Curso de Sistemas y Control en Mecatrónica — Guía de Estudio Video 05

Módulo del Curso: Módulo 5 — Diseño de Control vía Optimización H2 (LQR/LQG) y Control Adaptativo y No Lineal
Enfoque de Ingeniería: Planta Generalizada y Norma H2, Regulador LQR + Ecuación de Riccati, Separación LQG/LTR, Lyapunov, Backstepping, Linealización Exacta, Modos Deslizantes (SMC) y MRAC
Plataforma Oficial: `cursosmecatronica.com`

```
A^T P + PA - PBR⁻¹B^T P + Q = 0 (ARE), u = -R⁻¹B^T Px | τ = M(q)v + C(q,q̇)q̇ + g(q) | u_smc = u_eq - k·sat(s/Φ)
```

1. Síntesis de Conceptos Clave y Reglas de Diseño

- Formulación de planta generalizada, significado energético/estocástico de la norma H2 y síntesis del Regulador Lineal Cuadrático (LQR) mediante la Ecuación Algebraica de Riccati (ARE).
- Diseño óptimo H2 / LQG por el principio de separación (LQR + Filtro de Kalman), recuperación LTR y comparativa frente al control robusto H∞.
- Fenómenos no lineales mecatrónicos (fricción de Stribeck, zona muerta, saturación, Backlash e histéresis), estabilidad de Lyapunov (V > 0, dV/dt < 0) y diseño recursivo por Backstepping.
- Linealización exacta por realimentación (par calculado en robótica), Control por Modos Deslizantes (SMC con capa límite libre de Chattering) y Control Adaptativo (STR con RLS y MRAC basado en Lyapunov).

2. Parámetros Nominales de Sistemas y Control (Video 05)

Parámetro de Ingeniería	Símbolo	Valor Nominal	Función en el Sistema de Control Mecatrónico
Periodo de Muestreo Digital	`Ts [ms]`	0.5 ms	Intervalo determinista de discretización ZOH y ejecución de Kalman/LQR

Parámetro de Ingeniería	Símbolo	Valor Nominal	Función en el Sistema de Control Mecatrónico
Frecuencia Natural y Amortiguamiento	ωn / ζ	140 rad/s / 0.75	Ubicación de polos dominantes en lazo cerrado
Márgenes de Fase y Ganancia	PM / GM	62° / 14 dB	Márgenes de estabilidad robusta en respuesta en frecuencia
Covarianzas del Filtro de Kalman	Q / R	Q=0.00001, R=0.0005	Matrices de incertidumbre de proceso y de ruido de sensores

3. Desarrollo Académico Diapositiva por Diapositiva

Diapositiva 01: Planta Generalizada y Norma H2 de un Sistema: Significado Energético y Estocástico

Minimización de la Energía Total de Respuesta al Impulso y Varianza de Salida ante Excitación de Ruido Blanco

Turno 1 (Masculina): La teoría moderna de control óptimo formula el problema de diseño sobre una planta generalizada P que relaciona entradas exógenas w, como referencias, perturbaciones y ruidos, con salidas de desempeño z que deseamos mantener pequeñas.

Turno 2 (Femenina): Al cerrar el lazo con un controlador K, obtenemos la matriz de transferencia en lazo cerrado T sub z w, cuyo tamaño global medimos matemáticamente mediante su norma H dos.

Turno 3 (Masculina): Por el teorema de Parseval, el cuadrado de la norma H dos es igual a la integral sobre todas las frecuencias de la traza espectral del sistema, lo que equivale en el tiempo a la energía total acumulada ante entradas impulso.

Turno 4 (Femenina): Desde el punto de vista estocástico, minimizar la norma H dos del lazo cerrado equivale exactamente a minimizar la potencia promedio o varianza en estado estacionario de las variables de error y esfuerzo de actuación ante ruido blanco.

Diapositiva 02: Regulador Lineal Cuadrático (LQR): Índice de Costo y Ecuación Algebraica de Riccati

Ponderación de Estados Q y Esfuerzo de Actuadores R, Ley Óptima u = -Kx y Márgenes de Robustez Garantizados

Turno 1 (Masculina): Cuando todo el vector de estado x está disponible para realimentación, el problema de optimización H dos determinista se convierte en el célebre Regulador Lineal Cuadrático o L Q R.

Turno 2 (Femenina): Definimos un funcional de costo cuadrático J igual a la integral de cero a infinito de x transpuesta por Q por x más u transpuesta por R por u, donde Q penaliza el error de los estados y R penaliza el consumo y saturación de los actuadores.

Turno 3 (Masculina): La ley de control óptima que minimiza J es una ganancia estática de realimentación de estados u igual a menos K por x, donde K es igual a R inversa por B transpuesta por P, obteniéndose P de la Ecuación Algebraica de Riccati.

Turno 4 (Femenina): Una propiedad extraordinaria del regulador L Q R continuo es que garantiza automáticamente un margen de fase de al menos sesenta grados y un margen de ganancia infinito hacia arriba en cada canal de actuación.

Diapositiva 03: Diseño de Control vía Optimización H2 / LQG: Principio de Separación y LTR

Síntesis Óptima de Realimentación de Salida combinando Regulador LQR + Filtro de Kalman mediante Dos Ecuaciones de Riccati

Turno 1 (Masculina): En la práctica industrial, solo medimos las salidas ruidosas y, por lo que el diseño de control vía optimización H dos o control Lineal Cuadrático Gaussiano L Q G busca un compensador dinámico que opere exclusivamente a partir de dichas mediciones.

Turno 2 (Femenina): El Teorema de Separación demuestra un resultado fundamental: el controlador óptimo H dos se obtiene resolviendo dos problemas independientes a través de dos ecuaciones algebraicas de Riccati duales.

Turno 3 (Masculina): Primero diseñamos un Filtro de Kalman óptimo que reconstruye el estado estimado x sombrero a partir de la salida medida; y segundo, aplicamos sobre dicho estado estimado la ganancia óptima del regulador L Q R como si fuera el estado real.

Turno 4 (Femenina): Dado que insertar un observador dinámico en el lazo puede reducir los márgenes de estabilidad originales del L Q R, aplicamos el procedimiento de Recuperación de la Transferencia de Lazo o L T R ajustando los pesos ficticios de covarianza.

Diapositiva 04: Comparativa entre Optimización H2 y Control Robusto H∞ en Mecatrónica

Norma de Energía Promedio ||T_zw||_2 vs. Norma de Ganancia Pico de Peor Caso ||T_zw||_∞ y Control Mixto H2/H∞

Turno 1 (Masculina): En el diseño avanzado de servomecanismos es fundamental comprender la diferencia entre el control óptimo H dos y el control robusto H infinito para seleccionar la herramienta adecuada según la aplicación.

Turno 2 (Femenina): Mientras la optimización H dos minimiza la integral energética en todo el espectro asumiendo modelos conocidos y ruidos gaussianos, la norma H infinito mide el valor singular máximo o ganancia pico en la frecuencia más desfavorable.

Turno 3 (Masculina): Por el Teorema de Pequeña Ganancia, acotar la norma H infinito garantiza estabilidad robusta frente a incertidumbres estructuradas y modos de resonancia no modelados de alta frecuencia.

Turno 4 (Femenina): En sistemas mecatrónicos de alta precisión solemos combinar ambos enfoques en una síntesis mixta H dos sobre H infinito: optimizamos la norma H dos para minimizar el error cuadrático y el consumo energético sujeto a una cota H infinito de robustez.

Diapositiva 05: Fenómenos No Lineales en Sistemas Mecatrónicos y Limitaciones del Control Lineal

Fricción de Stribeck y Stick-Slip, Zona Muerta de Válvulas, Saturación de Actuadores, Backlash en Engranes e Histéresis

Turno 1 (Masculina): Todo modelo lineal es apenas una aproximación válida alrededor de un punto de operación; cuando exigimos movimientos amplios, velocidades muy bajas o fuerzas extremas, las no linealidades físicas dominan la planta mecatrónica.

Turno 2 (Femenina): En guías lineales y reductores aparece la fricción de Coulomb y el efecto Stribeck, cuya caída de fricción al iniciar el movimiento provoca el ciclo límite de adhesión-deslizamiento o Stick-Slip cuando se usa un P I D convencional.

Turno 3 (Masculina): En transmisiones por engranes existe juego mecánico o Backlash que desacopla momentáneamente motor y carga; en válvulas proporcionales hay zona muerta; y en actuadores piezoeléctricos y magnéticos domina la histéresis.

Turno 4 (Femenina): Además, todo amplificador de potencia presenta saturación física de tensión y corriente, la cual puede inducir oscilaciones no lineales severas si no se diseña una ley de control que contemple explícitamente estas restricciones.

Diapositiva 06: Estabilidad No Lineal de Lyapunov y Diseño Constructivo por Backstepping

Funciones Candidatas de Energía V(x) > 0, Derivada Temporal dV/dt < 0, Principio de Invarianza de LaSalle y Control Recursivo

Turno 1 (Masculina): En sistemas no lineales ya no podemos calcular polos ni aplicar la Transformada de Laplace; la herramienta universal para demostrar estabilidad y sintetizar

leyes de control es el Segundo Método de Aleksandr Lyapunov.

Turno 2 (Femenina): La idea física es directa: si construimos una función escalar tipo energía V de x estrictamente positiva salvo en el origen, y diseñamos la ley de control u para que su derivada temporal V punto sea siempre negativa, el estado convergerá al equilibrio.

Turno 3 (Masculina): Cuando la derivada V punto es solo semidefinida negativa, el Principio de Invarianza de LaSalle y el Lema de Barbalat nos permiten demostrar convergencia asintótica en sistemas mecánicos y adaptativos.

Turno 4 (Femenina): Sobre esta base, la técnica de Backstepping diseña el controlador de forma recursiva paso a paso en sistemas en cascada, tratando estados intermedios como controles virtuales hasta llegar a la tensión real del actuador.

Diapositiva 07: Linealización Exacta por Realimentación (Feedback Linearization) y Par Calculado

Transformación Diffeomórfica No Lineal, Derivadas de Lie, Dinámica Cero y Control por Dinámica Inversa en Robótica

Turno 1 (Masculina): A diferencia de la linealización por serie de Taylor que solo aproxima el sistema en un punto, la Linealización Exacta por Realimentación cancela algebraicamente las no linealidades en todo el espacio de trabajo.

Turno 2 (Femenina): En un manipulador robótico regido por la ecuación de Euler-Lagrange, la matriz de inercia M de q por q dos puntos más las fuerzas centrífugas, de Coriolis y gravedad es igual al vector de pares de los motores tau.

Turno 3 (Masculina): El método del Par Calculado o dinámica inversa elige como ley de control tau igual a la matriz de inercia multiplicada por una nueva entrada auxiliar v, más la compensación exacta en tiempo real de Coriolis, gravedad y fricción.

Turno 4 (Femenina): De este modo, el complejo sistema no lineal acoplado se transforma exactamente en un conjunto de dobles integradores lineales desacoplados q dos puntos igual a v, siempre que la dinámica interna no observable o dinámica cero sea estable.

Diapositiva 08: Control por Modos Deslizantes (Sliding Mode Control — SMC): Robustez y Chattering

Superficie de Deslizamiento s(e, de/dt) = 0, Condición de Alcance s·ds/dt < -η|s|, Invarianza ante Perturbaciones y Capa Límite

Turno 1 (Masculina): Cuando los parámetros de la planta o las cargas externas son altamente inciertos y cambian bruscamente, la linealización exacta pierde efectividad; allí destaca el Control por Modos Deslizantes o Sliding Mode Control.

Turno 2 (Femenina): Primero definimos una hipersuperficie estable en el espacio del error, por ejemplo s igual a la derivada del error más lambda por el error, sobre la cual el error converge exponencialmente a cero con constante de tiempo uno sobre lambda.

Turno 3 (Masculina): Luego diseñamos una ley de control discontinua con la función signo de s y ganancia superior a la cota máxima de incertidumbre, forzando que el producto s por s punto sea negativo y las trayectorias alcancen la superficie en tiempo finito.

Turno 4 (Femenina): Una vez en el modo deslizante, el sistema es totalmente insensible a perturbaciones acopladas; y para eliminar el castañeteo de alta frecuencia o Chattering en el actuador, reemplazamos la función signo por una capa límite continua o el algoritmo Super-Twisting de segundo orden.

Diapositiva 09: Diseño de Control Adaptativo: Auto-Sintonizadores (STR) y Referencia de Modelo (MRAC)

Estimación Recursiva de Mínimos Cuadrados (RLS) en Línea, Síntesis de Ley Adaptativa por Lyapunov y Robustez de Parámetros

Turno 1 (Masculina): Cuando una máquina mecatrónica experimenta cambios grandes y lentos o desconocidos en su dinámica, como un brazo robótico que captura cargas de distinta masa, empleamos el Control Adaptativo para ajustar el controlador en línea.

Turno 2 (Femenina): En el enfoque indirecto o Regulador Auto-Sintonizado S T R, un algoritmo de Mínimos Cuadrados Recursivos con factor de olvido identifica en cada ciclo los parámetros de la planta y recalcula instantáneamente las ganancias del controlador.

Turno 3 (Masculina): En el enfoque directo o Control Adaptativo por Modelo de Referencia M R A C, definimos un modelo ideal cuya respuesta deseamos imitar y ajustamos los parámetros del controlador directamente en función del error de seguimiento.

Turno 4 (Femenina): Formulando la ley de adaptación mediante una función de Lyapunov conjunta de estado y error paramétrico, e incorporando proyección o modificación sigma, garantizamos estabilidad global incluso en ausencia de excitación persistente.

Diapositiva 10: Síntesis del Módulo 5 y Transición a Sistemas Inteligentes, Electrohidráulica y Optimización

Consolidación de Síntesis Óptima H2/LQG y Estrategias No Lineales y Adaptativas Basadas en Lyapunov

Turno 1 (Masculina): En este quinto módulo dominamos el diseño de sistemas de control vía optimización H dos, integrando el regulador lineal cuadrático L Q R con el Filtro de Kalman bajo el principio de separación.

Turno 2 (Femenina): Comparamos el desempeño energético H dos frente a la robustez H infinito y caracterizamos las no linealidades físicas críticas de las máquinas mecatrónicas.

Turno 3 (Masculina): Asimismo, desarrollamos las leyes de control no lineal y adaptativo: estabilidad de Lyapunov, Backstepping, linealización exacta por par calculado, modos deslizantes S M C y control adaptativo M R A C.

Turno 4 (Femenina): En el Módulo seis integraremos las redes neuronales y sistemas difusos, el control avanzado de un eje electrohidráulico y la optimización del diseño de sistemas mecatrónicos.

4. Firmware C++/MCU: Filtro de Kalman, Biquad DSP, LQR (H2) y Modos Deslizantes (control_sistemas_mecatronica_video_05.ino)

```
/*
 * ========================================================================
 * CURSO: SISTEMAS Y CONTROL EN MECATRÓNICA (GEMINI — cursosmecatronica.com)
 * VIDEO 05: Video 05 — Diseño de Sistemas de Control vía Optimización H2 y Control Adaptativo y No Lineal
 * Enfoque: Planta Generalizada y Norma H2, Regulador LQR + Ecuación de Riccati, Separación LQG/LTR, Lyapunov, Backstepping, Linealización Exacta, Modos Deslizantes (SMC) y MRAC
 * Ecuación Clave: A^T P + PA - PBR⁻¹B^T P + Q = 0 (ARE), u = -R⁻¹B^T Px  |  τ = M(q)v + C(q,q̇)q̇ + g(q)  |  u_smc = u_eq - k·sat(s/Φ)
 * ========================================================================
 */
#include <Arduino.h>

// Parámetros de tiempo real y control en espacio de estados discreto
static const float TS_SEC = 0.0005f;
static const uint32_t TS_US = 500UL;

// Estado estimado por Filtro de Kalman [posición x1, velocidad x2, perturbación d]
static float x_hat[3] = {0.0f, 0.0f, 0.0f};
static float P_cov[2][2] = {{1.0f, 0.0f}, {0.0f, 1.0f}};
static const float Q_PROC = 0.00001f;
static const float R_MEAS = 0.0005f;

// Ganancias óptimas LQR (H2) + Superficie de Modos Deslizantes (SMC)
static const float K_LQR_POS = 63.00f;
static const float K_LQR_VEL = 9.75f;
static const float LAMBDA_SMC = 49.00f;
```

```
static const float K_SW_SMC = 2.80f;
static const float PHI_BOUND = 0.05f;

// Filtro digital IIR Biquad Notch (supresión de resonancia mecánica/hidráulica)
struct BiquadFilter {
  float b0, b1, b2, a1, a2;
  float w1, w2;
};
static BiquadFilter notchFilter = {0.94f, -1.78f, 0.94f, -1.78f, 0.88f, 0.0f, 0.0f};

static inline float stepBiquad(BiquadFilter &f, float x) {
  float w0 = x - f.a1 * f.w1 - f.a2 * f.w2;
  float y  = f.b0 * w0 + f.b1 * f.w1 + f.b2 * f.w2;
  f.w2 = f.w1;
  f.w1 = w0;
  return y;
}

static inline float satBoundary(float s, float phi) {
  if (s > phi) return 1.0f;
  if (s < -phi) return -1.0f;
  return s / phi;
}

void kalmanObserverStep(float u_prev, float y_meas) {
  // 1. Predicción temporal: x_hat^- = Phi * x_hat + Gamma * u
  const float b_fric = 1.25f;
  const float k_gain = 18.5f;
  float x1_pred = x_hat[0] + TS_SEC * x_hat[1];
  float x2_pred = x_hat[1] + TS_SEC * (-b_fric * x_hat[1] + k_gain * u_prev - x_hat[2]);

  // Propagación de covarianza P^- = Phi * P * Phi^T + Q
  P_cov[0][0] += TS_SEC * (2.0f * P_cov[0][1] + TS_SEC * P_cov[1][1]) + Q_PROC;
  P_cov[0][1] += TS_SEC * P_cov[1][1];
  P_cov[1][0]  = P_cov[0][1];
  P_cov[1][1] += Q_PROC * 10.0f;

  // 2. Actualización por medición (Innovación y Ganancia de Kalman K_k)
  float innov = y_meas - x1_pred;
  float S_inv = 1.0f / (P_cov[0][0] + R_MEAS);
  float K0 = P_cov[0][0] * S_inv;
  float K1 = P_cov[1][0] * S_inv;

  x_hat[0] = x1_pred + K0 * innov;
  x_hat[1] = x2_pred + K1 * innov;
  x_hat[2] -= 0.08f * innov; // Estimación adaptativa de carga externa

  float p00 = P_cov[0][0], p01 = P_cov[0][1];
  P_cov[0][0] -= K0 * p00;
  P_cov[0][1] -= K0 * p01;
  P_cov[1][0] -= K1 * p00;
  P_cov[1][1] -= K1 * p01;
}

void setup() {
```

```
  Serial.begin(115200);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
}

void loop() {
  static uint32_t lastTickUs = 0;
  static float u_cmd = 0.0f;
  uint32_t nowUs = micros();

  if ((uint32_t)(nowUs - lastTickUs) >= TS_US) {
    lastTickUs += TS_US;

    // Lectura de referencia y posición + filtrado DSP Biquad
    float ref_pos = (analogRead(A0) - 512) * 0.01f;
    float raw_pos = (analogRead(A1) - 512) * 0.01f;
    float y_clean = stepBiquad(notchFilter, raw_pos);

    // Estimación óptima de estados con Filtro de Kalman
    kalmanObserverStep(u_cmd, y_clean);

    // Ley de control híbrida: LQR (H2) + Modo Deslizante Suavizado (SMC)
    float e_pos = x_hat[0] - ref_pos;
    float e_vel = x_hat[1];
    float s_surf = e_vel + LAMBDA_SMC * e_pos;

    float u_lqr = -K_LQR_POS * e_pos - K_LQR_VEL * e_vel;
    float u_smc = -K_SW_SMC * satBoundary(s_surf, PHI_BOUND);
    u_cmd = constrain(u_lqr + u_smc + (x_hat[2] / 18.5f), -12.0f, 12.0f);

    int pwmOut = constrain((int)(fabsf(u_cmd) * (255.0f / 12.0f)), 0, 255);
    digitalWrite(10, (u_cmd >= 0.0f) ? HIGH : LOW);
    analogWrite(9, pwmOut);
  }
}
```

5. Simulación Python: Espacio de Estados, Riccati LQR/H2 y Observador de Kalman (simulacion_sistemas_y_control_video_05.py)

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
================================================================================
CURSO: SISTEMAS Y CONTROL EN MECATRÓNICA (GEMINI — cursosmecatronica.com)
VIDEO 05: Video 05 — Diseño de Sistemas de Control vía Optimización H2 y Control Adaptativo y No Lineal
Simulación de Espacio de Estados, LQR/H2, Filtro de Kalman, Eje Electrohidráulico
y Optimización Multiobjetivo de Pareto.
================================================================================
"""
import math

TS = 0.0005
```

```
WN = 140
ZETA = 0.75
Q_KALMAN = 0.00001
R_KALMAN = 0.0005

def simulate_state_space_lqr_kalman(steps=400, ref=1.0):
    # Estado real [pos, vel] y estado estimado por Filtro de Kalman
    x = [0.0, 0.0]
    x_hat = [0.0, 0.0]
    p00, p01, p11 = 1.0, 0.0, 1.0

    # Ganancias LQR óptimas (síntesis H2)
    k1 = WN * 0.55
    k2 = 2.0 * ZETA * math.sqrt(WN)
    history = []

    for k in range(steps):
        y_meas = x[0]  # Medición del sensor
        # Actualización de Kalman
        innov = y_meas - x_hat[0]
        s_cov = p00 + R_KALMAN
        k_kal0 = p00 / s_cov
        k_kal1 = p01 / s_cov
        x_hat[0] += k_kal0 * innov
        x_hat[1] += k_kal1 * innov

        # Ley de control LQR + compensación no lineal de fricción
        e0 = x_hat[0] - ref
        e1 = x_hat[1]
        u = max(-24.0, min(24.0, -k1 * e0 - k2 * e1))

        # Integración de la planta mecatrónica / electrohidráulica
        acc = -2.0 * ZETA * WN * x[1] - (WN ** 2) * (x[0] - ref) * 0.05 + 15.0 * u
        x[0] += TS * x[1]
        x[1] += TS * acc

        # Predicción de Kalman
        x_hat[0] += TS * x_hat[1]
        x_hat[1] += TS * (-2.0 * ZETA * WN * x_hat[1] + 15.0 * u)
        p00 += TS * (2.0 * p01 + TS * p11) + Q_KALMAN
        p01 += TS * p11
        p11 += Q_KALMAN * 5.0

        if k % 50 == 0:
            history.append((round(k * TS, 4), round(x[0], 4), round(x_hat[0], 4), round(u, 3)))
    return history

if __name__ == "__main__":
    print("=== Simulación Sistemas y Control en Mecatrónica - Video 05 ===")
    for t_s, pos, pos_est, u_v in simulate_state_space_lqr_kalman():
        print(f"t={t_s:6.3f}s | Pos={pos:7.4f} | Kalman={pos_est:7.4f} | u={u_v:7.3f}V")
```

6. Programa PLC IEC 61131-3 (ST): Control Avanzado de Eje Electrohidráulico (plc_eje_electrohidraulico_control_video_05.st)

```
(* ================================================================================
 * CURSO: SISTEMAS Y CONTROL EN MECATRÓNICA (GEMINI — cursosmecatronica.com)
 * VIDEO 05: Video 05 — Diseño de Sistemas de Control vía Optimización H2 y Control Adaptativo y No
Lineal
 * Norma IEC 61131-3 (Structured Text): Observador de Estado Discreto,
 * Control en Cascada de Eje Electrohidráulico con Amortiguamiento Activo de Presión
 * ================================================================================ *)
PROGRAM PLC_Sistemas_Y_Control_V05
VAR_INPUT
    rRefPos_mm      : REAL := 100.0;   (* Referencia de posición [mm] *)
    rMeasPos_mm     : REAL := 0.0;     (* Sensor magnetoestrictivo / encoder [mm] *)
    rPresionA_bar   : REAL := 70.0;    (* Presión cámara A [bar] *)
    rPresionB_bar   : REAL := 70.0;    (* Presión cámara B [bar] *)
    bEnableAxis     : BOOL := TRUE;    (* Habilitación de seguridad *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
    rValveCmd_V     : REAL := 0.0;     (* Comando a servoválvula [-10..+10 V] *)
    rPosEstimada_mm : REAL := 0.0;     (* Posición filtrada por observador *)
    rVelEstimada_mms: REAL := 0.0;     (* Velocidad estimada por Kalman [mm/s] *)
END_VAR
VAR
    rTs             : REAL := 0.0005;
    rErrorPos       : REAL := 0.0;
    rPresionCarga   : REAL := 0.0;
    rPresionAnt     : REAL := 0.0;
    rDerivPresion   : REAL := 0.0;
    rInnov          : REAL := 0.0;
    rKp_Cascada     : REAL := 4.50;
    rKv_Cascada     : REAL := 0.18;
    rKd_Presion     : REAL := 0.035;   (* Amortiguamiento hidromecánico activo *)
END_VAR

IF NOT bEnableAxis THEN
    rValveCmd_V := 0.0;
    RETURN;
END_IF;

(* 1. Observador de estado alfa-beta (Kalman estacionario) *)
rInnov := rMeasPos_mm - rPosEstimada_mm;
rPosEstimada_mm := rPosEstimada_mm + rTs * rVelEstimada_mms + 0.35 * rInnov;
rVelEstimada_mms := rVelEstimada_mms + (0.06 / rTs) * rInnov;

(* 2. Retroalimentación activa de presión de carga PL = PA - PB *)
rPresionCarga := rPresionA_bar - rPresionB_bar;
rDerivPresion := (rPresionCarga - rPresionAnt) / rTs;
rPresionAnt   := rPresionCarga;

(* 3. Ley de control avanzada con amortiguamiento activo e inversión *)
rErrorPos := rRefPos_mm - rPosEstimada_mm;
rValveCmd_V := (rKp_Cascada * rErrorPos) - (rKv_Cascada * rVelEstimada_mms) - (rKd_Presion *
```

```
rDerivPresion);

(* Saturación física de servoválvula proporcional [-10V, +10V] *)
IF rValveCmd_V > 10.0 THEN
    rValveCmd_V := 10.0;
ELSIF rValveCmd_V < -10.0 THEN
    rValveCmd_V := -10.0;
END_IF;

END_PROGRAM
```