Curso de Sistemas y Control en Mecatrónica — Guía de Estudio Video 02

Módulo del Curso: Módulo 2 — Análisis en Espacio de Estados, Propiedades del Sistema y Respuesta Dinámica
Enfoque de Ingeniería: Matriz de Transición e^(At), Formas Canónicas, Controlabilidad y Observabilidad de Kalman, Estabilidad de Lyapunov y Respuesta Transitoria/Estacionaria
Plataforma Oficial: `cursosmecatronica.com`

```
rank[B, AB, ..., A^(n-1)B] = n | rank[C; CA; ...; CA^(n-1)] = n | A^T P + PA = -Q | Mp = exp(-πζ / √(1-ζ²))
```

1. Síntesis de Conceptos Clave y Reglas de Diseño

- Solución completa de la ecuación de estado mediante la exponencial matricial e^(At), autovalores, autovectores y modos naturales de vibración.
- Transformaciones de similitud x = Pz e invarianza de autovalores; formas canónicas controlable, observable y diagonal/modal.
- Criterios de rango de Kalman y prueba modal PBH para controlabilidad y observabilidad; dualidad matemática y prevención de cancelaciones polo-cero inestables.
- Ecuación matricial de Lyapunov continua y discreta, respuesta de sistemas de 1er y 2do orden (tr, tp, Mp, ts), efecto de polos/ceros adicionales (fase no mínima) y errores estacionarios según el Tipo N (Kp, Kv, Ka).

2. Parámetros Nominales de Sistemas y Control (Video 02)

Parámetro de Ingeniería	Símbolo	Valor Nominal	Función en el Sistema de Control Mecatrónico
Periodo de Muestreo Digital	`Ts [ms]`	1 ms	Intervalo determinista de discretización ZOH y ejecución de Kalman/LQR
Frecuencia Natural y Amortiguamiento	`ωn / ζ`	80 rad/s / 0.707	Ubicación de polos dominantes en lazo cerrado

Parámetro de Ingeniería	Símbolo	Valor Nominal	Función en el Sistema de Control Mecatrónico
Márgenes de Fase y Ganancia	PM / GM	58° / 11 dB	Márgenes de estabilidad robusta en respuesta en frecuencia
Covarianzas del Filtro de Kalman	Q / R	Q=0.00005, R=0.002	Matrices de incertidumbre de proceso y de ruido de sensores

3. Desarrollo Académico Diapositiva por Diapositiva

Diapositiva 01: Solución de la Ecuación de Estado, Matriz Exponencial e^(At) y Modos Naturales

Descomposición en Respuesta Libre y Respuesta Forzada, Autovalores λ_i y Autovectores del Sistema Mecatrónico

Turno 1 (Masculina): La solución temporal completa de la ecuación de estado continua se descompone en dos términos físicos: la respuesta libre debida al estado inicial x cero y la respuesta forzada generada por la integral de convolución de la entrada u.

Turno 2 (Femenina): El núcleo de ambas componentes es la matriz de transición de estados Fi de t igual a la exponencial matricial e elevado a A por t, la cual propaga el vector de estado hacia adelante en el tiempo.

Turno 3 (Masculina): Los autovalores lambda sub i de la matriz A, obtenidos al resolver la ecuación característica determinante de lambda I menos A igual a cero, definen las frecuencias y tasas de decaimiento de los modos naturales de la máquina.

Turno 4 (Femenina): Cada autovector asociado indica la dirección geométrica en el espacio de estados a lo largo de la cual vibra o se atenúa dicho modo, permitiendo identificar resonancias acopladas entre ejes mecánicos.

Diapositiva 02: Transformaciones de Similitud x = Pz y Formas Canónicas en Espacio de Estados

Invarianza de Autovalores y Función de Transferencia, Forma Canónica Controlable, Observable y Diagonal Modal

Turno 1 (Masculina): A diferencia de la función de transferencia que es única, la representación en espacio de estados depende del sistema de coordenadas elegido: mediante cualquier matriz invertible P podemos definir un nuevo estado z igual a P inversa por x.

Turno 2 (Femenina): Esta transformación de similitud cambia las matrices internas pero deja completamente invariantes tanto los autovalores de la planta como su matriz de transferencia de entrada a salida.

Turno 3 (Masculina): A partir de los coeficientes del polinomio de transferencia podemos construir por inspección la Forma Canónica Controlable, ideal para calcular ganancias de realimentación de estados, o la Forma Canónica Observable, dual para el diseño de estimadores.

Turno 4 (Femenina): Por su parte, cuando elegimos como matriz P los autovectores del sistema, obtenemos la Forma Canónica Diagonal o de Jordan, donde las ecuaciones de estado quedan desacopladas en modos dinámicos independientes.

Diapositiva 03: Controlabilidad del Sistema: Criterio de Rango de Kalman y Significado Físico

Matriz de Controlabilidad C = [B, AB, ..., A^(n-1)B], Prueba de Popov-Belevitch-Hautus (PBH) y Ubicación de Actuadores

Turno 1 (Masculina): Antes de intentar diseñar una ley de control, debemos responder una pregunta estructural: ¿pueden los actuadores instalados conducir el vector de estado desde cualquier condición inicial hasta cualquier destino en un tiempo finito?

Turno 2 (Femenina): Rudolf Kalman demostró que un sistema lineal de dimensión n es completamente controlable si y solo si la matriz de controlabilidad formada por B, A por B, hasta A elevada a la n menos uno por B posee rango completo igual a n.

Turno 3 (Masculina): Físicamente, una pérdida de rango en esta matriz revela que existe un subespacio de estados desacoplado de los actuadores, como ocurre cuando un motor se coloca exactamente sobre el nodo de vibración de una viga flexible.

Turno 4 (Femenina): La prueba modal de Popov-Belevitch-Hautus complementa este análisis verificando qué modo específico es incontrolable, permitiendo distinguir si un modo no gobernable es al menos internamente estable, lo que define un sistema estabilizable.

Diapositiva 04: Observabilidad del Sistema: Matriz de Kalman, Dualidad y Ubicación de Sensores

Matriz de Observabilidad O = [C; CA; ...; CA^(n-1)], Reconstrucción de Estados Ocultos y Detectabilidad

Turno 1 (Masculina): En la mayoría de las máquinas mecatrónicas resulta costoso o imposible instalar un sensor físico para cada variable de estado interna, por lo que

necesitamos deducir el estado completo a partir de unas pocas salidas medidas.

Turno 2 (Femenina): Un sistema es completamente observable si y solo si la matriz de observabilidad, apilada verticalmente con C, C por A, hasta C por A a la n menos uno, posee rango completo igual al número de estados n.

Turno 3 (Masculina): Por el principio de dualidad de Kalman, el par formado por las matrices A y C es observable si y solo si el par transpuesto A transpuesta y C transpuesta es controlable, unificando los algoritmos numéricos de ambas propiedades.

Turno 4 (Femenina): Cuando un modo inestable es simultáneamente incontrolable o inobservable, se produce una cancelación polo-cero peligrosa en la función de transferencia que oculta una inestabilidad interna catastrófica.

Diapositiva 05: Estabilidad Interna de Lyapunov vs. Estabilidad Entrada-Salida (BIBO)

Criterio de Autovalores Re(λ_i) < 0, Ecuación Matricial Continua A^T P + PA = -Q y Discreta Φ^T P Φ - P = -Q

Turno 1 (Masculina): La estabilidad es el requisito primario de todo sistema de control: en espacio de estados evaluamos la estabilidad interna en el sentido de Lyapunov, la cual exige que ante perturbaciones iniciales el estado regrese al equilibrio.

Turno 2 (Femenina): En sistemas lineales continuos, la estabilidad asintótica interna garantiza siempre la estabilidad BIBO y se cumple cuando todos los autovalores de la matriz A tienen parte real estrictamente negativa.

Turno 3 (Masculina): Sin necesidad de calcular raíces polinómicas, el método directo de Lyapunov establece que la matriz A es estable si y solo si, para cualquier matriz simétrica definida positiva Q, existe una única solución definida positiva P...

Turno 4 (Femenina): ...que satisface la ecuación algebraica de Lyapunov A transpuesta por P más P por A igual a menos Q en tiempo continuo, o su contraparte Fi transpuesta por P por Fi menos P igual a menos Q en tiempo discreto.

Diapositiva 06: Respuesta de Sistemas Dinámicos de Primer y Segundo Orden ante Entradas Estándar

Constante de Tiempo τ, Frecuencia Natural ω_n, Factor de Amortiguamiento ζ y Regímenes Subamortiguado y Crítico

Turno 1 (Masculina): El comportamiento dinámico de sensores térmicos, circuitos R C y motores de corriente continua en velocidad se describe mediante sistemas de primer orden

gobernados por una única constante de tiempo tau.

Turno 2 (Femenina): Ante un escalón, un sistema de primer orden alcanza el sesenta y tres punto dos por ciento de su valor final en un tiempo tau y se estabiliza dentro de la banda del dos por ciento tras cuatro constantes de tiempo.

Turno 3 (Masculina): Por su parte, los posicionadores electromecánicos masa-resorte-amortiguador responden como sistemas de segundo orden parametrizados por su frecuencia natural no amortiguada omega sub n y su factor de amortiguamiento zeta.

Turno 4 (Femenina): Cuando zeta está entre cero y uno el sistema es subamortiguado y oscila con frecuencia amortiguada omega sub d; mientras que en zeta igual a uno logra el régimen críticamente amortiguado más rápido posible sin sobreimpulso.

Diapositiva 07: Especificaciones de Desempeño en el Dominio del Tiempo y Geometría en el Plano s

Relaciones Exactas entre Sobreimpulso Mp, Tiempo de Pico tp, Tiempo de Asentamiento ts y Regiones de Polos

Turno 1 (Masculina): En ingeniería de control traducimos los requerimientos operativos de una máquina en cuatro métricas temporales precisas medidas sobre la respuesta al escalón unitario.

Turno 2 (Femenina): El sobreimpulso máximo porcentual M sub p depende exclusivamente del amortiguamiento zeta según la exponencial de menos pi por zeta dividido entre la raíz de uno menos zeta al cuadrado.

Turno 3 (Masculina): El tiempo de pico t sub p es inversamente proporcional a la frecuencia amortiguada omega sub d, mientras que el tiempo de asentamiento al dos por ciento t sub s se aproxima a cuatro dividido entre el producto sigma igual a zeta por omega sub n.

Turno 4 (Femenina): Estas ecuaciones trazan fronteras geométricas en el plano s: exigir un tiempo de asentamiento corto obliga a situar los polos a la izquierda de una línea vertical, y limitar el sobreimpulso los confina dentro de un cono angular.

Diapositiva 08: Efecto de Polos Adicionales, Polos Dominantes y Ceros de Fase No Mínima

Aproximación de Segundo Orden Dominante, Aceleración por Ceros en Semiplano Izquierdo y Respuesta Inversa

Turno 1 (Masculina): Los sistemas mecatrónicos reales poseen orden superior a dos debido a la inductancia eléctrica, los filtros de sensores y los modos elásticos de la transmisión, por

lo que contienen polos y ceros adicionales.

Turno 2 (Femenina): Si los polos adicionales se encuentran al menos cinco veces más alejados del eje imaginario que el par complejo conjugado más lento, su decaimiento es tan rápido que el sistema puede diseñarse bajo la aproximación de polos dominantes.

Turno 3 (Masculina): La presencia de un cero cercano en el semiplano izquierdo incrementa la derivada inicial de la respuesta, reduciendo el tiempo de subida pero elevando notablemente el pico de sobreimpulso.

Turno 4 (Femenina): En cambio, un cero en el semiplano derecho define un sistema de fase no mínima, frecuente en grúas, vehículos articulados y ejes flexibles, cuya salida comienza moviéndose transitoriamente en dirección opuesta al comando.

Diapositiva 09: Errores en Estado Estacionario, Tipo de Sistema y Principio del Modelo Interno

Teorema del Valor Final, Constantes de Error de Posición Kp, Velocidad Kv y Aceleración Ka, y Rechazo de Perturbaciones

Turno 1 (Masculina): Además de una respuesta transitoria rápida y bien amortiguada, un sistema de control mecatrónico debe garantizar alta exactitud en régimen permanente al seguir trayectorias y rechazar cargas externas.

Turno 2 (Femenina): Aplicando el Teorema del Valor Final de Laplace, clasificamos el lazo abierto según su Tipo N, que corresponde al número de integradores puros o polos exactamente en el origen s igual a cero.

Turno 3 (Masculina): Un sistema Tipo cero presenta un error estacionario finito ante un escalón gobernado por la constante de posición K sub p; un sistema Tipo uno anula por completo el error ante escalón y sigue una rampa con error inverso a K sub v.

Turno 4 (Femenina): De manera general, el Principio del Modelo Interno establece que para seguir sin error una referencia o rechazar una perturbación determinista, el controlador debe contener en su lazo el modelo generador de dicha señal.

Diapositiva 10: Síntesis del Módulo 2 y Transición al Lugar de las Raíces y Respuesta en Frecuencia

Consolidación de Propiedades Estructurales de Estado, Estabilidad de Lyapunov y Dinámica Temporal

Turno 1 (Masculina): En este segundo módulo analizamos la solución matricial en espacio de estados, las transformaciones de similitud y las formas canónicas que estructuran los sistemas dinámicos.

Turno 2 (Femenina): Evaluamos los criterios de controlabilidad y observabilidad de Kalman junto con la ecuación de estabilidad de Lyapunov tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto.

Turno 3 (Masculina): Asimismo, vinculamos la ubicación geométrica de polos y ceros con las métricas de respuesta transitoria y la precisión en estado estacionario según el tipo de sistema.

Turno 4 (Femenina): En el Módulo tres abordaremos las dos grandes metodologías clásicas de análisis y síntesis: el método del Lugar Geométrico de las Raíces y los métodos de Respuesta en Frecuencia.

4. Firmware C++/MCU: Filtro de Kalman, Biquad DSP, LQR (H2) y Modos Deslizantes (control_sistemas_mecatronica_video_02.ino)

```
/*
 * ============================================================================
 * CURSO: SISTEMAS Y CONTROL EN MECATRÓNICA (GEMINI — cursosmecatronica.com)
 * VIDEO 02: Video 02 — Análisis en Espacio de Estados, Propiedades del Sistema y Respuesta Dinámica
 * Enfoque: Matriz de Transición e^(At), Formas Canónicas, Controlabilidad y Observabilidad de Kalman,
Estabilidad de Lyapunov y Respuesta Transitoria/Estacionaria
 * Ecuación Clave: rank[B, AB, ..., A^(n-1)B] = n  |  rank[C; CA; ...; CA^(n-1)] = n  |  A^T P + PA = -Q
|  Mp = exp(-πζ / √(1-ζ²))
 * ============================================================================
 */
#include <Arduino.h>

// Parámetros de tiempo real y control en espacio de estados discreto
static const float TS_SEC = 0.0010f;
static const uint32_t TS_US = 1000UL;

// 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 = 0.00005f;
static const float R_MEAS = 0.002f;

// Ganancias óptimas LQR (H2) + Superficie de Modos Deslizantes (SMC)
static const float K_LQR_POS = 36.00f;
static const float K_LQR_VEL = 9.19f;
static const float LAMBDA_SMC = 28.00f;
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_02.py)

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
================================================================================
CURSO: SISTEMAS Y CONTROL EN MECATRÓNICA (GEMINI — cursosmecatronica.com)
VIDEO 02: Video 02 — Análisis en Espacio de Estados, Propiedades del Sistema y Respuesta Dinámica
Simulación de Espacio de Estados, LQR/H2, Filtro de Kalman, Eje Electrohidráulico
y Optimización Multiobjetivo de Pareto.
================================================================================
"""
import math

TS = 0.0010
WN = 80
ZETA = 0.707
```

```
Q_KALMAN = 0.00005
R_KALMAN = 0.002

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 02 ===")
    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_02.st)

```
(* ================================================================================
 * CURSO: SISTEMAS Y CONTROL EN MECATRÓNICA (GEMINI — cursosmecatronica.com)
 * VIDEO 02: Video 02 — Análisis en Espacio de Estados, Propiedades del Sistema y Respuesta Dinámica
 * 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_V02
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 := 0.0010;
    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
```