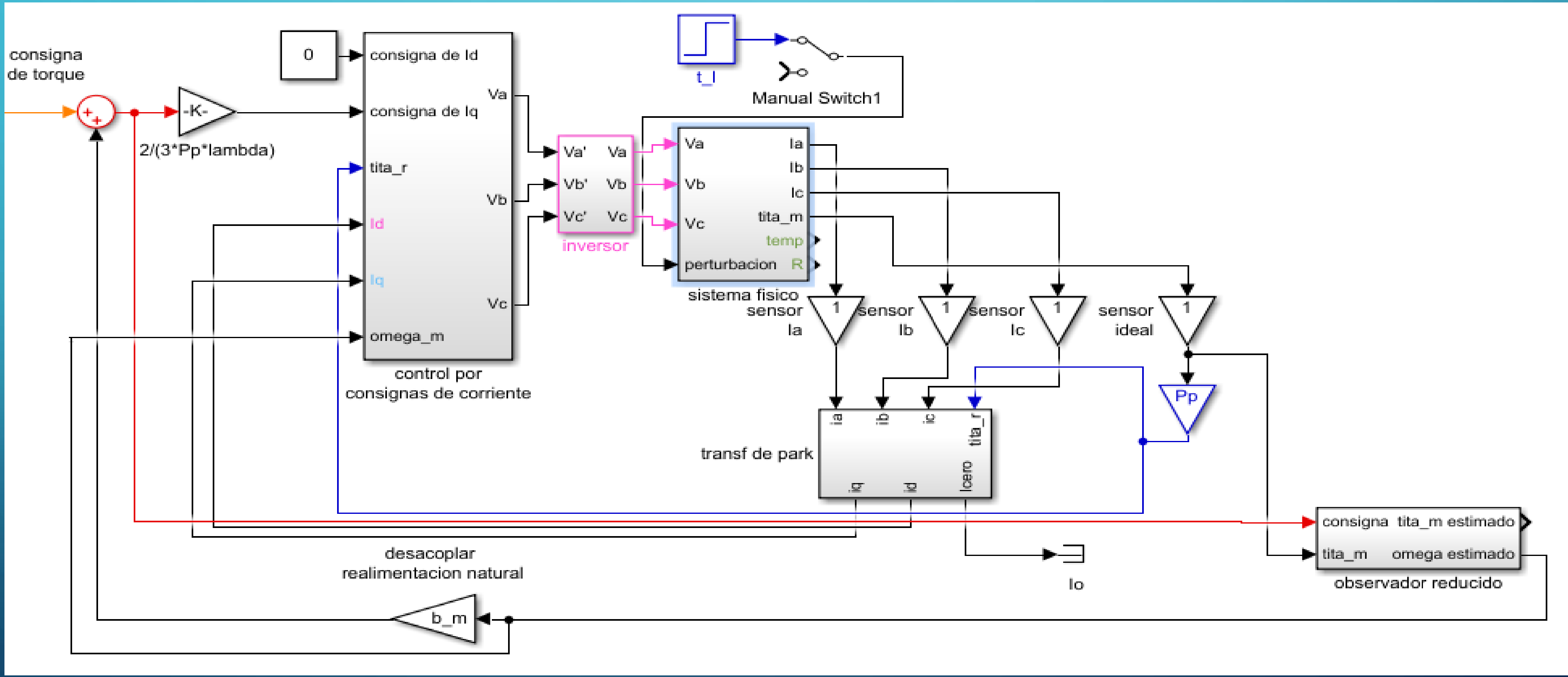


$$\frac{di_q}{dt} = \frac{Rs}{Lq}\left(i_q{}^* - i_q\right) \rightarrow Iq(s) = \frac{1}{S\frac{Lq}{Rs}+1} Iq(s)^* \rightarrow$$

$$R_{s1} \cong 29[rad * H/s] = [\Omega]$$

$$R_{s2} = 33[\,rad * H/s] = [\Omega]$$

CONTROLADOR DE MOVIMIENTO: CONSIGNA DE TORQUE



equivalente a una máquina de CC

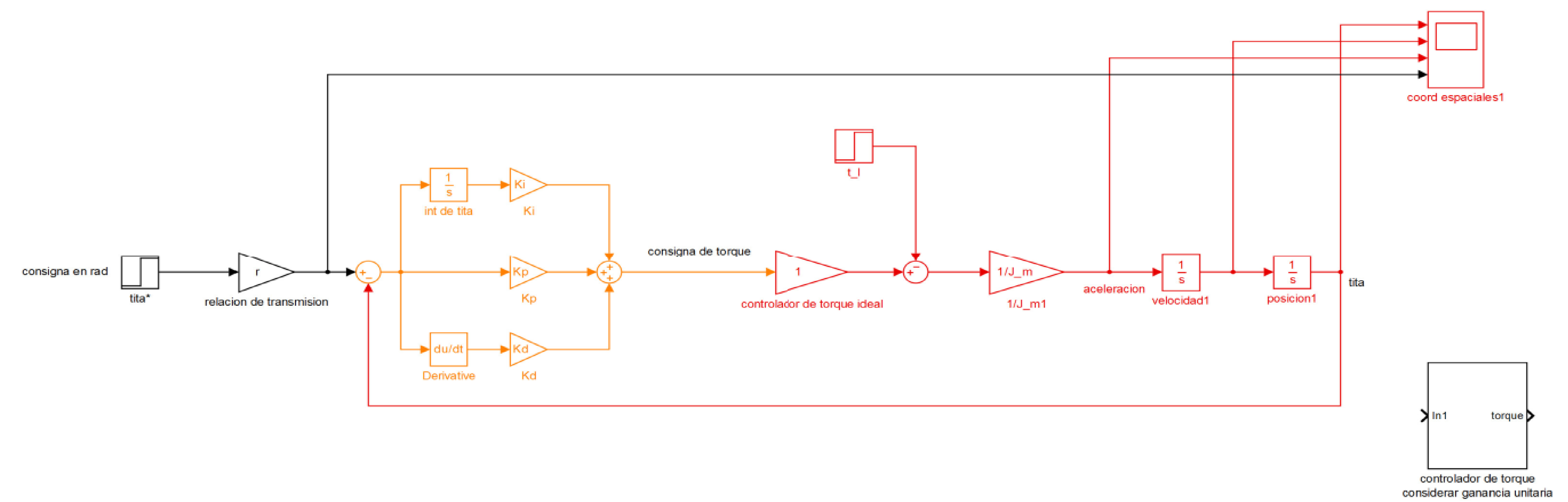
CONTROLADOR DE MOVIMIENTO: PID

$$n = 2.5$$

$$\omega_{pos} = 800 \frac{rad}{s}$$

$$\begin{cases} \omega_{pos} \\ \omega_{int\_pos} = n \cdot \omega_{pos} \\ \omega_{vel} = \frac{1}{n}\,\omega_{pos} \end{cases}$$

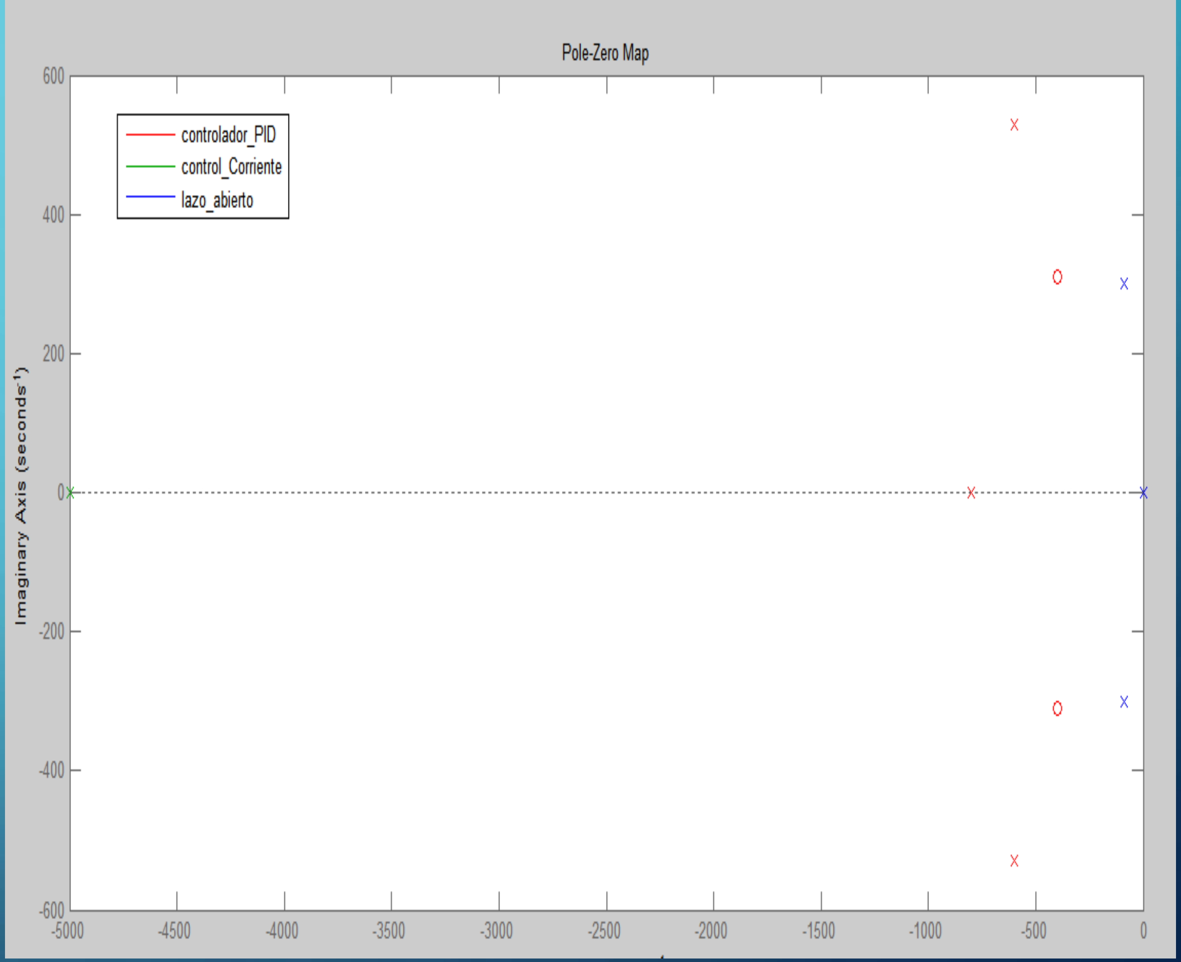
$$\begin{cases} Kd = J'_m\, n\, \omega_{pos} = 0.0113 \frac{N.s}{m} \\ Kp = J'_m\, n\, {\omega_{pos}}^2 = 9.041 \frac{N}{m} \\ Ki = J'_m\, {\omega_{pos}}^3 = 2893.3 \frac{N}{m.s} \end{cases}$$



POLOS Y CEROS

- Variación extrema de parámetros

	$Jl = 0.3780$		$Jl = 0.1260$	
	$bl = 0{,}0630$	$bl = -0{,}0630$	$bl = 0{,}0630$	$bl = -0{,}0630$
Polos lazo abierto	$-\ 89.0599$ $-\ 269.783i$ 0	-88.9678 $-\ 269.754i$ 0	$-\ 89.718$ $-\ 346.011i$ 0	-89.5722 $-\ 345.975i$ 0
Amort. en lazo abierto	0.3134	0.3134	0.2509	0.2506



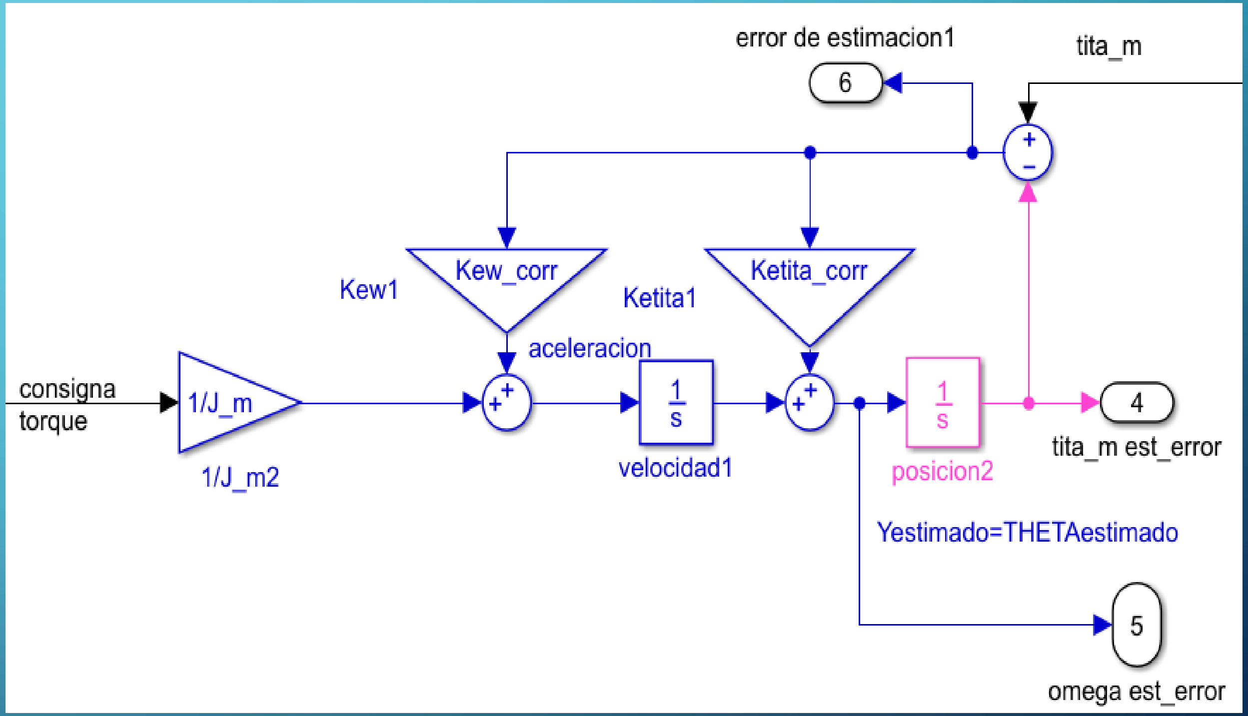
OBSERVADOR DE ESTADOS

Polos $p_{1,2} = -3200\,\frac{rad}{s}$

$$\begin{cases} \dot{\overline{x}}(t) = [A - K_e C]\overline{x}(t) + BU(t) + K_e y(t) \\ \overline{y}(t) = C\overline{x}(t) \end{cases}$$

$$|sI - (A - K_e C)| = \begin{vmatrix} s + K_\theta & -1 \\ K_\omega & s \end{vmatrix} = (s + 3200)^2$$

$$\begin{cases} K_\theta = -\dfrac{b_m}{J_m} + 6400 = 6{,}3973\,.10^3\,\dfrac{rad}{s} \\ K_\omega = -\dfrac{b_m K_\theta}{J_m} + 10240000 = 1{,}02230.\,10^7\,\dfrac{rad^2}{s^2} \end{cases}$$

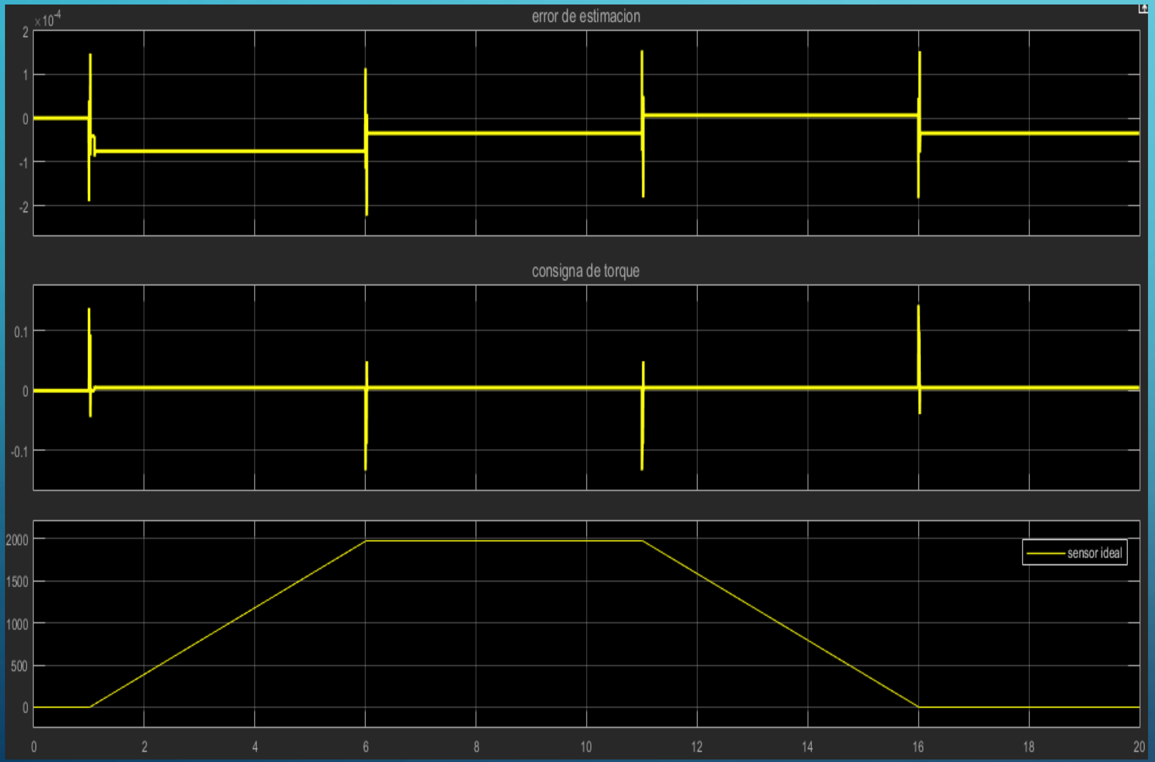


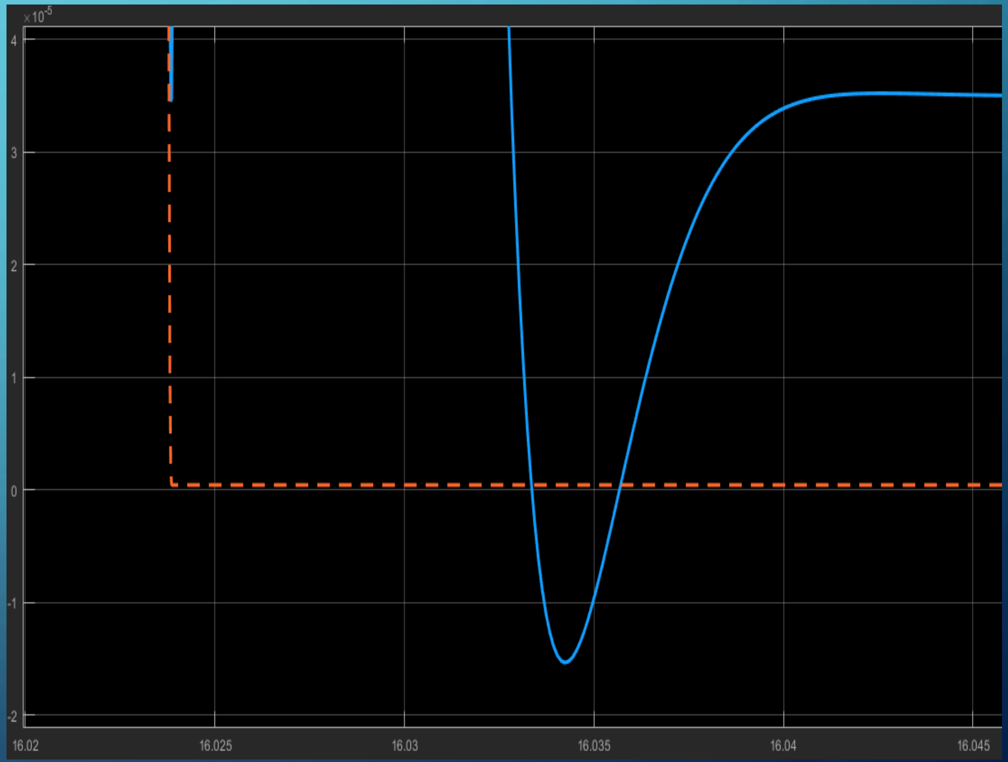
SIMULACIÓN

Con perturbación: Error de estado estacionario

error

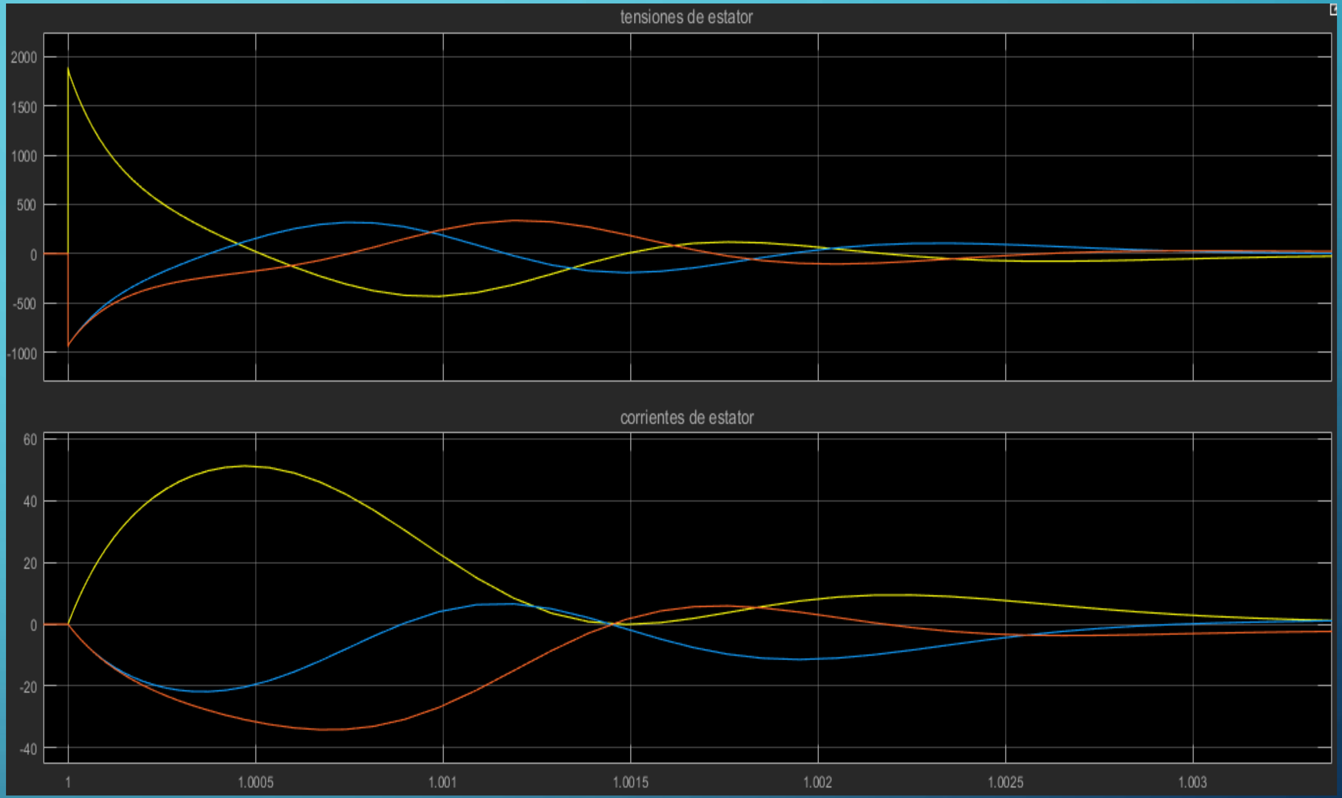
torque





RESULTADO

- picos de tensión $2000V$
- consigna de torque llega a $5\ N.m$
- corrientes 50A
- Al aplicar el torque de carga hay un transitorio y la corriente aumenta levemente.



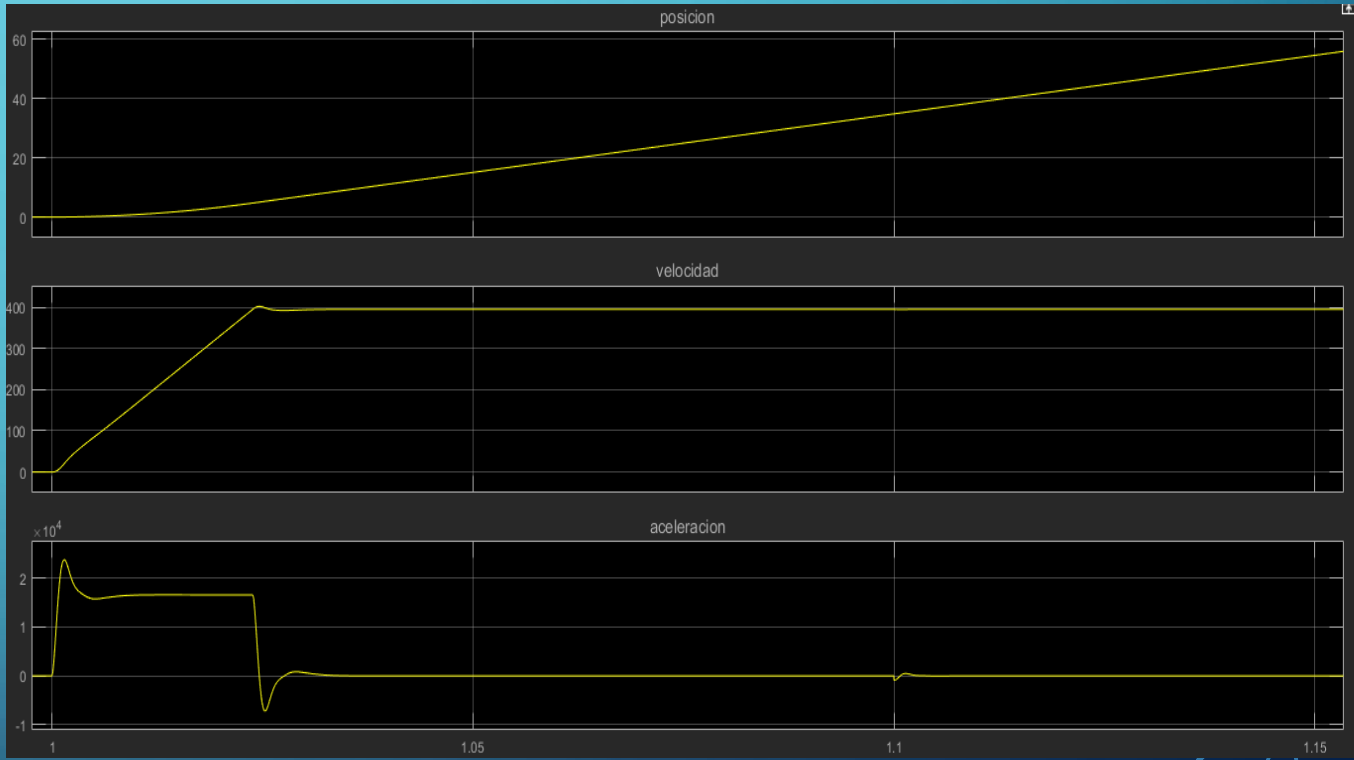
MODIFICACIÓN: CONSIGNA DE VELOCIDAD

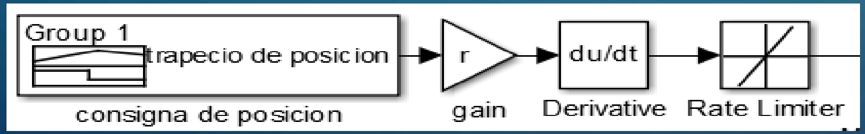
- aceleraciones grandes: impulsos
- limitar "tasa de cambio"

$$T_{m\,max}(t)=\frac{\mathrm{Tq}}{r}=\frac{29.42\ \mathrm{N.m}}{314{,}3008}=0{,}0936\ N.m$$

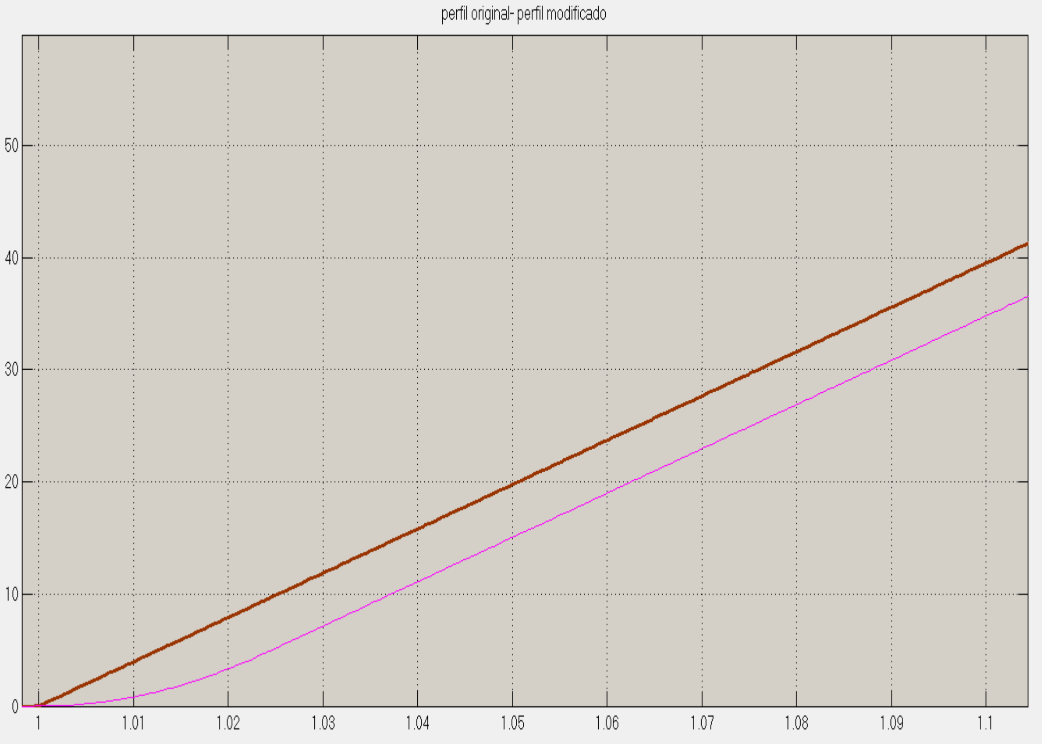
$$i_{q\,max}=\frac{2}{3}\frac{T_m}{P_p\lambda_{af}}=1{,}351A$$

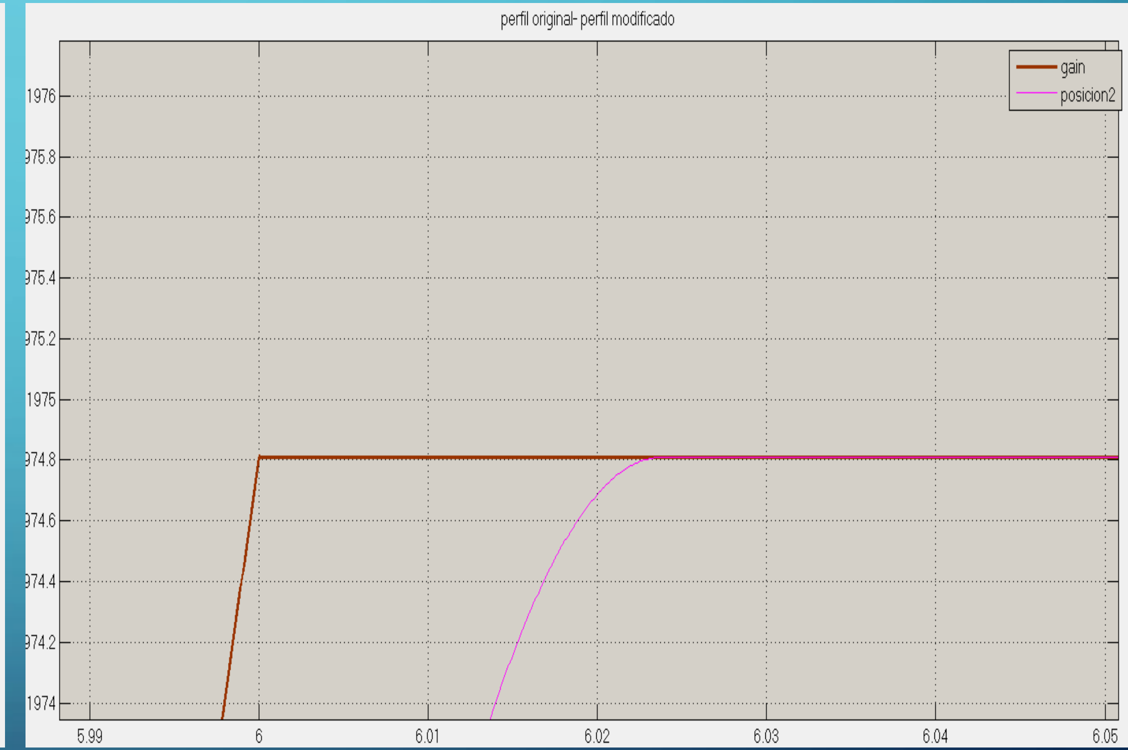
$$\dot{\omega}_m(t)=\frac{1}{J'_m}\left(T_m(t)-b'_m\omega_m(t)-T'_l(t)\right)=16562\ \frac{rad}{s^2}$$





PERFIL DE POSICIÓN SUAVIZADO



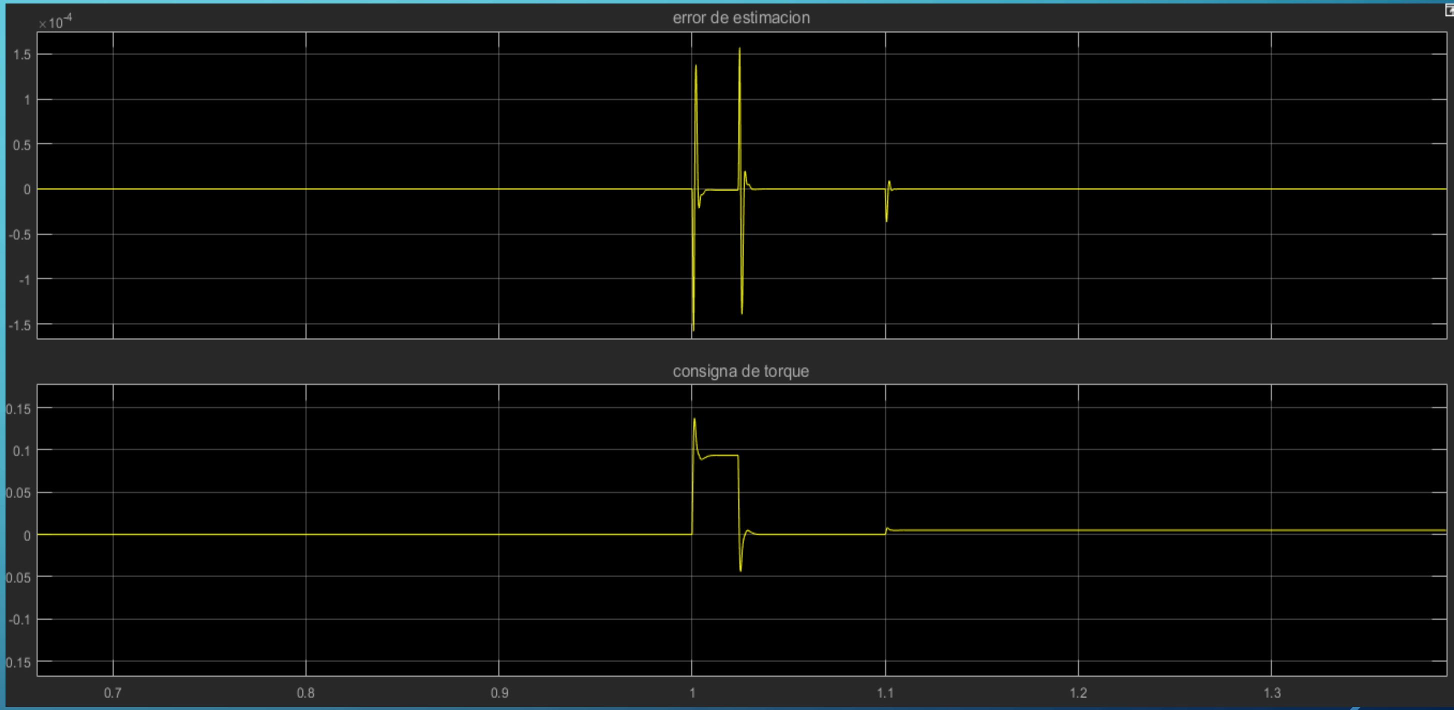


CORRECCIÓN DEL ERROR DEL OBSERVADOR

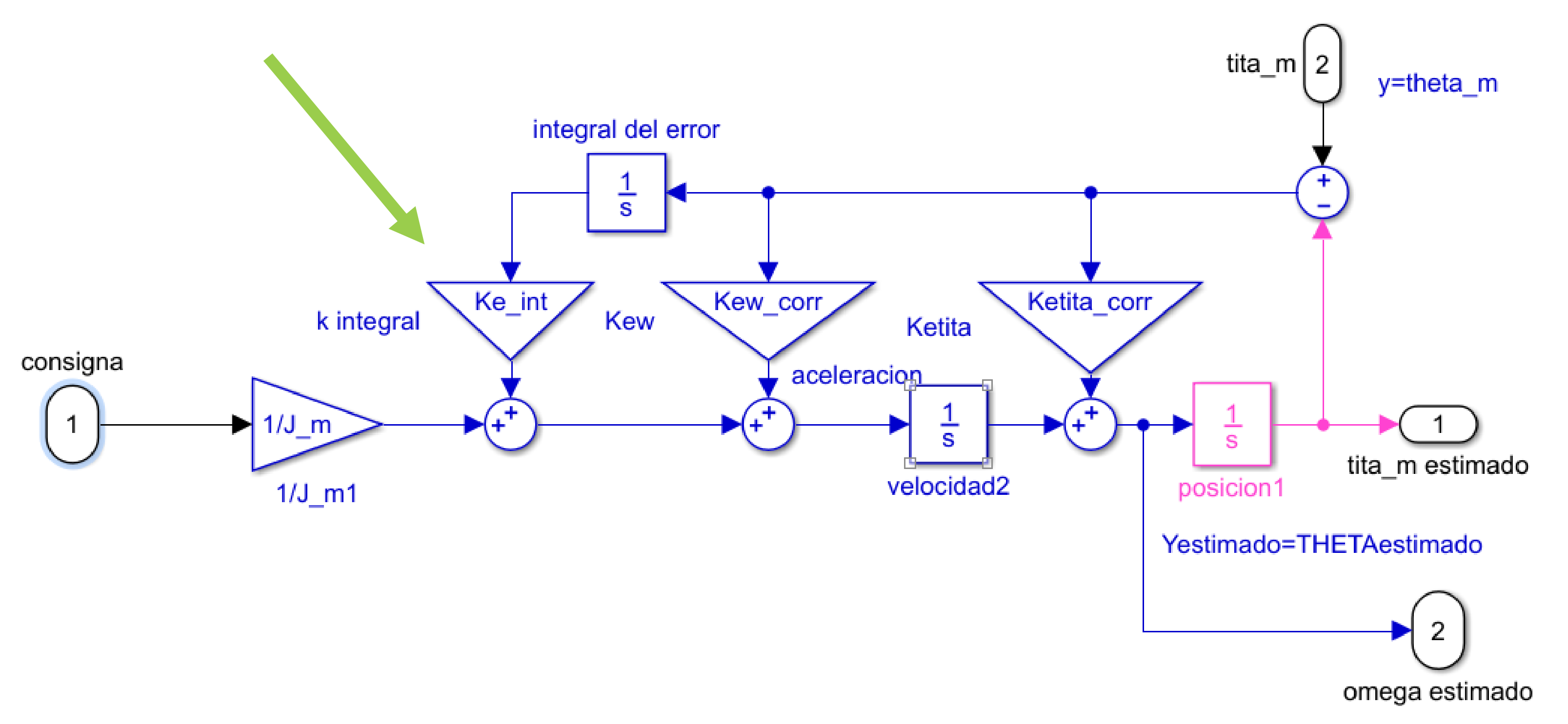
Las ganancias del observador corregido son:

$$\begin{cases} K_{\theta\ corr} = 8000 \\ K_{\omega\ corr} = 25600\,.\,10^{3} \\ K_{i\ corr} = 3{,}2768.\,10^{10} \end{cases}$$

Se corrige el error de estado estacionario para perturbaciones escalón.



CORRECCIÓN DEL ERROR DEL OBSERVADOR



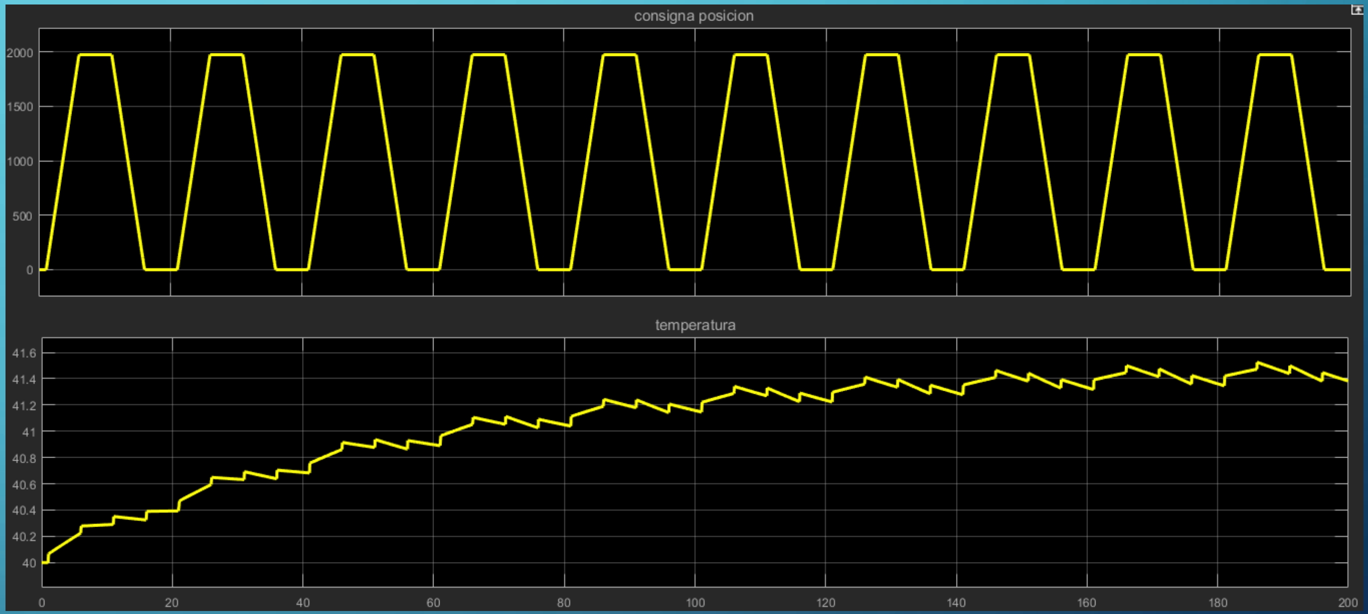
RESULTADOS FINALES DE LA SIMULACIÓN

- velocidad de salida 1,25 rad/s, podría aumentar hasta 2 rad/s
- temperatura no supera los 42°
- tensiones pico a pico rondan los 20V (máximo 24V RMS)
- Frecuencia aprox. 180 Hz, menor a 330Hz

verifica

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL MOTOR

- ciclos de operación
- se mantiene dentro de los parámetros



CONCLUSIONES

- Se verificó el sistema de control mediante la simulación
- se alcanzaron las especificaciones.
- controlador es robusto
- A futuro