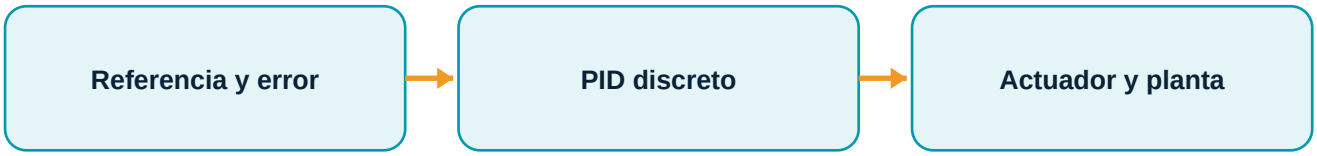
Capítulo 25 · Control en lazo cerrado: PID discreto y anti-windup

Conceptos clave

Muestrea con un periodo definido. Aplica los límites del actuador y comprueba cómo se recupera la integral al salir de saturación.



Ejemplo complementario

```
def paso_pid(error, previo, integral, dt, kp, ki, kd):
    if dt <= 0:
        raise ValueError("dt debe ser positivo")
    candidata = integral + error * dt
    base = kp * error + kd * (error - previo) / dt
    propuesta = base + ki * candidata
    if 0 <= propuesta <= 100 or (propuesta > 100 and error < 0) or (propuesta < 0
and error > 0):
        integral = candidata
    return max(0, min(100, base + ki * integral)), integral
```

GUÍA PASO A PASO DE LABORATORIO — MÓDULO 08

Control en Lazo Cerrado (`PID` Discreto), Llamadas a Procedimiento Remoto (`RPC` sobre `MQTT`) e Inteligencia Artificial en el Borde (`Edge AI`)

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

Módulo: 08 — Regulación `PID` en Tiempo Discreto, Protocolo `RPC` Correlacionado, `Isolation Forest` y Visión por Eventos

Duración estimada de laboratorio: 4 horas prácticas

---

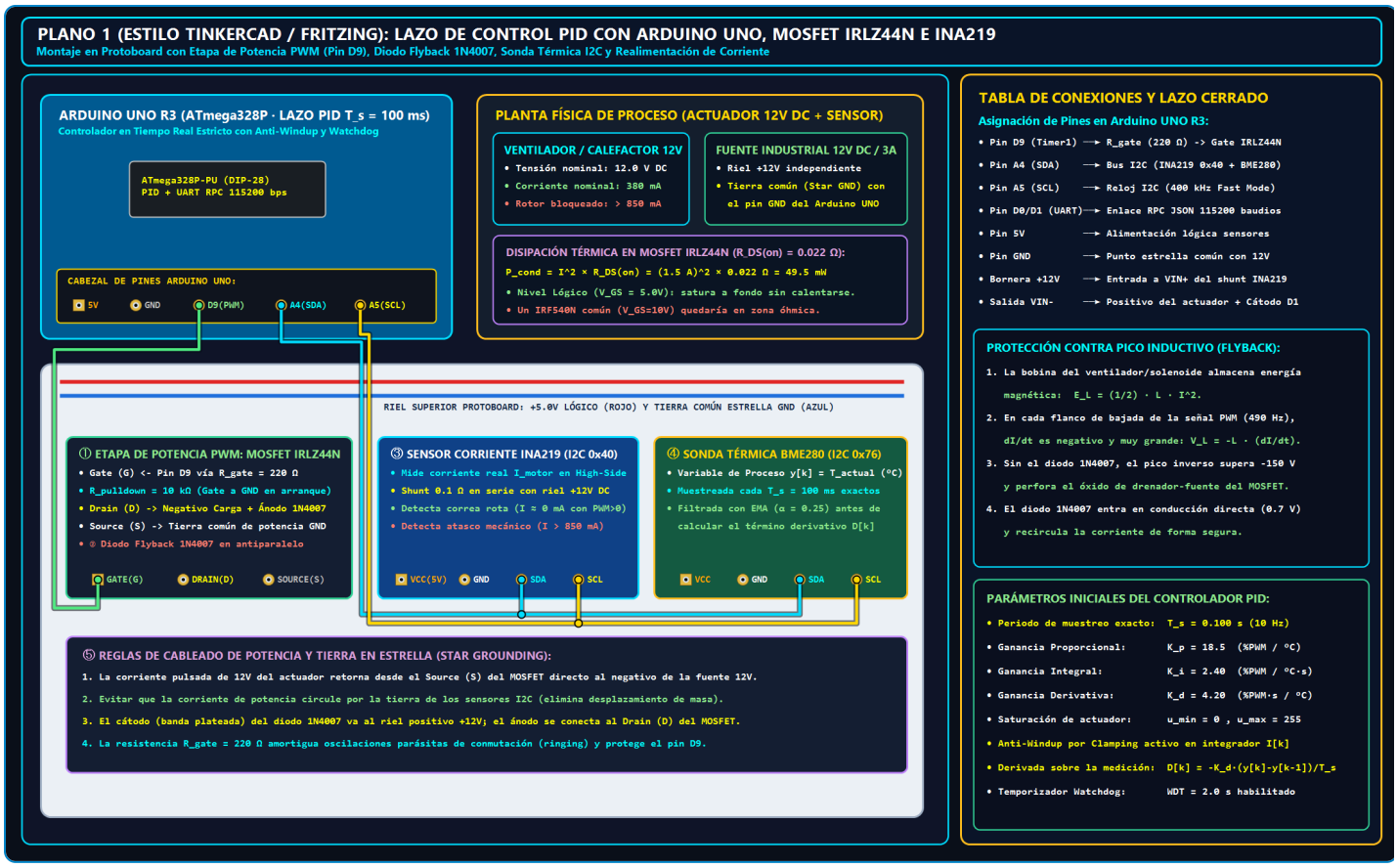
1. Objetivos de Ingeniería del Laboratorio

- **Separar la jerarquía de control en tiempo real estricto (`Hard Real-Time`) de la supervisión analítica en el borde (`Soft Real-Time`):** ejecutar el lazo cerrado proporcional-integral-derivativo (`PID`) cada $T_s = 100\ ms$ en el microcontrolador **Arduino UNO R3 (`ATmega328P`)**, delegando el ajuste de consigna (`Setpoint`), la inferencia de anomalías y la visualización a la **Raspberry Pi 4 / 5**.
- **Construir la etapa de potencia en modulación por ancho de pulso (`PWM`) con transistor `MOSFET` de nivel lógico (`IRLZ44N`):** calcular la disipación térmica por conducción, instalar la resistencia limitadora de compuerta ($220\ \Omega$), la resistencia de anclaje a tierra ($10\ k\Omega$) y el diodo volante de rueda libre (`1N4007`) en antiparalelo con la carga inductiva de $12\ V\ DC$.
- **Implementar ambos planos de construcción electrónica:** el prototipo experimental en **protoboard (estilo Tinkercad / Fritzing)** con tipografía ampliada de alta legibilidad y la **placa de circuito impreso (`PCB FR-4` de doble capa) con montaje por soldadura** y pistas de potencia de $2.50\ mm$.
- **Programar un protocolo de Llamada a Procedimiento Remoto (`RPC`) correlacionado sobre `MQTT` (`QoS 1`):** emparejar solicitudes y respuestas mediante un identificador único universal (`req_id`), sincronizar hilos con `threading.Event()` , establecer un temporizador de expiración de $1500\ ms$ y aplicar reversión segura (`Rollback`) en la interfaz gráfica si el hardware no confirma la orden.
- **Desplegar Inteligencia Artificial en el Borde (`Edge AI`) y captura visual dirigida por eventos:** ejecutar detección estadística por puntaje Z móvil (`Rolling Z-Score` 3σ) e inferencia multivariada con **Bosque de Aislamiento (`Isolation Forest`)** sobre el vector $\mathbf{x} = [T_{actual}, PWM, I_{motor}]^T$, disparando la cámara `CSI` (`Picamera2` + `OpenCV`) en el milisegundo exacto de una anomalía.

---

2. Arquitectura Física del Lazo Cerrado y Etapa de Potencia (`Plano 1`)

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



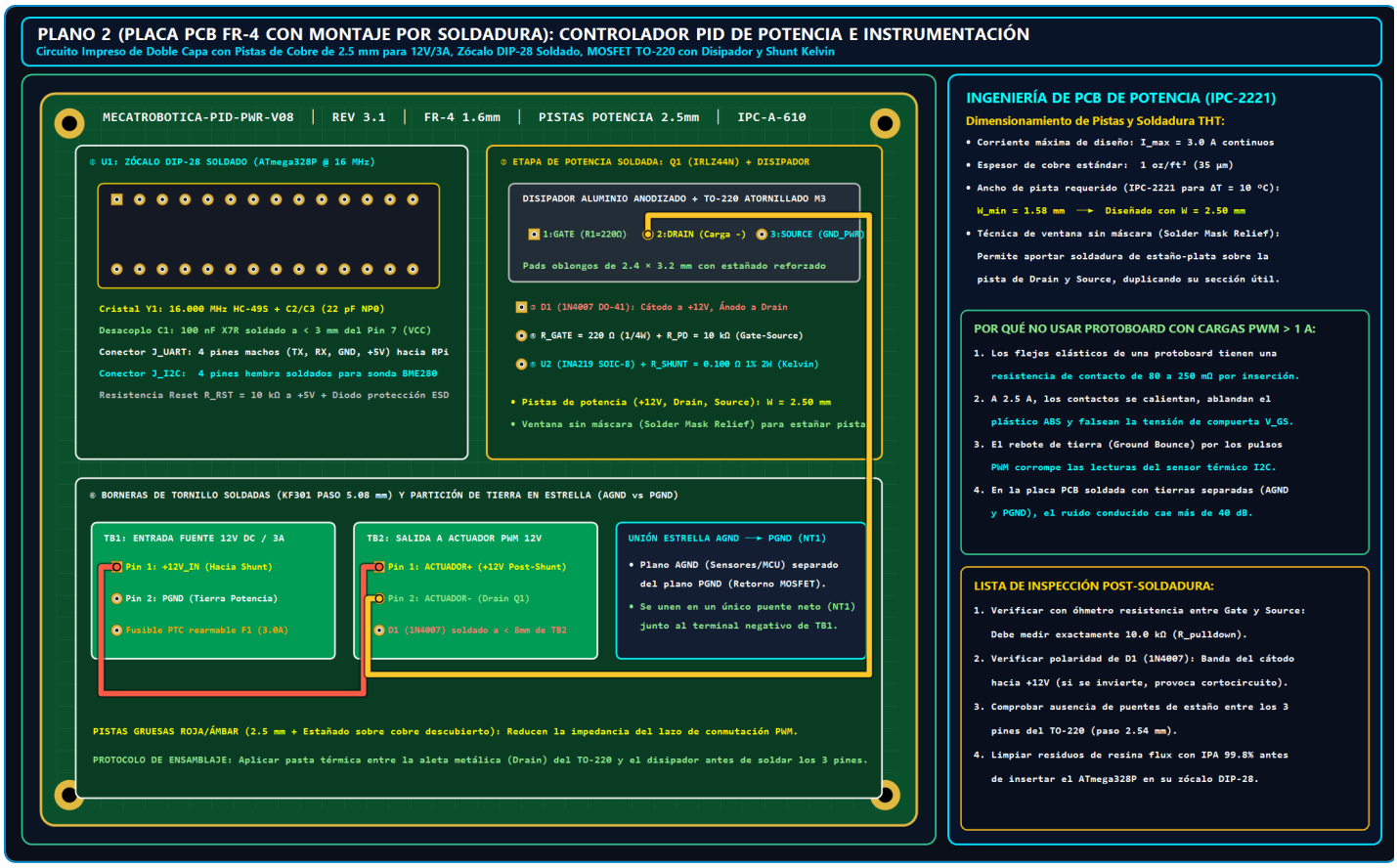
Paso 2.1 — Reglas Críticas de Cableado de Potencia y Tierra en Estrella (`Star Grounding`)

- **Por qué es obligatorio un `MOSFET` de nivel lógico (`IRLZ44N`):** el pin `D9` del Arduino UNO entrega $5.0\ \text{V}$ (y las placas de $3.3\ \text{V}$ entregan aún menos). Un transistor `MOSFET` estándar como el `IRF540N` requiere $V_{GS} = 10\ \text{V}$ para saturar completamente; si se excita con $5\ \text{V}$, permanece en su región lineal/óhmica y se destruye por sobrecalentamiento. El `IRLZ44N` posee tensión umbral $V_{GS(th)} \in [1.0, 2.0]\ \text{V}$ y alcanza $R_{DS(on)} = 0.022\ \Omega$ con $V_{GS} = 5.0\ \text{V}$.
- **Diodo de rueda libre (`Flyback 1N4007`):** conéctelo directamente entre los terminales del actuador inductivo (ventilador o válvula solenoide de $12\ \text{V}$), con el **cátodo (banda plateada)** hacia el riel positivo de $+12\ \text{V}$ y el **ánodo** hacia el drenador (`Drain`) del `IRLZ44N`.
- **Tierra en estrella (`Star Ground`):** el surtidor (`Source`) del `IRLZ44N` debe retornar directamente por un cable grueso al borne negativo de la fuente de $12\ \text{V DC}$, evitando que los pulsos de corriente de conmutación `PWM` circulen por la pista de tierra de los sensores `I2C` (`BME280` e `INA219`).

---

3. Montaje Definitivo en Placa de Circuito Impreso Soldada (`Plano 2`)

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



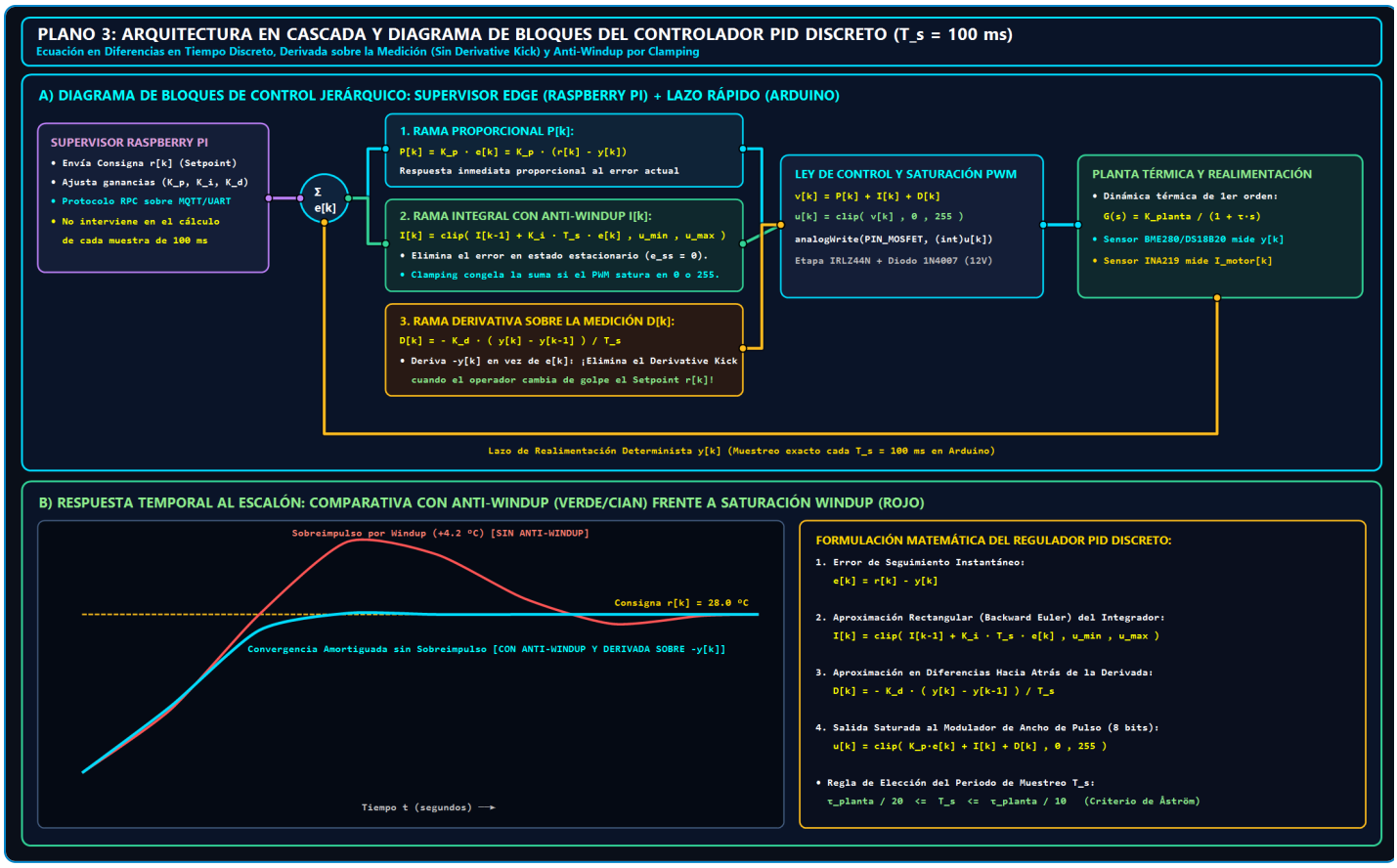
Paso 3.1 — Procedimiento de Soldadura de Potencia según `IPC-2221` e `IPC-A-610`

- Suelde primero los componentes de bajo perfil: resistencias de película metálica ($220\ \Omega$, $10\ k\Omega$), condensadores cerámicos `X7R` de $100\ nF$, el cristal de $16.000\ MHz$ y el sensor de corriente `INA219` junto a su resistencia `Shunt` Kelvin de $0.100\ \Omega$ (1%, $2\ W$).
- Suelde el **zócalo torneado** `DIP-28` para el microcontrolador `ATmega328P-PU` sin el chip insertado.
- Atornille la aleta metálica del `MOSFET IRLZ44N` (`TO-220`) al disipador de aluminio anodizado aplicando pasta térmica y suelde sus tres terminales en los pads oblongos reforzados.
- Suelde las borneras de tornillo `TB1` (entrada $12\ V\ DC$) y `TB2` (salida al actuador) y aporte una capa uniforme de aleación `SAC305` sobre las ventanas descubiertas de máscara (*Solder Mask Relief*) en las pistas de $2.50\ mm$.

---

4. Discretización del Controlador `PID` y Anti-Windup (`Plano 3`)

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



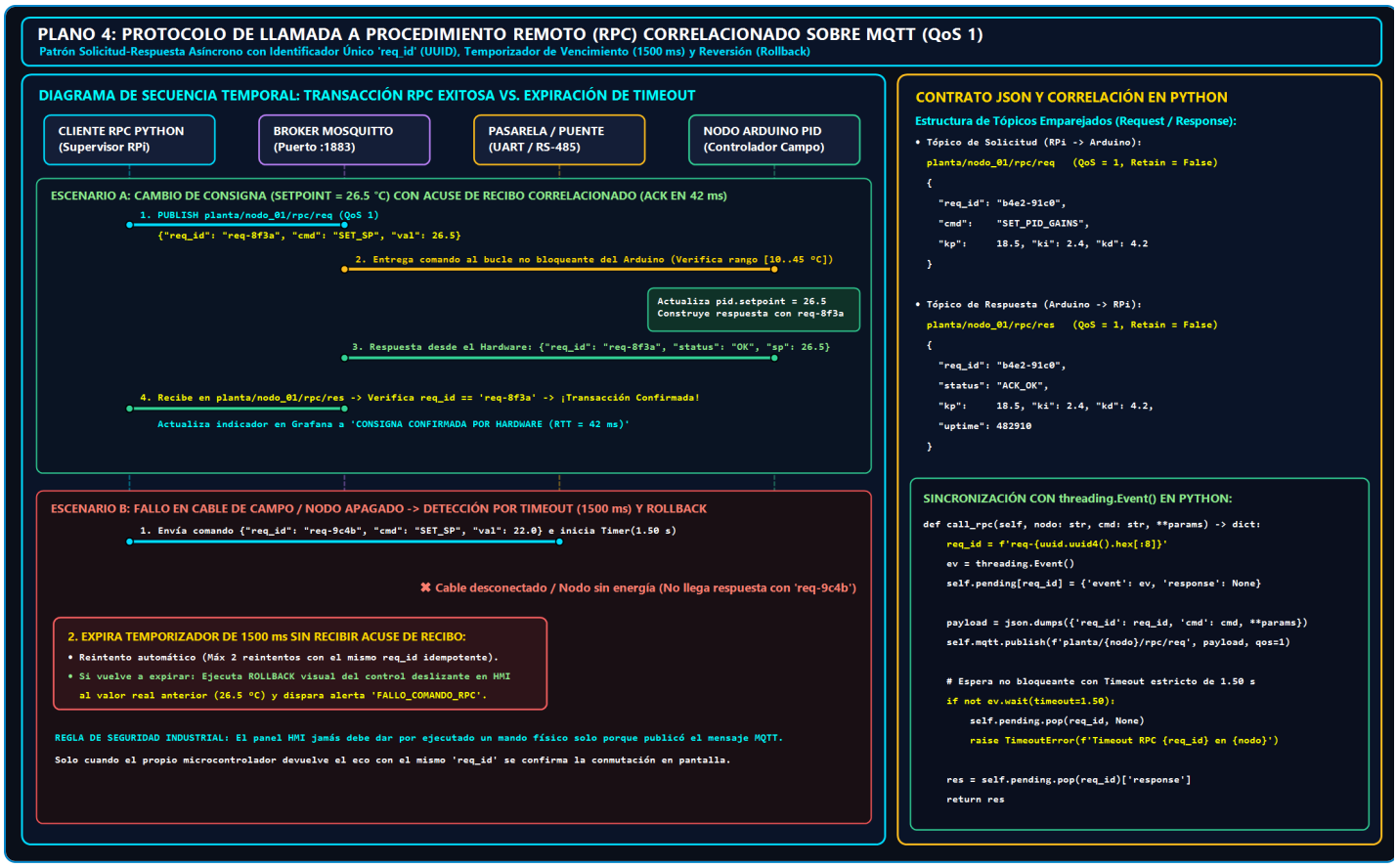
Paso 4.1 — Compilación y Carga del Firmware Determinista en Arduino UNO

- Abra el archivo `codigo_fuente/controlador_pid_discreto_rpc_arduino.ino` en Arduino IDE o PlatformIO.
- Verifique las tres mejoras industriales implementadas en la función `computeDiscretePID()`:
- **Muestreo exacto por temporizador no bloqueante:** $T_s = 100\ ms$ $(10\ Hz)$.
- **Derivada sobre la medición (**$-y[k]$**):** $D[k] = -K_d \cdot (y[k] - y[k-1]) / T_s$, eliminando el golpe derivativo (*Derivative Kick*) cuando el operador modifica de golpe el `Setpoint` desde Grafana.
- **Anti-Windup por recorte condicional (*Clamping*):** congela la acumulación del integrador $I[k]$ cuando la salida `PWM` alcanza 0 o 255.

---

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

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



Paso 5.1 — Prueba de Transacción Confirmada y Prueba de Fallo con `Rollback`

- Ejecute el cliente supervisor en la Raspberry Pi:

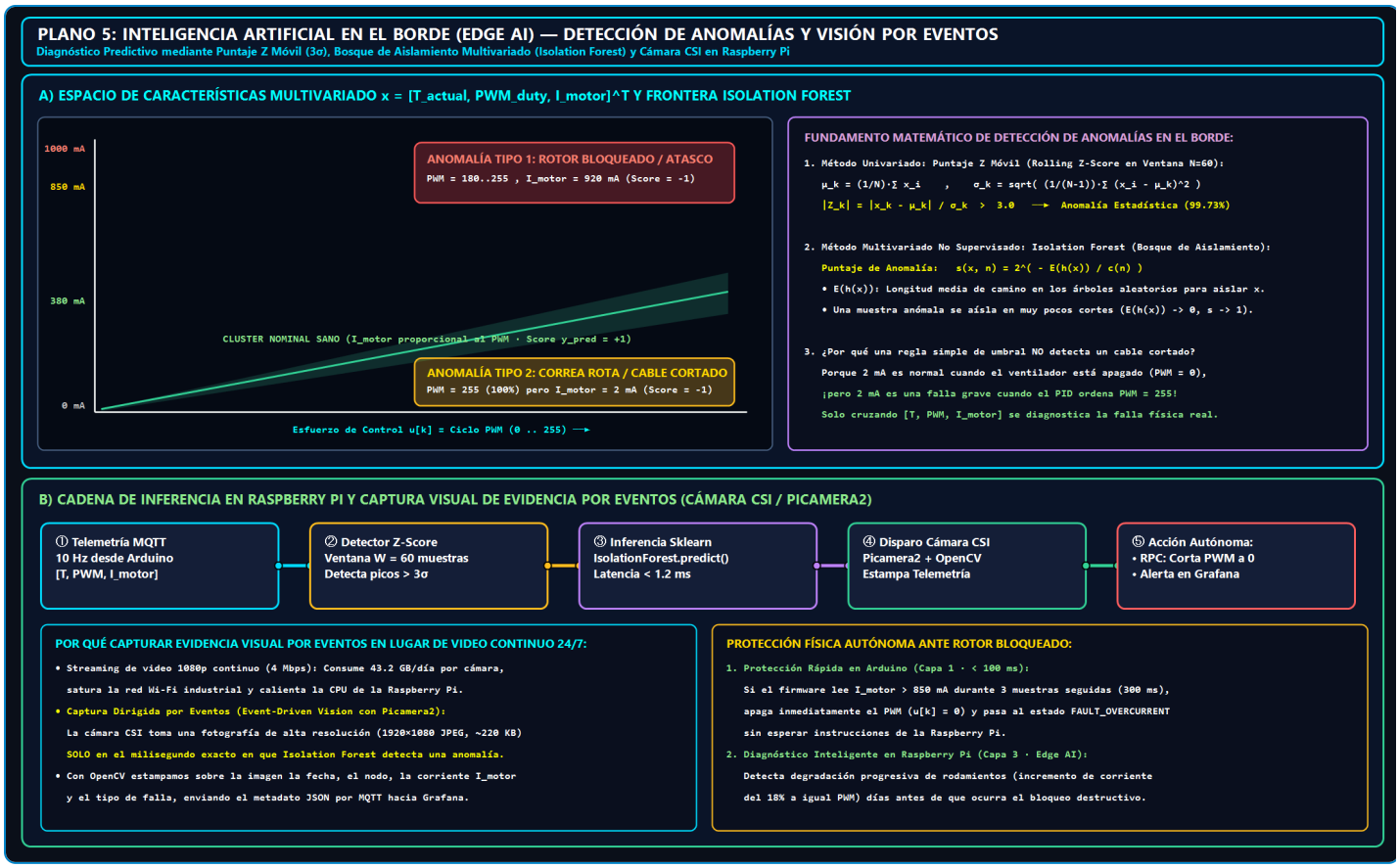
  ```bash
  python3 codigo_fuente/cliente_rpc_correlacionado_mqtt.py
  ```

- Verifique en consola que cada comando enviado en `planta/nodo_01/rpc/req` incluye un `req_id` único (por ejemplo, `req-8f3a19c2`) y que el hilo espera en `threading.Event.wait(timeout=1.50)` hasta recibir exactamente ese mismo `req_id` en `planta/nodo_01/rpc/res`.
- Desconecte momentáneamente el cable serial del Arduino y envíe una nueva consigna: compruebe cómo tras 1.50 s y 2 reintentos idempotentes, el servicio publica el evento de `Rollback` restaurando el indicador de la interfaz al valor real anterior.

---

6. Detección de Anomalías con `Edge AI` y Cámara `CSI` (`Plano 5`)

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



Paso 6.1 — Ejecución del Detector `Isolation Forest` y Captura Forense por Eventos

- Inicie en terminales separadas el motor de inferencia y el servicio de cámara `CSI`:

  ```bash
  python3 codigo_fuente/detector_anomalias_edge_ai_isolation_forest.py
  python3 codigo_fuente/captura_visual_eventos_camara_csi.py
  ```

- **Prueba de Anomalía Tipo 1 (Rotor Bloqueado):** frene suavemente el eje del ventilador durante $400\ ms$. Observe cómo la corriente I_{motor} supera los $850\ mA$, el Arduino corta autónomamente el `PWM` a 0 en menos de $300\ ms$ y el motor `Edge AI` clasifica `ROTOR_BLOQUEADO_SOBRECORRIENTE`, disparando una fotografía `1080p` con marca de agua en `/var/lib/mecatrobotica/evidencia_visual/`.
- **Prueba de Anomalía Tipo 2 (Correa Rota / Cable Abierto):** desconecte el hilo positivo del ventilador mientras el controlador `PID` ordena $\text{PWM} = 255$. Aunque $I_{motor} \approx 2\ mA$ no viola ningún límite de sobrecorriente, el modelo multivariado **`Isolation Forest`** detecta inmediatamente que la combinación $[\text{PWM}=255,\ I_{motor}=2\ mA]$ se ubica fuera de la variedad nominal ($\text{Score} = -1$) y reporta `CORREA_ROTA_O_CABLE_ACTUADOR_ABIERTO`.

LISTADO DE MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN (`BOM`) — MÓDULO 08

Hardware de Control en Lazo Cerrado `PID` , Etapa de Potencia `MOSFET PWM` , Sensórica `I2C` y Visión en el Borde (`CSI`)

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 Captura Visual por Eventos

---

1. Computación de Supervisión (`Edge AI`) y Controlador de Tiempo Real (`PID`)

Ítem	Cant.	Designador	Componente / Especificación Técnica	Función en el Sistema
01	1	`SBC1`	**Raspberry Pi 4 Modelo B / Raspberry Pi 5 (`4 GB` o `8 GB` RAM)**	Supervisor de planta, cliente `RPC` correlacionado, motor `Isolation Forest` y captura de cámara `CSI` .
02	1	`U1`	**Arduino UNO R3 (`ATmega328P-PU` @ `16 MHz`)**	Ejecución determinista del lazo cerrado `PID` discreto cada $T_s = 100\ ms$ y protección de sobrecorriente.
03	1	`CAM1`	**Cámara Oficial Raspberry Pi `CSI` (`IMX219 8MP` o `IMX708 12MP`) con cinta `FFC` de 15/22 pines**	Captura fotográfica `1920x1080` dirigida por eventos ante detección de anomalías mecánicas o térmicas.

---

2. Etapa de Potencia `PWM` de $12\ V\ DC$ y Protección contra Transitorios Inductivos

Ítem	Cant.	Designador	Componente / Especificación Técnica	Función en el Sistema
04	1	`Q1`	**Transistor** `MOSFET` **Canal N de Nivel Lógico** `IRLZ44N` **(** `TO-220` **,** $V_{DSS}=55\ V$**,** $I_D=47\ A$**,** $R_{DS(on)}=0.022\ \Omega$ **@** $V_{GS}=5\ V$**)**	Conmutador de potencia en lado bajo (*Low-Side Switch*) gobernado por la señal `PWM` del pin `D9` ($490\ Hz$).
05	1	`HS1`	**Disipador de Aluminio Anodizado para cápsula** `TO-220` **(**$19 \times 15 \times 25\ mm$**) con tornillo** `M3` **y pasta térmica**	Evacuación térmica de pérdidas por conducción y conmutación del transistor `Q1`.
06	1	`D1`	**Diodo Rectificador de Rueda Libre** `1N4007` **(** `DO-41` **,** $1000\ V$**,** $1.0\ A$**) o** `1N5819` **(** `Schottky` $40\ V$**)**	Supresión del pico inductivo inverso ($V_L = -L \cdot dI/dt$) en cada corte del ciclo `PWM`.
07	1	`R_GATE`	**Resistencia de Película Metálica de** $220\ \Omega$ **(**$1/4\ W$**,** $\pm 1\%$**)**	Limita el pico de corriente de carga de la capacitancia de compuerta (C_{iss}) y amortigua oscilaciones parásitas (*ringing*).
08	1	`R_PD`	**Resistencia de Anclaje (** `Pull-Down` **) de** $10\ k\Omega$ **(**$1/4\ W$**,** $\pm 1\%$**)**	Mantiene la compuerta (`Gate`) firmemente en $0\ V$ durante el reinicio o alta impedancia del microcontrolador.
09	1	`ACT1`	**Planta Térmica / Ventilador Axial Industrial de** $12\ V\ DC$ **(**$380\ mA$ **nominal,** $> 850\ mA$ **rotor bloqueado)**	Actuador físico del lazo de regulación térmica y banco de pruebas de anomalías mecánicas.
10	1	`PSU1`	**Fuente Conmutada Industrial de** $12\ V\ DC\ /\ 3.0\ A$ **(**$36\ W$**) con riel negativo común en estrella**	Alimentación dedicada para la etapa de potencia de $12\ V$, desacoplada del riel lógico de $5\ V$.

3. Sensórica de Realimentación de Estado (`T_actual` e `I_motor`)

Ítem	Cant.	Designador	Componente / Especificación Técnica	Función en el Sistema
11	1	`U2`	**Módulo Sensor de Corriente y Tensión de Lado Alto** `INA219` **(** `I2C 0x40` **) con Shunt Kelvin de** $0.100\ \Omega$ **(**1%**,** $2\ W$**)**	Medición en tiempo real de $I_{motor}[k]$ y $V_{bus}[k]$ para protección de sobrecorriente y vector de `Edge AI`.
12	1	`U3`	**Sonda Ambiental Digital** `Bosch BME280` **(** `I2C 0x76` **) o** `DS18B20` **impermeable**	Medición de la variable controlada $y[k] = T_{actual}$ con resolución de $0.01\ ^\circ C$.

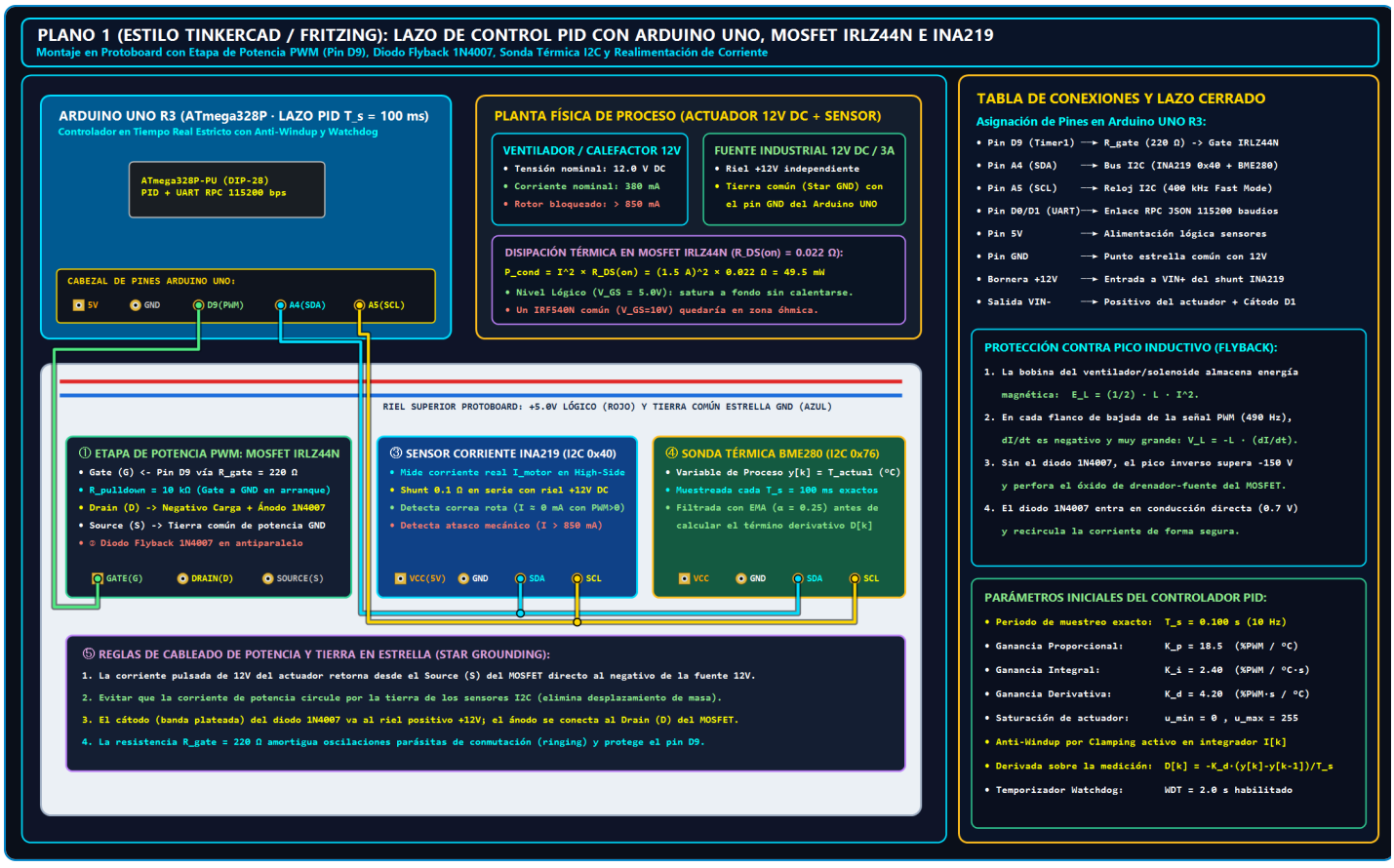
4. Insumos de Construcción para Placa Impresa Soldada (`PCB FR-4`) y Prototipo (`Tinkercad`)

Ítem	Cant.	Designador	Componente / Especificación Técnica	Función en el Sistema
13	1	`PCB1`	**Placa Virgen o Fabricada `FR-4` de Doble Capa (1.6 mm, cobre 1 oz/ft^2, pistas de potencia de 2.50 mm)**	Montaje definitivo por soldadura libre de falsos contactos y con partición de tierra `AGND` / `PGND`.
14	1	`SOCK1`	**Zócalo Torneado `DIP-28` de paso 2.54 mm + Cristal `HC-49S` 16.000 MHz + 2× 22 pF NP0**	Alojamiento seguro del microcontrolador `ATmega328P-PU` sin exponerlo al calor directo del cautín.
15	2	`TB1`, `TB2`	**Borneras de Tornillo para Circuito Impreso `KF301-2P` (paso 5.08 mm, 300 V / 15 A)**	Fijación mecánica firme de los cables de la fuente de 12 V DC y del actuador.
16	1	`F1`	**Fusible Polimérico Rearmable `PTC` de 3.0 A (`PPTC` radial)**	Protección contra cortocircuitos francos en la línea de +12 V.

5. Planos de Referencia para Inspección de Materiales y Montaje

5.1 Plano de Prototipado en Protoboard (`Plano 1`)

📐 Plano 1: Montaje en Protoboard del Lazo Cerrado PID

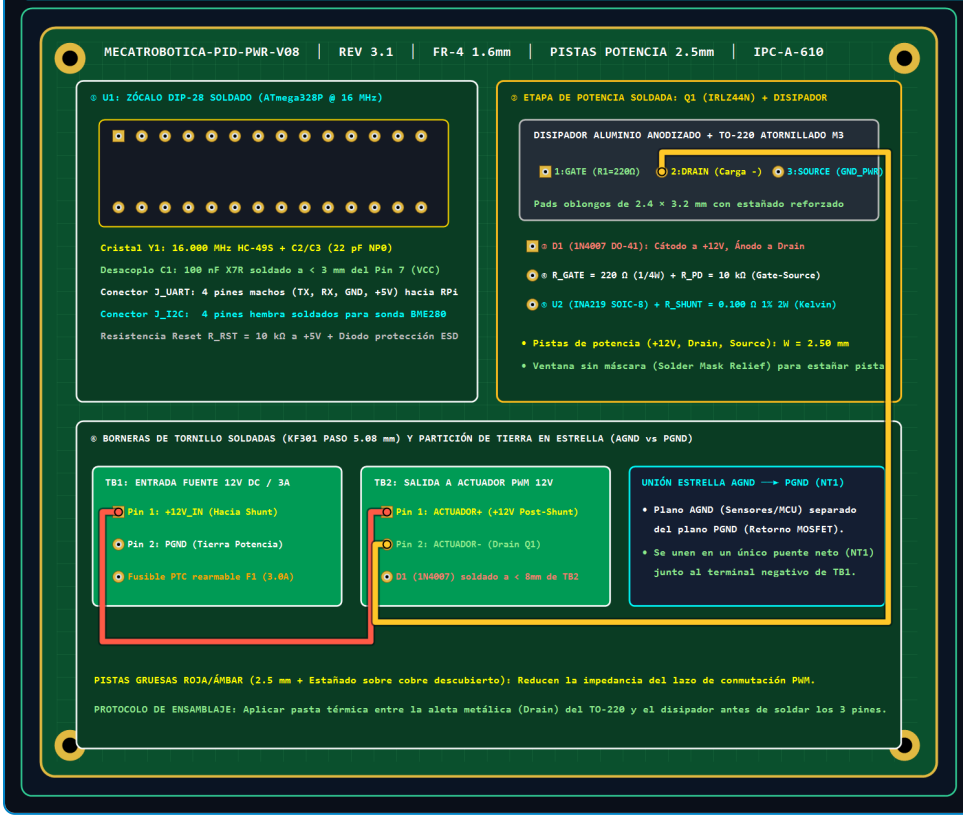


5.2 Plano de Circuito Impreso `FR-4` con Montaje por Soldadura (`Plano 2`)

📐 Plano 2: Placa PCB Soldada del Controlador PID de Potencia

PLANO 2 (PLACA PCB FR-4 CON MONTAJE POR SOLDADURA): CONTROLADOR PID DE POTENCIA E INSTRUMENTACIÓN

Circuito Impreso de Doble Capa con Pistas de Cobre de 2.5 mm para 12V/3A, Zócalo DIP-28 Soldado, MOSFET TO-220 con Disipador y Shunt Kelvin



INGENIERÍA DE PCB DE POTENCIA (IPC-2221)

Dimensionamiento de Pistas y Soldadura THT:

- Corriente máxima de diseño: $I_{max} = 3.0$ A continuos
- Espesor de cobre estándar: 1 oz/ft² (35 µm)
- Ancho de pista requerido (IPC-2221 para $\Delta T = 10$ °C):
  $W_{min} = 1.58$ mm ⟶ Diseñado con $W = 2.50$ mm
- Técnica de ventana sin máscara (Solder Mask Relief): Permite aportar soldadura de estaño-plata sobre la pista de Drain y Source, duplicando su sección útil.

POR QUÉ NO USAR PROTOBOARD CON CARGAS PWM > 1 A:

1. Los flejes elásticos de una protoboard tienen una resistencia de contacto de 80 a 250 mΩ por inserción.
2. A 2.5 A, los contactos se calientan, ablandan el plástico ABS y falsean la tensión de compuerta V_{GS}.
3. El rebote de tierra (Ground Bounce) por los pulsos PWM corrompe las lecturas del sensor térmico I2C.
4. En la placa PCB soldada con tierras separadas (AGND y PGND), el ruido conducido cae más de 40 dB.

LISTA DE INSPECCIÓN POST-SOLDADURA:

1. Verificar con óhmetro resistencia entre Gate y Source: Debe medir exactamente 10.0 kΩ ($R_{pulldown}$).
2. Verificar polaridad de D1 (1N4007): Banda del cátodo hacia +12V (si se invierte, provoca cortocircuito).
3. Comprobar ausencia de puentes de estaño entre los 3 pines del TO-220 (paso 2.54 mm).
4. Limpiar residuos de resina flux con IPA 99.8% antes de insertar el ATmega328P en su zócalo DIP-28.

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`?

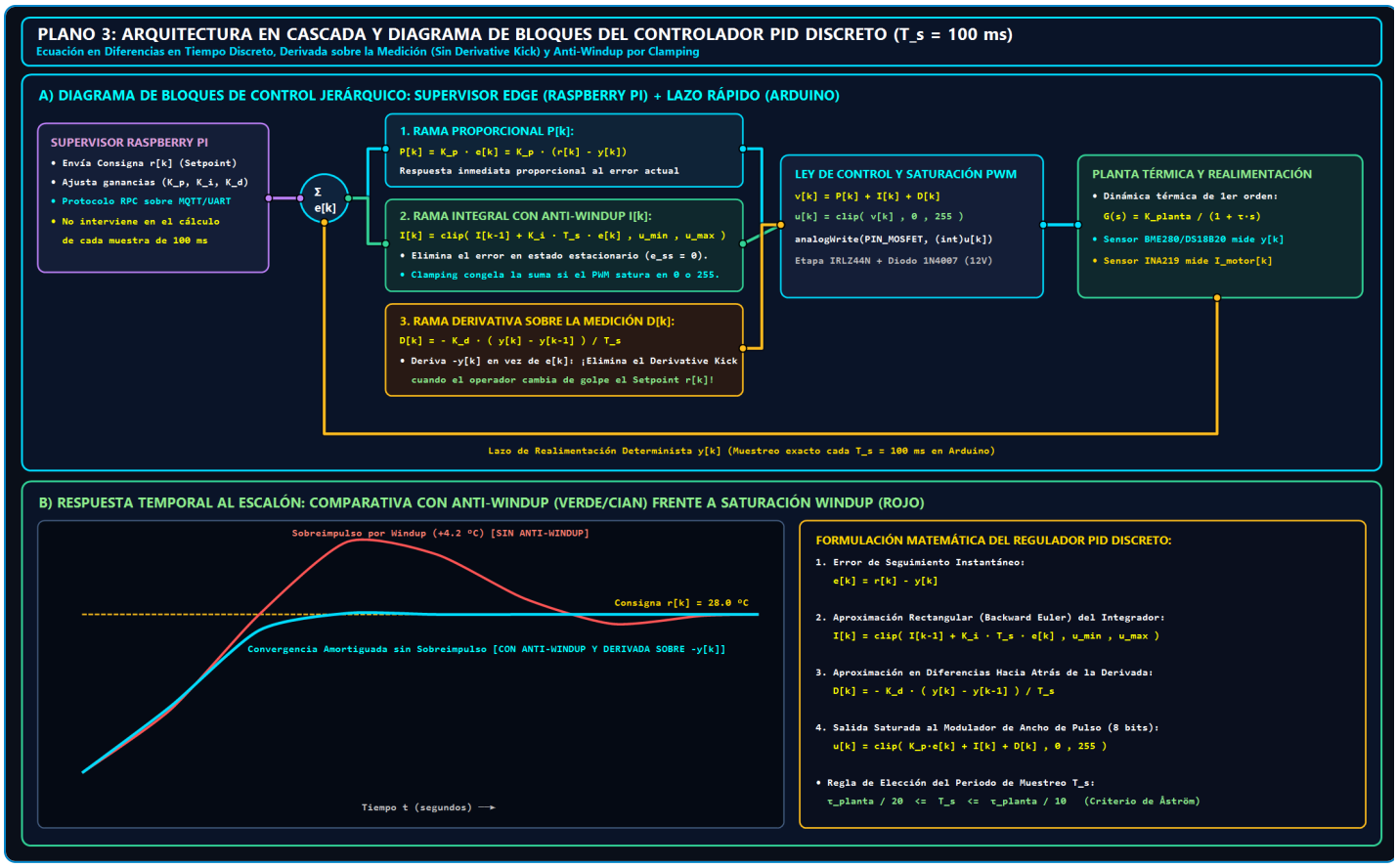
En la ingeniería de sistemas ciberfísicos e industriales, la primera regla de diseño consiste en **separar la capa de control regulatorio en tiempo real estricto (`Hard Real-Time`) de la capa de supervisión y analítica en tiempo real blando (`Soft Real-Time`)**:

- *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 $\Delta T = 0.0495 \times 62 \approx 3.1\ ^\circ C$.

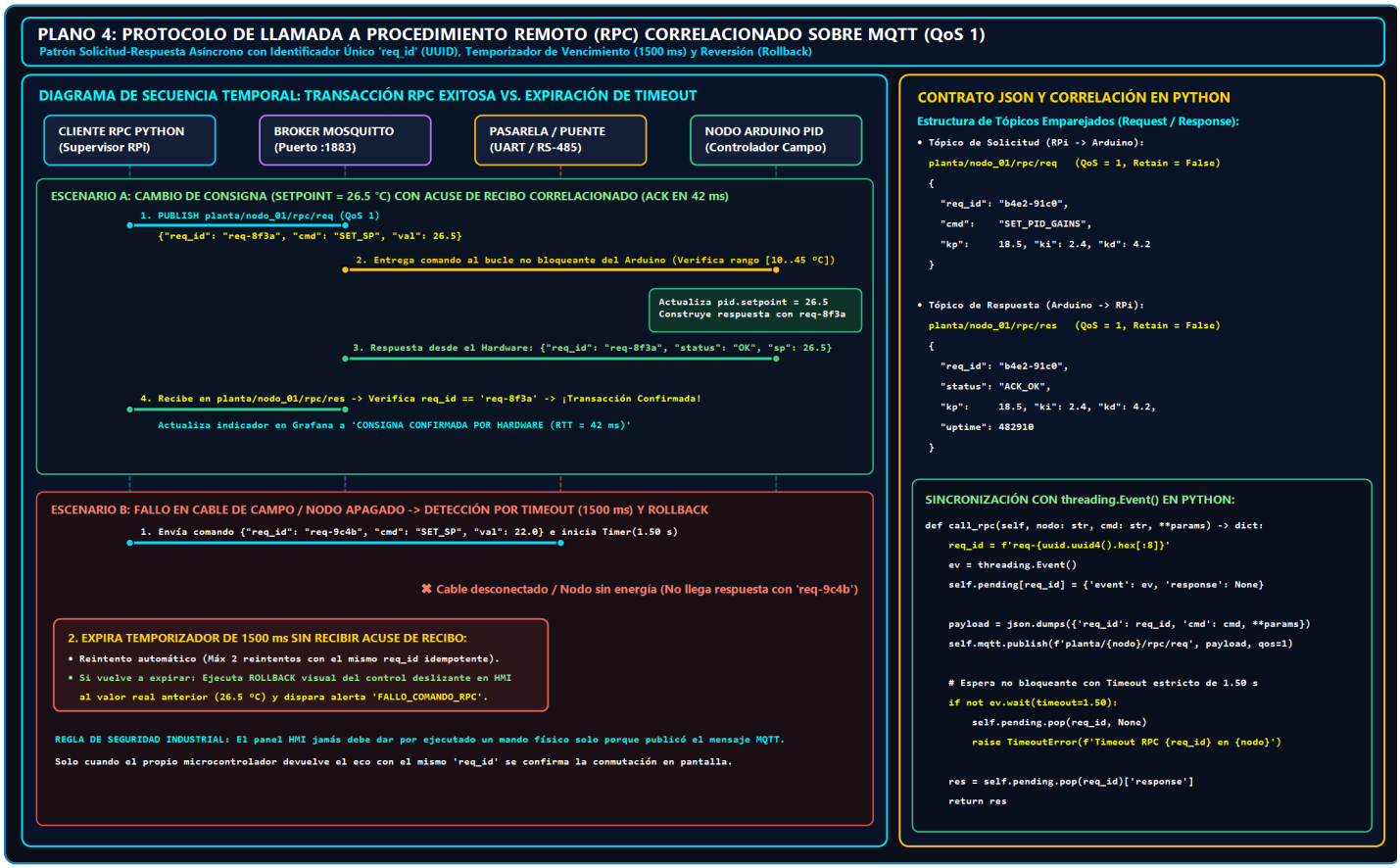
- **Física del diodo volante (`Flyback 1N4007`):**

  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**

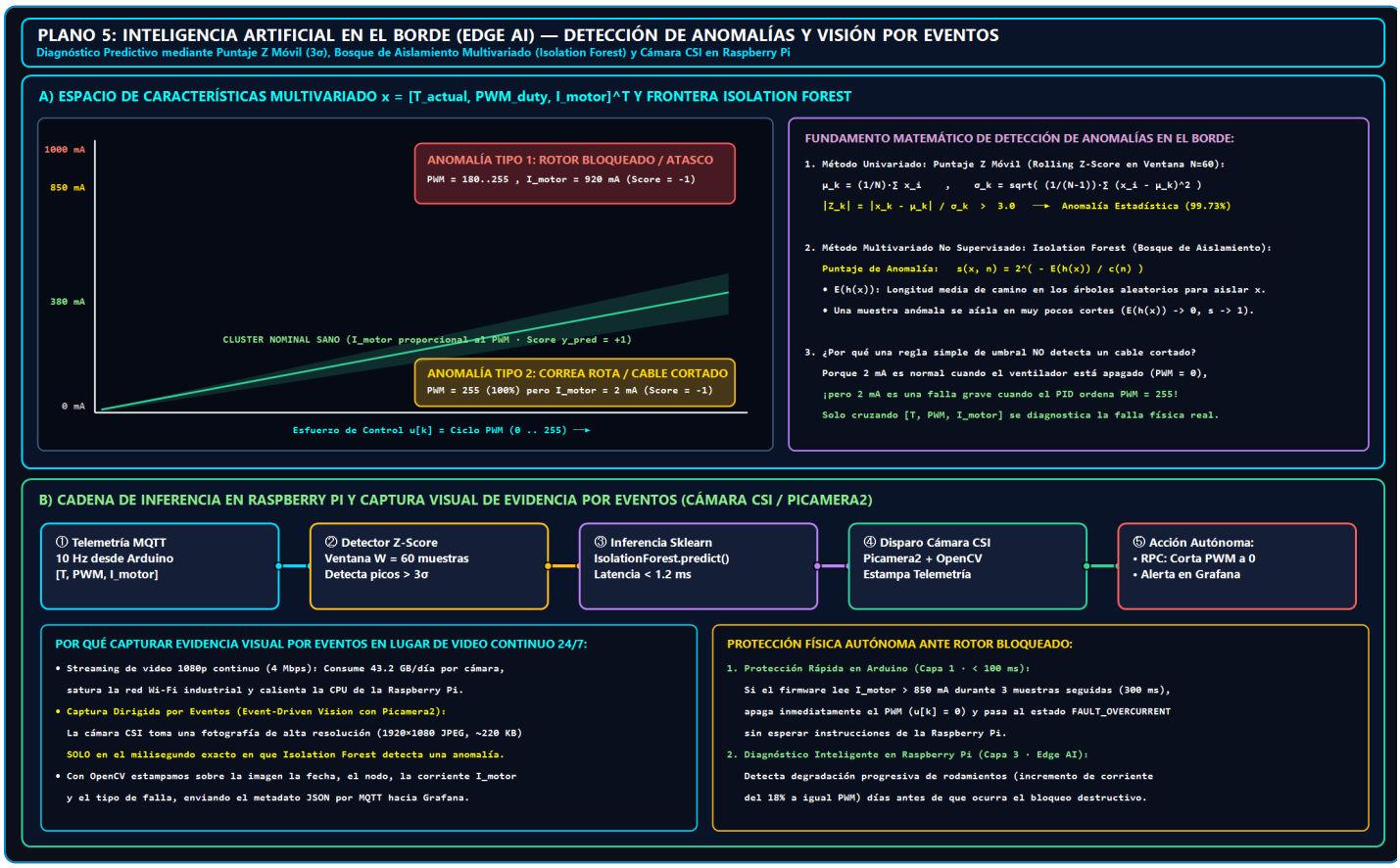
Procedimiento Remoto (`RPC`) de grado industrial:

- **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 μ_k y la desviación estándar muestral σ_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.

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

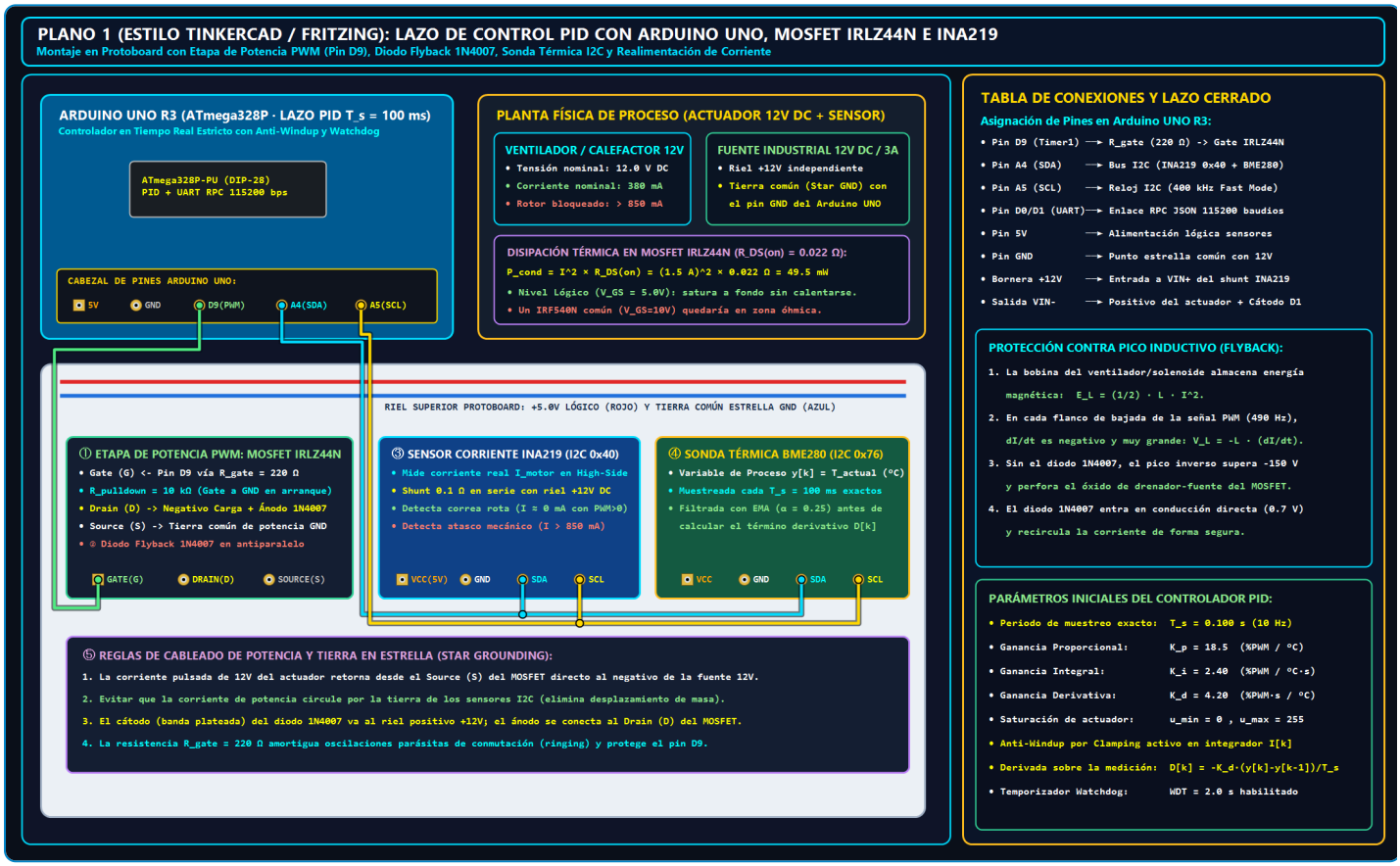


Tabla de Asignación de Terminales y Funciones Físicas

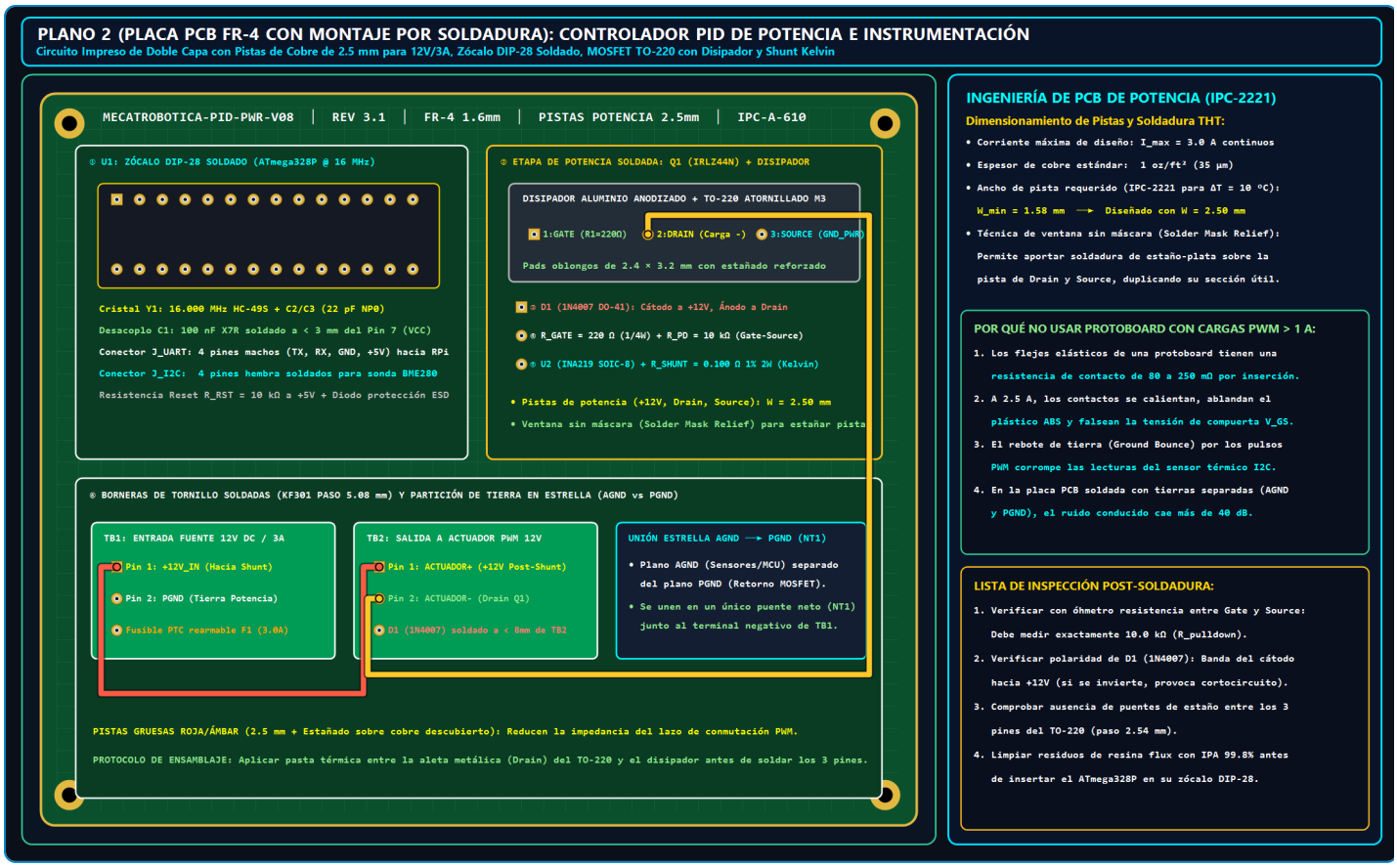
Origen (`Arduino / Fuente`)	Destino en Etapa de Campo	Color de Cable	Función Eléctrica y Regla de Diseño
`Pin D9` (`Timer1 PWM`)	Compuerta (`Gate`) del `IRLZ44N` vía $R_{gate} = 220\ \Omega$	Verde	Señal `PWM` de $490\ Hz$ (0 a 255). Incluye $R_{pulldown} = 10\ k\Omega$ entre `Gate` y `GND`.
`Pin A4` (`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

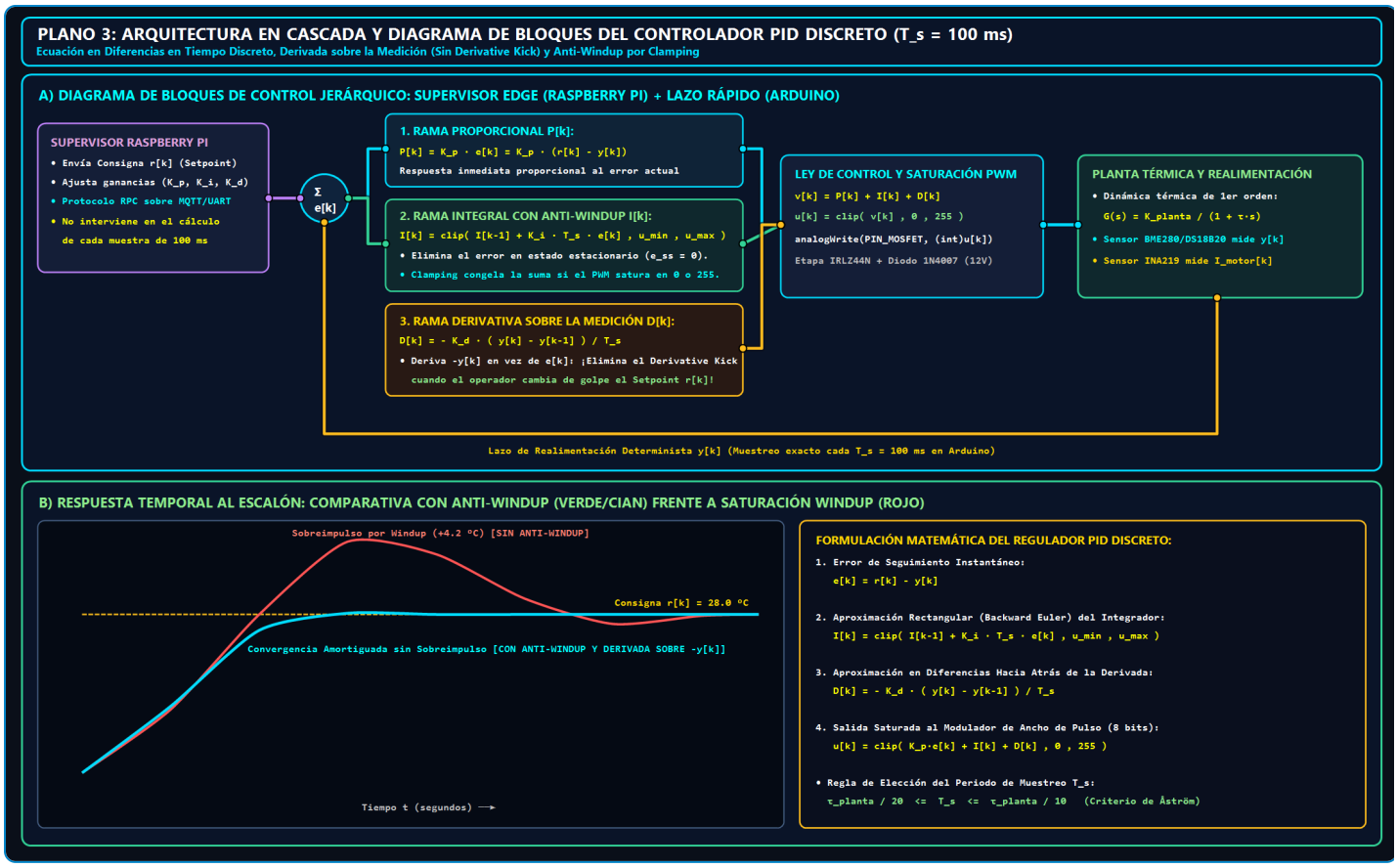


---

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

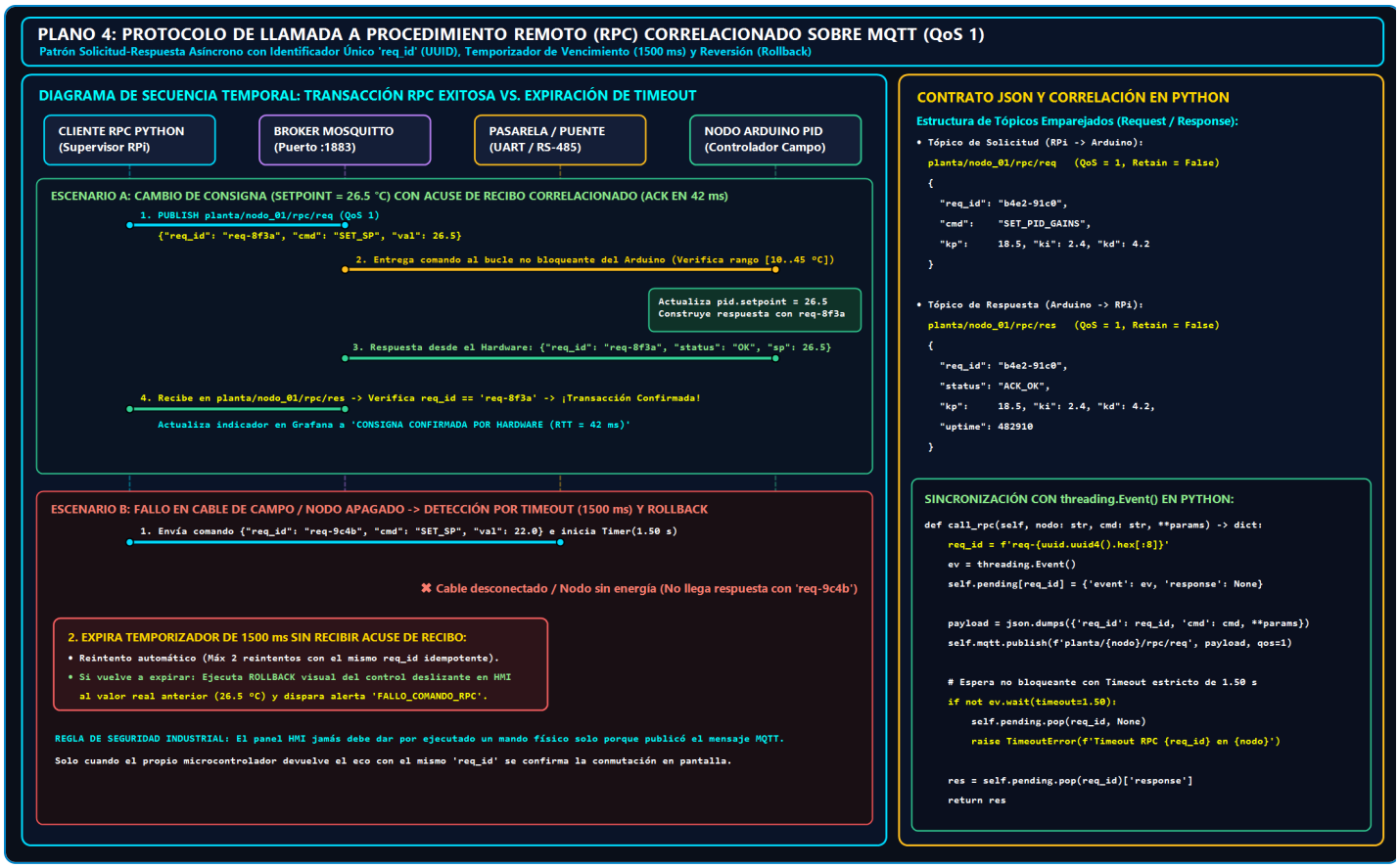


---

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.