

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

1. Objetivo y Alcances

Proyecto didáctico con el objetivo de integrar los conocimientos y competencias de la asignatura en una aplicación concreta simplificada.

Modelado, simulación, diseño y análisis de desempeño de un **sistema de control automático de posición y movimientos** para un **accionamiento electromecánico de 4 cuadrantes**, compuesto por: máquina eléctrica de corriente alterna (CA) trifásica sincrónica con excitación por imanes permanentes, alimentada por un inversor trifásico desde una fuente de CC; reductor de velocidad planetario de salida hacia la carga mecánica; y realimentación con 1 sensor de posición (encoder) en el eje del motor, más 3 sensores de corriente instantánea de fases en la salida del inversor al estator.

2. Lineamientos

- Trabajo individual o en grupo de dos (2) alumnos. Horario de Consulta semanal.
- Modelado, simulación, análisis y diseño (Matlab/Simulink). Respetar nomenclatura indicada.
- **Presentación de Informe Técnico**, completo y breve, cumpliendo lo pedido a continuación e incluyendo: Resumen. Introducción. Desarrollo: modelado y esquemas conceptuales; análisis; diseño; simulación; resultados. Conclusiones. Referencias consultadas. (Ver Guía de Informe.)
- **Demostración y explicación presencial** breve mediante simulación (Matlab/Simulink).
- Plazo de presentación: Marzo-Abril de 2016 (fecha a coordinar).

3. Datos del Sistema dinámico físico (Accionamiento) a controlar

Convención de signos y sentidos de torque electromagnético y velocidad angular de rotor: iguales (++) ó --) para motorización (cuadrantes I y III); opuestos (+- ó -+) para generación (cuadrantes II y IV).

Componentes: los componentes del accionamiento se especifican a continuación (modelos básicos equivalentes, parámetros y especificaciones de operación).

3.1 Carga mecánica

Modelo simplificado equivalente, referido al eje de salida del tren de transmisión: coordenada $q(t)$

$$J_l \ddot{q}(t) = T_q(t) - b_l \dot{q}(t) - T_l(t) \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Parámetros variables (valor nominal \pm variación máx.):

- Momento de inercia: $J_l \approx (0.2520 \pm 0.1260) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Amortiguamiento viscoso: $b_l \approx (0 \pm 0.0630) \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}}$

Especificaciones de operación (carga o perturbación, valor límite requerido):

- Torque de carga: $T_l(t) \approx (0 \pm 1.57) \text{ N} \cdot \text{m}$ (suponer función escalón)

3.2 Tren de Transmisión

Caja reductora reversible con sistema de engranajes planetarios (asumiendo acoplamiento rígido, sin elasticidad torsional y sin juego o “backlash”):

Modelo equivalente (rígido): $\dot{q}(t) = \frac{1}{r} \cdot \omega_m(t); \quad T_q(t) = r \cdot T_d(t)$ (Ec. 2.1 / 2.2)

Parámetro (constante):

- Relación de reducción total: $r = 314.3008 : 1$

Especificaciones de operación (valores límite, no sobrepasar):

- Velocidad nominal (salida): $n_{q\ nom} = 21\ rpm \ (\dot{q}_{nom} = 2.2 \frac{rad}{s})$
- Torque nominal (salida): $T_{q\ nom} = 7.26\ N.m$ (régimen continuo o rms)
- Torque pico (salida): $T_{q\ max} = 29.42\ N.m$ (corta duración, aceleración)

3.3 Máquina Eléctrica

Máquina eléctrica de CA trifásica sincrónica con excitación por imanes permanentes (**PMSM**) y estator conectado en estrella (simétrico y equilibrado) con centro de estrella flotante (accesible en bornes de fases *abcs*).

Subsistema mecánico (Rotor, referido a Estator estacionario = sistema *inercial* de referencia):

Modelo equivalente: $J_m \cdot \dot{\omega}_m(t) = T_m(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_d(t)$ (Ec. 3.1)

$\dot{\theta}_m(t) \equiv \omega_m(t) \Leftrightarrow \theta_m(t) = \int_0^t \omega_m(\xi) \cdot d\xi + \theta_m(0)$ (Ec. 3.2)

Subsistema electromagnético (modelo idealizado equivalente en coordenadas *eléctricas* de entrehierro *qd0* fijas a rotor, a partir de Transformación de Park¹ del circuito estatórico estacionario):

Coordenadas *eléctricas* de entrehierro *qd0* fijas a rotor (marco de referencia ~sincrónico, ver Ec. 5.1):

$\dot{\theta}_r(t) \equiv \omega_r(t) \Leftrightarrow \theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(\xi) \cdot d\xi + \theta_r(0)$ (Ec. 3.3)

$\theta_r(t) \equiv P_p \cdot \theta_m(t) \therefore \omega_r(t) = P_p \cdot \omega_m(t)$ (Ec. 3.4)

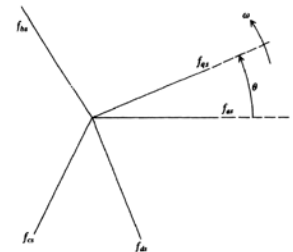
¹ **Transformación de Park:** (forma invariante en módulo de resultante vectorial de variables base *f*)

- a) **Directa:** coord. trifásicas de fase estator (“estacionarias”): $f_{abcs}(t) \rightarrow$
coord. *qd0* fijas a rotor (eléctricas=“sincrónicas”): $f_{qd0s}^r(t)$

$$\begin{bmatrix} f_{qs}^r(t) \\ f_{ds}^r(t) \\ f_{0s}^r(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r(t) & \cos \left(\theta_r(t) - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r(t) + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_r(t) & \sin \left(\theta_r(t) - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_r(t) + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{as}(t) \\ f_{bs}(t) \\ f_{cs}(t) \end{bmatrix}$$

- b) **Inversa:** $f_{qd0s}^r(t) \rightarrow f_{abcs}(t)$

$$\begin{bmatrix} f_{as}(t) \\ f_{bs}(t) \\ f_{cs}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r(t) & \sin \theta_r(t) & 1 \\ \cos \left(\theta_r(t) - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_r(t) - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta_r(t) + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_r(t) + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{qs}^r(t) \\ f_{ds}^r(t) \\ f_{0s}^r(t) \end{bmatrix}$$



donde $f_x(t)$ puede representar: tensión $v_x(t)$, corriente $i_x(t)$, flujo concatenado $\lambda_x(t)$, etc..

Torque electromagnético:
$$T_m(t) = \frac{3}{2} \cdot P_p \cdot [\lambda_m^r + (L_d - L_q) \cdot i_{ds}^r(t)] \cdot i_{qs}^r(t) \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Balance de tensiones eléctricas equivalentes de estator (referido a coordenadas qd0 fijas en rotor)²:

$$v_{qs}^r(t) = R_s \cdot i_{qs}^r(t) + L_q \cdot \frac{di_{qs}^r(t)}{dt} + [\lambda_m^r + L_d \cdot i_{ds}^r(t)] \cdot \omega_r(t) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$v_{ds}^r(t) = R_s \cdot i_{ds}^r(t) + L_d \cdot \frac{di_{ds}^r(t)}{dt} - L_q \cdot i_{qs}^r(t) \cdot \omega_r(t) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$v_{0s}(t) = R_s \cdot i_{0s}(t) + L_{ls} \cdot \frac{di_{0s}(t)}{dt} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Subsistema térmico (modelo simplificado equivalente de primer orden, considerando sólo pérdidas resistivas por efecto Joule (calor) en bobinado estatórico, despreciando pérdidas magnéticas y en rodamientos; transferencia de calor por conducción y convección natural, sin ventilador):

Potencia de pérdidas calóricas:
$$P_{s \text{ perd}}(t) = R_s \cdot (i_{as}^2(t) + i_{bs}^2(t) + i_{cs}^2(t)) \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Balance térmico de estator:
$$P_{s \text{ perd}}(t) = C_{ts} \cdot \frac{dT_s^\circ(t)}{dt} + \frac{1}{R_{ts-amb}} \cdot (T_s^\circ(t) - T_{amb}^\circ(t)) \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Parámetros (valores nominales medidos, tolerancia error +/- 1%; salvo aclaración específica):

- Momento de inercia (motor y caja): $J_m \approx 3.1 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Coef. de fricción viscosa (motor y caja): $b_m \approx 1.5 \times 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}}$
- Pares de Polos magnéticos: $P_p = 3 \text{ pares (i. e. 6 polos)}$
- Flujo magnético equivalente de imanes concatenado por espiras del bobinado estatórico:

$$\lambda_m^r \approx 0.01546 \text{ Wb} - \text{t, ó } \left(\frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \right)$$

- 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: $R_s \approx 1.02 \Omega (@40^\circ\text{C}) \rightarrow 1.32 \Omega (@115^\circ\text{C})$
Nota: R_s depende de $T_s^\circ(t)$: $R_s = R_{s0} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_s^\circ(t) - T_{s0}^\circ))$; $\alpha_{Cu} = 3.9 \times 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$
- Capacitancia térmica de estator: $C_{ts} \approx 1.091 \text{ W}/(^\circ\text{C/s})$ (\rightarrow almacenamiento interno)
- Resistencia térmica estator-ambiente: $R_{ts-amb} \approx 55 \text{ }^\circ\text{C/W}$ (\rightarrow disipación al ambiente)

Especificaciones de operación, en bornes de fases *abcs* de estator (valores límite, no sobrepasar):

- Tensión nominal de línea: $V_{sl \text{ nom}} = 24 \text{ V}_{ca \text{ rms}}$ (tensión nominal de fase: $V_{sf \text{ nom}} = \frac{V_{sl \text{ nom}}}{\sqrt{3}}$)
- Corriente nominal: $I_{s \text{ nom}} = 0.4 \text{ A}_{ca \text{ rms}}$ (régimen continuo)
- Corriente pico: $I_{s \text{ max}} = 2.0 \text{ A}_{ca \text{ rms}}$ (corta duración, aceleración)
- Temperatura máxima de bobinado estator: $T_{s \text{ max}}^\circ = 115 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura ambiente máxima: $T_{amb \text{ max}}^\circ = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

² Para un sistema de tensiones y corrientes trifásicas equilibrado, la Ec. 3.8 no influye: $i_{0s}(t) \equiv 0$; $v_{0s}(t) \equiv 0$.

3.4 Inversor trifásico de alimentación (modulador de tensión)

Inversor trifásico de 4 cuadrantes (regenerativo), consistente en puente trifásico con llaves electrónicas semiconductoras (ej. transistores MOSFETs / IGBTs de potencia) alimentado desde fuente ideal de CC, conmutado con modulación de ancho de pulso, PWM (existen distintas configuraciones y métodos, con ventajas y desventajas).

Nota: el análisis de detalle de operación PWM del inversor NO es parte de este proyecto. Para este trabajo, considerar al inversor trifásico como **Modulador idealizado de tensión trifásico (vectorial)** para alimentación al estator de la Máq. Eléctrica sincrónica → modelo promediado a continuación.

Modelo promediado equivalente de *tensiones sintetizadas de salida* (componente *fundamental*, sin armónicos): sistema trifásico de tensiones de fase senoidales de secuencia positiva *abc*, equilibrado o balanceado (igual módulo, desfasaje 120° eléctricos), *variable* en Módulo $V_{sl}(t)$ y Frecuencia $\omega_e(t)$:

$$v_{as}(t) \cong \sqrt{2} \cdot \frac{V_{sl}(t)}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\theta_{ev}(t)) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$v_{bs}(t) \cong \sqrt{2} \cdot \frac{V_{sl}(t)}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\theta_{ev}(t) - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$v_{cs}(t) \cong \sqrt{2} \cdot \frac{V_{sl}(t)}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\theta_{ev}(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$\omega_e(t) \equiv \dot{\theta}_{ev}(t) \Leftrightarrow \theta_{ev}(t) = \int_0^t \omega_e(\xi) \cdot d\xi + \theta_{ev}(0) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Parámetros variables:

$V_{sl}(t)$ y $\omega_e(t) \equiv 2\pi \cdot f_e(t)$ pueden variarse a voluntad (dentro de ciertos límites) a partir del control de la modulación PWM.

Especificaciones de operación (valores límite, no sobrepasar):

- Módulo de tensión de línea: $V_{sl} = [0.0 \dots 24 V_{ca \text{ rms}}]$
 - Frecuencia sincrónica: $f_e = [-330.0 \dots 0.0 \dots + 330.0] \text{ Hz}$
- Signo \pm de f_e : determina sentido de giro de campo magnético rodante.

Nota: **Ángulo de carga del rotor, o “ángulo (eléctrico) de rotor”** $\delta(t)$: desfasaje o desplazamiento angular instantáneo relativo entre la coordenada eléctrica qd0 fija a rotor y la cordenada eléctrica sincrónica (tensión de fase *a* del estator), depende del torque erogado (acoplamiento “elástico” equivalente entre rotor y campo rodante de estator debido a torque electromagnético):

$$\delta(t) \equiv \theta_r(t) - \theta_{ev}(t) = \int_0^t [\omega_r(\xi) - \omega_e(\xi)] \cdot d\xi + \theta_r(0) - \theta_{ev}(0) \quad (\text{Ec. 5.1})$$

3.5 Sensores de realimentación

El sistema cuenta con los siguientes dispositivos físicos de medición:

- **1 sensor de posición (encoder)**, montado en el eje de motor → variable medida: $\theta_m(t)$;
- **3 sensores de corriente** instantánea de fase, montados en salida trifásica de inversor a estator → variables medidas: $i_{as}(t), i_{bs}(t), i_{cs}(t)$.

Nota: para este trabajo, se asume que los sensores tienen **respuesta ideal** en tiempo continuo (transferencia = 1: filtro con ancho de banda infinito o “pasatodo”, de ganancia unitaria).

4. Tareas a desarrollar

4.1 Modelado, Análisis y Simulación dinámica a Lazo Abierto (sin control realimentado)

Considerando las siguientes **especificaciones**:

- Corriente nula en eje d : $i_{ds}^r(t) \equiv 0$ (estrategia de Control Vectorial con campo orientado \rightarrow *desacoplamiento* de canales de flujo y torque en el controlador).
- Excitaciones (entradas) externas:
 - Variable manipulada** (vectorial): sistema trifásico de tensiones de estator $v_{abc}(t)$, con $V_{sl}(t)$ y $\omega_e(t)$ ajustables (a través de manipulación de la modulación PWM del inversor) $\rightarrow v_{qd0s}^r(t)$ equivalente (transformación de Park).
 - Nota: considerar la restricción sobre $v_{qd0s}^r(t) \rightarrow v_{abc}(t)$ a imponer para cumplir la especificación a) $i_{ds}^r(t) \equiv 0$.
 - Variables de **perturbación**: torque de carga mecánica $T_l(t)$, del lado de la carga; temperatura ambiente $T_{amb}^\circ(t)$ (sólo para monitoreo de temperatura de estator).
- Respuesta** (salida) medida para realimentación: posición angular de eje del motor $\theta_m(t)$; respuesta no medida (efector final): posición angular de eje de la carga $q(t)$.
- Estado interno**: posición $\theta_m(t)$ y velocidad $\omega_m(t)$ en eje del motor, corrientes de estator $i_{qd0s}^r(t)$ (donde $i_{ds}^r(t) \equiv 0$) $\rightarrow i_{abc}(t)$ equivalente (transformación de Park inversa); temperatura de estator $T_s^\circ(t)$ (sólo para monitoreo).
- Estado inicial nulo (cero). Temperatura inicial de estator=Temperatura ambiente máxima=40°C.
- Valores *nominales* de inercia y amortiguamiento de la carga mecánica:
 $J_{l\ nom} \approx 0.2520 \text{ kg.m}^2$; $b_{l\ nom} \approx 0 \frac{\text{N.m}}{\text{rad/s}}$.

Realizar:

- Modelo matemático *equivalente* (1 grado de libertad) del subsistema mecánico del motor (Ec. 3.1 / 3.2) + transmisión *rígida* (Ec. 2.1 / 2.2) + carga (Ec. 1.1), *referido al eje del motor*.
- Modelo dinámico** del sistema físico *completo*, incorporando el subsistema electromagnético y térmico:
 - Modelo **global no lineal (NL)**, para $i_{ds}^r(t)$ genérica: a) Diagrama de bloques de estado (forma desagregada o escalar); b) Ecuaciones vectoriales de estado y de salida (con estado inicial genérico).
 - Modelo **simplificado lineal invariante (LTI)**, considerando directamente la restricción $i_{ds}^r(t) \equiv 0$, a partir de modelo NL (sin tener en cuenta el subsistema térmico): a) Diagrama de bloques de estado (forma desagregada o escalar); b) Ecuaciones vectoriales/matriciales de estado y de salida (con estado inicial genérico) \rightarrow matrices del modelo LTI.

Determinación de la restricción sobre la variable manipulada: $v_{qd0s}^r(t) \rightarrow v_{abc}(t)$ para cumplir la especificación a) $i_{ds}^r(t) \equiv 0$ (\rightarrow **realimentación directa no lineal** impuesta al modelo NL), y su efecto sobre $i_{abc}(t)$.
 - Modelo **global linealizado con parámetros variables (LPV)**, para $i_{ds}^r(t)$ genérica, a partir de modelo NL mediante aproximación de Taylor de 1° orden en punto genérico de operación \rightarrow Ecuaciones: a) **Espacio de operación** NL (cuasi-estacionario) + b) **Modelo dinámico LPV (pequeñas variaciones locales)**, función de parámetros variables según el punto de operación. Indicar estado inicial genérico.

Comparación del modelo global LPV con el modelo simplificado LTI para $i_{ds}^r(t) \equiv 0$; evaluación para otras condiciones: $i_{ds}^r(t) < 0$ (debilitamiento de campo), $i_{ds}^r(t) > 0$ (reforzamiento de campo), etc..

- d) **Funciones de Transferencia** de ambas entradas $v_{qs}^r(t)$ y $T_l(t)$ a la salida $\theta_m(t)$, para el caso simplificado lineal (LTI) considerando $i_{ds}^r(t) \equiv 0$.

3) Análisis de **Estabilidad** a lazo abierto (para $i_{ds}^r(t) \equiv 0$):

- Determinar autovalores=polos y ceros (valores numéricos y mapa en plano s);
- Evaluar estabilidad. Determinar frecuencia natural y amortiguamiento.

4) **Respuesta dinámica** en DT (principio de superposición, para $i_{ds}^r(t) \equiv 0$):

- Respuesta del estado interno $\{\theta_m(t); \omega_m(t); i_{qs}^r(t)\}$ (y $v_{ds}^r(t)$ requerida) a escalón de tensión de estator $v_{qs}^r(t) = 0 \rightarrow V_{qs}^r \text{ nom} = +19.596 V_{cc}$ en $t_{step1} = 0.1$ s seguido de escalón de torque de carga $T_l(t) = 0 \rightarrow T_{l \text{ max}} = +1.57$ N.m en $t_{step2} = 0.3$ s. Graficar (considerar coordenadas $qd0 \leftrightarrow abcs$).
- Determinar velocidad y corriente final de establecimiento, tiempos de crecimiento (10% al 90% de velocidad final), tiempo de establecimiento ($\pm 1\%$), sobrepico de corriente, etc.. ¿Qué influencia relativa tienen cada una de las dos acciones externas? ¿A qué se debe?

5) Análisis de **Controlabilidad** completa de estado (para $i_{ds}^r(t) \equiv 0$) desde entrada manipulada $v_{qs}^r(t)$, sin considerar la perturbación de la carga mecánica.

6) Análisis de **Observabilidad** completa de estado (para $i_{ds}^r(t) \equiv 0$) desde salida medida $\theta_m(t)$. Alternativa: ¿medir velocidad con tacogenerador, en vez de medir posición con encoder?

4.2 Diseño, Análisis y Simulación de Controlador de Movimiento en Cascada con Modulador de Torque equivalente (Control Vectorial)

Considerando las siguientes **especificaciones**:

- Corriente nula en eje d: $i_{ds}^r(t) \equiv 0$ (estrategia de **Control Vectorial con campo orientado** \rightarrow desacoplamiento de canales de flujo y torque en el controlador).
- Diseño en tiempo continuo $t \in \mathbb{R}$.
- Acceso a todas las variables de estado para realimentación (luego reemplazado por estimación mediante Observador de estado reducido a partir de salida medida [ítem 3 abajo]).
- Valores *nominales* de inercia y amortiguamiento de la carga mecánica:
 $J_{l \text{ nom}} \approx 0.2520 \text{ kg.m}^2$; $b_{l \text{ nom}} \approx 0 \frac{\text{N.m}}{\text{rad/s}}$.

Nota: En los **diagramas de bloques**, separar claramente el sistema físico del sistema de control. Indicar las transformaciones de Park necesarias (directas y/o inversas) con todas sus señales involucradas, tanto virtuales en el sistema físico como a implementar concretamente en el sistema de control. Indicar dónde se implementan los desacoplamientos, representar el “modulador de tensión trifásico” de ganancia unitaria (inversor) y los elementos sensores de corriente y posición/velocidad. No repetir diagramas de bloques innecesariamente; sintetizar información.

NO se requiere control realimentado de temperatura; incorporar **modelo térmico** sólo para **monitoreo de calentamiento** en bobinados.

Realizar:

- 1) **Modulador de Torque equivalente (controlador interno de corriente/torque)**, con su diagrama de bloques completo y valores de parámetros correspondientes, basado en los siguientes lineamientos:

- a) **Desacoplamiento** de todas las realimentaciones físicas naturales de estado hacia la entrada.
- b) Diseño de **lazos internos de control vectorial de corrientes** $i_{qds}^r(t)$ desacoplados de la velocidad (donde $i_{ds}^{r*}(t) \equiv 0$), con control proporcional solamente, con polo en $p_i = -5000 \frac{rad}{s}$ (BW ~ 796 Hz) para ambos casos.
- c) Incorporación adecuada de **consigna de torque** (nueva variable manipulada).

- 2) **Controlador externo de movimientos: posición/velocidad** (con “acceso ~directo” a manipular el torque motor a través de la corriente $i_{qs}^r(t)$) diseñado utilizando el método de sintonía serie con acción integral (“PID”), con $n = 2.5$; $\omega_{pos} = 800 \frac{rad}{s}$, considerando valores nominales de J_l, b_l ; con su diagrama de bloques completo y valores de parámetros correspondientes.

Indicar en el plano s dónde quedan ubicados los polos correspondientes, en comparación con el polo del regulador de corriente y los polos de la planta original (evaluar la influencia de variación extrema de parámetros de carga $J_l, b_l \rightarrow$ migración de polos, etc.).

Incorporar entrada de referencia o **setpoint de posición** $q^*(t) \equiv \frac{1}{r} \cdot \theta_m^*(t)$ al diagrama de bloques del sistema.

- 3) Incorporación y diseño de **Observador de Estado de orden reducido** sólo para la parte mecánica de este controlador, que estime la **Posición y Velocidad** a partir de sensor de posición $\theta_m(t)$ (no es necesario estimar la corriente, ya que se dispone de sensores de corriente para el lazo del modulador de torque). Ubicar los dos polos del observador reales iguales en $p_{obs1,2} = -3200 \frac{rad}{s}$, para no interferir demasiado con el controlador de estado. Adecuar las realimentaciones a los valores estimados.

- 4) **Simulación** en tiempo continuo mostrando:

- a) Seguimiento de consignas de movimiento $q^*(t) \equiv \frac{1}{r} \cdot \theta_m^*(t)$ con **perfil trapezoidal de posición**: $q^*(t) = 0 \rightarrow (\Delta t_{ramp} = 5 \text{ s}) \rightarrow 2 \cdot \pi \text{ [rad]} \rightarrow (\Delta t_{ramp} = 5 \text{ s}) \rightarrow 0$;
- b) Rechazo a **perturbaciones**: considerando *valores nominales y variación máx.* de los parámetros de carga mecánica física (cambios en escalón).
- c) Verificar si se supera/n alguna/s de las *Especificaciones de operación (valores límite)* de velocidad, torque, corriente y tensión de los componentes del sistema físico (caja reductora, motor, inversor), o si existe margen para aumentar el desempeño del sistema.

Nota: En caso de superar los valores límites, determinar qué restricciones es necesario imponer al controlador para respetar dichos límites \rightarrow realizar los ajustes y verificar.

- d) Observador: Verificar si existe error de estimación de régimen permanente distinto de cero ante perturbaciones constantes, o si en este caso también converge asintóticamente la estimación al valor real no medido.

Nota: En caso de tener error de estimación estacionario no nulo, proponer esquema alternativo o agregado para compensar este error y llevarlo a cero (para perturbación constante) \rightarrow realizar los ajustes y verificar.

- e) Comportamiento térmico del motor: Verificar si la temperatura del bobinado está dentro de los valores admisibles para operación repetitiva con ciclo de operación especificado.