



POSGRADOS

Maestría en

MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN PARA LA INDUSTRIA 4.0.

RPC-SO-37-NO-653-2023

Opción de Titulación:

Artículos Profesionales de Alto Nivel

Tema:

DESARROLLO DE UNA ARQUITECTURA IIOT DE
ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS PARA
EL MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES FÍSICAS
EMPLEADAS EN UN PROCESO DE PRODUCCIÓN

Autor

Zeuzky Daniela Guayasamín Jacho

Director:

Byron Ricardo Zapata Chancusig

Quito – Ecuador

2025

Autor:



Zeuzky Daniela Guayasamin Jacho.

Ingeniera en mecatrónica

Candidato a Magíster en automatización para la industria 4.0. por la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Quito.

zguayasamin@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Byron Ricardo Zapata Chancusig.

Ingeniero electrónico.

Magister en automatización y control electrónico industrial.

bzapata@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2025 Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO – ECUADOR – SUDAMÉRICA

ZEUZKY DANIELA GUAYASAMIN JACHO.

DESARROLLO DE UNA ARQUITECTURA IIOT DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES FÍSICAS EMPLEADAS EN UN PROCESO DE PRODUCCIÓN.

Desarrollo de una arquitectura IIoT de adquisición y procesamiento de datos para el monitoreo y control de variables físicas empleadas en un proceso de producción.

Z.Guayasamin

Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador

Resumen

La integración de tecnología IIoT permite transformar entornos industriales mediante monitoreo inteligente, conectividad continua y análisis descentralizado. Este estudio presenta una arquitectura IIoT para el monitoreo y control en tiempo real de la temperatura en un área de almacenamiento de materiales inflamables, utilizando un sensor de temperatura Ex, un PLC Siemens S7-1200 y una pasarela SIMATIC IoT2040. El sistema emplea edge computing y comunicación segura vía MQTT con la nube Insight Hub. Se estableció un umbral crítico de temperatura de 30°C, límite de seguridad ante el riesgo de explosión por peróxido de hidrógeno, y se implementó un sistema de alertas por Telegram para notificaciones y consultas remotas. El dashboard integrado mostró una latencia entre 250ms y 1s, y durante pruebas reales el sistema alcanzó una latencia de 1 segundo, adecuada para su operación. Los resultados validan la arquitectura en términos de interoperabilidad, escalabilidad y ciberseguridad, cumpliendo con los principios de la Industria 4.0.

Abstract

The integration of Industrial Internet of Things (IIoT) technology enables the transformation of industrial environments through intelligent monitoring, continuous connectivity, and decentralized analysis. This study presents the design and implementation of an IIoT architecture for real-time temperature monitoring and control in a storage area for flammable raw materials. The system uses an Ex-rated temperature sensor, a Siemens S7-1200 PLC, and a SIMATIC IoT2040 gateway. It incorporates edge computing and secure MQTT communication with the Insight Hub cloud platform. A critical temperature threshold of 30°C was established, given the explosion risk posed by hydrogen peroxide at this level. To address this, a Telegram-based notification system was developed to provide immediate alerts and remote status access. The integrated dashboard displayed latency between 250 ms and 1 s; during real operating conditions, total system latency was measured at 1 second, which proved suitable for operational needs. The results validate the proposed architecture, meeting the interoperability, scalability, and cybersecurity requirements of Industry 4.0.

Palabras clave— IIoT, edge computing, monitoreo industrial, pasarela inteligente, MQTT, Industria 4.0, seguridad operativa, EDA, materias inflamables.

1 Introducción

La Industria 4.0 ha transformado profundamente el panorama industrial, impulsada por el desarrollo de tecnologías emergentes que facilitan la automatización, digitalización y optimización de los procesos de producción (1). Este cambio está marcado por la integración de sistemas ciberfísicos, la computación en la nube, el análisis de grandes volúmenes de datos y, especialmente, el Industrial Internet of Things (IIoT), que desempeña un papel clave en la mejora de la eficiencia operativa y la calidad del proceso industrial (2).

El IIoT posibilita la interconexión de dispositivos, sensores y máquinas en tiempo real, proporcionando una visibilidad sin precedentes de los procesos. Dicha visibilidad facilita la recolección de datos precisos y la toma de decisiones informadas, lo que redundará en una optimización de los recursos y en la mejora continua de las operaciones (3). Mediante plataformas en la nube y técnicas de análisis avanzado, el IIoT no solo permite monitorizar las condiciones operativas de los sistemas, sino también anticipar y prevenir fallos mediante mantenimientos predictivos basados en datos históricos y en línea (4).

A pesar de estos beneficios, muchas empresas se enfrentan a obstáculos al adoptar dichas tecnologías. Entre los retos más frecuentes se encuentran la carencia de infraestructura adecuada, la integración de sistemas heterogéneos y la necesidad de garantizar la calidad y fiabilidad de los datos capturados (5). Además, la gestión de los elevados volúmenes de datos generados requiere soluciones de procesamiento y almacenamiento eficientes, con mecanismos que aseguren la ciberseguridad y la interoperabilidad (6).

1.1 Peróxido de hidrógeno líquido

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un compuesto inorgánico de carácter oxidante cuya estructura molecular se compone de dos átomos de hidrógeno y dos de oxígeno. En su forma líquida y a concentraciones industriales, es considerado un agente altamente reactivo y termolábil, capaz de descomponerse exotérmicamente a temperaturas elevadas, generando grandes volúmenes de oxígeno gaseoso. Esta descomposición puede iniciarse de manera acelerada a partir de los $30^\circ C$, umbral térmico identificado como crítico en zonas de almacenamiento industrial, especialmente en espacios confinados donde la acumulación de oxígeno incrementa el riesgo de incendio o explosión por sobrepresión (7).

Desde el punto de vista toxicológico, el contacto directo con H_2O_2 concentrado puede provocar quemaduras químicas en piel y mucosas, daños oculares irreversibles, e intoxicación respiratoria al inhalar vapores, pudiendo desencadenar efectos agudos como edema pulmonar o asfixia (8). Estas propiedades hacen imprescindible la implementación de sistemas automatizados de monitoreo continuo y control activo en entornos donde se manipule esta sustancia.

1.2 Arquitectura en capas de la industria 4.0

Se adopta un modelo de referencia en capas, común en entornos industriales, el cual segmenta la arquitectura en diferentes niveles, facilitando la escalabilidad, seguridad y eficiencia del sistema. Las capas principales son (3):

- **Capa de percepción (Sensórica y Adquisición de Datos:** Se compone de sensores físicos (temperatura, presión, flujo, etc.) que capturan los datos del proceso de producción. Se utilizan dispositivos de adquisición como PLCs o módulos específicos como SIMATIC IOT2040 para digitalizar y enviar los datos a los sistemas de procesamiento.
- **Capa de comunicación:** Responsable de la transmisión de datos entre los dispositivos de campo y los sistemas superiores en esta capa se emplea protocolos como MQTT, OPC UA, Modbus TCP/IP y Ethernet Industrial para garantizar una comunicación segura y en tiempo real.
- **Capa de procesamiento y computación:** Se utilizan plataformas Edge Computing para el preprocesamiento local de los datos, reduciendo la latencia y optimizando el uso

del ancho de banda. Para esta capa se utiliza servidores en la nube o Fog Computing que permiten el almacenamiento masivo y análisis avanzado con tecnologías como Big Data, IA y Machine Learning (3).

1.3 Pasarela inteligente

Un dispositivo de pasarela inteligente permite conectar sistemas de campo como sensores y actuadores con plataformas de procesamiento o almacenamiento, ya sea en la nube o servidores locales. Su rol es fundamental para gestionar y transmitir datos de manera eficiente, asegurando la integración entre dispositivos con diferentes protocolos. Estas pasarelas también son capaces de realizar análisis locales mediante tecnologías de Edge Computing, mejorando la eficiencia antes de enviar los datos procesados a niveles superiores. Además, ofrecen seguridad avanzada en la comunicación, asegurando la autenticidad de los dispositivos conectados y la encriptación de datos transmitidos (9).

Características principales de las pasarelas inteligentes son:

- **Conectividad múltiple:** Soporta diversos protocolos como MQTT, Modbus, OPC UA, entre otros.
- **Procesamiento local:** Utiliza tecnologías de Edge Computing para filtrar o analizar datos antes de enviarlos a la nube.
- **Seguridad:** Garantiza la protección de datos mediante encriptación y autenticación de dispositivos.
- **Escalabilidad:** Puede adaptarse a sistemas de mayor complejidad.

1.4 Computación a la nube

Cloud computing en inglés, es un modelo que permite el acceso a recursos informáticos a través de internet, en lugar de depender de recursos locales o en sitio. En lugar de tener servidores, almacenamiento, bases de datos u otros dispositivos físicos en las instalaciones de una empresa o usuario, se accede a estos recursos a través de proveedores de servicios en la nube, como Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud Platform, entre otros. (6).

El objetivo de este artículo es presentar el desarrollo de una arquitectura IIoT centrada en la adquisición y procesamiento de datos para el monitoreo y control de variables físicas en procesos de producción industrial. La propuesta se fundamenta en una arquitectura en capas que integra dispositivos de adquisición de datos, pasarelas inteligentes y plataformas de análisis en la nube (10; 11). Con ello se busca mejorar la eficiencia operativa, garantizar un monitoreo seguro y habilitar la toma de decisiones en tiempo real, minimizando los riesgos de interrupciones y pérdidas de producción.

En las siguientes secciones, se abordarán los antecedentes teóricos que sustentan el uso de IIoT en la industria, las características de las tecnologías empleadas en el diseño de la arquitectura propuesta, así como los resultados obtenidos durante la implementación y pruebas realizadas. Finalmente se presentará las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

2 Trabajos relacionados

En la actualidad existen diferentes estudios donde se aplica la tecnología de IOT a nivel industrial y a nivel eléctrico, para la adquisición, análisis, procesamiento y predicción de datos. A continuación

se presentan diferentes trabajos enfocados a la aplicación de IOT a nivel industrial.

En (12) se propone una arquitectura IIoT modular que integra sensores, PLCs y pasarelas inteligentes con plataformas cloud utilizando herramientas de código abierto como Node-RED, Apache Cassandra y Mosquitto MQTT. Se destacan dos aplicaciones reales: la primera, un sistema de monitoreo genérico donde sensores simulan variables industriales que se procesan y visualizan en tiempo real; la segunda, una planta de energía de ciclo combinado simulada con datos históricos y scripts en Python. Ambas implementaciones demuestran una integración efectiva entre dispositivos industriales y la nube. Además, se incorpora un SOC (Security Operations Center) que permite la detección de anomalías y el cifrado de datos. La latencia se midió entre el envío del dato y su visualización en dashboard, resultando en valores aceptables menores a 150 ms. El estudio valida que es posible implementar soluciones IIoT industriales seguras, escalables y de bajo costo, aprovechando tecnologías libres y entornos virtualizados

En (13) se presenta una plataforma que integra y gestiona datos energéticos de un edificio inteligente. En el borde, un Data Collector modular captura 4878 variables (~ 1800 val/s) provenientes de la automatización, contadores de calidad de energía, planta fotovoltaica, meteorología y mercados eléctricos; normaliza su formato y filtra la información sensible antes de almacenarla localmente y remitir un subconjunto al backend IoT-Ticket para visualización y análisis. Esta arquitectura edge-cloud reduce la latencia a decenas de milisegundos, esencial para controles rápidos como la gestión de picos mediante baterías, y evita la saturación de la red. Las primeras aplicaciones incluyen: pronóstico de demanda con Prophet, diagnóstico de distorsión mediante Random Forest, simulación de intercambio energético con blockchain y paneles web en tiempo real para los usuarios. Las lecciones subrayan la importancia de estandarizar metadatos, coordinar actores y seleccionar/comprimir datos en entornos comerciales. La plataforma demuestra el potencial del edificio como fuente de flexibilidad y servicios avanzados para la red.

En (11) se presenta un gateway IoT de bajo costo que convierte una piscina en un entorno inteligente. La solución emplea un Raspberry Pi 3 como nodo de agregación y un Arduino Uno con sensores de temperatura y nivel de agua, temperatura-humedad ambiente, luminosidad y calidad del aire, más relés para bombas y luminarias. Los datos se transfieren por USB al Pi y, mediante MQTT, se publican en un servidor MySQL; una plataforma web muestra históricos y permite accionar los dispositivos. La arquitectura modular admite otros protocolos (p. ej. RS-485 o ZigBee) y mantiene latencias reducidas. Las pruebas demostraron funcionamiento estable: el usuario encendió luces y activó bombas desde la web mientras recibía lecturas coherentes (22°C , 39% HR). El trabajo valida que, con hardware abierto y software ligero, es posible implementar monitorización y control remotos fiables a coste mínimo, y abre la vía a mejoras futuras como cifrado SSL, reglas automáticas y algoritmos de inteligencia artificial.

El artículo (14) presenta una revisión crítica del ecosistema Internet of Things (IoT) como base para proyectos en la Patagonia Austral. A partir de 58 fuentes científicas recientes, los autores estructuran los hallazgos en cinco ejes: aplicaciones, clasificadas en Smart Cities, IoT industrial, entornos inteligentes y casos personales/futuristas, destacando oportunidades locales en agricultura, ganadería y monitoreo ambiental; arquitecturas de 3–6 capas y la tendencia fog/edge para reducir latencias; protocolos clave—MQTT, CoAP, AMQP, DDS (aplicación) y RPL, 6LoWPAN (red)—cuya combinación depende del caso de uso; tecnologías inalámbricas de bajo consumo (LoRaWAN, Sigfox, ZigBee, Bluetooth LE, NFC) aptas para extensiones rurales; vacíos legales en privacidad y seguridad. El resultado es un marco de referencia que acelera la curva de aprendizaje y orienta el desarrollo de soluciones verticales basadas en computación fog y modelos IoT adaptados al contexto patagónico.

En (4) se muestra una arquitectura que integra un sistema SCADA-IoT de bajo coste para un conjunto fotovoltaico experimental. Dos microcontroladores ESP32 cumplen funciones complementarias: el ESP32-E adquiere tensiones y corrientes del módulo FV, la batería y la carga mediante divisores de tensión y sensores Hall ACS712, promedia cada 30 s y gobierna un relé que enciende la lámpara sólo cuando $V_{bat} > 13\text{V}$; además, envía los datos vía MQTT a Arduino Cloud y por HTTP al ESP32-S3. El ESP32-S3 reenvía la información a ThingSpeak y publica imágenes en vivo de la carga con una cámara OV2640, añadiendo verificación visual. El empleo simultáneo de ambas nubes proporciona redundancia: durante una parada programada de Arduino Cloud, ThingSpeak siguió registrando sin pérdidas. En 20 días de pruebas se midieron 0–16 V en

el módulo y hasta 4.42 A en la carga, corroborado con multímetros externos. Todo el sistema consume 2.38 W y utiliza hardware y plataformas completamente abiertas.

3 Metodología

Para este trabajo se plantea el desarrollo de la arquitectura IIoT aplicado a la bodega de almacenamiento de materia prima de una industria química, para lo cual se desarrolla la metodología que se representa en la Figura 1.

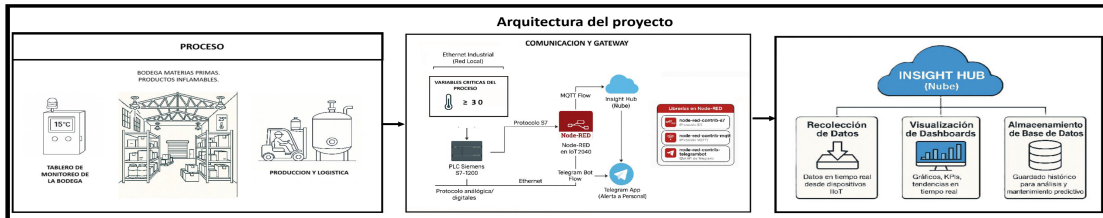


Figure 1: Arquitectura de la aplicación IIOT para almacenamiento de materia prima.

Esta metodología se fundamenta en un enfoque modular y escalable, orientado a la adquisición, procesamiento y visualización de datos de variables físicas críticas en un entorno de producción industrial.

3.1 Arquitectura IIoT

La arquitectura adoptada como se visualiza en la Figura 2, se basa en el modelo de referencia IIoT en capas, que segmenta las funciones del sistema en niveles funcionales para garantizar escalabilidad, seguridad y eficiencia en el procesamiento de datos (15). Las capas de la arquitectura IIOT se describen a continuación:

- **Capa de percepción:** Utiliza sensores físicos (temperatura) conectada a un PLC Siemens S7-1200 y a la pasarela IoT2040, encargada de capturar variables relevantes del entorno (16).
- **Capa de comunicación:** Se implementaron protocolos industriales como MQTT y Ethernet para la transmisión eficiente de datos entre dispositivos y plataformas de supervisión .
- **Capa de procesamiento:** Mediante tecnologías de Edge Computing, la pasarela IoT2040 filtra y preprocesa los datos localmente antes de enviarlos a la nube (17).
- **Capa de aplicación:** Se utilizó la plataforma Insight Hub (MindSphere, Siemens) para el almacenamiento en la nube, análisis de datos, generación de reportes y visualización mediante dashboards interactivos (18).

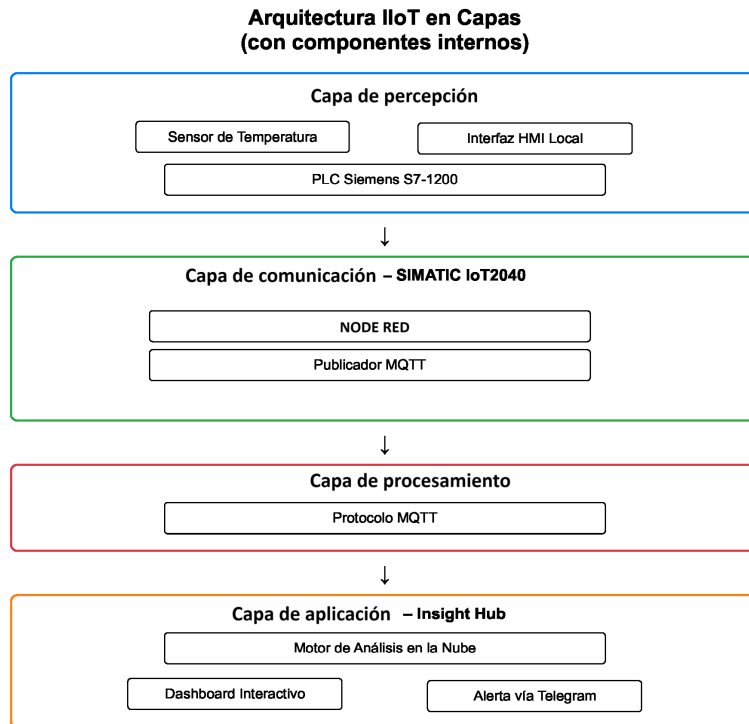


Figure 2: Arquitectura IIoT en Capas.

3.2 Capa de percepción

3.2.1 Descripción del proceso

El sistema desarrollado se implementa en el contexto de una industria química, específicamente en el área de almacenamiento de materias primas críticas e inflamables. Como se representa en la Figura 3, Los cuales son insumos fundamentales en la formulación de distintas líneas de productos químicos. Estas materias primas, antes de ser utilizadas en los procesos de reacción, son transferidas a los reactores donde se someten a mezclas controladas. La calidad del producto final depende de forma directa de las condiciones físico-ambientales bajo las cuales se almacenan dichos insumos.

Donde el almacenamiento seguro de materias primas inflamables constituye una etapa crítica dentro de la cadena de producción. Sustancias como el peróxido de hidrógeno H₂O₂ en su forma líquida presentan una alta sensibilidad a las condiciones ambientales, especialmente a la temperatura. Este compuesto es térmicamente inestable y puede descomponerse violentamente al exponerse a calor excesivo, generando oxígeno gaseoso en grandes volúmenes, lo que incrementa el riesgo de incendio y explosión por sobrepresión en espacios confinados (19). La ausencia de un sistema de monitoreo y control continuo de temperatura en este tipo de entornos puede desencadenar eventos catastróficos. En escenarios sin intervención oportuna, la descomposición del peróxido puede liberar vapores tóxicos o inflamables, con consecuencias directas en la salud del personal, incluyendo asfixia, quemaduras químicas, ahogamiento por gases densos, e incluso la muerte en casos extremos (20). Además de los riesgos humanos, la pérdida de materia prima por desestabilización térmica representa una afectación económica severa, al interrumpir la producción, afectar la calidad del producto final y comprometer la cadena de suministro industrial (20). Considerando el carácter altamente reactivo y sensible a la temperatura de ciertos compuestos, resulta imprescindible contar con una infraestructura tecnológica que garantice monitoreo constante, control automático y trazabilidad de las condiciones de almacenamiento. Para ello, se dispone de un PLC Siemens S7-1200, que actúa como unidad central de adquisición y control de variables físicas. En este contexto, el monitoreo en tiempo real mediante tecnologías del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) permite reducir significativamente los riesgos operativos. La incorporación de una pasarela inteligente como el SIMATIC IoT2040, permite detectar

aumentos críticos de temperatura y activar protocolos automáticos de respuesta, como sistemas de enfriamiento, alarmas locales o notificaciones remotas (21; 16). Complementariamente, el uso de plataformas de análisis en la nube (como Insight Hub de Siemens) facilita el seguimiento histórico de la variable y permite implementar modelos de predicción para prevenir condiciones de riesgo antes de que se manifiesten (22).

Este enfoque preventivo basado en IIoT no solo mitiga las consecuencias inmediatas de una reacción térmica, sino que garantiza la continuidad operativa en zonas clasificadas y la protección de recursos humanos y materiales en entornos de alta peligrosidad.

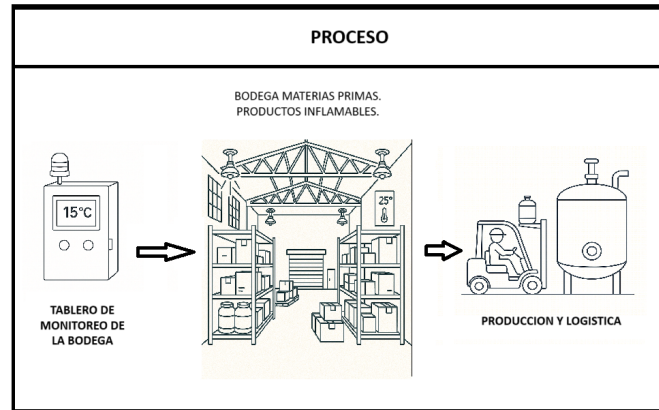


Figure 3: Representación del proceso de almacenamiento de materia prima.

El sistema implementado se basa en una arquitectura IIoT por capas, orientada al monitoreo y control en tiempo real de la temperatura en un área crítica de almacenamiento de materias primas inflamables. Estas sustancias son insumos esenciales para procesos térmicos posteriores en calderos, donde se ejecutan operaciones de mezcla, vaporización y reacción química con compuestos altamente combustibles. El control de temperatura se vuelve fundamental, ya que se conoce el rango óptimo en el cual los productos se mantienen estables y no presentan riesgo de reacción.

Para ello, se integran sensores industriales conectados a un PLC Siemens S7-1200, enlazado con una pasarela inteligente SIMATIC IoT2040 que transmite datos mediante el protocolo MQTT. El sistema aplica procesamiento local (Edge Computing) para detectar condiciones críticas de forma inmediata y envía los datos a la nube (Insight Hub), donde se almacenan, analizan y visualizan a través de dashboards. Además, se generan alertas automáticas vía Telegram ante desviaciones peligrosas, lo que permite mitigar riesgos de accidentes, proteger al personal y garantizar la continuidad operativa en áreas clasificadas (16).

3.3 Componentes del proceso

El proceso se compone de diversos dispositivos y plataformas que trabajan en conjunto para garantizar el monitoreo eficiente y seguro de las condiciones del entorno industrial (23). El sistema de monitoreo implementado combina sensores industriales certificados, equipos de automatización y herramientas digitales para garantizar seguridad en zonas clasificadas con riesgo de incendio o explosión, como áreas de almacenamiento de materias primas inflamables.

A continuación se describen los componentes esenciales:

- **Sensor de temperatura (ExTemp):** Se utiliza el ExTemp Sensor de Temperatura por Infrarrojos Intrínsecamente Seguro, diseñado para entornos peligrosos. Este dispositivo opera en un rango de -20°C a 1000°C , cuenta con certificaciones ATEX e IECEx (Zona 0 para gas y Zona 20 para polvo), y emplea una salida de 4–20 mA alimentada por lazo, lo cual lo hace adecuado para su integración directa con PLCs industriales (24).
- **PLC siemens S7-1200:** Este controlador lógico programable permite gestionar señales de entrada de sensores y activar sistemas de respuesta (por ejemplo, alarmas, aspersores, ventilación o mecanismos contraincendios). Ofrece módulos de entradas/salidas digitales y analógicas, soporte para protocolos industriales como PROFINET y Modbus TCP/IP, y programación mediante TIA Portal (25).
- **HMI Siemens SIMATIC KTP400 Basic Panel:** Interfaz local que permite a los operadores visualizar en tiempo real variables como temperatura, gas y estado del sistema. Cuenta con una pantalla TFT de 4.3 pulgadas (480×272 px), interfaz táctil resistiva y comunicación vía PROFINET. Se integra directamente con el PLC mediante TIA Portal, facilitando una interacción eficiente con el sistema en campo (26).
- **Pasarela SIMATIC IoT2040:** Esta pasarela actúa como nexo entre los sensores/PLC y la nube. Posee procesador Intel Quark x1020, Profinet, y es compatible con Node-RED, MQTT y OPC UA. Además de la conectividad, permite realizar procesamiento local (edge computing) para filtrar y reducir el volumen de datos antes de transmitirlos a la nube (22; 27).
- **Plataforma Insight Hub (MindSphere – Siemens):** Plataforma en la nube para la gestión y análisis de datos industriales. Su licenciamiento se realiza por suscripción anual, con paquetes básicos desde aproximadamente \$500 USD por activo/año. El costo puede variar según la región y número de dispositivos conectados. Proporciona almacenamiento seguro, dashboards personalizables, integración con sensores y PLCs, así como capacidades analíticas e inteligencia artificial (28).
- **Telegram (API Bot):** Se emplea como canal de notificación remota utilizando bots integrados en Node-RED. Esta herramienta permite enviar alertas instantáneas a dispositivos móviles ante condiciones de riesgo, y su uso es gratuito. Su integración en entornos IIoT se ha validado en arquitecturas de bajo costo con resultados eficaces en comunicación en tiempo real (15; 29).

3.4 Monitoreo y Control Local

El PLC Siemens S7-1200 gestiona las señales de los sensores de temperatura. Este dispositivo procesa los datos recibidos y activa los sistemas de control correspondientes si los valores de los parámetros exceden los umbrales predefinidos.

El sistema de monitoreo y control implementado establece un umbral crítico de temperatura de 30 en el área de almacenamiento de materias primas inflamables. Este umbral ha sido definido con base en las características térmicas del compuesto almacenado como es el peróxido líquido, los cuales presentan riesgos de descomposición violenta o ignición a temperaturas elevadas.

Cuando la temperatura medida por el sensor ExTemp supera este umbral, el PLC Siemens S7-1200 ejecuta automáticamente una serie de acciones de seguridad programadas en el entorno TIA Portal. Estas incluyen:

- Activación de alarmas visuales balizas luminosas y sonoras sirenas industriales.
- Envío de una señal lógica de salida para la activación del sistema contraincendios del recinto.

Este enfoque garantiza una respuesta oportuna ante condiciones térmicas peligrosas, alineado con las prácticas recomendadas en sistemas de seguridad instrumentados (SIS) para la industria química (25).

Un HMI está instalado en el sitio, proporcionando a los operadores una visualización en tiempo real de las condiciones del cuarto. A través de esta interfaz, los operadores pueden monitorear los parámetros críticos y tomar decisiones rápidas en caso de ser necesario, garantizando una respuesta inmediata ante posibles riesgos.

3.4.1 Lógica programada del sistema de monitoreo

El pseudocódigo 1 se representa el sistema, la cual fue desarrollada en el PLC Siemens S7-1200 e integrada con la pasarela inteligente SIMATIC IoT2040, alarmas físicas locales y un sistema de notificaciones automáticas vía Telegram. Este diseño lógico permite una respuesta inmediata ante condiciones críticas y asegura la continuidad del monitoreo mediante infraestructura IIoT.

La lógica programada contempla los siguientes procesos:

- **Lectura continua de la temperatura**, mediante sensores conectados al PLC.
- **Visualización local en HMI**, para supervisión directa en planta.
- **Evaluación de umbrales críticos** 30°C, que activa:
 - **Alarmas físicas** (sirenas y luces estroboscópicas).
 - **Notificaciones inmediatas** enviadas al canal de Telegram del personal responsable.
- **Transmisión y registro de datos a la nube**, utilizando la pasarela IoT2040 y el protocolo MQTT hacia la plataforma Insight Hub (MindSphere de Siemens).

Este sistema integral posibilita un monitoreo en tiempo real, respuesta automatizada ante riesgos, y registro histórico de datos para análisis técnico, fortaleciendo así la seguridad operativa y la toma de decisiones basada en datos confiables.

Algorithm 1 Temperature Monitoring and Alarm System

```
1: procedure MONITORTEMPERATURE
2:   THRESHOLD  $\leftarrow$  30.0 ▷ Set temperature threshold
3:   Initialize temperature sensor
4:   Initialize IoT2040 gateway
5:   Initialize MQTT connection to Insight Hub
6:   Initialize Telegram notification module
7:   Initialize visual and sound alarms
8:   while system is active do
9:      $T \leftarrow$  Read temperature from sensor
10:    Send  $T$  to Insight Hub via MQTT
11:    if  $T <$  THRESHOLD then
12:      Log status  $\leftarrow$  "NORMAL"
13:      Store log and  $T$  in Insight Hub
14:    else
15:      Activate visual alarm
16:      Activate sound alarm
17:      message  $\leftarrow$  "ALERT: Critical temperature: " +  $T$  + "°C"
18:      Send message via Telegram
19:      Log status  $\leftarrow$  "ALERT"
20:      Store alert and  $T$  in Insight Hub
21:    end if
22:    Wait 5 seconds
23:  end while
24: end procedure
```

3.5 Capa de comunicación

El sistema de comunicación desarrollado establece una arquitectura de monitoreo y control que integra un PLC Siemens S7-1200, una pasarela inteligente SIMATIC IoT2040, el protocolo MQTT y la plataforma de programación visual Node-RED. Toda la comunicación de datos entre los

componentes del sistema se realiza de manera cableada mediante una red Ethernet industrial (TCP/IP), garantizando alta velocidad de transferencia, estabilidad, inmunidad a interferencias electromagnéticas y mínima latencia en la transmisión de información crítica.

3.5.1 Flujo de Comunicación del Sistema

La arquitectura de comunicación desarrollada garantiza la transmisión confiable de datos críticos desde el sensor hasta la nube, integrando tecnologías industriales como Profinet, MQTT y procesamiento en el borde. A continuación, se describe el flujo completo de este proceso.

- **Lectura y adquisición de temperatura por el PLC S7-1200:**
El sensor de temperatura instalado en la bodega envía su señal al PLC Siemens S7-1200, el cual procesa esta variable crítica y la almacena en memoria interna accesible vía Profinet. De forma simultánea, el valor medido es mostrado en tiempo real en una pantalla HMI, permitiendo supervisión local directa por parte del operador.
- **Intercambio de datos PLC – IoT2040 mediante Profinet:**
Mediante una conexión física Ethernet, la pasarela IoT2040 accede a los datos almacenados en el PLC utilizando comunicación nativa sobre Profinet. Este acceso permite la lectura continua y segura de la temperatura industrial registrada.
- **Procesamiento en el borde (Edge Computing) dentro del IoT2040:**
Una vez que el dato es capturado por la pasarela, se ejecuta un procesamiento local a través de flujos programados en Node-RED, incluyendo validación del umbral de temperatura, análisis exploratorio de datos (EDA) y compresión para transmisión eficiente.
- **Publicación de datos mediante protocolo MQTT:**
El protocolo MQTT, basado en el modelo publish/subscribe, fue seleccionado en esta arquitectura IIoT por su eficiencia en la transmisión de datos y bajo consumo de recursos, características ideales para entornos industriales. Una de sus ventajas clave es el uso de niveles de calidad de servicio (QoS) que determinan la fiabilidad de entrega de los mensajes:
 - **QoS 0:** entrega no garantizada (*at most once*), con mínimo uso de red.
 - **QoS 1:** entrega garantizada al menos una vez (*at least once*), con posibilidad de duplicación.
 - **QoS 2:** entrega garantizada exactamente una vez (*exactly once*), con mayor costo computacional.

En este trabajo, se implementó QoS 1 para variables críticas como la concentración de gases inflamables, asegurando la llegada de los datos a la plataforma Insight Hub incluso en condiciones de red inestables. Para datos de menor criticidad, como registros de temperatura bajo umbrales normales, se utilizó QoS 0, optimizando así el uso del ancho de banda.

Esta configuración permitió optimizar la confiabilidad y el rendimiento del sistema de monitoreo, integrando sensores, el PLC Siemens S7-1200 y la pasarela SIMATIC IoT2040, mediante una comunicación segura, escalable y adaptable a los principios de la Industria 4.0 (30).

- **Recepción de Comandos y Control Remoto:** El IoT2040 también puede suscribirse a tópicos MQTT para recibir comandos de control desde plataformas de supervisión, reenviándolos al PLC S7-1200 mediante la red Ethernet.
- **Supervisión, Visualización y Alertas:** Los datos transmitidos son visualizados en dashboards locales mediante Node-RED Dashboard o en plataformas remotas como Insight Hub. En caso de condiciones críticas, el sistema genera alertas automáticas a dispositivos móviles mediante servicios de mensajería como Telegram.

3.6 Capa de procesamiento

Esta capa opera en el punto intermedio entre la recolección sensorica y el análisis en la nube, y se implementa mediante un enfoque de computación en el borde (Edge Computing) para garantizar eficiencia, rapidez de respuesta y reducción del tráfico de red. En esta arquitectura, la pasarela inteligente SIMATIC IoT2040 de Siemens cumple el rol de nodo de procesamiento local. Gracias a su capacidad de integración con dispositivos industriales (como PLCs) y su compatibilidad con protocolos como MQTT, la pasarela permite filtrar, evaluar y clasificar las variables físicas capturadas por los sensores, tales como temperatura y concentración de gases inflamables. Este preprocesamiento local no solo disminuye la carga de datos enviada a la nube, sino que además habilita acciones inmediatas ante condiciones críticas, como el encendido de alarmas o la activación de sistemas de seguridad. Esta capa prepara los datos para su transmisión estructurada a la plataforma en la nube Insight Hub, donde se almacenan, visualizan y analizan de manera avanzada. De esta forma, la capa de procesamiento no solo optimiza el desempeño del sistema, sino que también constituye un elemento clave para la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y control remoto inteligente (31).

3.6.1 Pasarela inteligente – SIMATIC IoT2040

La pasarela IoT2040 de Siemens actúa como interfaz entre los sensores y la nube, permitiendo conectividad multidispositivo, procesamiento local y transmisión segura. Sus etapas de implementación incluyeron:

1. **Adquisición de datos:** Conexión con sensores de temperatura mediante Profinet. Lectura y digitalización de variables físicas a través de un PLC.
2. **Procesamiento local (Edge Computing):** Aplicación de filtros y umbrales locales para identificar eventos críticos (por ejemplo, temperaturas superiores a 20°C o 30°C), reduciendo la carga de datos transmitidos.
3. **Comunicación con la nube:** Transmisión segura de datos a la plataforma Insight Hub mediante el protocolo MQTT.
4. **Supervisión y control:** Visualización local a través de HMI y notificación remota mediante alertas automáticas vía Telegram.

3.6.2 Gestión y tipos de datos

Como parte del sistema propuesto como en la Figura 4, se implementó un flujo de datos robusto que permite la adquisición, transmisión, almacenamiento y análisis continuo de variables físicas críticas en la planta. La gestión de los datos se centra en tres ejes principales: su transmisión en tiempo real, su almacenamiento para análisis históricos, y la generación de alertas automáticas ante condiciones de riesgo.

Los sensores instalados están conectados al PLC Siemens S7-1200, que se comunica con la pasarela inteligente SIMATIC IoT2040. Esta pasarela actúa como nodo intermedio, procesando localmente los datos mediante técnicas de Edge Computing y enviándolos a la plataforma en la nube Insight Hub mediante el protocolo MQTT. Este entorno en la nube permite tanto la visualización de datos a través de dashboards interactivos como la generación de alertas remotas en caso de eventos críticos, notificando a los operadores mediante mensajes automatizados en Telegram.

Los tipos de datos gestionados por el sistema se clasifican de la siguiente manera:

- **Datos en tiempo real:** incluyen las lecturas de temperatura y concentración de gases que se procesan localmente y se envían de inmediato a la nube para su supervisión continua.
- **Datos históricos:** almacenados en Insight Hub, son utilizados para el análisis de patrones, elaboración de reportes técnicos y soporte a estrategias de mantenimiento predictivo.
- **Alertas:** generadas automáticamente cuando se detectan condiciones anómalas, como temperaturas superiores a 30 °C, y enviadas a múltiples canales para asegurar una respuesta rápida.

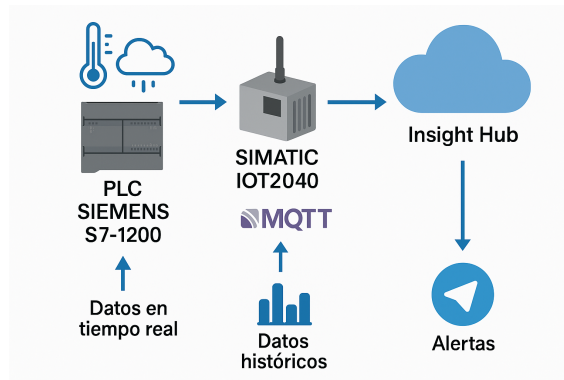


Figure 4: Gestion y tipo de datos.

3.7 Uso de librerías en Node-RED

Para implementar la comunicación que se reflejan en la Figura 5. En donde el procesamiento y la supervisión de datos dentro de la pasarela IoT2040, se utilizaron diversas librerías (nodos) en Node-RED:

- **node-red-node-mqtt:** Librería encargada de establecer la comunicación MQTT. Permite la publicación y suscripción de mensajes en tópicos configurables, con soporte para conexiones seguras mediante TLS.
- **node-red-contrib-s7:** Librería utilizada para la conexión directa al PLC Siemens S7-1200. Facilita la lectura y escritura de áreas específicas de memoria (DB, inputs, outputs) a través de Ethernet, sin necesidad de software adicional intermedio.
- **node-red-dashboard:** Librería que proporciona elementos gráficos (gráficas, indicadores, botones) para construir interfaces web de supervisión accesibles desde cualquier navegador conectado a la red.
- **node-red-node-telegrambot:** Librería implementada para el envío de notificaciones automáticas mediante el servicio de mensajería Telegram, habilitando alertas móviles inmediatas en caso de condiciones de riesgo.

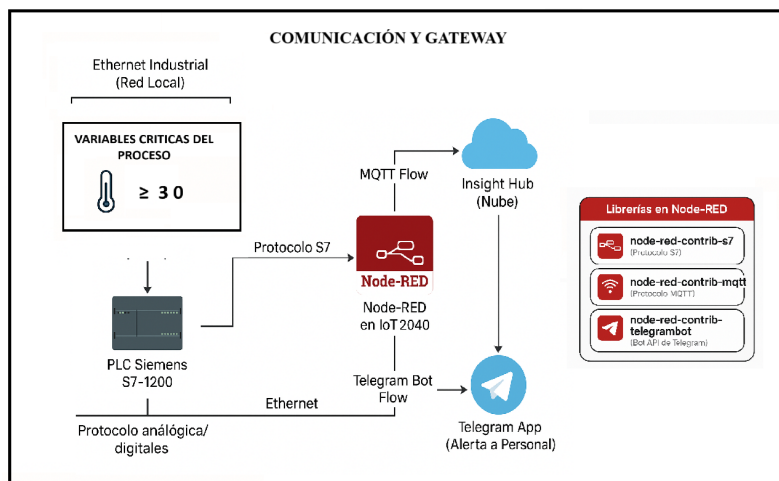


Figure 5: Descripción de la técnica proceso de comunicación.

3.7.1 Descripción de la configuración de NODE-RED

El sistema implementado se basa en la ejecución de flujos de control en la pasarela inteligente SIMATIC IoT2040, utilizando la plataforma visual Node-RED como en la Figura 6. Este entorno permite la adquisición de datos desde el PLC Siemens S7-1200, su procesamiento en el borde (edge computing) y la transmisión segura hacia la nube mediante el protocolo MQTT, además de incorporar un sistema de alertas en tiempo real vía Telegram, optimizando así la supervisión remota de condiciones críticas como la temperatura en zonas con riesgo de inflamabilidad.

- **Adquisición de datos desde el PLC S7-1200:** Se utilizó la librería `node-red-contrib-s7`, que habilita la comunicación directa entre Node-RED y dispositivos Siemens mediante el protocolo S7. El nodo configurado como Temperatura lee en tiempo real los valores provenientes del sensor ubicado en el cuarto de almacenamiento, accediendo directamente a la dirección de memoria del PLC. Este último se encarga de digitalizar la señal analógica y mantenerla disponible para su procesamiento posterior en la pasarela.
- **Procesamiento local y control de umbrales:** El valor adquirido es evaluado mediante un nodo `switch`, donde se compara con el umbral crítico establecido en 30°C. Si se supera este límite, la función `temperatura` ejecuta un bloque lógico que genera un mensaje de alerta, indicando el valor crítico detectado. Esta lógica de procesamiento en el borde permite reducir la latencia de respuesta y disminuir la cantidad de datos enviados innecesariamente a la nube.
- **Publicación de datos a la nube mediante MQTT:** El nodo MQTT configura el enlace entre el IoT2040 y la plataforma Insight Hub (MindSphere) de Siemens. Esta integración se realizó utilizando certificados y credenciales generados desde el servicio IoT de Insight Hub. Se estableció un tópico dedicado (por ejemplo: `bodega Inflamables/temperatura`) y se configuró el nivel de calidad de servicio QoS 1, el cual garantiza que el mensaje será entregado al menos una vez, lo que resulta crítico en aplicaciones industriales donde la pérdida de datos puede comprometer la seguridad del proceso (32).

El bloque MQTT se configura como cliente productor `publisher` y es responsable de enviar los valores procesados al Asset digital creado en Insight Hub. Este asset representa la instalación física supervisada, y sus datos son almacenados como series temporales, permitiendo su visualización en dashboards personalizados, trazabilidad histórica y eventual análisis con inteligencia artificial para mantenimiento predictivo.

- **Sistema de alertas mediante integración con Telegram:** Se incorporó un sistema de mensajería directa mediante la Telegram Bot API, configurando un bot que se comunica con el flujo de Node-RED a través de los nodos `Telegram sender` y `Telegram receiver`. En caso de que se detecte una condición crítica (temperatura $\geq 30^{\circ}\text{C}$), el sistema genera automáticamente un mensaje de advertencia que es enviado a los operadores mediante el bot.

La función `function 6` también permite la interacción bidireccional. Si el operador escribe la palabra clave `temperatura`, el bot responde con el valor actual almacenado en una variable global dentro del flujo. Esto permite supervisión remota sin necesidad de acceder a la interfaz completa del sistema.

- **Control remoto de salidas del PLC:** Además del monitoreo, el flujo incluye nodos que permiten el control remoto de salidas digitales del PLC, como ventiladores o alarmas físicas, directamente desde comandos enviados por Telegram. Esto otorga al operador la posibilidad de ejecutar acciones correctivas inmediatas desde cualquier ubicación.
- **Estabilidad operativa mediante temporizadores:** Se utilizaron nodos `trigger` configurados con intervalos definidos (5s y 250ms) para controlar la frecuencia de envío de mensajes y la activación de salidas. Esto permite evitar la saturación del canal de comunicación y estabilizar el comportamiento del sistema, manteniendo la eficiencia del monitoreo continuo.

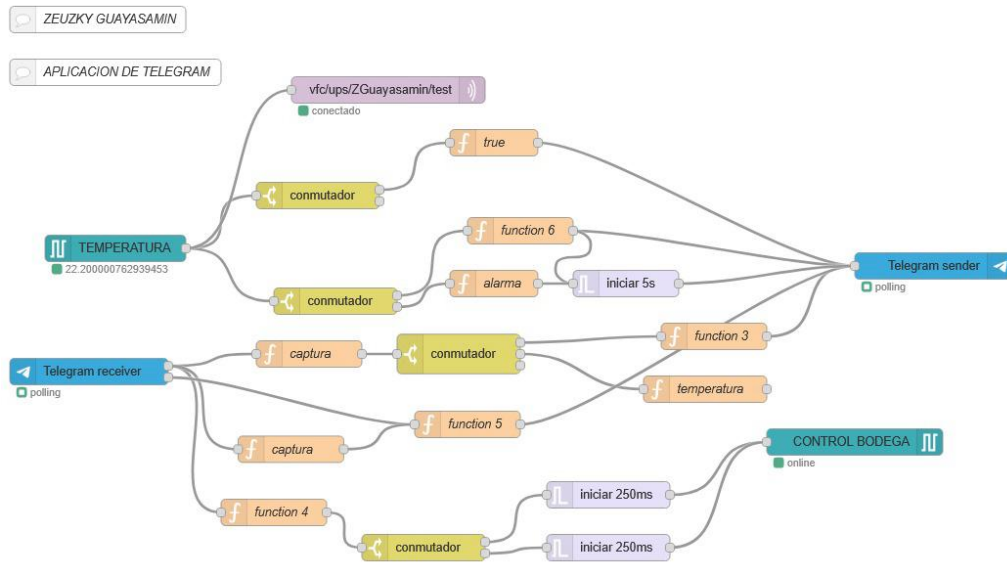


Figure 6: Programación Node Red.

3.8 Capa de aplicación

La capa de aplicación constituye el nivel superior dentro de la arquitectura IIoT implementada, y cumple una función clave en la gestión centralizada, análisis avanzado y visualización remota de las variables físicas adquiridas desde el entorno industrial. En este proyecto, dicha capa se materializa mediante la plataforma Insight Hub de Siemens, la cual proporciona un entorno robusto para el almacenamiento, procesamiento y representación visual de datos provenientes del campo.

Los datos recolectados por el PLC Siemens S7-1200, y preprocesados localmente en la pasarela IoT2040 a través de Node-RED, son transmitidos hacia la nube utilizando el protocolo MQTT sobre red Ethernet industrial. Una vez recibidos por el servicio en la nube, estos datos son almacenados en bases de datos estructuradas, donde se conservan tanto los valores en tiempo real como los históricos, permitiendo trazabilidad completa de las condiciones de operación de la bodega de almacenamiento.

Insight Hub habilita al usuario final para construir e interactuar con dashboards gráficos personalizados, tal como representa la Figura 7. Los cuales presentan información clave como temperatura ambiente, concentración de gases inflamables, activación de alarmas locales y estado de los sensores. Esta visualización se organiza mediante elementos modulares que incluyen gráficos de tendencia, indicadores visuales, medidores y tablas de eventos, permitiendo una interpretación clara y eficiente del estado del sistema.

Adicionalmente, la plataforma admite la generación de reportes automáticos, el uso de filtros por rangos de tiempo y la integración de motores analíticos basados en inteligencia artificial, lo que habilita capacidades como mantenimiento predictivo o detección temprana de condiciones anómalas. De esta forma, la capa de aplicación no solo proporciona un canal de visualización remota, sino que se convierte en una herramienta estratégica para la toma de decisiones operativas fundamentadas en datos confiables y disponibles en tiempo real.

3.8.1 Plataforma Insight Hub

Se utilizó Insight Hub como núcleo del sistema de análisis en la nube, proporcionando:

- Compatibilidad con protocolos industriales (OPC UA, MQTT).
- Procesamiento de datos en tiempo real e históricos.
- Dashboards interactivos personalizables.
- Algoritmos de inteligencia artificial para mantenimiento predictivo.

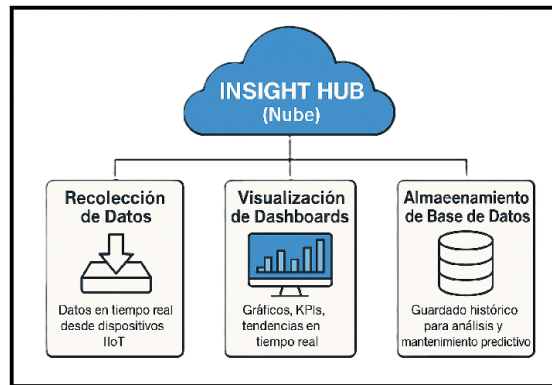


Figure 7: Capa de aplicación Insight Hub.

3.8.2 Configuración jerárquica de activos digitales en Insight Hub

La Figura 8. muestra la jerarquía funcional que se sigue al configurar activos digitales en Insight Hub. se basa en una jerarquía lógica que permite representar de manera digital y ordenada los componentes físicos del sistema industrial. Esta jerarquía está conformada por elementos interdependientes que aseguran la correcta vinculación de variables, su trazabilidad y visualización en la nube. El flujo de configuración parte desde la definición de variables hasta la creación de activos digitales operativos.

- **Asset Manager:** Es el módulo principal desde donde se gestionan todos los elementos digitales del sistema. Permite crear, editar y visualizar los diferentes niveles de la jerarquía, como tipos de aspectos, tipos de activos y activos reales. En el contexto del presente trabajo, desde el Asset Manager se inició la configuración del activo correspondiente a la sala de monitoreo industrial, así como su asociación con los sensores y la pasarela IoT2040.
- **Variables:** Las variables representan los datos individuales que serán adquiridos y monitoreados en la nube. Cada variable corresponde a una medida física del proceso. Para este sistema se definieron variables como:
 - temperatura (tipo `Double`, unidad °C)
 - estado_alarma (tipo `Boolean`, sin unidad)

Estas variables son utilizadas posteriormente para construir un conjunto lógico denominado aspecto.

- **Asset Type:** El Asset Type funciona como plantilla o modelo para los activos digitales. Define qué aspectos componen un tipo específico de activo. En este proyecto se configuró un tipo de activo asociado al aspecto `ZGUAYASAMIN_TITULACION2`, lo cual garantiza coherencia estructural entre los datos transmitidos desde el IoT2040 y los elementos representados en la nube.
- **Add Asset:** Finalmente, se procedió a la creación del activo digital real mediante la opción Add Asset. Se creó el activo con el nombre `ZGUAYASAMIN_TITULACION2`, instancia operativa vinculada directamente a la pasarela SIMATIC IoT2040. Este activo fue configurado para recibir datos mediante MQTT con autenticación TLS, utilizando tópicos estructurados que se vinculan al aspecto definido previamente.

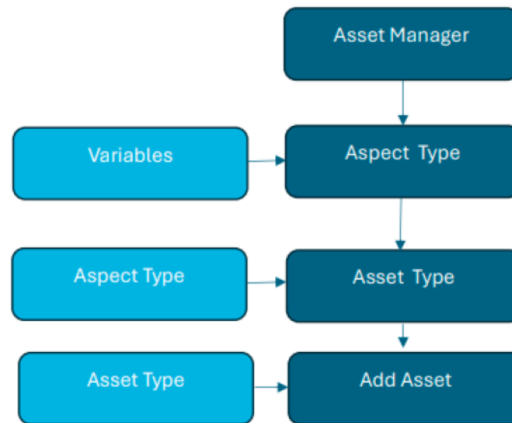


Figure 8: Configuración digital en Insight Hub: Assets, Aspects y comunicación MQTT.

3.8.3 Monitoreo remoto (Telegram)

Como parte del sistema de monitoreo inteligente, se procedió a la creación de un bot de Telegram a través del asistente oficial @BotFather. Este procedimiento incluyó el uso del comando /newbot, mediante el cual se asignó un nombre al bot y un identificador único que debía finalizar en la palabra “bot”. Tras completar este proceso, se obtuvo un token de acceso, indispensable para integrar el servicio con la plataforma Node-RED, utilizando para ello el nodo node-red-node-telegrambot. Esta clave permitió establecer una conexión segura entre la aplicación de mensajería y la lógica de control desplegada en el dispositivo SIMATIC IoT2040.

El bot fue diseñado para operar bajo dos funcionalidades principales:

- **Modo de consulta bajo demanda:**

A través del envío del comando de texto “TEMPERATURA”, cualquier operador autorizado puede consultar el valor actual registrado por los sensores conectados al PLC. Node-RED responde automáticamente utilizando una variable global que almacena el último valor leído, como se muestra en el panel izquierdo de la imagen. Esta función es especialmente útil para la supervisión remota en momentos en los que no se han activado alertas automáticas.

- **Modo de alerta automática ante condiciones críticas:**

El sistema verifica continuamente si la temperatura supera un umbral establecido de 29°C. Al detectar esta condición, se activa de forma inmediata una serie de mensajes de advertencia, enviados directamente a los responsables mediante Telegram. Estas notificaciones incluyen el texto “ALERTA!!! TEMPERATURA sobrepasa la temperatura:” seguido del valor específico. En la sección derecha de la imagen se visualiza esta dinámica de respuesta, con registros que ascienden progresivamente hasta superar los 29.8°C, permitiendo una intervención rápida ante situaciones de riesgo.

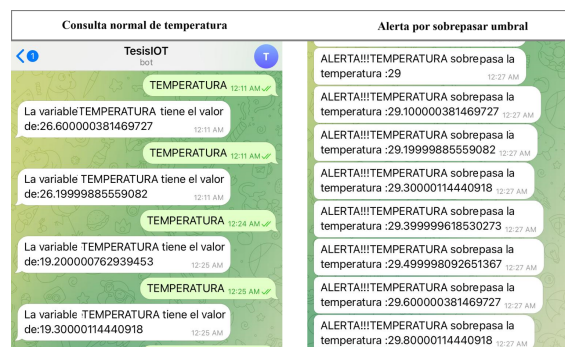


Figure 9: Monitoreo de temperatura y alerta en telegram.

3.9 Implementación del dashboard en Insight Hub

El panel de monitoreo en Insight Hub representa la interfaz principal en la para visualizar las condiciones críticas de temperatura en el área de almacenamiento de peróxidos. Esta herramienta, ubicada en la capa de aplicación del sistema IIoT, permite vigilar en tiempo real los datos recolectados en campo sin exponer al personal a zonas de riesgo.

3.9.1 Proceso de configuración

La construcción del dashboard se realizó siguiendo estos pasos como podemos verlo en la Figura 10:

- **Definición jerárquica de activos:** Se establecieron variables como temperatura y alarmas, agrupadas en un aspecto funcional denominado ZGUAYASAMIN.TITULACION2, el cual fue asociado a un activo digital conectado al IoT2040 mediante MQTT seguro.
- **Diseño gráfico:** Se incorporaron elementos visuales como medidores e historiales de temperatura, los cuales se actualizan con datos recibidos directamente desde la pasarela.
- **Validación previa en el borde:** Antes de enviarse a la nube, los datos son procesados en el IoT2040 utilizando Node-RED con técnicas como EDA, garantizando consistencia y eficiencia en la visualización.

Este entorno visual cumple funciones clave:

- Permite **supervisar de forma remota** sin presencia física en áreas peligrosas.
- Facilita **acciones preventivas** ante cambios bruscos, gracias a su integración con sistemas de alerta como Telegram.
- Contribuye al **análisis técnico** mediante datos históricos estructurados.
- Ofrece **flexibilidad para escalar**, añadiendo sensores o monitoreando nuevas variables en el futuro.

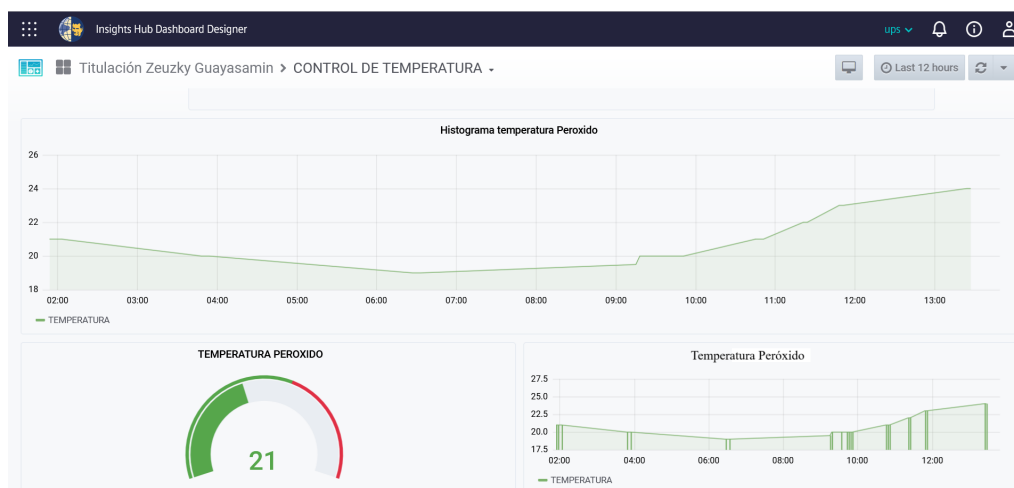


Figure 10: Dashboard registro de temperatura peroxido

3.10 Formulación matemática y aplicación del análisis exploratorio de datos (EDA)

El **Análisis exploratorio de datos (EDA)** es una estrategia estadística fundamental orientada a describir, resumir y comprender las propiedades de un conjunto de datos antes de aplicar técnicas de modelado predictivo. Su objetivo es revelar patrones, identificar valores extremos, y evaluar la calidad y estructura del conjunto de datos sin asumir distribuciones específicas.

3.10.1 Fundamentos matemáticos del EDA

En el contexto de este estudio, el EDA se emplea para el monitoreo de la variable temperatura. Las métricas empleadas incluyen:

- **Promedio (media aritmética)**, que ofrece una medida central del comportamiento de la variable:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

- **Desviación estándar**, que cuantifica la dispersión respecto a la media:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

- **Intervalo intercuartílico (IQR)**, útil para identificar valores atípicos:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

$$x_i \in \text{Outlier} \quad \text{si } x_i < Q_1 - 1.5 \cdot IQR \quad \text{o } x_i > Q_3 + 1.5 \cdot IQR \quad (4)$$

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del diseño, implementación y evaluación de la arquitectura IIoT propuesta para el monitoreo y control de temperatura en áreas críticas de almacenamiento de materias primas inflamables. El sistema fue validado en condiciones operativas reales dentro de la planta química mencionada anteriormente.

4.1 Análisis de latencias

En la Figura 11, se representa la variación temporal del intervalo entre registros consecutivos capturados por el sistema IIoT. En el eje vertical se muestra la latencia en segundos $\text{latencia}_i = t_i - t_{i-1}$, mientras que el eje horizontal corresponde a la fecha y hora de cada muestra registrada.

Esta representación permite evaluar visualmente la consistencia del muestreo del sistema de adquisición. Bajo condiciones normales de operación y configuración estable del sistema, se esperaría una frecuencia de muestreo constante, reflejada en una latencia aproximadamente fija. Sin embargo, en esta gráfica se observa una alta variabilidad en los valores de latencia, con intervalos que oscilan desde fracciones de segundo hasta cientos e incluso miles de segundos.

El conjunto de datos analizado comprende un total de 7.080 registros de temperatura capturados entre marzo a mayo de 2025.

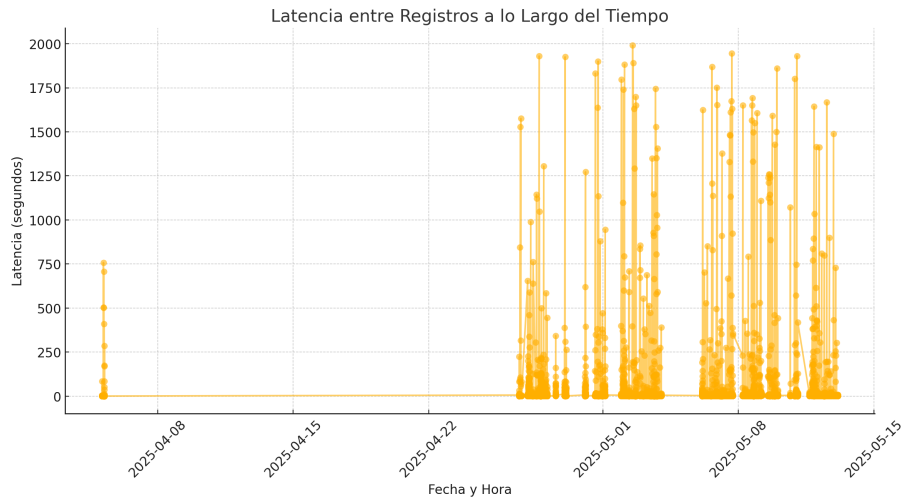


Figure 11: Registro de latencias.

Para cada par de registros consecutivos se calculó la latencia, definida como el intervalo temporal en segundos entre una medición y la siguiente. Las estadísticas descriptivas obtenidas fueron las siguientes:

- **Latencia promedio:** 464.93 segundos (~ 7.7 minutos)
- **Mediana:** 2.5 segundos
- **Percentil 25 (Q1):** 1.86 segundos
- **Percentil 75 (Q3):** 6.06 segundos
- **Latencia mínima:** 0.033 segundos
- **Latencia máxima:** 18.51 segundos
- **Desviación estándar:** 22.198 segundos

En la Tabla 1 muestra las latencias promedio en cada etapa del sistema IIoT, desde la adquisición hasta la notificación.

Table 1: Resumen de latencias por etapa del sistema IIoT.

Etapa	Proceso	Latencia promedio
Adquisición	Sensor \rightarrow PLC	150 ms
Procesamiento local	PLC \rightarrow IoT2040 + EDA	200 ms
Transmisión	IoT2040 \rightarrow Nube (MQTT)	250 ms
Visualización y Alerta	Insight Hub o Telegram	400 ms
Total estimado		1 s

Con base en la mediana de 2.5 segundos y en el hecho de que el 75 % de los registros se obtuvieron con menos de 6 segundos de diferencia, se concluye que el sistema opera bajo un rango aceptable para sensores de temperatura, suficiente para aplicaciones de monitoreo térmico continuo en zonas clasificadas. El sensor ExTemp y el PLC Siemens S7-1200 presentan una latencia combinada de hasta 200 ms, lo cual es adecuado para sistemas de monitoreo continuo. La comunicación industrial mediante Profinet entre el PLC y la pasarela IoT2040 añade una demora mínima de 20 a 50 ms. El envío a Insight Hub por el protocolo MQTT y la visualización en dashboards suman entre 350 y

550 ms adicionales. Finalmente, las alertas automáticas vía Telegram, activadas cuando se supera el umbral crítico de 30 °C, pueden tardar entre 300 y 500 ms. En conjunto, el sistema alcanza una latencia total estimada entre 800 ms y 1.3 s, lo cual es completamente aceptable para entornos industriales de monitoreo térmico.

4.1.1 Análisis exploratorio de datos (EDA) y validación del monitoreo térmico

Se presentan los resultados obtenidos del análisis exploratorio de datos aplicado a los registros de temperatura del sistema de monitoreo. Este análisis permitió evaluar la calidad y el comportamiento de las mediciones a lo largo del tiempo, identificando tendencias, valores atípicos y la consistencia general del sistema. Las gráficas incluidas muestran comparaciones entre los datos brutos evidenciando el impacto del preprocesamiento local del sistema IIoT desarrollado.

El conjunto de datos evaluado incluye un total de 7.080 registros temporales, recolectados entre marzo y mayo de 2025. Las temperaturas se concentran mayoritariamente en un rango operativo estable de 18 °C a 26 °C, con una mediana de 21 °C, lo que refleja condiciones térmicas controladas durante la mayor parte del período. Este comportamiento es coherente con las exigencias del entorno industrial monitoreado, donde se requiere preservar la estabilidad de compuestos sensibles como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), altamente reactivo ante variaciones térmicas. Fue elaborada a partir de los registros cronológicos de temperatura capturados por el sensor ExTemp en la bodega de materias primas inflamables. Los datos fueron adquiridos mediante el PLC Siemens S7-1200, procesados localmente en la pasarela SIMATIC IoT2040, y posteriormente enviados a la nube a través del protocolo MQTT. La Figura 12, permite observar el comportamiento térmico entre abril y mayo de 2025, identificando tanto la estabilidad general del sistema como la aparición de picos anómalos. Estos valores extremos se representan con los puntos destacados en rojo corresponden a la fase de calibración del sensor y no representan condiciones reales del entorno. Esta visualización es fundamental para validar la trazabilidad temporal del monitoreo, demostrar la eficiencia del sistema ante fluctuaciones térmicas y justificar el uso de procesamiento en el borde para filtrar lecturas inválidas.

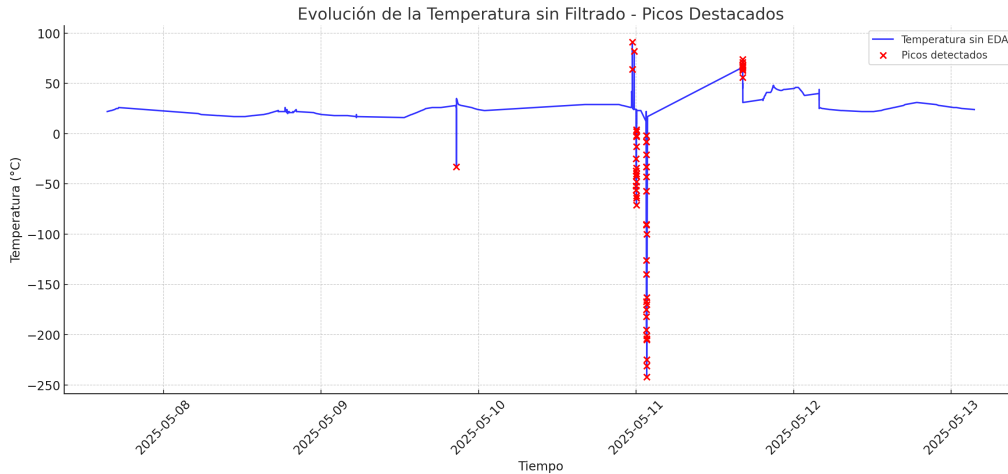


Figure 12: Evolución de la Temperatura sin Filtrado - Picos Destacados

4.1.2 Histograma de temperaturas

Para filtrar los valores atípicos se parte con la obtención del histograma que representa la distribución de frecuencia de los valores de temperatura registrados durante el período de análisis. La Figura 13, fue construido agrupando los datos en intervalos definidos, lo que permite visualizar de manera clara la concentración de mediciones en un rango operativo seguro. La mayor densidad de registros se encuentra entre los 20 °C y 24 °C, lo cual confirma la estabilidad térmica de la bodega en condiciones normales de operación.

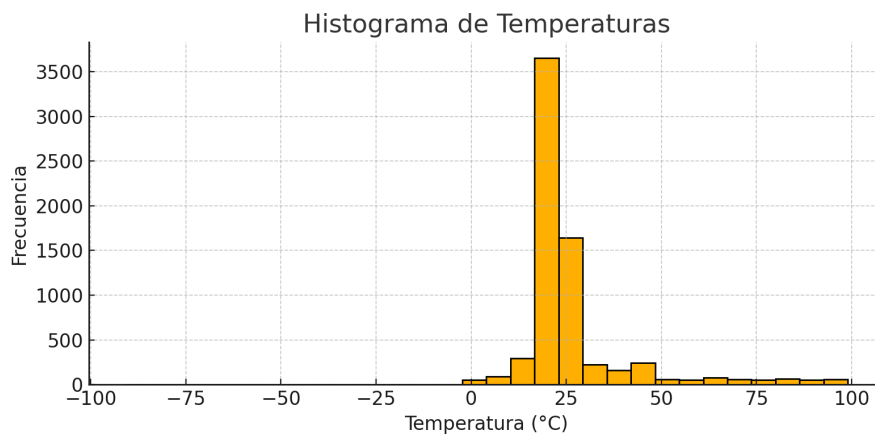


Figure 13: Histograma de temperatura.

4.1.3 Boxplot de temperatura

El diagrama de caja o boxplot proporciona una síntesis estadística del conjunto de datos, permitiendo visualizar la mediana, los cuartiles y los valores atípicos. En esta Figura 14, se observa que el 50% central de las mediciones se concentra dentro de un rango estrecho, con una mediana de aproximadamente 21 °C. No obstante, se evidencian múltiples *outliers* que superan los límites del rango intercuartílico, los cuales fueron generados principalmente durante la fase de prueba y calibración del sensor.

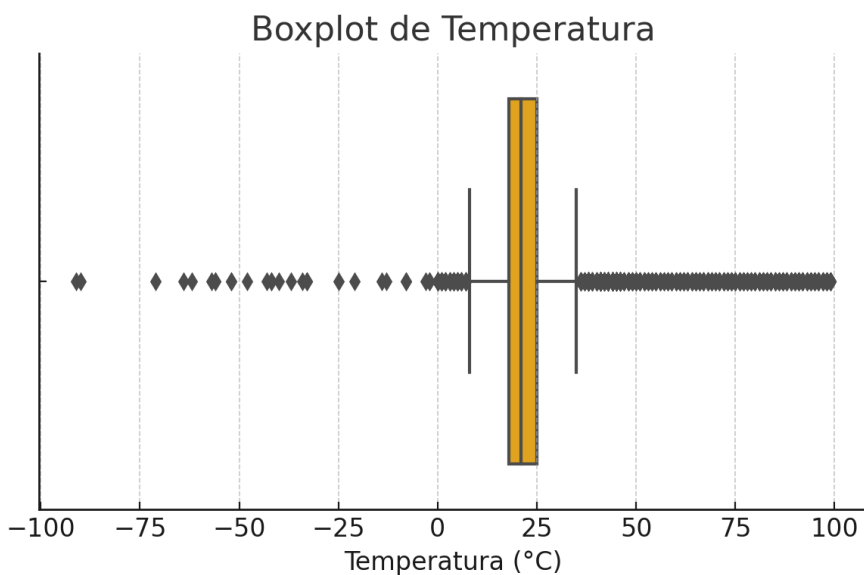


Figure 14: Boxplot de temperatura.

4.2 Análisis de eventos, prueba y calibración del sensor

La Tabla 2 presenta los eventos en los que la variable de temperatura superó el umbral crítico de 30 °C. Las condiciones aplicadas por EDA incluyen los valores fuera del rango operativo (10–50°C) definido como límite de seguridad para el almacenamiento de sustancias químicas sensibles térmicamente, como el peróxido de hidrógeno. Estos valores fueron identificados utilizando la técnica de Análisis Exploratorio de Datos (EDA), que permite detectar anomalías y valores atípicos antes de su transmisión a la nube. El procesamiento se realiza localmente en la pasarela inteligente

Table 2: Comparación entre lecturas sin EDA y con EDA aplicando umbrales de temperatura y detección de errores.

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Estado con EDA
2025-03-15	06:00:00	43.0	Descartado
2025-03-15	06:15:00	47.3	Descartado
2025-03-15	06:30:00	53.7	Descartado
2025-03-15	06:45:00	29.0	29.0
2025-03-15	07:00:00	36.1	Descartado
2025-03-15	07:15:00	31.8	Descartado
2025-03-15	07:30:00	44.0	Descartado
2025-03-15	07:45:00	32.7	Descartado
2025-03-15	08:00:00	54.8	Descartado
2025-03-15	08:15:00	35.4	Descartado
2025-03-15	08:30:00	36.0	Descartado
2025-03-15	08:45:00	39.3	Descartado
2025-03-15	09:00:00	44.8	Descartado
2025-03-15	09:15:00	29.9	29.9
2025-03-15	09:30:00	47.4	Descartado
2025-03-15	10:00:00	29.7	29.7
2025-03-15	10:15:00	43.1	Descartado
2025-03-15	10:30:00	25.2	25.2
2025-03-15	10:45:00	25.8	25.8

SIMATIC IoT2040, lo que facilita una respuesta rápida y reduce el volumen de datos enviados. Los registros listados corresponden a picos intencionales generados durante actividades de prueba y calibración del sensor, realizadas para asegurar la integridad del sistema de monitoreo.

4.3 Evaluación del Filtrado de Datos mediante EDA

La Figura 15 presenta una comparación entre dos conjuntos de datos obtenidos durante el monitoreo de temperatura en el área de almacenamiento de materias primas inflamables de una planta química.

La curva en color naranja refleja la serie de datos obtenida durante la fase de validación inicial del sistema, en la cual se realizaron procedimientos de calibración del sensor infrarrojo ExTemp y pruebas de tolerancia térmica. Este sensor posee un rango operativo nominal de -20°C a 1000°C , y fue sometido a condiciones extremas simuladas para verificar su desempeño técnico. Como resultado, contiene registros atípicos que van desde -250°C hasta 320°C , valores que no corresponden a las condiciones reales del entorno, sino a pruebas controladas. Incluir estos valores en el sistema de monitoreo activo podría inducir falsos positivos y activar protocolos de emergencia sin justificación.

La curva en color azul representa la misma serie tras haber sido procesada mediante técnicas de EDA locales.

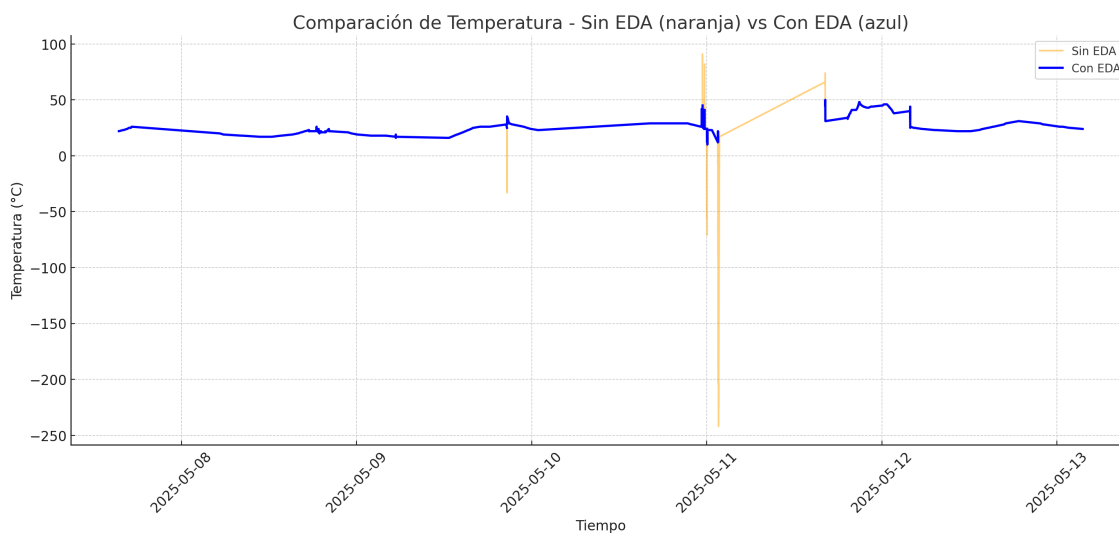


Figure 15: Comparación entre datos sin filtrar y datos procesados mediante EDA en el monitoreo de temperatura.

Se define el umbral de 30°C en función de las propiedades fisicoquímicas del peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual presenta riesgos de descomposición exotérmica al ser sometido a temperaturas elevadas. Superar dicho valor implica la activación automática de alarmas visuales y sonoras, así como el envío de notificaciones remotas mediante la API de Telegram, integradas en el sistema de control a través de flujos programados.

La depuración local de datos no sólo asegura que los valores enviados a la plataforma Insight Hub MindSphere sean confiables, sino que también reduce significativamente la cantidad de información transmitida, optimizando el uso del ancho de banda en la red industrial Ethernet TCP/IP. Esta estrategia mejora la eficiencia operativa del sistema y facilita la implementación de modelos de mantenimiento predictivo con base en datos históricos limpios y relevantes.

4.4 Reducción de carga operativa y beneficio económico

La incorporación de una arquitectura IIoT en el sistema de monitoreo térmico ha permitido sustituir procedimientos manuales por un control automatizado y continuo. Antes de esta implementación, el personal operativo realizaba tres inspecciones diarias en campo, cada una con una duración aproximada de 30 minutos, destinadas al registro de temperatura en áreas clasificadas.

El tiempo diario invertido en dicha labor se define en la ecuación (5):

$$T_d = 0.5 \text{ h/ronda} \times 3 \text{ rondas/día} = 1.5 \text{ h/día} \quad (5)$$

A escala semanal, el total acumulado de horas es:

$$T_s = 1.5 \text{ h/día} \times 7 \text{ días} = 10.5 \text{ h/semana} \quad (6)$$

Y, considerando un mes promedio de cuatro semanas, el esfuerzo mensual se determina según la ecuación (7):

$$T_m = 10.5 \text{ h/semana} \times 4 = 42 \text{ h/mes} \quad (7)$$

Este tiempo, previamente requerido para tareas repetitivas de verificación, ahora se encuentra liberado gracias a la digitalización del proceso. Con base en los datos proporcionados por la empresa, el valor de la hora laboral técnica se estima en \$8.00 USD (33), lo que permite calcular el beneficio económico mensual derivado de la automatización, como se observa en la ecuación (8):

$$\text{Beneficio mensual} = 42 \text{ h/mes} \times 8 \text{ USD/h} = 336 \text{ USD/mes} \quad (8)$$

4.5 Análisis de presupuesto y retorno de inversión

Para la implementación del sistema de monitoreo basado en IIoT se consideraron únicamente los costos esenciales vinculados a la arquitectura instalada, que incluyen la pasarela, la plataforma en la nube y la mano de obra técnica especializada. El desglose del presupuesto estimado se presenta en la Tabla 3.

Table 3: Presupuesto estimado del sistema IIoT

Componente	Descripción	Costo (USD)
Pasarela SIMATIC IoT2040	Dispositivo de borde para adquisición y transmisión	\$500
Suscripción Insight Hub	Plataforma en la nube (licencia anual)	\$500
Mano de obra especializada	Programación del PLC, IoT2040, Node-RED e integración	\$800
Total estimado		\$1.800

Antes de la automatización, el monitoreo de temperatura se realizaba de forma manual en tres rondas diarias de 30 minutos cada una, representando un total de 1.5 horas diarias o 42 horas al mes. Considerando un valor de \$8.00 USD por hora, correspondiente al salario técnico promedio en plantas industriales ecuatorianas (33), el ahorro mensual estimado se calcula con la ecuación (9).

$$\text{Ahorro mensual} = 42 \text{ h/mes} \times 8 \text{ USD/h} = 336 \text{ USD/mes} \quad (9)$$

El retorno de inversión del sistema (ROI) se estima con la ecuación (10), considerando el total invertido y el ahorro mensual calculado:

$$ROI_{\text{meses}} = \frac{1800}{336} \approx 5.35 \text{ meses} \quad (10)$$

5 Discusiones

Este trabajo plantea una arquitectura IIoT de implementación práctica, validada en un entorno industrial real, destinada al monitoreo y control de variables críticas en una bodega de sustancias inflamables. A través del uso de un PLC Siemens S7-1200, una pasarela IoT2040, comunicación mediante el protocolo MQTT y visualización en la plataforma Insight Hub, se logró integrar la supervisión en tiempo real con mecanismos de alerta inmediata. Esta integración optimizó la seguridad operativa y redujo significativamente la carga manual del personal encargado del monitoreo.

Por otro lado, el estudio desarrollado por (12) presenta una arquitectura conceptual basada en simulaciones, que incorpora tecnologías como Apache Kafka, Spark y Cassandra. Su diseño está orientado al procesamiento distribuido de grandes volúmenes de datos, aplicando enfoques de “hot path” para procesamiento en tiempo real y “cold path” para análisis histórico. Sin embargo, su validación se realizó en entornos virtuales (contenedores Docker), sin conexión a sensores físicos ni condiciones industriales reales, lo cual limita el alcance práctico de sus resultados.

Uno de los aspectos técnicos más relevantes para comparar ambas soluciones es la latencia total del sistema, entendida como el tiempo transcurrido desde la adquisición de una variable hasta su visualización o respuesta automática. En el presente trabajo, gracias al uso de edge computing, se registraron latencias menores a 1 segundo, incluso en condiciones reales de operación. En contraste, Ferencz et al. reportan tiempos de entre 2 y 4 segundos debido a las etapas de encolamiento, procesamiento y visualización que requiere su arquitectura distribuida.

Ambos trabajos coinciden en su objetivo de digitalizar procesos industriales mediante arquitecturas IIoT abiertas. Sin embargo, sus enfoques se complementan más que competir: el modelo de Ferencz et al. es apropiado para plantas de producción complejas con múltiples nodos de datos, mientras que la arquitectura desarrollada en este estudio se adapta a entornos operativos con recursos limitados donde la inmediatez y robustez son prioritarias.

Los principales aportes técnicos del presente trabajo son:

- **Validación funcional en planta**, con sensores físicos y condiciones reales de operación, lo cual garantiza replicabilidad en otros entornos industriales.
- **Evaluación operativa y económica**, demostrando una reducción de 1.5 h/día de tareas manuales, equivalente a más de 40 horas/mes y un ahorro estimado entre 336 USD/mes.
- **Uso de EDA en el dispositivo de borde**, eliminando valores atípicos y mejorando la calidad del dato antes de su envío a la nube.
- **Canales de alerta eficientes como Telegram**, que permiten al operario recibir información crítica sin interfaces complejas ni licencias adicionales.

Estos resultados demuestran que una arquitectura IIoT bien diseñada y aplicada localmente puede ofrecer un impacto significativo en eficiencia, seguridad y toma de decisiones, incluso frente a modelos más complejos pero aún no implementados en campo. La solución desarrollada aquí aporta una opción concreta, de bajo costo y alto valor técnico, alineada con los principios de la Industria 4.0 y adaptada a la realidad operativa de plantas industriales en transición digital.

6 Conclusiones

- La manipulación de peróxido de hidrógeno en su forma líquida representa un riesgo significativo para la seguridad industrial debido a su alta reactividad térmica y toxicidad en caso de exposición directa. Como se ha demostrado, la descomposición acelerada de esta sustancia puede ocurrir a temperaturas iguales o superiores a los 30°C, generando condiciones propicias para incendios, explosiones y daños a la salud humana. En este contexto, la integración de tecnologías IIoT, mediante la implementación de interfaces gráficas (HMI, dashboards y alertas remotas), ha permitido establecer un sistema de monitoreo continuo y respuesta automática que actúa de forma preventiva ante cualquier desviación crítica. Este enfoque no solo mejora la seguridad operativa al reducir la necesidad de presencia constante en zonas peligrosas, sino que también optimiza los tiempos de intervención y disminuye la carga manual, precautelando la salud del personal.

- La arquitectura implementada permitió integrar sensores industriales con un sistema robusto de control PLC S7-1200 y una pasarela inteligente SIMATIC IoT2040, logrando capturar en tiempo real las variables físicas críticas del proceso. Esta pasarela actuó como puente entre el entorno físico y la nube, permitiendo una adquisición continua y segura de datos, lo cual cumple el objetivo de establecer un sistema confiable de monitoreo digital. Durante el periodo de validación, se recopilaron un total de 7.080 registros de temperatura en condiciones reales de planta. El sistema demostró ser capaz de transmitir los datos con una latencia combinada promedio a 1 segundo, dividida entre adquisición 150ms, procesamiento local 200ms y envío a la nube vía MQTT 250ms, lo que asegura su idoneidad para procesos industriales sensibles
- Se desarrolló una infraestructura de almacenamiento en la nube usando Insight Hub, donde los datos fueron transmitidos mediante el protocolo MQTT, los cuales se organizaron y registraron en históricos dentro del mismo. Estos datos adquiridos fueron analizados mediante la técnica de EDA para generar el filtrado de valores atípicos, los cuales fueron generados en el proceso de pruebas iniciales. Estos datos puros mostraban irregularidades en el proceso, con temperaturas mayores a 30°C. Después del EDA, estos fueron eliminados, garantizando la integridad del análisis posterior.
- Previo a la automatización, el monitoreo de temperatura requería 1.5 horas diarias distribuidas en tres rondas manuales, lo que representaba un total de 42 horas mensuales de trabajo operativo. La digitalización del proceso permitió un ahorro estimado de 336 USD mensuales, lo cual facilitó la reasignación del recurso humano a tareas de mayor valor agregado. En este contexto, el sistema obtuvo un retorno de inversión estimado en 5.35 meses, considerando un costo total de implementación de 1.800 USD y un ahorro mensual directo constante, respaldando así la viabilidad técnica y económica de la solución en entornos industriales.

References

- [1] A. Valencia and P. Portilla, “Internet Industrial De Las Cosas (Iiot): Nueva Forma De Fabricación Inteligente,” pp. 3–6, 2019.
- [2] K. A. Yague Zapata, J. E. Hernández Alvarado, C. F. Trujillo Trujillo, and D. R. Delgado, “Internet industrial de las cosas , evolución y desafíos .,” *Universidad Cooperativa de Colombia*, pp. 1–15, 2020.
- [3] P. Valencia, Angie, Paola, “Internet industrial de las cosas (IIoT) — PTC,” *Fundación Universitaria de Popayán*, vol. 0, p. 9, 2023.
- [4] W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, “An internet of things—supervisory control and data acquisition (iot–scada) architecture for photovoltaic system monitoring, control, and inspection in real time,” *Electronics*, vol. 14, p. 42, Jan. 2025. Published 26 December 2024.
- [5] A. Toro, G. Sánchez gsanchez, M. Strefezza strefeza, and E. Granado granado, “IIoT y sistemas de control: oportunidades, desafíos y arquitecturas,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 3, pp. 209–214, 2019.
- [6] A. R. Gallardo, J. R. Herrera Morales, S. Sandoval Carrillo, M. Andrade Aréchiga, and E. M. Ramos Michel, “Internet de las cosas,” *Internet de las cosas*, 2023.
- [7] Centro Nacional de Seguridad Química, “Ficha técnica de peróxido de hidrógeno: riesgos y medidas de seguridad,” 2017. Consulta técnica sobre peligrosidad del HO.
- [8] Y. Zhang and J. Li, “Hazard analysis and risk assessment of hydrogen peroxide decomposition in chemical storage,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 65, p. 104181, 2020.
- [9] J. Cortés, “Internet Industrial de las Cosas,” *Bit*, no. 199, pp. 46–48, 2022.
- [10] G. Beniwal and A. Singhrova, “A systematic literature review on IoT gateways,” *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 9, pp. 9541–9563, 2022. Available online 27 November 2021.
- [11] A. Glória, F. Cercas, and N. Souto, “Design and implementation of an IoT gateway to create smart environments,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2017)*, vol. 109 of *Procedia Computer Science*, pp. 568–575, Elsevier, 2017. Open-access article, © 2017 The Authors, CC BY.
- [12] K. Ferencz, J. Domokos, and L. Kovács, “Cloud integration of industrial iot systems: Architecture, security aspects and sample implementations,” *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 21, no. 4, pp. 7–28, 2024.
- [13] A. Hildén, P. Järventausta, S. Repo, K. Systä, V. Heikkilä, O. Hylli, N. Saarimäki, and M. Vilkkö, “A data collection and supplementary control platform of a modern building for smart energy applications,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, p. 100928, 2022. Open-access article under CC BY 4.0 licence.
- [14] L. González, O. Sofía, D. Laguía, E. Gesto, and K. Hallar, “Internet del futuro—estudio de tecnologías IoT,” *Revista de Investigaciones en Ciencia y Tecnología (ICT-UNPA)*, vol. 12, no. 3, pp. 105–122, 2020.
- [15] L. González, O. Sofía, D. Laguía, E. Gesto, and K. Hallar, “Internet del futuro—estudio de tecnologías iot,” *Revista de Investigaciones en Ciencia y Tecnología (ICT-UNPA)*, vol. 12, no. 3, pp. 105–122, 2020.
- [16] W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, “An internet of things—supervisory control and data acquisition (iot–scada) architecture for photovoltaic system monitoring, control, and inspection in real time,” *Electronics*, vol. 14, p. 42, 2025. Published 26 December 2024.

- [17] A. Hildén, P. Järventausta, S. Repo, K. Systä, V. Heikkilä, O. Hylli, N. Saarimäki, and M. Vilkkö, “A data collection and supplementary control platform of a modern building for smart energy applications,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, p. 100928, 2022. Open-access article under CC BY 4.0 licence.
- [18] K. E. TIGRE CHITACPA and J. D. ZUMBA ARICHAVALA, *Estudio De La Pasarela Inteligente Iot 2040 De Siemens Y Desarrollo De Un Manual De Prácticas De Laboratorio Orientadas Al Aprendizaje De Los Sistemas De Automatización*. 2022.
- [19] C. N. de Seguridad Química, “Ficha técnica de peróxido de hidrógeno: riesgos y medidas de seguridad,” 2017.
- [20] Y. Zhang and J. Li, “Hazard analysis and risk assessment of hydrogen peroxide decomposition in chemical storage,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 65, p. 104181, 2020.
- [21] A. Toro, G. Sánchez, M. Strefezza, and E. Granado, “Iiot y sistemas de control: oportunidades, desafíos y arquitecturas,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 3, pp. 209–214, 2019.
- [22] K. E. T. Chitacpa and J. D. Z. Arichavála, “Estudio de la pasarela inteligente iot 2040 de siemens y desarrollo de un manual de prácticas de laboratorio orientadas al aprendizaje de los sistemas de automatización,” 2022.
- [23] A. Valencia and P. Angie, “Internet industrial de las cosas (iiot),” 2023. Recurso institucional, sin número de volumen.
- [24] L. I. International, “Extemp - intrinsically safe infrared temperature sensor,” 2022. Datasheet, ATEX Certified.
- [25] S. AG, *SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual*, 2021. Available at Siemens Industry Support.
- [26] S. AG, *SIMATIC HMI Basic Panels - KTP400 Specification*, 2021. Manual de usuario, Siemens Industry.
- [27] G. Beniwal and A. Singhrova, “A systematic literature review on iot gateways,” *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 9, pp. 9541–9563, 2022. Available online 27 November 2021.
- [28] S. D. Industries, “Insight hub (mindsphere) licensing overview,” 2023. Accessed on 2023.
- [29] J. T. Ventura, A. H. R. Puente, and J. R. H. García, “Performance for interoperability between raspberry pi and esp8266 with a plc in a node-red server for iiot,” *Ingenius*, no. 29, pp. 90–97, 2023.
- [30] L. González, O. Sofía, D. Laguía, E. Gesto, and K. Hallar, “Internet del futuro—estudio de tecnologías iot,” *Revista de Investigaciones en Ciencia y Tecnología (ICT-UNPA)*, vol. 12, no. 3, pp. 105–122, 2020.
- [31] Z. D. G. Jacho, “Capas de un sistema industrial,” 2025. Imagen propia.
- [32] S. AG, *SIMATIC IoT2040 Documentation and MQTT Configuration Guide*. Siemens Industrial Support, 2023. Disponible en: <https://support.industry.siemens.com>.
- [33] W. J. Stevenson, *Operations Management*. McGraw-Hill Education, 13th ed., 2020.