

Sistema de Detección de Incrustaciones Calcáreas (SDIC)

1. Contexto y Planteamiento del Problema

La Península de Yucatán cuenta con una de las aguas más "duras" del mundo, caracterizada por altas concentraciones de minerales disueltos (calcio y magnesio). La precipitación de estos minerales genera incrustaciones adherentes (sarro) en las tuberías y electrodomésticos, provocando obstrucciones, pérdida de eficiencia energética y daños prematuros. El mayor desafío de este fenómeno es su naturaleza "invisible"; los daños solo se perciben cuando ya han generado un impacto económico severo en la infraestructura residencial o comercial.

2. Objetivo del Proyecto

El objetivo principal del proyecto fue diseñar y desarrollar un sistema de monitoreo IoT (Internet de las Cosas) de bajo costo capaz de medir variables indirectas del agua en tiempo real. Esto con el fin de diagnosticar, predecir y alertar al usuario sobre la acumulación de sarro, permitiendo una transición de un modelo de mantenimiento reactivo a uno preventivo y basado en datos.

3. Arquitectura y Propuesta Tecnológica

El sistema se estructuró bajo una arquitectura IoT industrial dividida en tres capas principales:

- **Capa de Hardware (Percepción):** Se diseñó un **Módulo de Detección Híbrido (MDH)**, el cual consiste en una carcasa personalizada fabricada en impresión 3D (PETG) que se instala en la línea de tubería (PVC de ½"). Este módulo integra de forma compacta tres sensores:
 - **Sensor de Flujo (YF-S201):** Para medir el caudal y detectar reducciones en el diámetro de la tubería.
 - **Sensor TDS (Sólidos Totales Disueltos):** Para evaluar la carga mineral y el riesgo químico del agua.
 - **Sensor de Temperatura (DS18B20):** Para correlacionar el factor térmico con la aceleración en la formación de sarro.
 - El cerebro del módulo es un microcontrolador **ESP32**, encargado de la lectura analógica/digital, conversión matemática y empaquetado de datos.
- **Capa de Red (Conectividad):** El ESP32 utiliza conectividad Wi-Fi local para transmitir la telemetría mediante el protocolo **MQTT** (Message Queuing Telemetry Transport). Los datos se empaquetan en formato JSON y se envían a un Broker en la nube (HiveMQ) con rutinas de reconexión automática para garantizar la resiliencia.
- **Capa de Software (Aplicación e Interfaz):** Se desarrolló una Interfaz Humano-Máquina (HMI) de escritorio utilizando **Python** (Tkinter, Paho-MQTT y Matplotlib). Este *dashboard* actúa como cliente suscriptor, mostrando tarjetas de información en tiempo real y gráficas dinámicas del comportamiento histórico de las tres variables.

4. Validación y Banco de Pruebas

Para certificar el funcionamiento del algoritmo y el hardware sin poner en riesgo una instalación real, se construyó un **banco de pruebas de circuito cerrado**. Utilizando una bomba periférica, válvulas de bola y un depósito de agua, se logró simular de manera controlada:

- Obstrucciones físicas (estrangulando el flujo).
 - Variaciones químicas (añadiendo sales al agua).
 - Cambios térmicos (introduciendo agua caliente).
- Este entorno permitió validar la integridad de la transmisión de datos y la capacidad del sistema para detectar anomalías.

5. Lógica de Diagnóstico y Predicción

El valor fundamental del proyecto reside en su capacidad analítica. El sistema no solo recolecta datos, sino que cruza la información para emitir diagnósticos estructurales:

- **Línea Base ("Punto Cero"):** Se calibra el sistema en sus primeras 48 horas con tubería limpia para establecer el caudal máximo de referencia.
- **Cálculo de "Salud de la Tubería":** Mediante la fórmula $(\text{Flujo Actual} / \text{Flujo de Referencia}) * 100$, el sistema calcula el porcentaje de vida útil del conducto.
- **Matriz de Alarmas:** Se programó una lógica que clasifica el estado del sistema en cuatro niveles:
 1. *Sistema OK:* Flujo > 95%, TDS bajos.
 2. *Riesgo Químico:* TDS > 500 ppm, Flujo > 90% (El sarro se está formando, se sugiere ablandador).
 3. *Obstrucción Leve:* Flujo entre 70% y 85% (Requiere limpieza química).
 4. *Alerta Crítica:* Flujo < 60% (Riesgo de taponamiento, requiere intervención mecánica).

6. Conclusión

El proyecto logró materializar con éxito un prototipo IoT de extremo a extremo (Hardware-Red-Software). Se demostró que, mediante la integración de sensores de bajo costo, protocolos de comunicación ligeros (MQTT) y un análisis lógico de variables cruzadas (TDS, Flujo y Temperatura), es completamente factible predecir la acumulación de incrustaciones calcáreas. El sistema cumple su promesa de valor: **hacer visible un problema invisible**, empoderando al usuario para tomar decisiones preventivas que protegen su infraestructura y economía.