

Proyecto Global Integrador: Control de Accionamiento de CA con Motor Sincrónico de Imanes Permanentes

Borquez Juan y Escobar Matías

Abstract—

I. INTRODUCCIÓN

Modelado, simulación, diseño y análisis de desempeño de un Sistema de Control Automático de Posición y Movimiento para un Accionamiento electromecánico de 4 cuadrantes, compuesto por: máquina eléctrica de corriente alterna (CA) trifásica sincrónica con excitación por imanes permanentes (PMSM), alimentada por inversor trifásico desde fuente de corriente continua (CC); reductor de velocidad de engranajes planetarios de salida hacia la carga mecánica; realimentación con 1 sensor de posición en el eje del motor, más 3 sensores de corriente instantánea de fases en la salida del inversor trifásico al estator de la máquina (PMSM) y 1 sensor de temperatura del bobinado de estator.

II. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

A. Carga Mecánica

Aplicación simplificada de referencia (adaptado de [1]): control de movimiento de 1 eje (descentralizado) para articulación de brazo manipulador robótico elemental de un grado de libertad (1 g.d.l.) rotacional de eje horizontal sometido a la acción de la aceleración de gravedad (péndulo rígido actuado), con eje de rotación fijo a base en sistema de referencia inercial (Fig. 1); con parámetros equivalentes variables según sea la carga útil transportada en el extremo (ver Ec. 1).

1) **Modelo:** simplificado equivalente (No Lineal con parámetros variables), referido al eje de salida del tren de transmisión: coordenada articular de eje de la articulación $q(t) \equiv \theta_l(t)$, referida a la vertical hacia abajo, positiva en sentido antihorario; torque impulsor $\tau(t) \equiv T_q(t)$.

$$J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} = T_q(t) - b_l \omega_l(t) - T_l(t) \quad (1)$$

$$T_l(t) = k_l \sin(\theta_l(t)) + T_d(t) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_l(t)}{dt} \equiv \omega_l(t) \Leftrightarrow \theta_l(t) = \int_0^t \omega_l(\zeta) d\zeta + \theta_l(0) \quad (3)$$

2) Parámetros Equivalentes Variables:

- Coeficiente de fricción viscosa en articulación:

$$b_l \approx (0.1 \pm 0.03) \text{ N.m rad/s (incertidumbre)}$$

- Aceleración de gravedad:

$$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

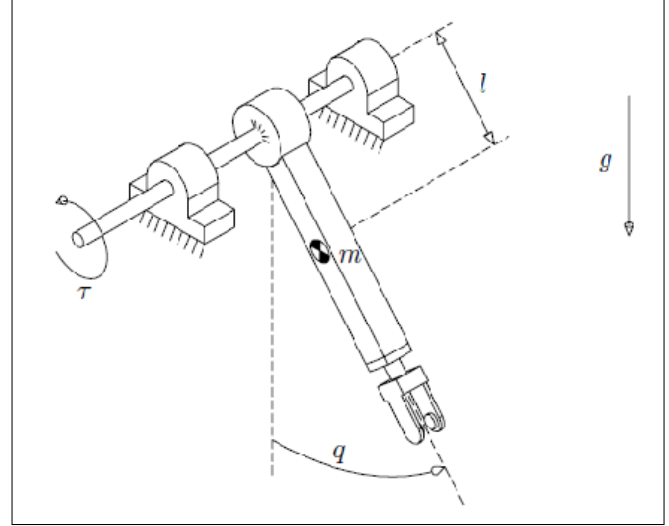


Fig. 1. Robot manipulador elemental de 1 g.d.l. en plano vertical (péndulo rígido actuado) [2].

- Masa del brazo manipulador:

$$m = 1.0 \text{ kg}$$

- Longitud e Inercia equivalente (respecto al centro de masa):

$$l_{cm} = 0.25 \text{ m}$$

$$J_{cm} = 0.0208 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

- Longitud total (extremo):

$$l_l = 0.50 \text{ m}$$

- Masa de carga útil en el extremo (variable):

$$m_l = [0 \dots 1.5] \text{ kg}$$

- Momento de inercia total (respecto al eje de rotación):

$$J_l = (m \cdot l_{cm}^2 + J_{cm}) + m_l \cdot l_l^2 = 0.0833 + [0 \dots 0.375] \text{ kg.m}^2$$

- Coeficiente de torque recuperador gravitacional:

$$k_l = m \cdot g \cdot l_{cm} + m_l \cdot g \cdot l_l = 2.452 + [0 \dots 7.355] \text{ N.m}$$

3) Especificaciones de Operación:

- Torque de perturbación externo:

$$T_d(t) \approx (0 \pm 5.0) \text{ N.m}$$

B. Caja Reductora

Caja reductora reversible con sistema de engranajes planetarios, asumiendo acoplamiento rígido (sin elasticidad torsional y sin juego, holgura o “backlash”); momento de inercia equivalente y pérdidas de energía por fricción interna, reflejados al eje de entrada y considerados junto con el motor

1) Modelo equivalente (rígido):

$$\omega_l(t) = 1/r \cdot \omega_m(t) \quad (4)$$

$$T_q(t) = r \cdot T_{dm}(t) \quad (5)$$

2) Parámetros:

- Relación de reducción total:

$$r = 120.0 : 1$$

3) Especificaciones de operación: :

- Velocidad nominal (salida):

$$n_{lnom} = 60 \text{ rpm} \quad (\omega_{lnom} = 6.28 \text{ rad/s})$$

- Torque nominal (salida):

$$T_{qnom} = 17.0 \text{ N.m} \quad (\text{régimen continuo o rms})$$

- Torque pico (salida):

$$T_{qmax} = 45.0 \text{ N.m} \quad (\text{corta duración, aceleración})$$

C. Máquina Eléctrica PMSM

Máquina eléctrica de CA trifásica sincrónica con excitación por imanes permanentes (PMSM) y estator conectado en estrella (simétrico y equilibrado) accesible en bornes de fases *abc*, con centro de estrella (punto “neutro”) flotante (no accesible).

1) Subsistema mecánico: Rotor referido a Estator estacionario (fijo a sistema inercial de referencia).

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m(t) - b_m \omega_m(t) - T_{dm}(t) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \Leftrightarrow \theta_m(t) = \int_0^t \omega_m(\tau) d\tau + \theta_m(0) \quad (7)$$

2) Subsistema electromagnético: Modelo idealizado equivalente en coordenadas eléctricas de entrehierro $qd0^r$ fijas a rotor, aplicando Transformación de Park a circuito estator estacionario ([3]).

- Coordenadas eléctricas de entrehierro $qd0^r$ (marco de referencia de rotor \neq “sincrónico”):

$$\frac{d\theta_r(t)}{dt} \equiv \omega_r(t) \Leftrightarrow \theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(\tau) d\tau + \theta_r(0) \quad (8)$$

$$\theta_r(t) \equiv P_p \theta_m(t) \therefore \omega_r(t) = P_p \omega_m(t) \quad (9)$$

- Torque electromagnético:

$$T_m(t) = \frac{3}{2} P_p [\lambda'_{mr} i_{qsr}(t) + (L_d - L_q) i_{dsr}(t) i_{qsr}(t)] \quad (10)$$

- Balance de tensiones eléctricas equivalentes de estator (referido a coordenadas $qd0^r$):

$$v_{qsr}(t) = R_s(t) i_{qsr}(t) + L_q \frac{di_{qsr}(t)}{dt} + [\lambda'_{mr} + L_d i_{dsr}(t)] \omega_r(t) \quad (11)$$

$$v_{dsr}(t) = R_s(t) i_{dsr}(t) + L_d \frac{di_{dsr}(t)}{dt} - L_q i_{qsr}(t) \omega_r(t) \quad (12)$$

$$v_{0s}(t) = R_s(t) i_{0s}(t) + L_{ls} \frac{di_{0s}(t)}{dt} \quad (13)$$

$$R_s(t) = R_{sREF} (1 + \alpha_{Cu} (T_s^\circ(t) - T_{sREF}^\circ)) \quad (14)$$

3) Subsistema Térmico: Modelo simplificado equivalente de primer orden, considerando sólo pérdidas eléctricas resistivas por efecto Joule en bobinado de estator, despreciando pérdidas magnéticas en el núcleo; transferencia de calor por conducción y convección natural, sin ventilación forzada:

- Potencia de pérdidas calóricas:

$$P_{s \text{ perd}}(t) = R_s(t) (i_{as}^2(t) + i_{bs}^2(t) + i_{cs}^2(t)) \\ = \frac{3}{2} R_s(t) (i_{qs}^2(t) + i_{ds}^2(t) + 2i_{0s}^2(t)) \quad (15)$$

- Balance térmico de estator:

$$P_{s \text{ perd}}(t) = C_{ts} \frac{dT_s^\circ(t)}{dt} + \frac{1}{R_{ts-amb}} (T_s^\circ(t) - T_{amb}^\circ(t)) \quad (16)$$

4) Parámetros: Valores nominales medidos, tolerancia error $\pm 1\%$; salvo aclaración específica:

- Momento de inercia (motor y caja):

$$J_m \approx 1.4 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

- Coef. de fricción viscosa (motor y caja):

$$b_m \approx 1.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$$

- Pares de Polos magnéticos:

$$P_p = 3$$

- Flujo magnético equivalente de imanes concatenado por espiras del bobinado de estator:

$$\lambda_m^r \approx 0.016 \text{ Wb} - \left(\frac{V}{\text{rad/s}} \right)$$

- Inductancia de estator (eje en cuadratura):

$$L_q \approx 5.8 \text{ mH}$$

- Inductancia de estator (eje directo):

$$L_d \approx 6.6 \text{ mH}$$

- Inductancia de dispersión de estator:

$$L_{ls} \approx 0.8 \text{ mH}$$

- Resistencia de estator, por fase (Ec. 3.9):

$$R_s \approx 1.02 \Omega \quad (@40^\circ\text{C}) \rightarrow 1.32 \Omega \quad (@115^\circ\text{C})$$

- Coef. aumento de R_s con $T_s^\circ(t)$ (14):

$$\alpha_C = 3.9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

- Capacitancia térmica de estator:

$$C_{ts} \approx 0.818 \text{ W} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Resistencia térmica estator-ambiente:

$$R_{ts-amb} \approx 146.7^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$$

Nota: Constante de tiempo térmica:

$$\tau_{ts-amb} = R_{ts-amb} \cdot C_{ts} \approx 120 \text{ s}$$

III. DESARROLLO DE TAREAS

A. Modelado, Análisis y Simulación dinámica del SISTEMA FÍSICO a "Lazo Abierto" (Sin Controlador externo de Movimiento)

1) **Modelo sub-sistema mecánico completo:** Multiplicando por r ambos miembros de la ecuación (6), sumando miembro a miembro con la ecuación (1) y tomando en cuenta $T_q(t)$ según la ecuación (5) obtenemos:

$$J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} + J_m r \frac{d\omega_m(t)}{dt} = r T_m(t) - T_l(t) - b_l \omega_l(t) - b_m r \omega_m(t)$$

Reemplazando en la anterior $\omega_l(t)$ según la ecuación (4), agrupando términos y dividiendo entre r a ambos miembros, obtenemos:

$$\left(J_m + \frac{J_l}{r^2}\right) \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m(t) - \left(b_m + \frac{b_l}{r^2}\right) \omega_m(t) - \frac{T_l(t)}{r} \quad (17)$$

Definimos ahora la inercia equivalente y el amortiguamiento equivalente respectivamente como:

$$J_{eq} = \left(J_m + \frac{J_l}{r^2}\right) \quad (18)$$

$$b_{eq} = \left(b_m + \frac{b_l}{r^2}\right) \quad (19)$$

Reemplazando (18) y (19) en (17) obtenemos el modelo matemático equivalente del sub-sistema mecánico completo con parámetros equivalentes referido aleje del motor (vease diagrama de bloques de la fig. 2):

$$J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m(t) - b_{eq} \omega_m(t) - \frac{T_l(t)}{r} \quad (20)$$

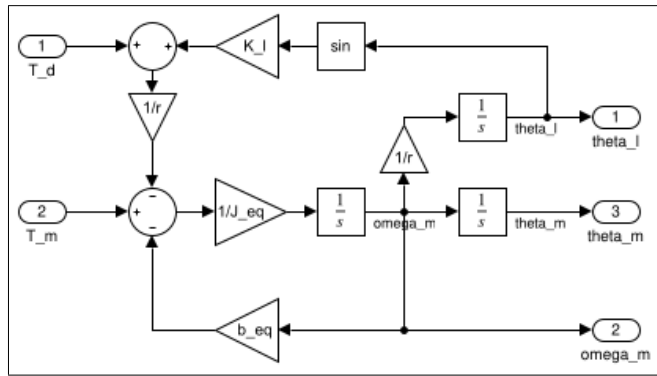


Fig. 2. Diagrama de bloques del sub-sistema mecánico completo.

El modelo resultante tiene un solo grado de libertad, tal como sucede en el modelo de la carga y del subsistema mecánico de la máquina eléctrica sin la transmisión. Esto se debe a la rigidez y la ausencia de "backlash" en la reducción, permitiendo un "acoplamiento directo" de la carga al eje de la máquina. Dicho de otra manera, la transmisión no incorpora dinámica al subsistema mecánico completo.

2) Modelo dinámico del sistema físico completo:

a) **Modelo Global No Lineal:** En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques del sistema físico completo, el cual está compuesto por varios subsistemas. En las Figuras 4, 2, 5 se muestran los diagramas de bloques de los subsistemas térmico, mecánico y electromagnético respectivamente. A su vez, los componentes del sub-sistema electromagnético se detallan en las figuras 6, 7, 8, para las corrientes (i_{qs} , i_{ds} , i_{0s} respectivamente) y 9 para el torque motor. En las figuras 10 y 11 se detallan las transformaciones de Park directa e inversa respectivamente.

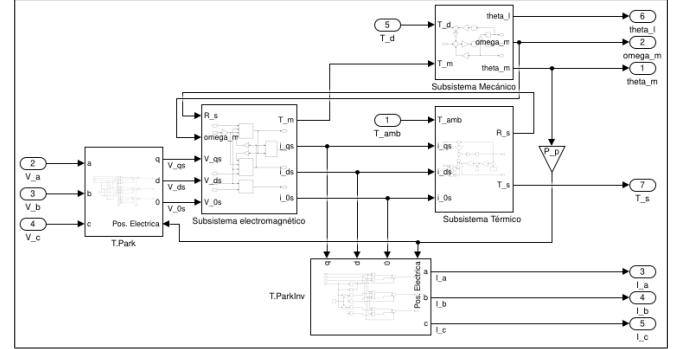


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema físico completo.

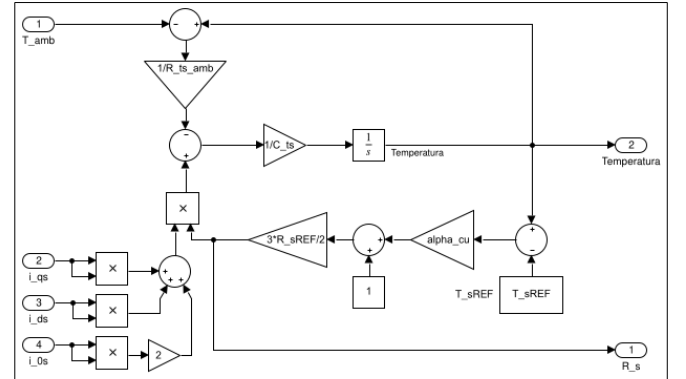


Fig. 4. Diagrama de bloques del sub-sistema térmico

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Heading 1, etc

B. Figures and Tables

Positioning Figures and Tables: Place figures and tables at the top and bottom of columns. Avoid placing them in the middle of columns. Large figures and tables may span across both columns. Figure captions should be below the figures; table heads should appear above the tables. Insert figures and tables after they are cited in the text. Use the abbreviation "Fig. 1", even at the beginning of a sentence.

V. CONCLUSIONES

APENDICE

Appendixes should appear before the acknowledgment.

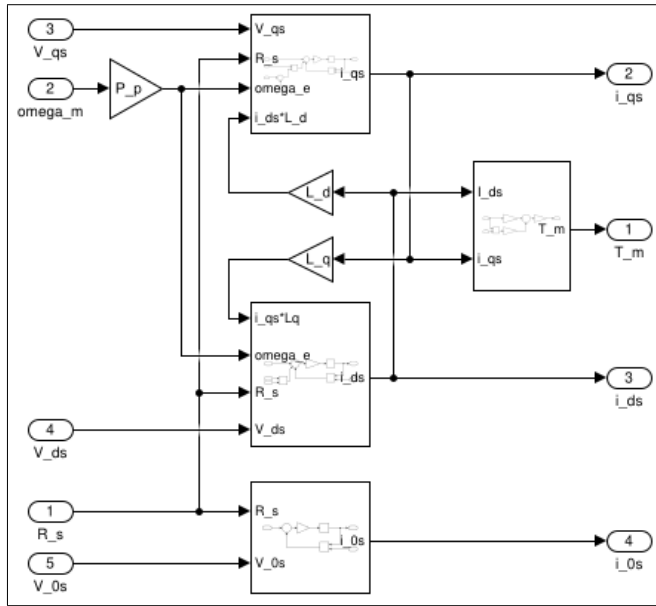


Fig. 5. Diagrama de bloques del sub-sistema electromagnético

REFERENCES

- [1] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor)," in *Plastics*, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
- [2] R. Kelly et al, *Control of Robot Manipulators in Joint Space*. Springer, 2005. (Example and Figure 2.2).
- [3] P. Krause et al, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd Ed.. IEEE-Wiley, 2013.

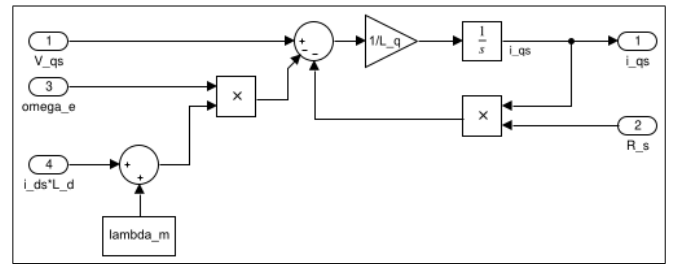


Fig. 6. Diagrama de bloques I_{qs}

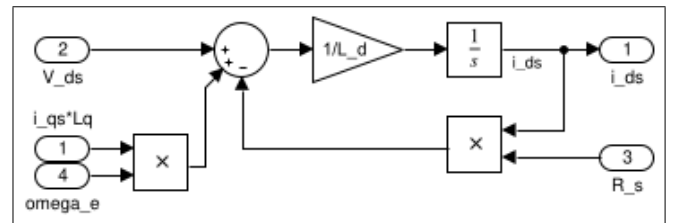


Fig. 7. Diagrama de bloques I_{ds}

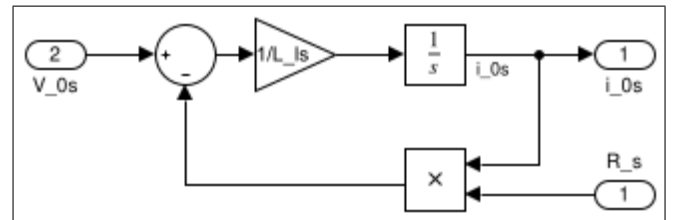
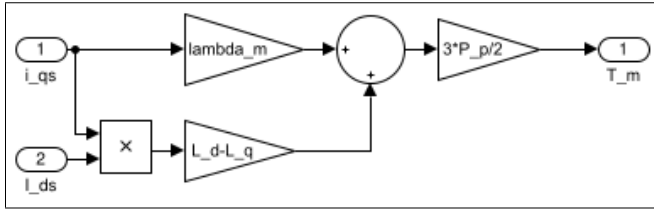


Fig. 8. Diagrama de bloques I_{0s}

Fig. 9. Diagrama de bloques T_m TABLE I
AN EXAMPLE OF A TABLE

One	Two
Three	Four

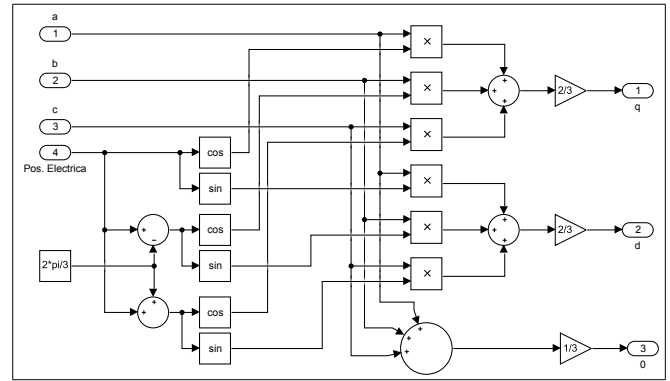


Fig. 10. Transformación de Park Directa

- [4] B. Smith, "An approach to graphs of linear forms (Unpublished work style)," unpublished.
- [5] E. H. Miller, "A note on reflector arrays (Periodical styleÑAccepted for publication)," IEEE Trans. Antennas Propagat., to be published.
- [6] J. Wang, "Fundamentals of erbium-doped fiber amplifiers arrays (Periodical styleÑSubmitted for publication)," IEEE J. Quantum Electron., submitted for publication.

Matrices Modelo linealizado

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_l \cos(\frac{\theta_m}{r})}{J_{eq} r^2} & -\frac{b_{eq}}{J_{eq}} & \frac{3 P_p (\lambda_m + i_{ds} (L_d - L_q))}{2 J_{eq}} & \frac{3 P_p i_{qs} (L_d - L_q)}{2 J_{eq}} \\ 0 & -3 P_p i_{ds} (L_d + \lambda_m) & -\frac{R_{ref} (\alpha_{cu} (T_s - T_{ref}) + 1)}{L_q P_p \omega_m} & -\frac{R_{ref} (\alpha_{cu} (T_s - T_{ref}) + 1)}{L_d P_p \omega_m} \\ 0 & \frac{L_q P_p i_{qs}}{L_d} & \frac{L_q P_p \omega_m}{L_d} & -\frac{R_{ref} (\alpha_{cu} (T_s - T_{ref}) + 1)}{L_d} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3 R_{ref} i_{qs} (\alpha_{cu} (T_s - T_{ref}) + 1)}{C_{ts}} & \frac{3 R_{ref} i_{ds} (\alpha_{cu} (T_s - T_{ref}) + 1)}{C_{ts}} \\ 0 & 0 & \frac{3 R_{ref} i_{qs} (\alpha_{cu} (T_s - T_{ref}) + 1)}{C_{ts}} & \frac{3 R_{ref} i_{ds} (\alpha_{cu} (T_s - T_{ref}) + 1)}{C_{ts}} \end{pmatrix}$$

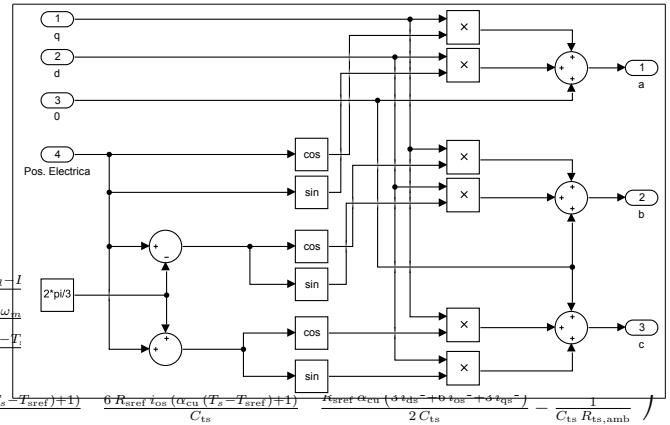


Fig. 11. Transformación de Park Inversa

We suggest that you use a text box to insert a graphic (which is ideally a 300 dpi TIFF or EPS file, with all fonts embedded) because, in an document, this method is somewhat more stable than directly inserting a picture.

Fig. 12. Inductance of oscillation winding on amorphous magnetic core versus DC bias magnetic field