# MANUAL DE INGENIERÍA: CONTROL `PID` DISCRETO, PROTOCOLO `RPC` Y `EDGE AI` — MÓDULO 08

## Fundamentos Matemáticos de Control en Tiempo Discreto, Conmutación `MOSFET PWM`, Correlación Asíncrona `MQTT` y Detección Multivariada con `Isolation Forest`

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

**Módulo:** 08 — Control en Lazo Cerrado, Llamadas a Procedimiento Remoto ( `RPC` ) e Inteligencia Artificial en el Borde

---

## 1. Arquitectura de Control Jerárquico: ¿Por qué nunca cerrar un lazo `PID` rápido a través de `Wi-Fi` o `MQTT`?

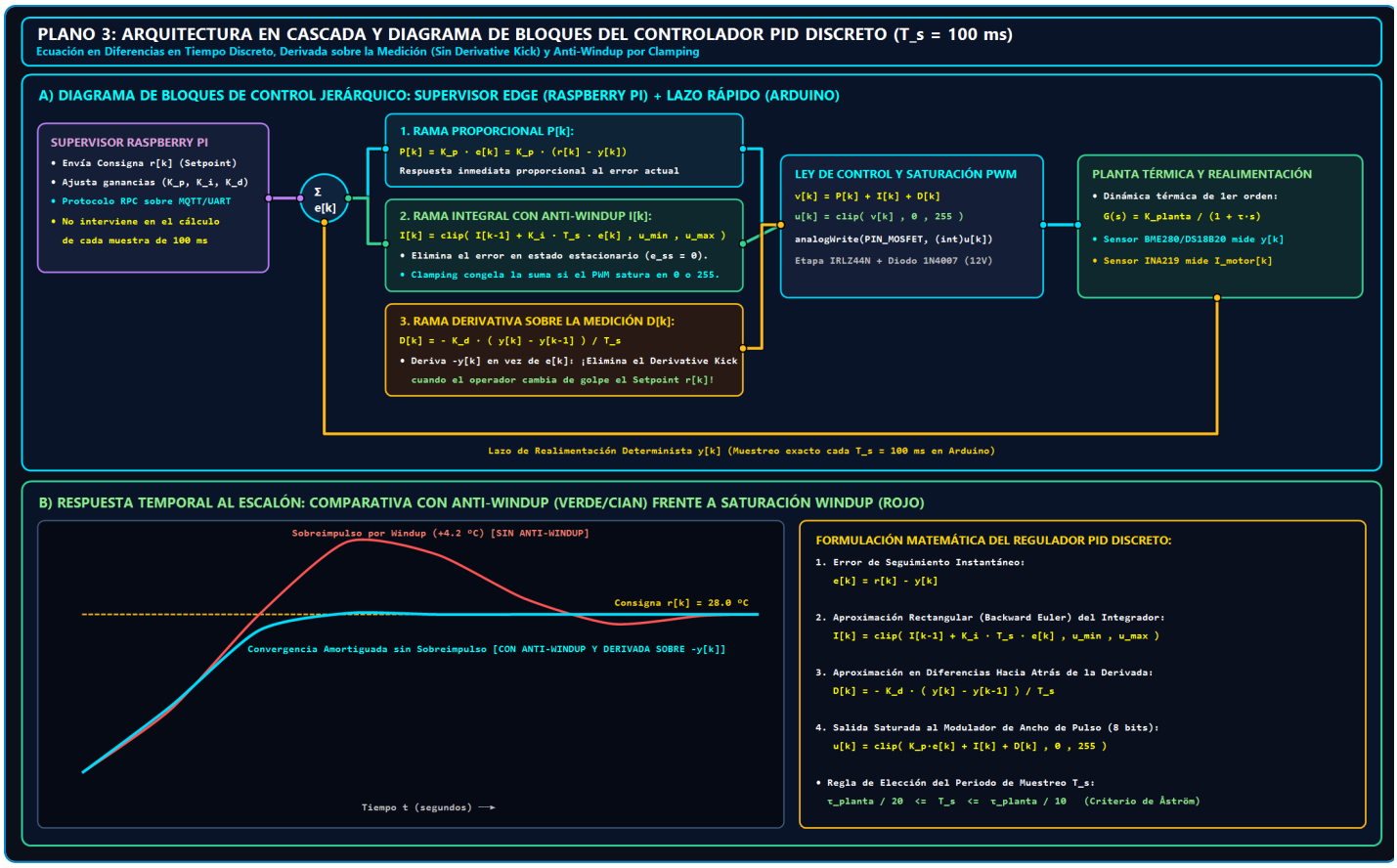
En la ingeniería de sistemas ciberfísicos e industriales, la primera regla de diseño consiste en **separar la capa de control regulatorio en tiempo real estricto ( `Hard Real-Time` ) de la capa de supervisión y analítica en tiempo real blando ( `Soft Real-Time` )**:

- *Incertidumbre temporal (Jitter) de la red:* un enlace `Wi-Fi` o una cola de mensajes `MQTT` sobre `TCP/IP` presenta latencias variables que oscilan entre $3\ ms$ en condiciones ideales y más de $800\ ms$ cuando ocurre una retransmisión `TCP` o una recolección de basura en el sistema operativo.
- **Degradación del margen de fase:** en un controlador proporcional-integral-derivativo ( `PID` ), un retardo de transporte variable $\tau_d(t)$ introduce un desfase adicional $\Delta\phi(\Omega) = -\Omega \cdot \tau_d(t)$ que reduce el margen de fase del sistema hasta volverlo inestable u oscilatorio.
- **Solución arquitectónica en cascada:**
- **Nivel 1 ( `Arduino UNO / ATmega328P` ):** ejecuta el algoritmo `PID` discreto con un periodo de muestreo determinista $T_s = 100\ ms$ ($10\ Hz$), lee directamente los sensores `I2C` ( `BME280` e `INA219` ), comanda el modulador `PWM` del transistor `MOSFET IRLZ44N` y aplica enclavamiento autónomo de seguridad si la corriente supera $850\ mA$.
- **Nivel 2 ( `Raspberry Pi 4 / 5` ):** envía cambios de consigna $r[k]$ ( `Setpoint` ) o ajustes de ganancias $(K_p, K_i, K_d)$ mediante transacciones `RPC` correlacionadas, ejecuta el motor de aprendizaje automático `Isolation Forest` y captura evidencia visual por cámara `CSI` .

---

## 2. Formulación Matemática del Controlador `PID` en Tiempo Discreto ( `Plano 3` )

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




En el dominio continuo, la ley de control `PID` ideal relaciona la señal de mando $u(t)$ con el error de seguimiento $e(t) = r(t) - y(t)$:

$$u(t) = K_p \, e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_d \, \frac{de(t)}{dt}$$

Al discretizar para un microcontrolador con periodo de muestreo constante $T_s = t_k - t_{k-1} = 0.100\ s$:

## 2.1 Término Proporcional $P[k]$

$$P[k] = K_p \cdot e[k] = K_p \cdot \left( r[k] - y[k] \right)$$

## 2.2 Término Integral $I[k]$ con Anti-Windup por Recorte Condicional (*Clamping*)

Aplicando la aproximación rectangular hacia atrás (*Backward Euler*) y acotando el acumulador dentro de los límites físicos del modulador `PWM` de $8$ bits ($[u_{min}, u_{max}] = [0, 255]$):

$$I[k] = \text{clip}\left( I[k-1] + K_i \cdot T_s \cdot e[k] \;;\; u_{min} \;;\; u_{max} \right)$$

Además, si la suma total pre-saturación $v[k] = P[k] + I[k] + D[k]$ excede $255$ y el error $e[k] > 0$ (o es menor que $0$ con $e[k] < 0$), el integrador se congela para evitar el fenómeno de **arrollamiento integral (*Integral Windup)**, eliminando el sobreimpulso térmico.

## 2.3 Término Derivativo sobre la Medición $D[k]$ (Eliminación del *Derivative Kick*)

Si derivamos el error $e[k] = r[k] - y[k]$, cualquier cambio escalón en la consigna $r[k]$ enviado por el operador desde Grafana produce una pendiente instantánea $\Delta r / T_s$ enorme que satura de golpe el actuador (*Derivative Kick*). Como $r[k]$ es constante por tramos, $\frac{dr}{dt} = 0$ salvo en el instante del cambio de consigna, por lo que reemplazamos $\frac{de}{dt}$ por $-\frac{dy}{dt}$:

$$D[k] = -K_d \cdot (y[k] - y[k-1]) / (T_s)$$

Previamente filtramos la temperatura cruda con un **filtro de media móvil exponencial (`EMA`)** con factor $\alpha = 0.25$:

$$y_{filt}[k] = \alpha \cdot y_{raw}[k] + (1 - \alpha) \cdot y_{filt}[k-1]$$

---

## 3. Física de Conmutación `MOSFET PWM` y Supresión de Pico Inductivo

- **Pérdidas por conducción en el `MOSFET` de nivel lógico `IRLZ44N`:**

  $$P_{cond} = I_{carga}^2 \cdot R_{DS(on)} = (1.5\ A)^2 \times 0.022\ \Omega = 0.0495\ W \approx 49.5\ mW$$

  Con una resistencia térmica unión-ambiente $R_{\theta JA} = 62\ ^\circ C/W$, el incremento de temperatura sin siquiera disipador para $1.5\ A$ es de apenas $\Delta T = 0.0495 \times 62 \approx 3.1\ ^\circ C$.

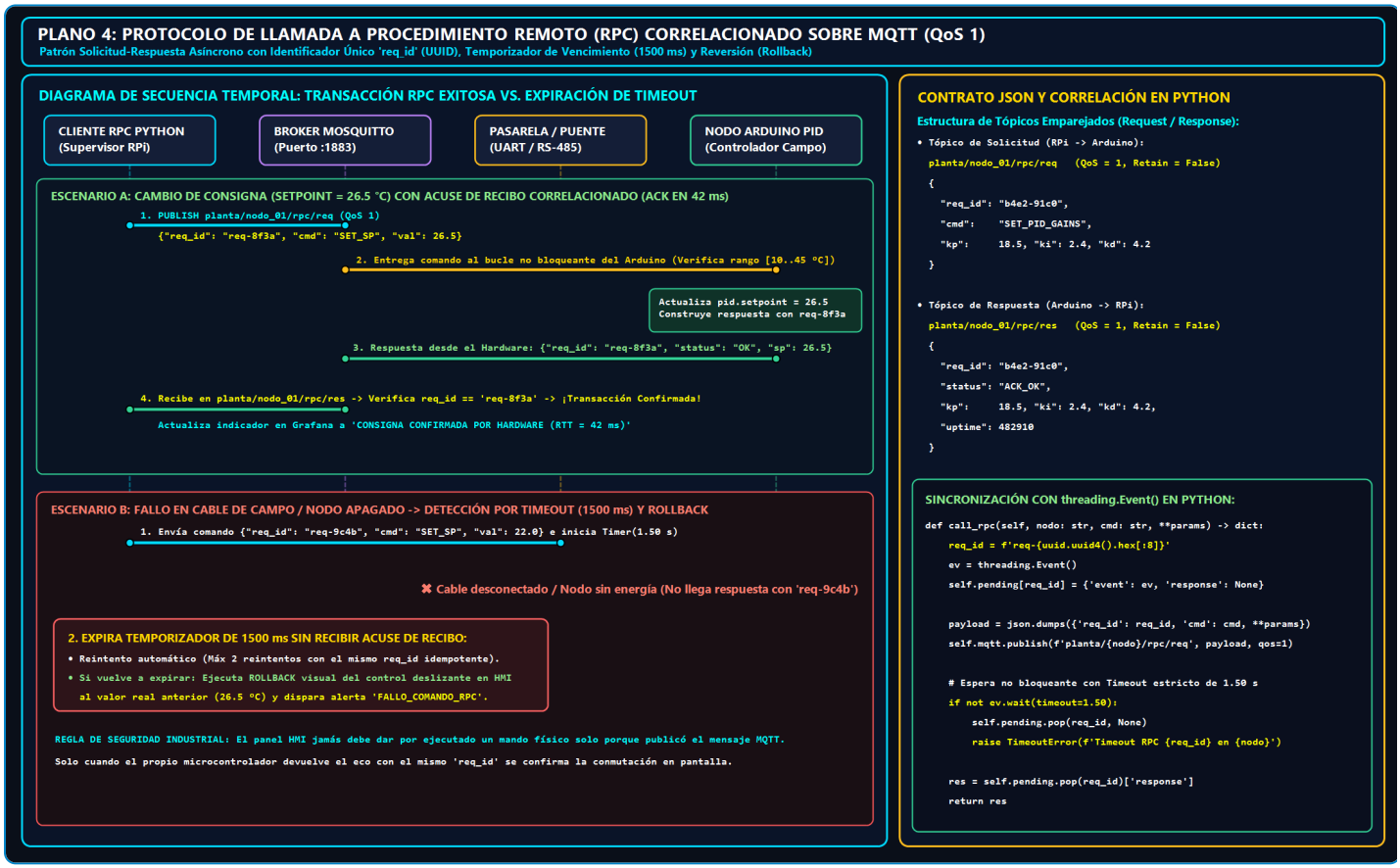
- **Física del diodo volante (`Flyback 1N4007`):**

  El devanado de un ventilador o electroválvula almacena energía magnética $E_L = (1)/(2)\ L\ I^2$. Cuando el transistor `IRLZ44N` pasa de conducción a corte en pocos nanosegundos, la derivada $(dI)/(dt)$ es negativa y de gran magnitud, induciendo una fuerza contraelectromotriz $V_L = -L\ (dI)/(dt)$ que puede superar $+150\ V$ en el drenador y destruir el transistor por avalancha. El diodo `1N4007` en antiparalelo entra en conducción directa a $0.7\ V$, ofreciendo un camino seguro de recirculación para la corriente inductiva.

---

## 4. Protocolo `RPC` Correlacionado sobre `MQTT` (`Plano 4`)

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




Dado que `MQTT` es un protocolo intrínsecamente asíncrono de publicación/suscripción, publicar un comando en un tópico no garantiza que el microcontrolador de campo lo haya recibido ni ejecutado. Para construir una **Llamada a**

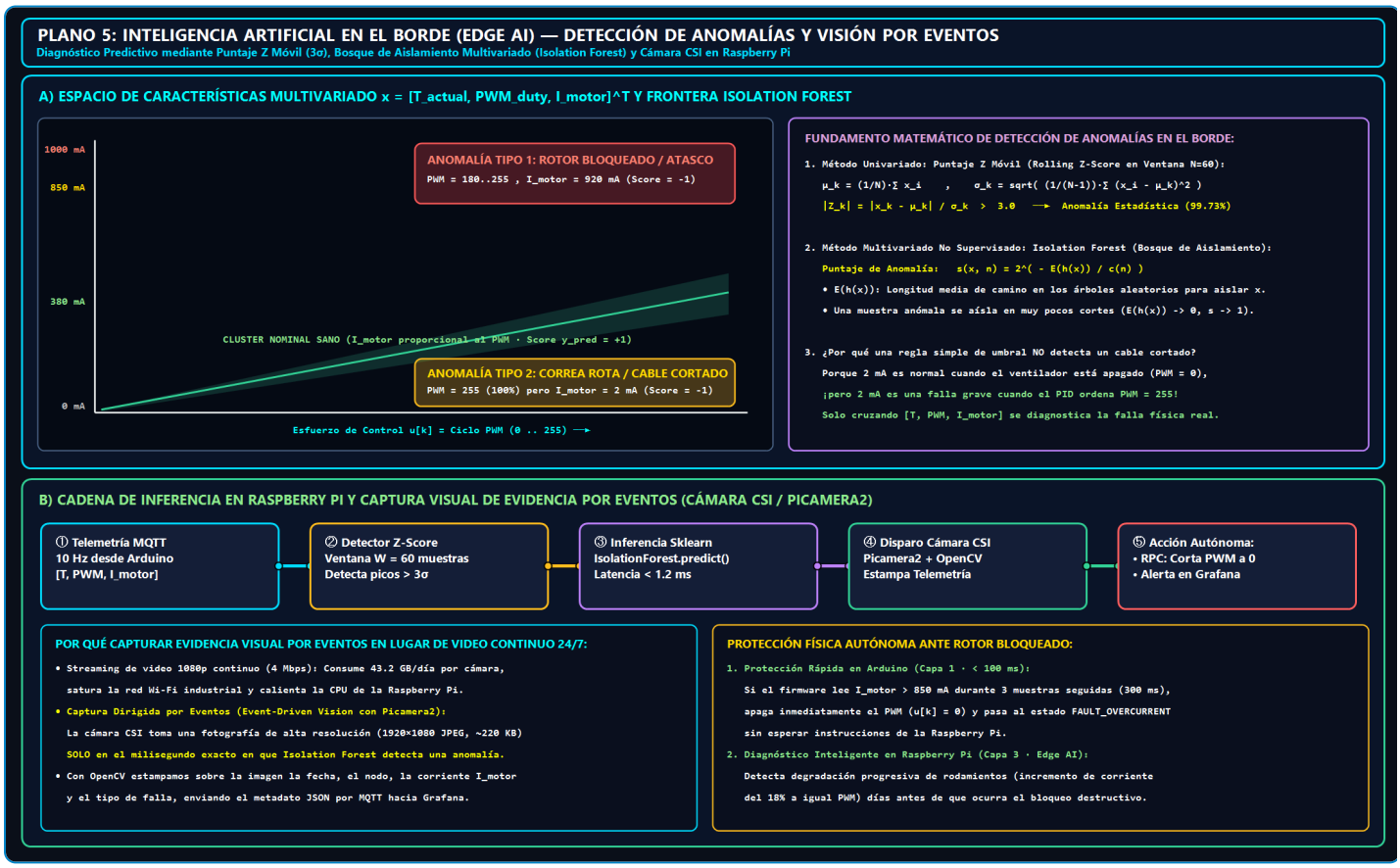
**Procedimiento Remoto ( `RPC` ) de grado industrial**:

- **Tópicos desacoplados de solicitud y respuesta:** `planta/nodo_01/rpc/req` y `planta/nodo_01/rpc/res` con `QoS = 1` y `Retain = False`.
- **Correlación estricta por `req_id` ( `UUID` ):** cada solicitud inyecta un identificador único (ej. `"req_id": "req-8f3a"` ). El hilo invocador registra un objeto `threading.Event()` en un diccionario protegido por cerrojo ( `Lock` ) y se suspende con `event.wait(timeout=1.50)`.
- **Idempotencia y Reversión ( `Rollback` ):** si el temporizador de $1500\ ms$ expira tras los reintentos configurados, el cliente supervisor revierte el control deslizante en la interfaz HMI al último valor confirmado por el hardware y emite una alerta de fallo de comunicación.

---

## 5. Inteligencia Artificial en el Borde ( `Edge AI` ) y Visión por Eventos ( `Plano 5` )

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




### 5.1 Puntaje Z Móvil (*Rolling Z-Score*) sobre Ventana Deslizante ($N = 60$)

Para detectar picos abruptos en una serie temporal univariada, calculamos en tiempo real la media $\mu_k$ y la desviación estándar muestral $\sigma_k$:

$$\mu_k = \frac{1}{N}\sum_{i=k-N+1}^{k} x_i \quad , \quad \sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=k-N+1}^{k}\left(x_i - \mu_k\right)^2} \quad , \quad Z_k = \frac{|x_k - \mu_k|}{\sigma_k}$$

Toda lectura con $Z_k > 3.0$ se desvía más de tres desviaciones estándar de su comportamiento reciente ($p < 0.0027$).

### 5.2 Detección Multivariada No Supervisada con `Isolation Forest`

Una regla simple de umbral sobre la corriente $I_{motor}$ **no puede detectar una correa rota ni un cable cortado**, porque $I_{motor} = 2\ mA$ es completamente normal cuando el ventilador está apagado ($PWM = 0$). Sin embargo, $I_{motor} = 2\ mA$

cuando el regulador `PID` ordena $\mathrm{PWM} = 255$ constituye una falla crítica de lazo abierto.

Al alimentar el algoritmo **Bosque de Aislamiento (`Isolation Forest`)** con el vector de estado tridimensional:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} T_{actual}[k] \\ PWM_{duty}[k] \\ I_{motor}[k] \end{bmatrix}$$

el conjunto de $100$ árboles aleatorios particiona el espacio de características y calcula el puntaje de anomalía:

$$s(\mathbf{x}, n) = 2^{-\frac{E(h(\mathbf{x}))}{c(n)}}$$

donde $E(h(\mathbf{x}))$ es la longitud media de camino necesaria para aislar la muestra $\mathbf{x}$. Las muestras anómalas (tanto el **rotor bloqueado** con $I_{motor} > 850\ mA$ como la **correa rota** con $PWM{=}255$ e $I_{motor} \approx 0\ mA$) quedan aisladas cerca de la raíz de los árboles ($E(h(\mathbf{x})) \to 0 \implies s \to 1$), disparando en menos de $1.2\ ms$ la captura de una fotografía forense `1080p` con la cámara `CSI` y el apagado preventivo del actuador.