CURSO #11: INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MECATRÓNICA

Video 05 — Resumen Ejecutivo y Cierre del Curso de Inteligencia Artificial en Mecatrónica — Síntesis Arquitectónica: Percepción, Cognición, Razonamiento, Aprendizaje y Automatización Cognitiva

Parte del Curso: Resumen Ejecutivo y Cierre Integrador del Curso de Inteligencia Artificial en Mecatrónica
Arquitectura Cognitiva / Algoritmo Estudiado: Celda Mecatrónica Cognitiva Completa: Percepción FFT/Visión + Razonamiento Kalman/Difuso + Aprendizaje TinyML + Control Neuro-PID

```
Integración Total: Percepción (FFT/Visión) -> Cognición (EKF/SLAM) -> Razonamiento (Fuzzy/A*) -> Acción (Neuro-PID + PLC)
```

1. Síntesis de Conceptos Clave y Reglas de Ingeniería Cognitiva

- Síntesis de la Parte 1: modelado de agentes mecatrónicos racionales PEAS, extracción de descriptores en tiempo y frecuencia (FFT), visión artificial 2D/3D (Pinhole, Sobel, Canny, RGB-D, LiDAR) y fusión multisensorial con SLAM.
- Síntesis de la Parte 2: diagnóstico con sistemas expertos, controladores difusos Mamdani y Takagi-Sugeno, estimación estadística óptima con el Filtro de Kalman Extendido (EKF) y planificación de trayectorias libres de colisión con A* y RRT.
- Síntesis de la Parte 3: entrenamiento y validación de modelos supervisados (Regresión, SVM, Random Forest), no supervisados (K-Means, PCA), redes neuronales profundas (MLP, CNN, LSTM) y políticas Actor-Crítico de aprendizaje por refuerzo.
- Síntesis de la Parte 4: despliegue embebido determinista con cuantización INT8 (TinyML), lazos híbridos Neuro-PID e identificación NARX, mantenimiento predictivo con pronóstico de Vida Útil Remanente (RUL), robótica colaborativa y gemelos digitales de Industria 5.0.

2. Parámetros Nominales de Configuración de IA y Control (Video 05)

Parámetro del Sistema Cognitivo / Controlador	Símbolo	Valor Nominal	Función en Percepción, Razonamiento, Aprendizaje o Automatización
Frecuencia de Muestreo y Ventana FFT	`fs [Hz] / N`	1000 Hz, N = 256	Adquisición determinista para descriptores RMS, Curtosis y espectro FFT
Covarianzas del Filtro de Kalman	`Q / R`	Q = 0.002, R = 0.04	Ponderación óptima entre incertidumbre del modelo dinámico y ruido del sensor
Tasa de Aprendizaje por Gradiente	`η (Learning Rate)`	0.01	Paso de actualización de pesos sinápticos en Backpropagation / Adam
Factor de Escala de Cuantización TinyML	`S (FP32 -> INT8)`	0.00781	Compresión de pesos y activaciones a enteros de 8 bits [-128, 127]
Ganancias Base del Lazo Neuro-PID	`[Kp0, Ki0, Kd0]`	[4.8, 1.6, 0.11]	Ganancias nominales moduladas en línea por la red neuronal y el bloque difuso

3. Desarrollo Académico Diapositiva por Diapositiva

Diapositiva 01: Síntesis de Percepción, Cognición y Razonamiento en Mecatrónica

Agentes PEAS, Procesamiento FFT y Visión 2D/3D, Lógica Difusa, Inferencia Bayesiana, Kalman y A*

- **Turno 1 (Masculina):** En este curso unificamos percepción, cognición, razonamiento, aprendizaje y acción en mecatrónica.
- **Turno 2 (Femenina):** Dominamos análisis espectral, visión artificial bidimensional y tridimensional, fusión sensorial y SLAM.
- **Turno 3 (Masculina):** Programamos sistemas expertos y controladores de lógica difusa para plantas no lineales.
- **Turno 4 (Femenina):** Y aplicamos el Filtro de Kalman junto con planificadores óptimos A estrella.

Diapositiva 02: Síntesis de Aprendizaje y Automatización Cognitiva Industrial

Machine Learning, Deep Learning, Refuerzo, TinyML, Control Neuro-PID, Mantenimiento Predictivo e Industria 5.0

- **Turno 1 (Masculina):** Entrenamos modelos supervisados, no supervisados, redes profundas y políticas de aprendizaje por refuerzo.
- **Turno 2 (Femenina):** Desplegamos inferencia cuantizada en microcontroladores, control Neuro-PID y mantenimiento predictivo industrial.
- **Turno 3 (Masculina):** Tienes listos los dieciocho códigos fuente y las seis guías de estudio PDF.
- **Turno 4 (Femenina):** Mucho éxito desarrollando la nueva generación de máquinas mecatrónicas cognitivas e inteligentes.

4. Firmware C++/MCU: Kalman, Difuso, TinyML INT8 y Neuro-PID (ia_embebida_kalman_difuso_tinymL_video_05.ino)

```
/*
 * ============================================================================
 * CURSO #11: INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MECATRÓNICA
 * VIDEO 05: Video 05 — Resumen Ejecutivo y Cierre del Curso de Inteligencia Artificial en Mecatrónica
 * Archivo: ia_embebida_kalman_difuso_tinymL_video_05.ino
 * ----------------------------------------------------------------------------
 * Descripción Técnica:
 *   Firmware determinista en C/C++ Embebido para Microcontrolador de 32 bits
 *   (ARM Cortex-M4/M7 STM32 / ESP32-S3 / Teensy 4.1) que integra los 4 pilares
 *   de la Inteligencia Artificial en Mecatrónica en tiempo real:
 *     1. PERCEPCIÓN: Ventaneo temporal deslizante y extracción de descriptores
 *        estadísticos (Valor Eficaz RMS, Varianza y Factor de Cresta).
 *     2. RAZONAMIENTO: Filtro de Kalman 1D recursivo para estimación óptima
 *        de estado y Motor de Inferencia Difusa Takagi-Sugeno (Fuzzy PD).
 *     3. APRENDIZAJE / TINYML: Inferencia neuronal densa cuantizada en 8 bits
 *        (INT8) con activación ReLU para ajuste dinámico de ganancias.
 *     4. AUTOMATIZACIÓN COGNITIVA: Controlador Híbrido Neuro-PID con
 *        Anti-Windup, diagnóstico de salud (HI) y telemetría CRC-16-CCITT.
 *
 * Enfoque del Módulo:
 *   Celda Mecatrónica Cognitiva Completa: Percepción FFT/Visión + Razonamiento Kalman/Difuso + Aprendizaje TinyML
+ Control Neuro-PID
 * ============================================================================
 */

#include <Arduino.h>
#include <stdint.h>
#include <math.h>

// --- Definición de Pines de Hardware (Sensores, Actuador PWM y Alarma) ---
const uint8_t PIN_ADC_SENSOR_PLANTA = A0; // Señal medida PV (Posición / Velocidad)
const uint8_t PIN_ADC_VIBRACION     = A1; // Acelerómetro MEMS para diagnóstico PdM
const uint8_t PIN_DI_HABILITACION   = 2;  // Entrada digital de habilitación segura
const uint8_t PIN_PWM_SERVO         = 9;  // Salida PWM hacia etapa de potencia
const uint8_t PIN_DO_ALARMA_PDM     = 8;  // Salida de alerta de anomalía / RUL

// --- Parámetros Nominales del Módulo (Video 05) ---
const float FS_HZ          = 1000.0f;
const float TS_SEC         = 1.0f / FS_HZ;
const float KALMAN_Q       = 0.0020f;
const float KALMAN_R       = 0.0400f;
const float QUANT_SCALE    = 0.00781f;
const float KP_BASE        = 4.80f;
const float KI_BASE        = 1.60f;
const float KD_BASE        = 0.11f;

// --- 1. Estructura del Estimador Estadístico: Filtro de Kalman 1D ---
struct FiltroKalman1D {
  float x_est; // Estado estimado óptimo
  float p_cov; // Covarianza de incertidumbre del error
  float q_proc;
  float r_meas;
};

FiltroKalman1D g_kalman = {0.0f, 1.0f, KALMAN_Q, KALMAN_R};

float actualizarFiltroKalman(FiltroKalman1D &kf, float medicionZ, float entradaU) {
  // Paso 1: Predicción a priori
  float x_pred = kf.x_est + 0.02f * entradaU * TS_SEC;
  float p_pred = kf.p_cov + kf.q_proc;

  // Paso 2: Corrección óptima de Bayes-Kalman
  float gananciaK = p_pred / (p_pred + kf.r_meas);
  kf.x_est = x_pred + gananciaK * (medicionZ - x_pred);
  kf.p_cov = (1.0f - gananciaK) * p_pred;
  return kf.x_est;
}
```

```
// --- 2. Motor de Inferencia Difusa Takagi-Sugeno (Compensador No Lineal) ---
float evaluarInferenciaDifusaSugeno(float errorNorm, float deltaErrorNorm) {
  // Funciones de pertenencia triangulares para Negativo (N), Cero (Z) y Positivo (P)
  float mu_N = constrain(-errorNorm, 0.0f, 1.0f);
  float mu_P = constrain( errorNorm, 0.0f, 1.0f);
  float mu_Z = constrain(1.0f - fabsf(errorNorm), 0.0f, 1.0f);

  // Consecuentes lineales de Takagi-Sugeno: u_i = p_i * e + q_i * de
  float u_regla_N = -18.0f + 4.0f * errorNorm + 1.5f * deltaErrorNorm;
  float u_regla_Z =   2.5f * errorNorm + 0.8f * deltaErrorNorm;
  float u_regla_P =  18.0f + 4.0f * errorNorm + 1.5f * deltaErrorNorm;

  float sumaPesos = mu_N + mu_Z + mu_P + 1e-6f;
  return (mu_N * u_regla_N + mu_Z * u_regla_Z + mu_P * u_regla_P) / sumaPesos;
}

// --- 3. Inferencia Neuronal TinyML Cuantizada en INT8 (2 Entradas -> 4 Ocultas -> 1 Salida) ---
const int8_t W1_INT8[4][2] = { {42, 18}, {-35, 29}, {51, -24}, {22, 46} };
const int8_t B1_INT8[4]    = { 5, -3, 4, 8 };
const int8_t W2_INT8[4]    = { 38, -27, 44, 31 };
const int8_t B2_INT8       = 6;

float ejecutarInferenciaTinyML_INT8(float e_norm, float de_norm) {
  int8_t x_q[2];
  x_q[0] = (int8_t)constrain((int)roundf(e_norm / QUANT_SCALE), -128, 127);
  x_q[1] = (int8_t)constrain((int)roundf(de_norm / QUANT_SCALE), -128, 127);

  int32_t acumSalida = (int32_t)B2_INT8 * 128;
  for (uint8_t i = 0; i < 4; i++) {
    int32_t z_oculto = (int32_t)B1_INT8[i] * 64 +
                       (int32_t)W1_INT8[i][0] * x_q[0] +
                       (int32_t)W1_INT8[i][1] * x_q[1];
    // Activación ReLU entera
    int32_t h_relu = (z_oculto > 0) ? (z_oculto >> 6) : 0;
    acumSalida += (int32_t)W2_INT8[i] * h_relu;
  }
  // Des-cuantización a factor multiplicador de ganancia [0.70 .. 1.50]
  float deltaGanancia = (float)acumSalida * (QUANT_SCALE * 0.0015f);
  return constrain(1.0f + deltaGanancia, 0.70f, 1.50f);
}

// --- 4. Extracción de Características de Vibración en Ventana (RMS y Salud HI) ---
const uint8_t TAM_VENTANA = 32;
float g_bufferVibracion[TAM_VENTANA];
uint8_t g_idxVentana = 0;

float calcularRmsVentana() {
  float sumaCuadrados = 0.0f;
  for (uint8_t i = 0; i < TAM_VENTANA; i++) {
    sumaCuadrados += g_bufferVibracion[i] * g_bufferVibracion[i];
  }
  return sqrtf(sumaCuadrados / (float)TAM_VENTANA);
}

// --- Cálculo de Verificación CRC-16-CCITT (Polinomio 0x1021) ---
uint16_t calcularCRC16(const uint8_t *datos, uint8_t longitud) {
  uint16_t crc = 0xFFFFU;
  for (uint8_t i = 0; i < longitud; i++) {
    crc ^= ((uint16_t)datos[i] << 8);
    for (uint8_t b = 0; b < 8; b++) {
      crc = (crc & 0x8000U) ? ((crc << 1) ^ 0x1021U) : (crc << 1);
    }
  }
  return crc;
}

// --- Variables Globales del Lazo Neuro-PID ---
```

```
float    g_integralError = 0.0f;
float    g_errorPrevio   = 0.0f;
float    g_comandoPrevio = 0.0f;
uint32_t g_prevMicros    = 0;
uint32_t g_ciclo         = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(PIN_DI_HABILITACION, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PIN_PWM_SERVO, OUTPUT);
  pinMode(PIN_DO_ALARMA_PDM, OUTPUT);

  for (uint8_t i = 0; i < TAM_VENTANA; i++) g_bufferVibracion[i] = 0.0f;
  g_prevMicros = micros();

  Serial.println(F("# ================================================================="));
  Serial.println(F("# CURSO IA EN MECATRONICA - VIDEO 05"));
  Serial.println(F("# Columnas: t_s,SP,PV_Kalman,u_NeuroPID,factor_TinyML,vib_RMS,HI,crc16"));
  Serial.println(F("# ================================================================="));
}

void loop() {
  uint32_t ahoraMicros = micros();
  uint32_t periodoMicros = (uint32_t)(TS_SEC * 1000000.0f);

  if (ahoraMicros - g_prevMicros >= periodoMicros) {
    g_prevMicros += periodoMicros;
    float t_sec = g_ciclo * TS_SEC;

    // 1. Percepción Sensorial y Filtrado Óptimo de Kalman
    float spDeseado = 50.0f + 25.0f * sinf(2.0f * 3.14159f * 0.25f * t_sec);
    float pvCrudo   = (analogRead(PIN_ADC_SENSOR_PLANTA) / 1023.0f) * 100.0f;
    float vibCruda  = ((analogRead(PIN_ADC_VIBRACION) - 512) / 512.0f) * 5.0f;

    g_bufferVibracion[g_idxVentana] = vibCruda;
    g_idxVentana = (g_idxVentana + 1) % TAM_VENTANA;
    float vibRMS = calcularRmsVentana();
    float indiceSaludHI = constrain(1.0f - (vibRMS / 4.5f), 0.0f, 1.0f);
    digitalWrite(PIN_DO_ALARMA_PDM, (indiceSaludHI < 0.35f) ? HIGH : LOW);

    float pvEstimado = actualizarFiltroKalman(g_kalman, pvCrudo, g_comandoPrevio);

    // 2. Razonamiento Difuso + Auto-Sintonización TinyML INT8 + Neuro-PID
    float errorActual = spDeseado - pvEstimado;
    float deltaError  = errorActual - g_errorPrevio;
    float e_norm      = constrain(errorActual / 50.0f, -1.0f, 1.0f);
    float de_norm     = constrain(deltaError / 10.0f, -1.0f, 1.0f);

    float factorTinyML = ejecutarInferenciaTinyML_INT8(e_norm, de_norm);
    float uDifuso      = evaluarInferenciaDifusaSugeno(e_norm, de_norm);

    float kpAdapt = KP_BASE * factorTinyML;
    float kiAdapt = KI_BASE * factorTinyML;
    float kdAdapt = KD_BASE * factorTinyML;

    float candIntegral = g_integralError + kiAdapt * TS_SEC * errorActual;
    float derivTermino = kdAdapt * (deltaError / TS_SEC);
    float uTotalUnsat  = kpAdapt * errorActual + candIntegral + derivTermino + 0.30f * uDifuso;
    float uSaturado    = constrain(uTotalUnsat, 0.0f, 100.0f);

    // Anti-Windup condicional (Clamping)
    if (uTotalUnsat == uSaturado) {
      g_integralError = candIntegral;
    }

    g_errorPrevio   = errorActual;
    g_comandoPrevio = uSaturado;
```

```
    int pwmDuty = constrain((int)((uSaturado / 100.0f) * 255.0f), 0, 255);
    analogWrite(PIN_PWM_SERVO, pwmDuty);

    // 3. Telemetría Estructurada con CRC-16 cada 20 ciclos
    if (g_ciclo % 20 == 0) {
      uint8_t payload[4] = {
        (uint8_t)constrain((int)spDeseado, 0, 255),
        (uint8_t)constrain((int)pvEstimado, 0, 255),
        (uint8_t)pwmDuty,
        (uint8_t)(indiceSaludHI * 100.0f)
      };
      uint16_t crc = calcularCRC16(payload, 4);

      Serial.print(t_sec, 3);          Serial.print(',');
      Serial.print(spDeseado, 2);      Serial.print(',');
      Serial.print(pvEstimado, 2);     Serial.print(',');
      Serial.print(uSaturado, 2);      Serial.print(',');
      Serial.print(factorTinyML, 3);   Serial.print(',');
      Serial.print(vibRMS, 3);         Serial.print(',');
      Serial.print(indiceSaludHI, 3);  Serial.print(",0x");
      Serial.println(crc, HEX);
    }
    g_ciclo++;
  }
}
```

5. Script Python IA: FFT, Planificación A*, Red MLP INT8 y RUL (ia_percepcion_kalman_mlp_y_planificacion_video_05.py)

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
================================================================================
CURSO #11: INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MECATRÓNICA
VIDEO 05: Video 05 — Resumen Ejecutivo y Cierre del Curso de Inteligencia Artificial en Mecatrónica
Archivo: ia_percepcion_kalman_mlp_y_planificacion_video_05.py
--------------------------------------------------------------------------------
Descripción Técnica:
  Script integral en Python para ingeniería mecatrónica cognitiva que
  implementa de forma autocontenida y reproducible:
    1. PERCEPCIÓN: Extracción de descriptores temporales (RMS, Varianza,
       Factor de Cresta, Curtosis) y Transformada Discreta de Fourier (DFT/FFT).
    2. RAZONAMIENTO: Filtro de Kalman 1D, Controlador Difuso Takagi-Sugeno y
       planificador heurístico de trayectorias A* sobre rejilla de ocupación.
    3. APRENDIZAJE Y TINYML: Entrenamiento de un Perceptrón Multicapa (MLP)
       mediante Backpropagation y cuantización simétrica FP32 -> INT8.
    4. AUTOMATIZACIÓN COGNITIVA: Simulación en lazo cerrado Neuro-PID y
       estimación de Vida Útil Remanente (RUL) para mantenimiento predictivo.
================================================================================
"""

import math
import heapq
from typing import Dict, List, Tuple

# Parámetros nominales del Video 05
FS_HZ        = 1000
WINDOW_N     = 256
KALMAN_Q     = 0.002
KALMAN_R     = 0.04
LR_INIT      = 0.01
QUANT_SCALE  = 0.00781


# ==============================================================================
# 1. PERCEPCIÓN SENSORIAL: DESCRIPTORES TEMPORALES Y ESPECTRALES (FFT)
# ==============================================================================
def extraer_caracteristicas_vibracion(senal: List[float], fs: float) -> Dict[str, float]:
    """Calcula RMS, Varianza, Factor de Cresta, Curtosis y pico espectral."""
    n = len(senal)
    media = sum(senal) / n
    varianza = sum((x - media) ** 2 for x in senal) / n
    rms = math.sqrt(sum(x * x for x in senal) / n)
    pico = max(abs(x) for x in senal)
    factor_cresta = pico / max(rms, 1e-9)
    curtosis = (sum((x - media) ** 4 for x in senal) / n) / max(varianza ** 2, 1e-12)

    # Evaluación de energía espectral con ventana de Hann en los primeros 32 bines
    mag_max = 0.0
    freq_dominante = 0.0
    for m in range(1, min(32, n // 2)):
        re = 0.0
        im = 0.0
        for k in range(n):
            w_hann = 0.5 * (1.0 - math.cos(2.0 * math.pi * k / (n - 1)))
            ang = 2.0 * math.pi * m * k / n
            re += senal[k] * w_hann * math.cos(ang)
            im -= senal[k] * w_hann * math.sin(ang)
        mag = math.sqrt(re * re + im * im) / n
        if mag > mag_max:
            mag_max = mag
            freq_dominante = (m * fs) / n

    return {
        "RMS": round(rms, 4),
        "Varianza": round(varianza, 4),
```

```
        "Factor_Cresta": round(factor_cresta, 4),
        "Curtosis": round(curtosis, 4),
        "Frecuencia_Dominante_Hz": round(freq_dominante, 2),
        "Amplitud_Pico_FFT": round(mag_max, 4),
    }


# ============================================================================
# 2. RAZONAMIENTO: PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE TRAYECTORIA CON ALGORITMO A*
# ============================================================================
def planificar_ruta_a_estrella(
    mapa_ocupacion: List[List[int]], inicio: Tuple[int, int], meta: Tuple[int, int]
) -> List[Tuple[int, int]]:
    """Encuentra el camino óptimo libre de colisiones minimizando f(n) = g(n) + h(n)."""
    filas, cols = len(mapa_ocupacion), len(mapa_ocupacion[0])
    abiertos = [(0.0, inicio)]
    came_from: Dict[Tuple[int, int], Tuple[int, int]] = {}
    g_score = {inicio: 0.0}

    vecinos = [(-1, 0), (1, 0), (0, -1), (0, 1), (-1, -1), (-1, 1), (1, -1), (1, 1)]

    while abiertos:
        _, actual = heapq.heappop(abiertos)
        if actual == meta:
            ruta = [actual]
            while actual in came_from:
                actual = came_from[actual]
                ruta.append(actual)
            return list(reversed(ruta))

        for dr, dc in vecinos:
            nr, nc = actual[0] + dr, actual[1] + dc
            if 0 <= nr < filas and 0 <= nc < cols and mapa_ocupacion[nr][nc] == 0:
                costo_paso = math.hypot(dr, dc)
                tentativo_g = g_score[actual] + costo_paso
                vecino = (nr, nc)
                if tentativo_g < g_score.get(vecino, float("inf")):
                    came_from[vecino] = actual
                    g_score[vecino] = tentativo_g
                    heuristica_h = math.hypot(meta[0] - nr, meta[1] - nc)
                    heapq.heappush(abiertos, (tentativo_g + heuristica_h, vecino))
    return []


# ============================================================================
# 3. APRENDIZAJE Y TINYML: RED NEURONAL MLP Y CUANTIZACIÓN FP32 -> INT8
# ============================================================================
def entrenar_mlp_y_cuantizar_int8(epocas: int = 120, lr: float = LR_INIT) -> Dict[str, object]:
    """
    Entrena una red neuronal ligera para compensar la fricción no lineal de Stribeck
    y cuantiza los pesos entrenados a enteros de 8 bits (INT8) para TinyML.
    """
    # Datos sintéticos de fricción no lineal: par_friccion = f(velocidad)
    muestras_x = [-1.0 + 0.1 * i for i in range(21)]
    muestras_y = [
        0.45 * (1.0 if v >= 0 else -1.0) * math.exp(-abs(v) / 0.25) + 0.25 * v
        for v in muestras_x
    ]

    # Pesos iniciales deterministas (1 entrada -> 4 neuronas ocultas Tanh -> 1 salida)
    w1 = [0.6, -0.5, 0.8, -0.7]
    b1 = [0.1, -0.1, 0.05, 0.15]
    w2 = [0.5, -0.4, 0.6, -0.5]
    b2 = 0.0

    mse_actual = 0.0
    for _ in range(epocas):
        mse_acum = 0.0
```

```
        for x_val, y_real in zip(muestras_x, muestras_y):
            # Forward pass
            z1 = [w1[i] * x_val + b1[i] for i in range(4)]
            h1 = [math.tanh(z) for z in z1]
            y_pred = sum(w2[i] * h1[i] for i in range(4)) + b2

            err = y_pred - y_real
            mse_acum += err * err

            # Backpropagation (Regla de la cadena)
            d_ypred = 2.0 * err / len(muestras_x)
            for i in range(4):
                grad_w2 = d_ypred * h1[i] + 1e-4 * w2[i]  # Regularización L2
                grad_h1 = d_ypred * w2[i] * (1.0 - h1[i] ** 2)
                w2[i] -= lr * grad_w2
                w1[i] -= lr * (grad_h1 * x_val + 1e-4 * w1[i])
                b1[i] -= lr * grad_h1
            b2 -= lr * d_ypred
        mse_actual = mse_acum / len(muestras_x)

    # Cuantización simétrica FP32 -> INT8
    max_abs = max(max(abs(v) for v in w1), max(abs(v) for v in w2), 1e-6)
    escala_s = max_abs / 127.0
    w1_int8 = [max(-128, min(127, int(round(w / escala_s)))) for w in w1]
    w2_int8 = [max(-128, min(127, int(round(w / escala_s)))) for w in w2]

    return {
        "MSE_Final_Entrenamiento": round(mse_actual, 6),
        "Escala_Cuantizacion_S": round(escala_s, 6),
        "W1_INT8": w1_int8,
        "W2_INT8": w2_int8,
    }


# ============================================================================
# 4. AUTOMATIZACIÓN COGNITIVA: PRONÓSTICO DE VIDA ÚTIL REMANENTE (RUL)
# ============================================================================
def estimar_vida_util_remanente_rul(rms_actual: float, rms_nominal: float = 0.45, rms_critico: float = 3.20,
tasa_deg_hora: float = 0.012) -> Dict[str, float]:
    """Calcula el Índice de Salud HI ∈ [0,1] y proyecta la Vida Útil Remanente (RUL) en horas."""
    hi = 1.0 - (rms_actual - rms_nominal) / max(rms_critico - rms_nominal, 1e-6)
    hi_clamped = max(0.0, min(1.0, hi))
    margen_restante = max(0.0, rms_critico - rms_actual)
    rul_horas = margen_restante / max(tasa_deg_hora, 1e-6)
    return {
        "Indice_Salud_HI": round(hi_clamped, 4),
        "RUL_Estimado_Horas": round(rul_horas, 1),
    }


if __name__ == "__main__":
    print("=" * 78)
    print(" CURSO #11: INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MECATRÓNICA — VIDEO 05")
    print(" Enfoque:", "Celda Mecatrónica Cognitiva Completa: Percepción FFT/Visión + Razonamiento Kalman/Difuso +
Aprendizaje TinyML + Control Neuro-PID")
    print("=" * 78)

    # 1. Prueba de Percepción Espectral
    senal_prueba = [
        0.65 * math.sin(2.0 * math.pi * 120.0 * (k / FS_HZ))
        + 0.20 * math.cos(2.0 * math.pi * 360.0 * (k / FS_HZ))
        for k in range(128)
    ]
    rasgos = extraer_caracteristicas_vibracion(senal_prueba, FS_HZ)
    print("\n[1] Percepción Sensorial (Tiempo y Frecuencia FFT):", rasgos)

    # 2. Prueba de Planificación A* en C-Space
    rejilla = [
```

```
    [0, 0, 0, 1, 0, 0],
    [0, 1, 0, 1, 0, 0],
    [0, 1, 0, 0, 0, 1],
    [0, 0, 1, 1, 0, 0],
    [0, 0, 0, 0, 0, 0],
]
ruta_optima = planificar_ruta_a_estrella(rejilla, (0, 0), (4, 5))
print("[2] Ruta Óptima Planificada con A*:", ruta_optima)

# 3. Prueba de Aprendizaje Neuronal y Cuantización TinyML INT8
modelo_q = entrenar_mlp_y_cuantizar_int8()
print("[3] Red Neuronal Entrenada y Cuantizada a INT8:", modelo_q)

# 4. Prueba de Mantenimiento Predictivo (HI y RUL)
pronostico = estimar_vida_util_remanente_rul(rms_actual=1.15)
print("[4] Pronóstico de Mantenimiento Predictivo (HI & RUL):", pronostico)
```

6. Programa PLC IEC 61131-3 (ST): Kalman, Takagi-Sugeno, Visión SHRB y PdM (automatizacion_cognitiva_plc_iec61131_video_05.st)

```
(* ============================================================================
 * CURSO #11: INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MECATRÓNICA
 * VIDEO 05: Video 05 — Resumen Ejecutivo y Cierre del Curso de Inteligencia Artificial en Mecatrónica
 * Archivo: automatizacion_cognitiva_plc_iec61131_video_05.st
 * ----------------------------------------------------------------------------
 * Estándar: IEC 61131-3 — Texto Estructurado (ST) para PLC Industrial
 * Descripción Técnica:
 *   Bloque de Función Cognitivo (FB_CeldaMecatronicaCognitiva_V05) que integra:
 *     1. Escalado analógico NORM_X / SCALE_X de sensores de proceso y vibración.
 *     2. Filtro Estadístico de Kalman 1D en tiempo de ciclo Scan para rechazo
 *        de ruido gaussiano en instrumentación de planta.
 *     3. Inferencia Difusa Takagi-Sugeno + Lazo Híbrido Neuro-PID con Anti-Windup.
 *     4. Registro de Corrimiento (SHRB) sincronizado con cámara de Visión IA
 *        y cálculo de Índice de Salud (HI) y Vida Útil Remanente (RUL).
 * ============================================================================ *)

FUNCTION_BLOCK FB_CeldaMecatronicaCognitiva_V05
VAR_INPUT
    (* Entradas Digitales de Campo (%IX) *)
    xMarchaCelda_NO        : BOOL; (* %IX0.0 - Orden de Marcha *)
    xParoEmergencia_NC     : BOOL; (* %IX0.1 - Seguridad Físicamente NC *)
    xVisionPiezaDefecto    : BOOL; (* %IX0.2 - Inferencia CNN en Borde: 1 = Defecto *)
    xPulsoEncoderBanda     : BOOL; (* %IX0.3 - Sincronismo de Banda Transportadora *)

    (* Entradas Analógicas Crudas 0..27648 Cuentas (%IW) *)
    iSensorProcesoRaw      : INT;  (* %IW64  - Variable de Proceso (4-20 mA) *)
    iSensorVibracionRaw    : INT;  (* %IW66  - Transmisor de Vibración RMS (mm/s) *)
    rSetpointIngenieria    : REAL := 65.0;
END_VAR

VAR_OUTPUT
    (* Salidas Digitales hacia Planta (%QX) *)
    xContactorBanda        : BOOL; (* %QX0.0 - Motor Principal de Línea *)
    xValvulaExpulsoraIA    : BOOL; (* %QX0.1 - Rechazo de Calidad en Estación 5 *)
    xAlertaPredictivaRUL   : BOOL; (* %QX0.2 - Alerta Temprana de Mantenimiento *)

    (* Salidas Analógicas y Diagnóstico Cognitivo hacia SCADA / Gemelo Digital *)
    iSalidaActuadorRaw     : INT;  (* %QW80  - Mando 0..27648 hacia Servoválvula/VFD *)
    rEstadoKalmanPV        : REAL; (* Estado filtrado óptimo por Kalman *)
    rComandoNeuroPID       : REAL; (* Esfuerzo de control 0.0 a 100.0 % *)
    rIndiceSaludHI         : REAL; (* Health Index normalizado [0.0 .. 1.0] *)
    rVidaUtilRemanenteH    : REAL; (* RUL estimado en horas de operación *)
END_VAR

VAR
    (* Parámetros del Estimador de Kalman 1D *)
    rKalmanX               : REAL := 0.0;
    rKalmanP               : REAL := 1.0;
    rKalmanQ               : REAL := 0.0020;
    rKalmanR               : REAL := 0.0400;
    rGananciaKalmanK       : REAL := 0.0;

    (* Variables de Escalado y Diagnóstico Predictivo *)
    rPvMedidaBruta         : REAL := 0.0;
    rVibracionRmsMmS       : REAL := 0.0;

    (* Registro de Corrimiento de 16 Bits para Inspección Visual IA *)
    wShiftRechazoVision    : WORD := 16#0000;
    xEncoderPrev           : BOOL := FALSE;
    xFlancoEncoder         : BOOL := FALSE;

    (* Memoria del Controlador Híbrido Difuso + Neuro-PID *)
    rKpBase                : REAL := 4.80;
    rKiBase                : REAL := 1.60;
    rKdBase                : REAL := 0.11;
    rTsScanSeg             : REAL := 0.010;
    rIntegralAcum          : REAL := 0.0;
```

```
    rErrorPrev             : REAL := 0.0;
END_VAR

(* ================================================================================
 * 1. ENCLAVAMIENTO DE SEGURIDAD Y ESCALADO ANALÓGICO (NORM_X / SCALE_X)
 * ================================================================================ *)
xContactorBanda := (xMarchaCelda_NO OR xContactorBanda) AND xParoEmergencia_NC;

rPvMedidaBruta   := (INT_TO_REAL(iSensorProcesoRaw) / 27648.0) * 100.0;
rVibracionRmsMmS := (INT_TO_REAL(iSensorVibracionRaw) / 27648.0) * 10.0;

(* ================================================================================
 * 2. FILTRO DE KALMAN 1D RECURSIVO (PREDICCIÓN + CORRECCIÓN BAYESIANA)
 * ================================================================================ *)
rKalmanP         := rKalmanP + rKalmanQ;
rGananciaKalmanK := rKalmanP / (rKalmanP + rKalmanR);
rKalmanX         := rKalmanX + rGananciaKalmanK * (rPvMedidaBruta - rKalmanX);
rKalmanP         := (1.0 - rGananciaKalmanK) * rKalmanP;
rEstadoKalmanPV  := rKalmanX;

(* ================================================================================
 * 3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO (CÁLCULO DE HEALTH INDEX HI Y RUL EN HORAS)
 * ================================================================================ *)
rIndiceSaludHI := 1.0 - ((rVibracionRmsMmS - 0.5) / 4.0);
IF rIndiceSaludHI > 1.0 THEN rIndiceSaludHI := 1.0; END_IF;
IF rIndiceSaludHI < 0.0 THEN rIndiceSaludHI := 0.0; END_IF;

rVidaUtilRemanenteH := rIndiceSaludHI * 850.0;
xAlertaPredictivaRUL := (rIndiceSaludHI < 0.30);

(* ================================================================================
 * 4. SINCRONISMO DE VISIÓN ARTIFICIAL DE ALTA VELOCIDAD CON SHRB
 * ================================================================================ *)
xFlancoEncoder := xPulsoEncoderBanda AND NOT xEncoderPrev;
xEncoderPrev   := xPulsoEncoderBanda;

IF xFlancoEncoder AND xContactorBanda THEN
    wShiftRechazoVision := SHL(IN := wShiftRechazoVision, N := 1);
    IF xVisionPiezaDefecto THEN
        wShiftRechazoVision := wShiftRechazoVision OR 16#0001;
    END_IF;
END_IF;

xValvulaExpulsoraIA := (wShiftRechazoVision AND 16#0010) <> 16#0000;

(* ================================================================================
 * 5. CONTROLADOR HÍBRIDO DIFUSO TAKAGI-SUGENO + NEURO-PID AUTO-SINTONIZABLE
 * ================================================================================ *)
IF xContactorBanda THEN
    VAR
        rError      : REAL;
        rDeltaError : REAL;
        rFactorIA   : REAL;
        rCompDifusa : REAL;
        rCandI      : REAL;
        rSumaUnsat  : REAL;
    END_VAR
    rError      := rSetpointIngenieria - rEstadoKalmanPV;
    rDeltaError := rError - rErrorPrev;

    (* Factor de adaptación neuronal en función de la magnitud del error *)
    rFactorIA   := 1.0 + 0.012 * ABS(rError);
    IF rFactorIA > 1.45 THEN rFactorIA := 1.45; END_IF;

    (* Consecuente de Takagi-Sugeno para amortiguamiento no lineal *)
    rCompDifusa := 0.25 * rError + 0.40 * rDeltaError;

    rCandI     := rIntegralAcum + (rKiBase * rFactorIA) * rTsScanSeg * rError;
```

```
    rSumaUnsat := (rKpBase * rFactorIA) * rError
                  + rCandI
                  + (rKdBase * rFactorIA) * (rDeltaError / rTsScanSeg)
                  + rCompDifusa;

    IF rSumaUnsat > 100.0 THEN
        rComandoNeuroPID := 100.0;
    ELSIF rSumaUnsat < 0.0 THEN
        rComandoNeuroPID := 0.0;
    ELSE
        rComandoNeuroPID := rSumaUnsat;
        rIntegralAcum    := rCandI;
    END_IF;

    rErrorPrev := rError;
ELSE
    rComandoNeuroPID := 0.0;
    rIntegralAcum    := 0.0;
END_IF;

iSalidaActuadorRaw := REAL_TO_INT((rComandoNeuroPID / 100.0) * 27648.0);

END_FUNCTION_BLOCK
```