PLANOS Y ESQUEMÁTICOS DE CIRCUITO E INGENIERÍA — MÓDULO 08

Planos de Alta Legibilidad en Protoboard (`Tinkercad`), Circuito Impreso Soldado (`PCB FR-4`), Lazo `PID` , Secuencia `RPC` y `Edge AI`

Curso: Ingeniería en Internet de las Cosas (`IoT`) con Arduino y Raspberry Pi

Módulo: 08 — Control en Lazo Cerrado (`PID`), Protocolo `RPC` , `Edge AI` y Visión por Eventos

---

1. Plano 1 (Estilo Tinkercad / Fritzing): Montaje en Protoboard del Lazo Cerrado `PID`

Este primer plano presenta el montaje experimental en protoboard con tipografía ampliada de alta legibilidad y llamadas numeradas (① a ⑤), interconectando el **Arduino UNO R3**, la etapa de potencia `MOSFET IRLZ44N` con diodo volante `1N4007` , el sensor de corriente de lado alto `INA219 (0x40)` y la sonda térmica `BME280 (0x76)` .

📐 Plano 1: Montaje en Protoboard del Lazo de Control PID con MOSFET IRLZ44N e INA219

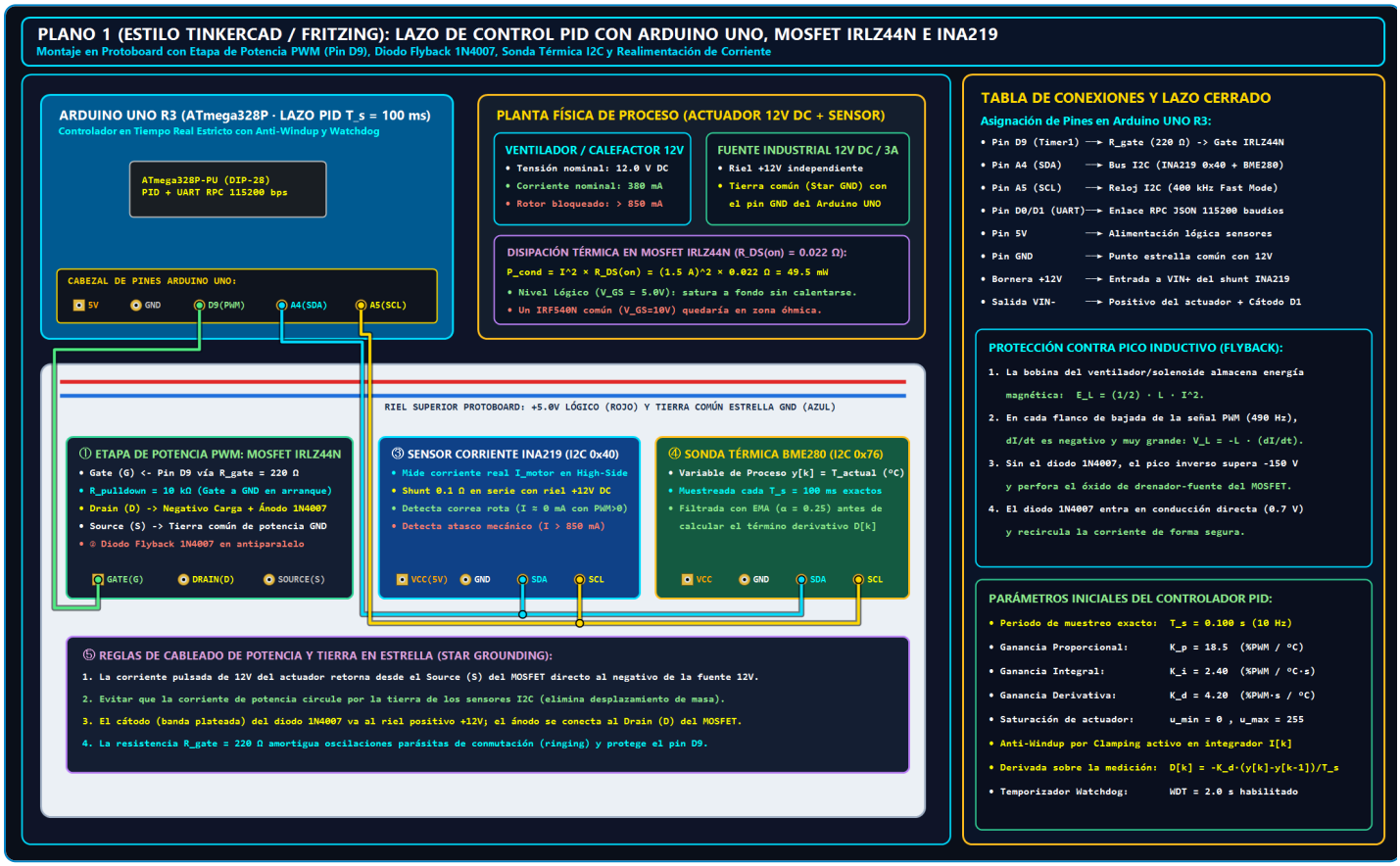


Tabla de Asignación de Terminales y Funciones Físicas

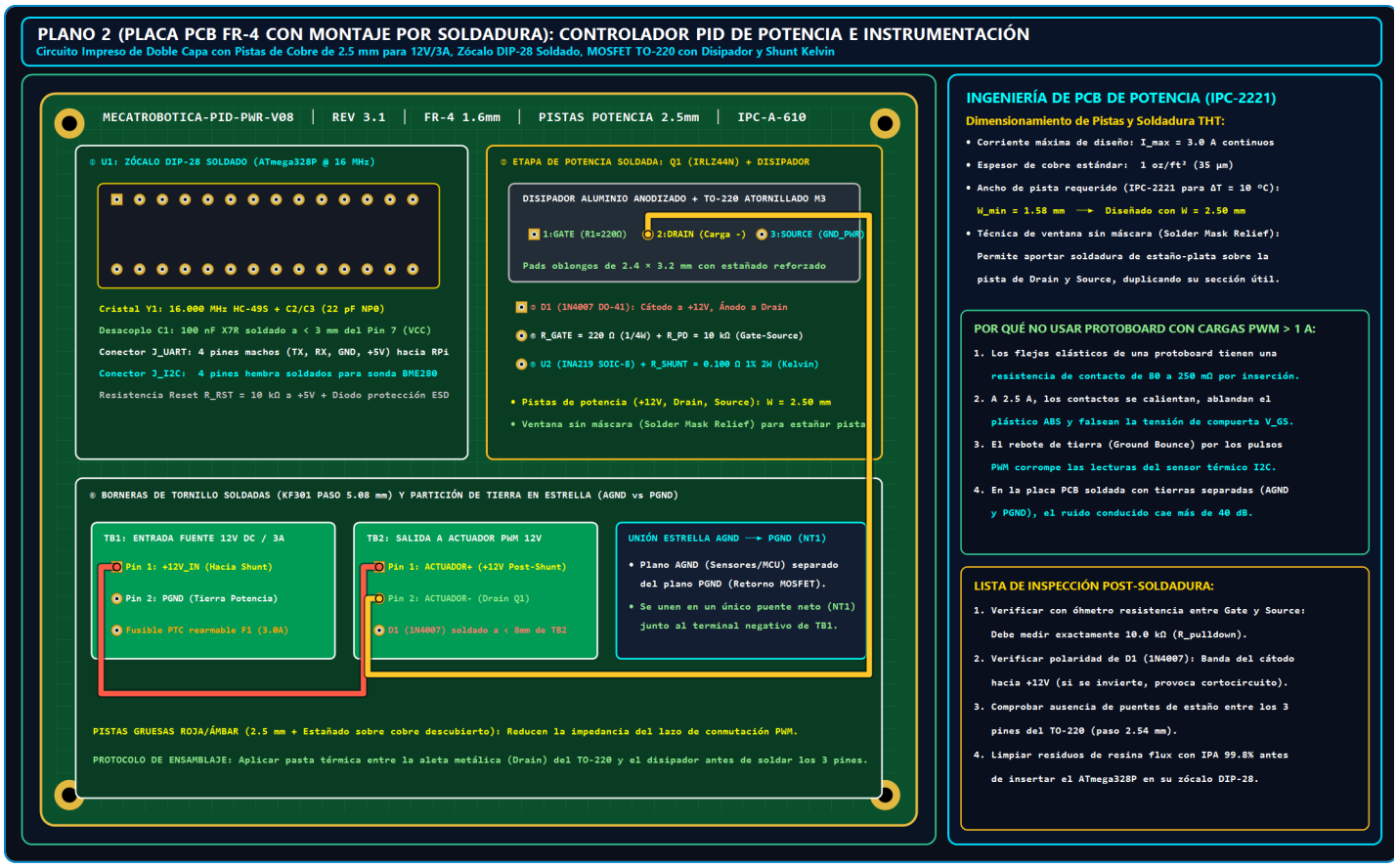
Origen (`Arduino / Fuente`)	Destino en Etapa de Campo	Color de Cable	Función Eléctrica y Regla de Diseño
`Pin D9` (`Timer1 PWM`)	Compuerta (`Gate`) del `IRLZ44N` vía $R_{gate} = 220\ \Omega$	Verde	Señal `PWM` de $490\ Hz$ (0 a 255). Incluye $R_{pulldown} = 10\ k\Omega$ entre `Gate` y `GND`.
`Pin A4` (`SDA`)	Pines `SDA` de `INA219 (0x40)` y `BME280 (0x76)`	Cian	Línea de datos serie `I2C` operando a $400\ kHz$ (*Fast Mode*).
`Pin A5` (`SCL`)	Pines `SCL` de `INA219 (0x40)` y `BME280 (0x76)`	Amarillo	Línea de reloj serie `I2C` sincronizada por el `ATmega328P`.
`Fuente +12V DC`	Borne `VIN+` del `Shunt` de $0.1\ \Omega$ (`INA219`)	Rojo	Entrada de potencia de lado alto (*High-Side*) protegida por fusible `PTC` de $3\ A$.
Borne `VIN-` (`INA219`)	Positivo del Actuador $12\ V$ + Cátodo de `1N4007`	Ámbar	Alimentación medida hacia el actuador y punto de sujeción del diodo de rueda libre.
Negativo del Actuador $12\ V$	Drenador (`Drain`) del `IRLZ44N` + Ánodo de `1N4007`	Amarillo	Conmutación de lado bajo (*Low-Side*) y absorción del pico inductivo inverso.
Surtidor (`Source`) `IRLZ44N`	Punto Estrella `GND` de la Fuente de $12\ V\ DC$	Azul / Negro	Retorno directo de corriente pulsada sin contaminar la tierra analógica de los sensores.

---

2. Plano 2 (Placa `PCB FR-4` con Montaje por Soldadura): Controlador `PID` de Potencia

Para aplicaciones permanentes donde las corrientes pulsadas `PWM` de 1 a $3\ A$ degradarían los contactos elásticos de un protoboard, este segundo plano detalla el diseño de una **placa de circuito impreso (`PCB FR-4`) de doble capa con montaje por soldadura (`THT` / `SMD`)**, pistas de potencia de $2.50\ mm$ con ventana de estañado (*Solder Mask Relief*) y partición de tierras en estrella (`AGND` vs. `PGND`).

📐 Plano 2: Placa PCB FR-4 de Doble Capa con Montaje por Soldadura para Controlador PID

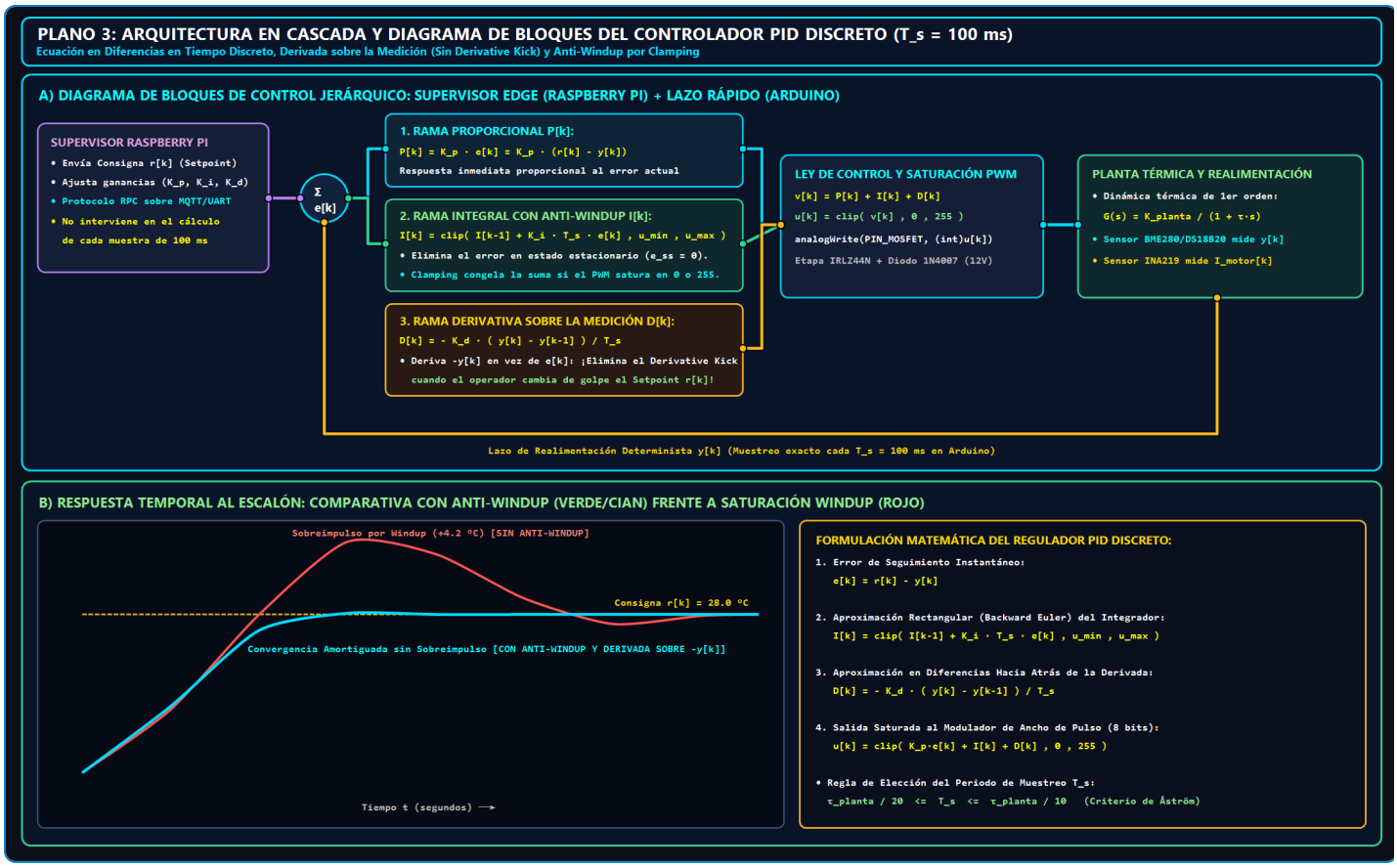


---

3. Plano 3: Arquitectura en Cascada y Diagrama de Bloques del Regulador `PID` Discreto

Detalla la estructura matemática de las tres ramas paralelas ($P[k]$, $I[k]$ con *Clamping Anti-Windup*, y $D[k]$ calculada sobre $-y[k]$) junto con las curvas comparativas de respuesta temporal al escalón.

📐 Plano 3: Diagrama de Bloques del Controlador PID Discreto y Respuesta con Anti-Windup

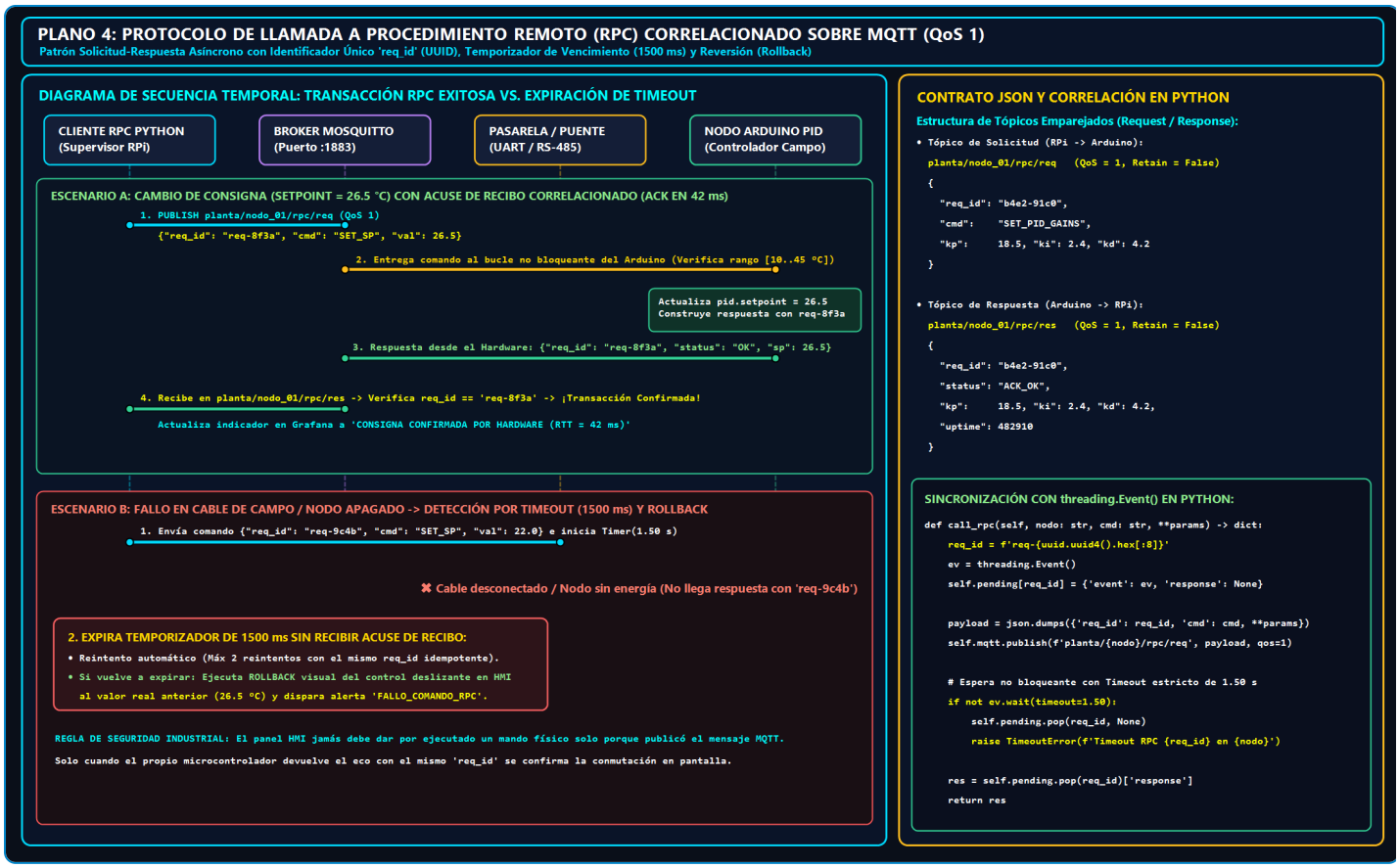


---

4. Plano 4: Diagrama de Secuencia del Protocolo `RPC` Correlacionado sobre `MQTT`

Representa el flujo temporal completo de una transacción exitosa con acuse de recibo (`ACK`) correlacionado en $42\ ms$ frente a un escenario de corte de cable detectado por expiración de temporizador ($1500\ ms$) con reversión automática (`Rollback`).

📐 Plano 4: Diagrama de Secuencia del Protocolo RPC Correlacionado con Timeout y Rollback



---

5. Plano 5: Espacio de Características `Isolation Forest` y Visión por Eventos (`CSI`)

Ilustra la separación geométrica en el espacio tridimensional $[T_{actual}, PWM, I_{motor}]$ entre el corredor nominal sano, la región de rotor bloqueado y la región de correa rota/cable abierto, así como la cadena de captura fotográfica `1080p` con `Picamera2` y `OpenCV`.

📐 Plano 5: Arquitectura Edge AI con Puntaje Z Móvil, Isolation Forest y Cámara CSI por Eventos

PLANO 5: INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL BORDE (EDGE AI) — DETECCIÓN DE ANOMALÍAS Y VISIÓN POR EVENTOS

Diagnóstico Predictivo mediante Puntaje Z Móvil (3σ), Bosque de Aislamiento Multivariado (Isolation Forest) y Cámara CSI en Raspberry Pi

A) ESPACIO DE CARACTERÍSTICAS MULTIVARIADO x = [T_actual, PWM_duty, I_motor]^T Y FRONTERA ISOLATION FOREST



FUNDAMENTO MATEMÁTICO DE DETECCIÓN DE ANOMALÍAS EN EL BORDE:

1. Método Univariado: Puntaje Z Móvil (Rolling Z-Score en Ventana N=60):

   $\mu_k = (1/N)\cdot\Sigma\ x_i$, $\sigma_k = \text{sqrt}((1/(N-1))\cdot\Sigma\ (x_i - \mu_k)^2)$

   $|Z_k| = |x_k - \mu_k| / \sigma_k > 3.0 \longrightarrow$ Anomalía Estadística (99.73%)

2. Método Multivariado No Supervisado: Isolation Forest (Bosque de Aislamiento):

   Puntaje de Anomalía: $s(x, n) = 2^{(- E(h(x)) / c(n))}$

   • E(h(x)): Longitud media de camino en los árboles aleatorios para aislar x.

   • Una muestra anómala se aísla en muy pocos cortes (E(h(x)) -> 0, s -> 1).

3. ¿Por qué una regla simple de umbral NO detecta un cable cortado?

   Porque 2 mA es normal cuando el ventilador está apagado (PWM = 0),

   ¡pero 2 mA es una falla grave cuando el PID ordena PWM = 255!

   Solo cruzando [T, PWM, I_motor] se diagnostica la falla física real.

B) CADENA DE INFERENCIA EN RASPBERRY PI Y CAPTURA VISUAL DE EVIDENCIA POR EVENTOS (CÁMARA CSI / PICAMERA2)

① Telemetría MQTT
10 Hz desde Arduino
[T, PWM, I_motor]

② Detector Z-Score
Ventana W = 60 muestras
Detecta picos > 3σ

③ Inferencia Sklearn
IsolationForest.predict()
Latencia < 1.2 ms

④ Disparo Cámara CSI
Picamera2 + OpenCV
Estampa Telemetría

⑤ Acción Autónoma:
• RPC: Corta PWM a 0
• Alerta en Grafana

POR QUÉ CAPTURAR EVIDENCIA VISUAL POR EVENTOS EN LUGAR DE VIDEO CONTINUO 24/7:

• Streaming de video 1080p continuo (4 Mbps): Consume 43.2 GB/día por cámara, satura la red Wi-Fi industrial y calienta la CPU de la Raspberry Pi.

• Captura Dirigida por Eventos (Event-Driven Vision con Picamera2):
  La cámara CSI toma una fotografía de alta resolución (1920×1080 JPEG, ~220 KB) SOLO en el milisegundo exacto en que Isolation Forest detecta una anomalía.

• Con OpenCV estampamos sobre la imagen la fecha, el nodo, la corriente I_motor y el tipo de falla, enviando el metadato JSON por MQTT hacia Grafana.

PROTECCIÓN FÍSICA AUTÓNOMA ANTE ROTOR BLOQUEADO:

1. Protección Rápida en Arduino (Capa 1 · < 100 ms):
   Si el firmware lee I_motor > 850 mA durante 3 muestras seguidas (300 ms), apaga inmediatamente el PWM (u[k] = 0) y pasa al estado FAULT_OVERCURRENT sin esperar instrucciones de la Raspberry Pi.
2. Diagnóstico Inteligente en Raspberry Pi (Capa 3 · Edge AI):
   Detecta degradación progresiva de rodamientos (incremento de corriente del 18% a igual PWM) días antes de que ocurra el bloqueo destructivo.