Plano y Esquemático del Circuito — Módulo 11: Banco de Inyección de Fallas (`FI-01..FI-05`) e Instrumentación de Diagnóstico

- **Curso:** Internet de las Cosas (`IoT`) con Arduino y Raspberry Pi (`MecatroboticApp`)
- **Módulo 11:** Montaje de Pruebas en Protoboard y Placa PCB de Diagnóstico e Inyección de Fallas (`IPC-A-610 Clase 3`)

---

1. Arquitectura Eléctrica del Banco de Inyección de Fallas

Para ejecutar las pruebas de aceptación `FI-01` , `FI-02` y `FI-04` de manera repetible, segura y sin aflojar cables con destornillador en plena marcha, se intercala entre los sensores/actuadores y la placa controladora un **Módulo Conmutador de Inyección de Fallas (`Fault Injection Switchbox`)** dotado de puntos de prueba (`TP1..TP6`) para analizador lógico y multímetro.

Tabla de Interconexión de los Interruptores de Prueba y Puntos de Medición

Interruptor / Punto de Prueba	Nodo de Entrada	Nodo de Salida	Estado Normal (Cerrado)	Estado Inyección de Falla (Abierto)
`SW1` (`FI-01`)	Terminal del termistor `NTC 10k`	Entrada `A0` del Arduino (con $R_{ref} = 10\ k\Omega$ a `GND`)	Tensión analógica proporcional a T ($1.5\ V$ - $3.5\ V$)	`A0` cae a $0.00\ V$ ($ADC = 0$) en $< 1\ ms$; dispara `FAULT_SAFE_SHUT` .
`SW2-A / SW2-B` (`FI-02`)	Líneas `A` y `B` del `MAX485` (Arduino)	Líneas `A` y `B` del `MAX485` (Raspberry Pi)	Tramas diferenciales `Modbus RTU` / `CRC-16` fluidas	Bus abierto; Arduino mantiene PID local y RPi reporta `serial_fault` .
`SW3` (`FI-04`)	Salida de medición `VIN-` del `INA219`	Positivo ($+12\ V$) del ventilador `PWM`	Corriente nominal $120\ mA$ - $350\ mA$ según ciclo `PWM`	Corriente cae a $0.0\ mA$ con $PWM \geq 120$; dispara `FAN_OPEN_CIRCUIT` .
`TP1` (`CH0 Analizador`)	Pin `D2` (`RS485_DERE`)	Canal 0 del Analizador Lógico	Pulso alto durante transmisión UART + $100\ \mu s$ de guarda	Permite auditar truncamiento de trama (`Anexo A.2`).
`TP2` (`CH1 Analizador`)	Pin `D7` (`HEATER_SSR`)	Canal 1 del Analizador Lógico	Alto cuando calefactor está activo	Permite medir con precisión de μs el apagado en `< 100 ms` tras abrir `SW1` .
`TP3` (`CH2 Analizador`)	Pin `D9` (`FAN_PWM`)	Canal 2 del Analizador Lógico	Señal `PWM` de $490\ Hz$ / $980\ Hz$	Pasa a ciclo 100% constante al entrar en `FAULT_SAFE_SHUT` .
`TP4 / TP5` (`I2C`)	Líneas `SDA` y `SCL`	Canales 3 y 4 + Osciloscopio	Con *pull-ups* externos de $3.3\ k\Omega$ a $+3.3\ V$	Flancos de subida limpios ($\tau_r < 300\ ns$) sin redondeo capacitivo.

---

2. Especificaciones de la Placa PCB Soldada de Pruebas (`Testbed & Fault-Injection PCB`)

- **Sustrato y Capas:** Fibra de vidrio `FR-4` de doble cara con máscara antisoldante verde esmeralda, espesor de placa $1.6\ mm$ y acabado superficial `ENIG` (oro químico) en las torretas de prueba `TP1..TP6` para garantizar baja resistencia de contacto con las puntas del multímetro y osciloscopio.
- **Dimensionamiento de Pistas de Potencia y Señal:**
- Pista de $+12\ V$ a través de `INA219` y `SW3` : ancho de $1.5\ mm$ **($60\ mil$)** en cobre de $1\ oz/ft^2$.

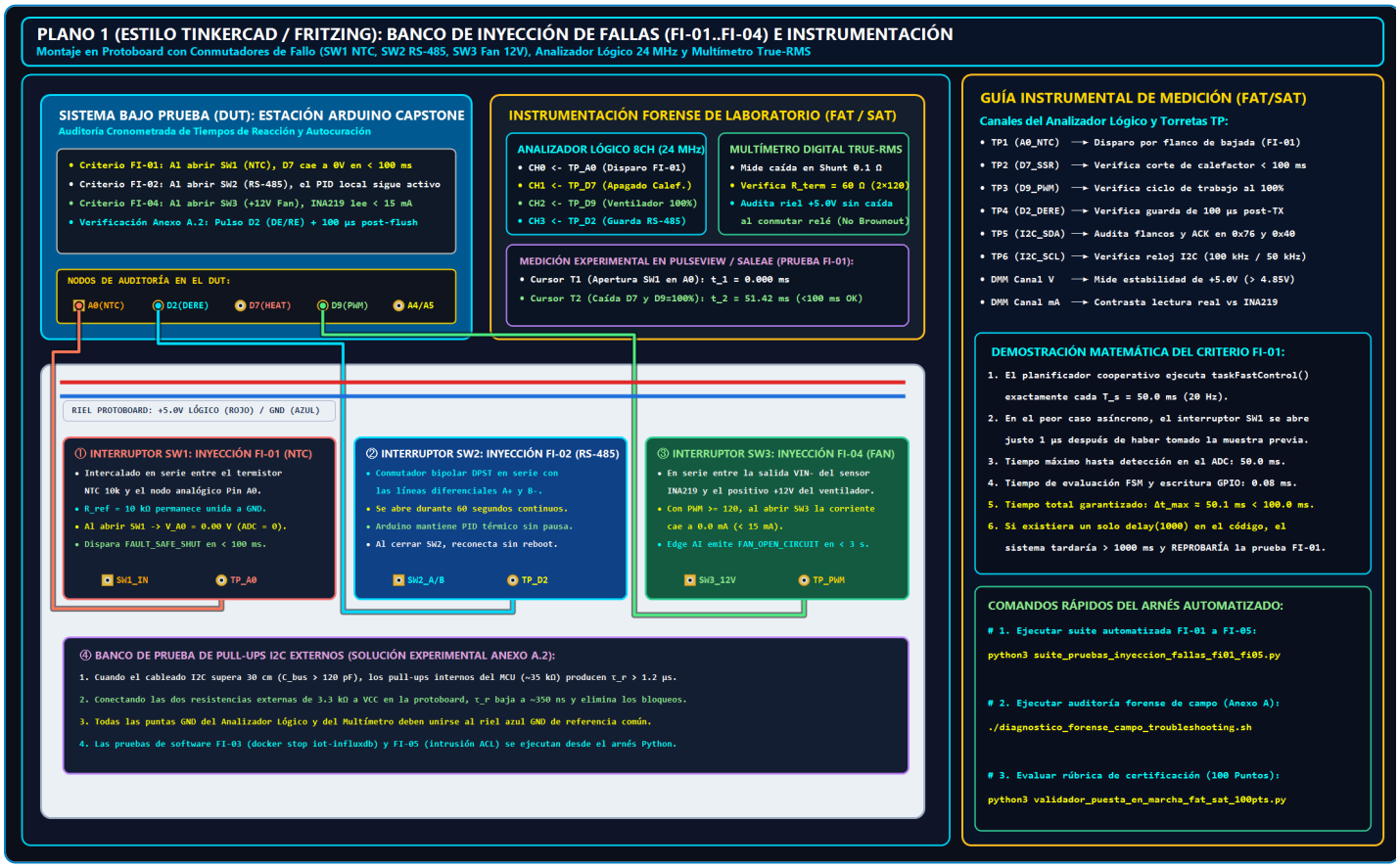
- Par diferencial `RS-485` (`A` / `B`) a través de `SW2` : trazado simétrico acoplado de $0.5\ mm$ **(**$20\ mil$**)** con jumper seleccionable `JP_TERM` para la resistencia terminadora de $120\ \Omega$.
- **Puentes de Selección de Pull-up** `I2C` **(** `JP_I2C_PU` **):** Permite conmutar en vivo entre las resistencias internas débiles ($35\ k\Omega$) y el banco de resistencias externas de precisión de $3.3\ k\Omega$, demostrando experimentalmente en el osciloscopio la corrección del flanco de subida descrita en el `Anexo A.2` .

---

3. Planos de Ingeniería Incluidos en el Módulo 11

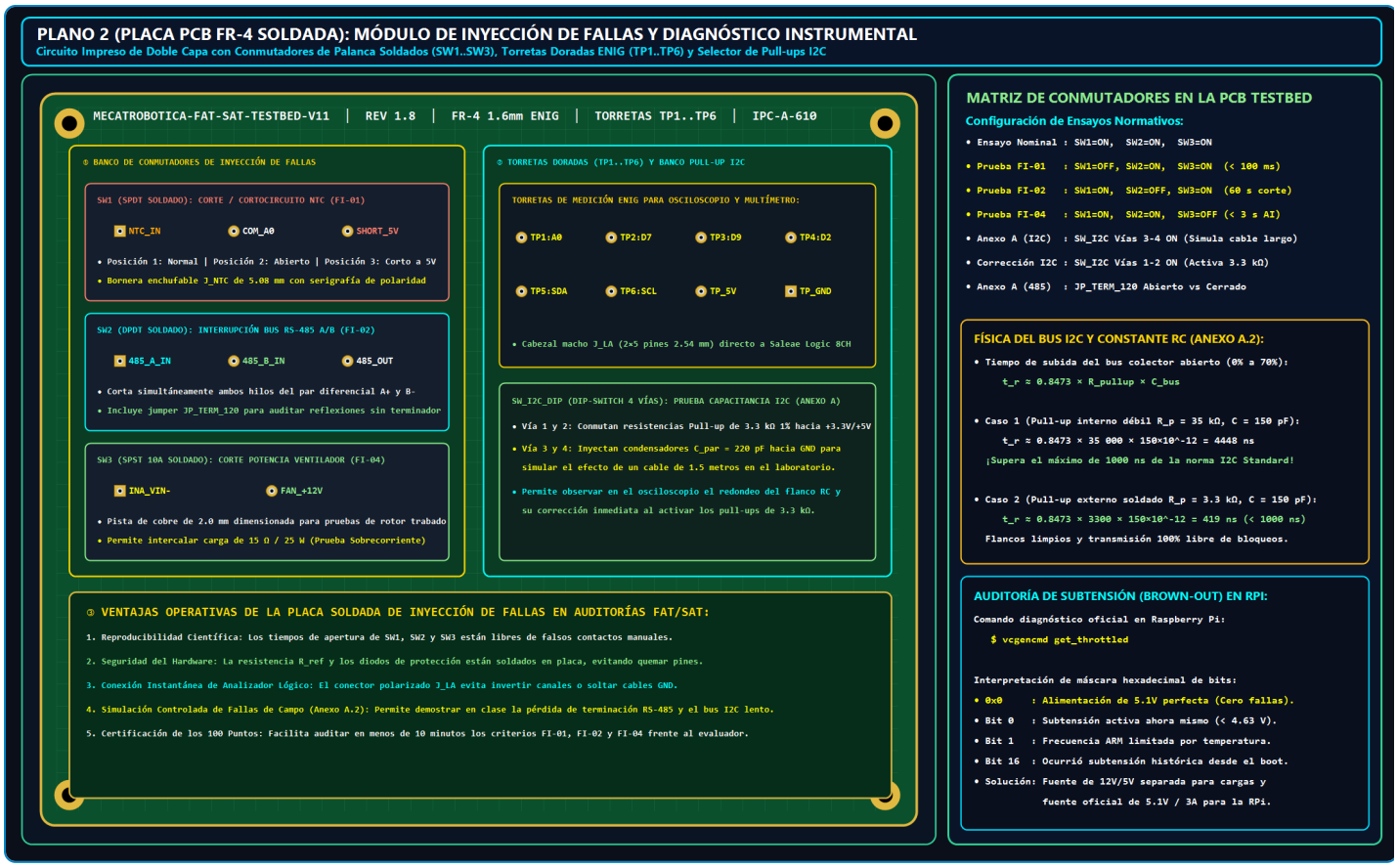
- **`plano_protoboard_banco_inyeccion_fallas_instrumentacion.png` :** Montaje práctico en protoboard con los tres interruptores de inyección de fallas (`SW1` , `SW2` , `SW3`), analizador lógico USB de 8 canales y multímetro digital conectados a los puntos de prueba.

📐 Plano 1: Banco de Inyección de Fallas e Instrumentación en Protoboard (Estilo Tinkercad)



- **`plano_pcb_soldadura_banco_pruebas_diagnostico.png` :** Diseño de PCB industrial de doble capa con borneras enchufables, torretas doradas `TP1..TP6` , interruptores de palanca de panel y banco de *pull-ups* `I2C` .

📐 Plano 2: Placa PCB FR-4 Soldada de Diagnóstico e Inyección de Fallas



- **`protocolo_5_pruebas_inyeccion_fallas_fi01_fi05.png`**: Cronograma de señales y matriz técnica de las 5 pruebas de estrés (`FI-01` a `FI-05`).

📐 Plano 3: Protocolo de las 5 Pruebas de Inyección de Fallas (FI-01 a FI-05)



- **`arquitectura_gemelo_digital_wokwi_rfc2217_docker.png`**: Diagrama de bloques e interconexión de protocolos del Gemelo Digital sin hardware (`Wokwi` + `RFC 2217 TCP:4000` + `pyserial` + `Docker Compose`).

📐 Plano 4: Arquitectura del Gemelo Digital sin Hardware (Wokwi + RFC 2217 + Docker)



- **`matriz_troubleshooting_y_rubrica_fat_sat_100pts.png`**: Árbol de diagnóstico forense de las 5 fallas de campo (`Anexo A`) y desglose ponderado de la rúbrica de certificación de 100 puntos.

📐 Plano 5: Matriz Forense de Troubleshooting (Anexo A) y Rúbrica de Puesta en Marcha (100 Puntos)

PLANO 5: GUÍA FORENSE DE RESOLUCIÓN DE FALLAS (ANEXO A) Y RÚBRICA DE CERTIFICACIÓN (100 PUNTOS)

Diagnóstico Raíz de las 5 Fallas Clásicas de Campo, Ponderación de Puesta en Marcha (Lección 10.4) e Insignias MecatroboticApp (Anexo C)

1. MATRIZ DE DIAGNÓSTICO RÁPIDO DE FALLAS FRECUENTES (ANEXO A.2)

FALLA 1: PermissionError: [Errno 13] Permission denied: '/dev/ttyACM0'

- Causa Raíz : El usuario de Linux no pertenece al grupo POSIX 'dialout'.
- Solución : Ejecutar 'sudo usermod -aG dialout ' y reiniciar sesión SSH.

FALLA 2: Al abrir el script Python, los primeros comandos al Arduino se pierden

- Causa Raíz : Auto-reset del Arduino por caída de la línea DTR al abrir el puerto.
- Solución : Agregar time.sleep(2.0) y ser.reset_input_buffer() tras serial.Serial().

FALLA 3: El Arduino se reinicia exactamente cuando se activa el relé o motor DC

- Causa Raíz : Caída de tensión (Brown-out) por compartir la línea de 5V del USB.
- Solución : Fuente externa independiente para cargas, uniendo GND u optoacoplando.

FALLA 4: En el bus RS-485, las tramas llegan truncadas en los últimos 1 o 2 bytes

- Causa Raíz : El pin DE/RE del MAX485 pasa a LOW antes de vaciar el registro UART.
- Solución : Llamar a Serial.flush() + delayMicroseconds(100) antes de D2 = LOW.

FALLA 5: Lecturas I2C erráticas o bloqueo del bus con cables largos (> 30 cm)

- Causa Raíz : Capacitancia parásita excesiva en SDA/SCL que redondea los flancos.
- Solución : Añadir pull-ups externos de 2.2 kΩ o 3.3 kΩ a VCC y Wire.setClock(50000).

2. RÚBRICA OFICIAL DE EVALUACIÓN (100 PUNTOS)

DIMENSIÓN 1: Seguridad Eléctrica y Hardware — PESO: 20 % (20 Puntos)

- Tierras comunes unidas en estrella, adaptación 5V <-> 3.3V impecable, diodo flyback 1N4007 instalado y condensadores de desacoplo de 100 nF.

DIMENSIÓN 2: Calidad del Firmware Arduino — PESO: 25 % (25 Puntos)

- Cero uso de delay(), planificación con millis(), filtro EMA, FSM con histéresis y FAULT_SAFE_SHUT, PID con anti-windup, CRC-16 y Watchdog 2s.

DIMENSIÓN 3: Robustez del Servicio Edge (RPi) — PESO: 25 % (25 Puntos)

- Servicios systemd con reconexión automática, testamento LWT en MQTT, cola Store-and-Forward en SQLite WAL, log2ram y Hardware Watchdog 15s.

DIMENSIÓN 4: Supervisión, Seguridad y Pruebas FI — PESO: 30 % (30 Puntos)

- Stack Docker operativo, MQTT con TLS 8883 + SAN + ACL, dashboard claro en Grafana (ISA-101) y aprobación de las 5 pruebas FI-01 a FI-05.

3. GRADUACIÓN E INSIGNIAS DEL CURSO (ANEXO C — 1000 XP)

- Curso Completo : 10 Módulos | 40 Lecciones | 2000 Minutos | 11 Videos HD
- Logro 1 (+75 XP) : "Arquitecto del Borde (Edge Architect)"
  Completa los módulos de Linux y Docker en Raspberry Pi.
- Logro 2 (+100 XP): "Maestro del Bus Industrial"
  Completa el laboratorio RS-485 y Modbus RTU sin errores CRC.
- Logro 3 (+250 XP): "Ingeniero IoT Full-Stack"
  Aprueba el Proyecto Integrador Final y las pruebas FI-01..FI-05.