

Diseño e implementación de nodos IoT de bajo costo para monitoreo de tanques de aceite en una Cooperativa Aceitera

Gastón Valdéz
Instituto Argentino de Radioastronomía
Berazategui, Argentina
gvaldez@iar.unlp.edu.ar

Augusto Donantueno
Instituto Argentino de Radioastronomía
Berazategui, Argentina
adonantueno@iar.unlp.edu.ar

Matías Contreras
Instituto Argentino de Radioastronomía
Berazategui, Argentina
mcontreras@iar.unlp.edu.ar

Martin Salibe
Instituto Argentino de Radioastronomía
Berazategui, Argentina
msalibe@iar.unlp.edu.ar

Elias S. Fliger
Instituto Argentino de Radioastronomía
Berazategui, Argentina
esfliger@iar.unlp.edu.ar

Resumen — El Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), con financiamiento del COFECYT Proyectos Federales de Innovación PFI2021, ha desarrollado una red de sensores inalámbricos IoT de bajo costo para la Cooperativa Aceitera La Matanza (CALM), como parte de una prueba piloto para modernizar la planta mediante la actualización tecnológica. Esta red tiene como objetivo principal monitorear los niveles de los tanques de aceite de girasol refinado, utilizando dispositivos IoT para la lectura de transductores de presión con lazo de corriente de 4-20 mA. Los datos recopilados se concentran y visualizan en un servidor para su posterior registro y análisis.

La red implementa una topología de mesh que permite la interconexión de dispositivos a través de WiFi, extendiendo el alcance de la red y manteniendo la comunicación entre nodos, incluso en caso de fallo de uno de ellos. Cada nodo envía los datos a través de la malla hasta el nodo raíz, que los retransmite mediante el protocolo MQTT a un servidor para su visualización en Node-RED.

El artículo se enfoca en el diseño y desarrollo del firmware de los nodos para establecer la red mesh WiFi, así como en los ensayos realizados y los datos obtenidos. En total, se han desarrollado 10 nodos equipados con un conversor analógico digital (ADC), un conversor de 4-20 mA a tensión y un microcontrolador (uC) ESP32.

Palabras clave — *redes mesh, IoT, industria, transferencia tecnológica, automatización.*

I. INTRODUCCIÓN

El sector oleaginoso argentino de soja y girasol es uno de los más competitivos a nivel mundial y representa una porción significativa de todas las exportaciones nacionales [1]. Sin embargo, mientras las empresas productoras tradicionales se mantienen competitivas, las cooperativas y empresas recuperadas enfrentan desafíos adicionales, como la falta de inversión en tecnología, lo que afecta su productividad [2].

El Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), con su experiencia en comunicaciones, electrónica y software, estableció un vínculo asociativo con la Cooperativa Aceitera La Matanza (CALM), impulsado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación y la Provincia de Buenos Aires. En este contexto, se presentó el proyecto de transferencia tecnológica financiado por el COFECYT, en el marco de los Proyectos Federales de Innovación PFI2021. El objetivo principal del proyecto es mejorar el sistema de instrumentación industrial actual e incorporar nuevas

tecnologías orientadas a la industria 4.0 [3], con el fin de aumentar la eficiencia del proceso y reducir los costos de producción.

La CALM aún enfrenta desafíos por resolver, como tecnología obsoleta, altos costos operativos y variabilidad en la calidad del producto final. Para abordar estas dificultades, el IAR propuso el diseño e implementación de una red de nodos IoT de bajo costo para monitorear los niveles de los tanques de aceite de girasol refinado. Estos nodos transmitirán los datos a través de una red mesh WiFi, que funcionará en paralelo con la instalación actual para reducir los costos de mantenimiento y minimizar los riesgos de fallas durante las pruebas.

Soluciones como la propuesta se han instalado en diferentes regiones de Latinoamérica y del mundo, con muy buenos resultados y experiencias [4, 5].

En las siguientes secciones, se detallará el diseño e implementación de los nodos IoT, descripción del hardware y firmware, así también como los ensayos realizados y trabajos futuros.

II. DISEÑO DEL SISTEMA

Para el diseño del sistema de monitoreo de los niveles de aceite en los tanques, se establecieron los siguientes requisitos y especificaciones:

- Lectura de los transductores de presión, con salida de 4-20 mA.
- Monitorear al menos 9 tanques de aceite refinado, de 200 m³ cada uno, y posibilidad de ampliación a otros 5 tanques de aceite crudo, Figura 1.
- Cobertura de un área aproximada de 1200 m².
- Visualización remota de los datos adquiridos en una plataforma web, utilizando mensajes MQTT.
- Bajo costo de implementación y mantenimiento.
- Escalabilidad y flexibilidad para futuras ampliaciones.
- Operación en paralelo y aislada del sistema de control existente, sin afectar el funcionamiento de la planta.

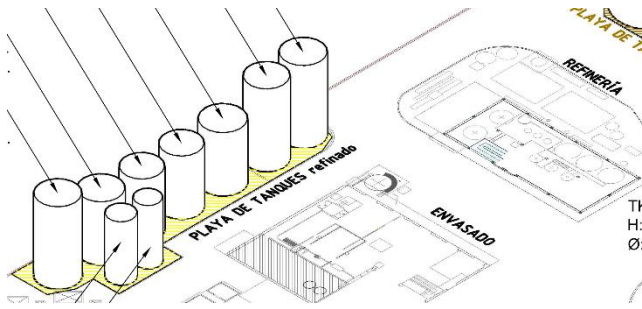


Figura 1: Plano general de la refinería y tanques de aceite refinado.

Como consecuencia, se propuso el despliegue de una red mesh WiFi IoT de bajo costo. Esta arquitectura consta de los siguientes componentes principales:

- **Nodos IoT:** Dispositivos encargados de la adquisición de datos de los transductores de presión y como repetidores de mensajes.
- **Red mesh WiFi:** Topología de red inalámbrica que permite la interconexión de los nodos IoT, extendiendo el alcance de la cobertura y manteniendo la comunicación en caso de fallas en uno o más nodos.
- **Infraestructura de red:** Puntos de acceso (AP), router y PC industrial, con capacidad de procesamiento para la comunicación entre el servidor y los nodos IoT.
- **Servidor:** Plataforma basada en Node-Red y MQTT que recibe los datos de los nodos IoT, incluyendo el procesamiento, almacenamiento y visualización.

III. DISEÑO DE HARDWARE

La Figura 2 muestra el diagrama en bloques de un nodo sensor IoT (SNIoT). Cada nodo se compone de los siguientes módulos:

- **Módulo conversor 4-20 mA a tensión:** Convierte la señal de lazo de corriente de 4-20mA proveniente del transductor de presión al rango de tensión de 0-5 V.
- **Conversor analógico-digital (ADS1015/1115):** Digitaliza la señal de tensión proveniente del módulo conversor de corriente. Posee una configuración de 12 o 16 bits, según el modelo del ADC, rango de ganancia de 6.144 V y muestreo de 8 SPS.
- **uC ESP32:** Plataforma de procesamiento con WiFi y BLE integrados. Procesa los datos digitales del ADC y conforma los mensajes MQTT con el formato JSON. Controla internamente la lógica de red mesh y la comunicación a través de WiFi.
- **Alimentación:** Suministra la tensión de alimentación de 5 V a todos los componentes del nodo IoT.
- **Transductor 4-20 mA:** Elemento externo al NIoT, que da funcionalidad al SNIoT. En este caso se emplea un transductor de presión de 0-1 bar, aunque puede ser extensible a diferentes unidades de medida.
- **Soporte mecánico:** El nodo comprende además una caja de aluminio estanca, una antena WiFi, conectores, placa PCB y fijaciones.

La integración modular de estos componentes permite una rápida iteración entre el diseño y los requerimientos propios

de la Cooperativa, así como de la arquitectura y las imposiciones externas, tanto económicas como comerciales.

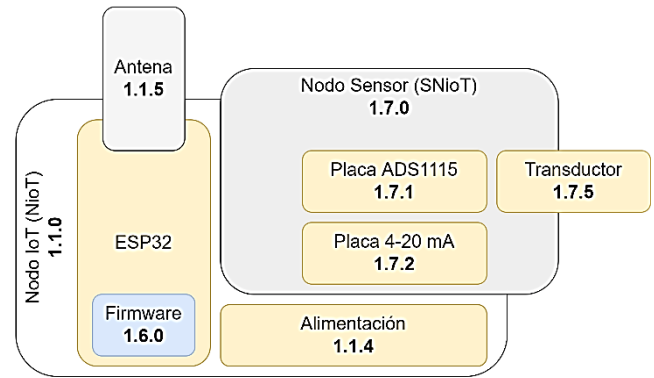


Figura 2: Diagrama en bloques de los módulos y componentes del SNIoT.

IV. DISEÑO DE FIRMWARE

A. Implementación de la red mesh Wi-Fi

La formación y autoorganización de la red mesh Wi-Fi se basa en una lógica de votación distribuida, provista por el framework ESP-MDF del ESP32 [6]. Cada nodo evalúa la intensidad de la señal del punto de acceso (AP), y el nodo con la mejor calidad de señal se establece como nodo raíz (root). El resto de los nodos se conectan al root, formando una topología jerárquica tipo árbol. Los dispositivos toman diferentes roles según su dependencia en la red: un dispositivo node se conecta a un root, mientras que un leaf sólo puede conectarse a un node. La profundidad de niveles en la jerarquía depende de la configuración definida para la red.

Si un nodo root falla, se inicia un nuevo proceso de votación entre los nodos restantes para seleccionar un nuevo root y reorganizar la red automáticamente. Si un nodo no puede conectarse a la red, queda en modo idle, esperando la comunicación.

B. Máquina de estados

El firmware implementa una máquina de estados que gestiona a cada nodo dentro de la red, ver Figura 3. A medida que los nodos se unen a la red, se les asignan diferentes roles según su condición:

- **Idle:** Estado inicial del nodo o sin conexión a la red.
- **Buscando root:** Evalúa la intensidad de la señal del AP.
- **Root:** Nodo con mejor calidad de señal asume como raíz, coordina y enruta el tráfico de mensajes.
- **Node:** Cualquier nodo que se conecta al nodo raíz.
- **Leaf:** Último nodo en la cadena de la red, sólo conecta a un node.

La máquina de estados transiciona estados en función de los eventos generados por el framework ESP-MDF. Estos eventos incluyen:

- **MESH_STARTED:** La red mesh se ha inicializado y está lista para unirse.
- **ROOT_CONNECTED:** El nodo se ha conectado correctamente al nodo raíz.
- **ROOT_FAILED:** El nodo raíz ha fallado y se debe iniciar una nueva elección de nodo raíz.

- **TABLE_CHANGE:** La topología de la red mesh ha cambiado, como la unión de un nuevo nodo o la salida de un nodo existente.

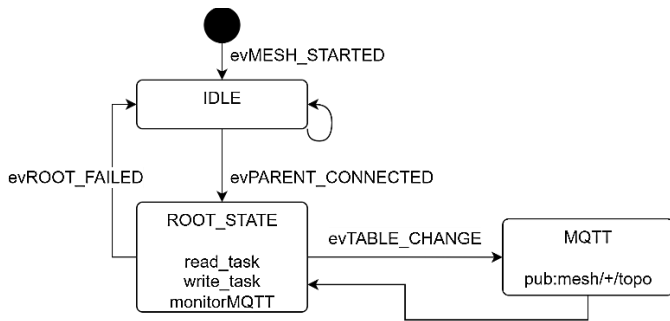


Figura 3: Máquina de estados del ESP-MDF.

C. Inicialización y operación

Cada nodo sigue un flujo de inicialización hasta entrar en operación, Figura 4. Se ejecutan una serie de tareas y colas de mensajes según:

- **Selección NioT o SNIoT:** El jumper del puerto GPIO23 anula el ADC, si está a VCC, o inicializa el ADC, si está conectado a GND.
- **Lectura ADC:** Lee los valores del ADC, enviándolos a través de una cola de mensajes al root.
- **Escritura de nodo:** Recibe los valores de la cola de mensajes, conforma el mensaje MQTT y los transmite al nodo root.
- **Lectura de nodo:** Atiende todas las comunicaciones recibidas por el nodo.
- **Depuración:** Monitorea y reporta el rol actual del nodo mediante LEDs indicadores.

Diagrama de secuencia simplificado:

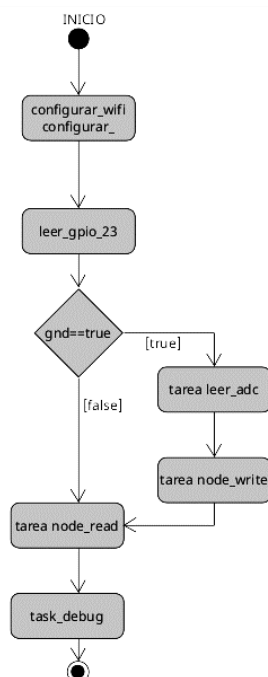


Figura 4: Flujo de inicio del firmware.

D. Interfaz Node-Red con MQTT

El nodo root envía los datos recolectados de la red a un broker MQTT (en este caso, Mosquitto). Un flujo de Node-Red, desarrollado específicamente para el proyecto, se suscribe a este tópico MQTT, recibe los datos y los procesa para visualizarlos en una interfaz web, permitiendo el monitoreo remoto de los niveles de los tanques y otras variables del proceso, Figura 5. Esta arquitectura cierra el lazo de comunicación desde el transductor de presión hasta la pantalla del usuario, desde donde se gestiona la salida del proceso de refinado.

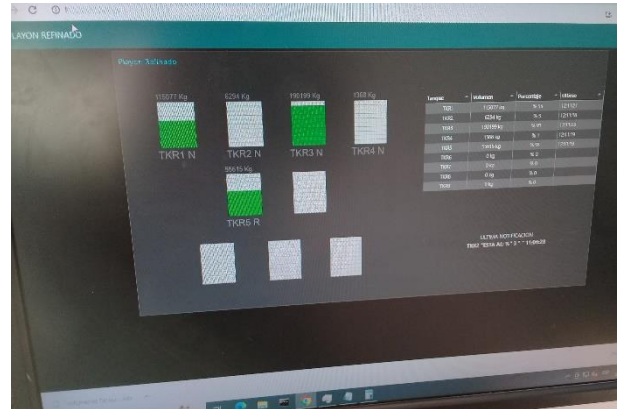


Figura 5: Interfaz de usuario basada en Node-RED, donde se aprecian los tanques de aceite y sus niveles.

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Durante el desarrollo del proyecto se ejecutaron una serie de ensayos, tanto en planta como en laboratorio, para evaluar el desempeño de la red y los NIoT. Estos ensayos demostraron que el sistema de monitoreo IoT del nivel de los tanques es una solución viable y confiable, presentando un buen desempeño en términos de precisión, escalabilidad, tolerancia a fallos y recuperación ante interrupciones.

Ensayo en Planta, Figura 6:

- Se realizaron diversas pruebas a lo largo de un día, empleando 5 nodos y un router en diferentes posiciones y ubicaciones. Se cubrieron unos 1.200 m² y una distancia en línea recta de hasta 90 m.
- Se identificaron problemas relacionados con el cableado inadecuado de los nodos y la cobertura deficiente de la señal WiFi.

Ensayos en Laboratorio:

- Se realizaron múltiples ensayos para evaluar el funcionamiento de los nodos en diferentes condiciones operativas y ambientales. En total, los nodos acumularon 20 días de funcionamiento, con más de 1.5 millones de mensajes transmitidos.
- Permitieron encontrar la configuración óptima de distancias, distribución (de 40 a 1200 m²) y calidad de la señal WiFi para garantizar la adquisición de datos en tiempo real (ventana de 10 s entre mensajes y latencia promedio de hasta 2 s).
- Los dispositivos mostraron resistencia a altas temperaturas y humedad (> 65 °C y 95 % HR), pero se detectó la necesidad de incrementar la potencia de la señal WiFi en condiciones extremas.

- Se identificaron problemas de desconexión repentina de algunos nodos dentro de la red mesh, así como paquetes perdidos en la comunicación.

Se implementaron soluciones para mejorar la estabilidad de la red, aunque persisten desafíos con nodos ubicados en condiciones marginales. En la Figura 7, se detallan los eventos con interrupciones mayores a 100 s, el color de los puntos representa el rol del nodo (azul: root, rojo: node, amarillo: leaf) y con una escala de tiempo de 12 hs/div. Sobre el margen derecho, se observan las interrupciones provocadas por la desconexión forzada de los nodos de la red, al concluir cada ensayo.



Figura 6: Uno de los nodos SNIoT durante la prueba en planta.

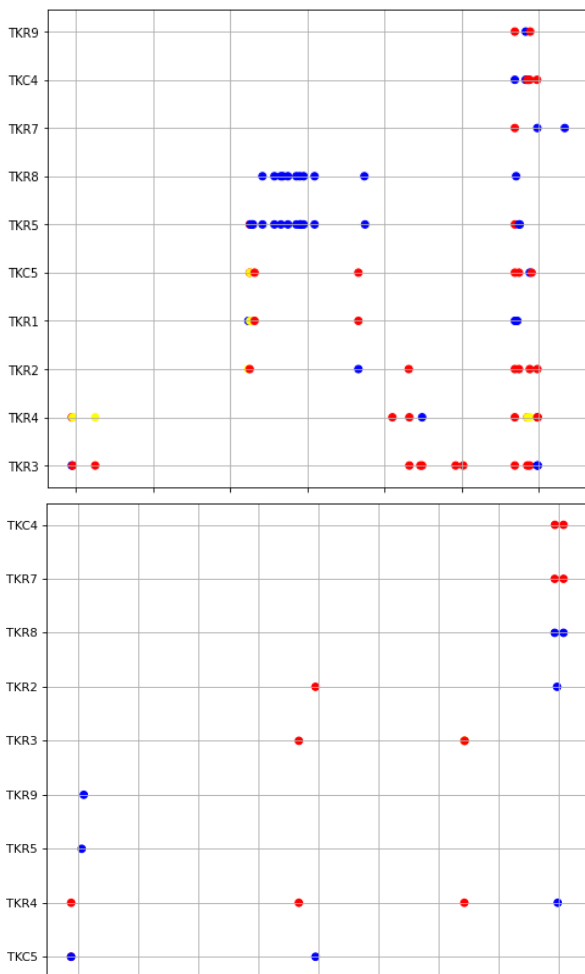


Figura 7: Comparativa de desempeño de la red entre ensayos. Gráfico superior: red inestable con múltiples desconexiones. Gráfico inferior: mejora de la red, con desconexiones marginales.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El proyecto de implementación de una red de sensores IoT en la CALM ha permitido avanzar significativamente en la modernización y mejora de los procesos de monitoreo en el proceso de refinamiento del aceite.

Como resultado del diseño, desarrollo y ensayos, se pudo validar el funcionamiento general del sistema, así como la efectividad de la red de sensores en la adquisición de datos en tiempo real, así como la robustez de la red y la confiabilidad de la transmisión de datos, empleando componentes de bajo costo.

Es de vital importancia encontrar la correcta ubicación, distribución y configuración de la red, para evitar problemas de conectividad y garantizar la adquisición de datos en tiempo real.

De esta manera, se determinó que el sistema se encuentra en condiciones de instalarse en los 9 tanques de aceite refinado, con la posibilidad de sumar otras variables del proceso de manera transparente para usuario.

Como trabajo futuro, además de la instalación de la red en los tanques de aceite refinado, se propone incorporar la medida de caudal másico de entrada y salida del proceso, para monitorear el balance del producto. Además, el sistema tiene la capacidad para sumar la medición de nivel de los tanques de aceite crudo, cuya disponibilidad dependerá de las condiciones de operación de la planta. Todas estas mejoras suponen una continuidad en las mejoras de las capacidades del hardware, así como de optimización y ampliación del firmware, orientados a un mejor desempeño y rendimiento.

En resumen, el proyecto ha sentado las bases para una modernización significativa de los procesos de monitoreo en la Cooperativa Aceitera La Matanza, y se espera que con el trabajo futuro se logren alcanzar niveles aún más altos de eficiencia y calidad en la producción de aceite.

REFERENCIAS

- [1] R. M. Amé, "Evaluación de la competitividad nacional del sector oleaginoso argentino de la soja y el girasol", Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2010.
- [2] Lavaca, "La combustión del aceite: Cooperativa Aceitera La Matanza", nota, enero 2023.
- [3] A. Erbes, G. Gutman, P. Lavarello y V. Robert, "Industria 4.0 oportunidades y desafíos para el desarrollo productivo de la provincia de Santa Fe", Documentos de Proyectos (LC/TS.2019/80), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2019.
- [4] D. Nuñez-Agurto, E. Benavides-Astudillo, G. Rodríguez y D. Salazar, "Propuesta de una Plataforma de Bajo Costo Basada en Internet de las Cosas para Agricultura Inteligente", Cumbres, vol. 6, no. 1, pp. 53-66, 2020.
- [5] T. Piamba, L. Zambrano, L. Montañó-Ruales y F. Rojas-Gonzales, "Implementación de un sistema de monitoreo IoT aplicado a una piscicultura de trucha," Informador Técnico, vol. 85, 2020, pp. 10-23850/22565035.2937.
- [6] Espressif Systems, #ESP32 Technical Reference Manual#, ESP32 TRM (Version 5.0), 2023.