



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

Propuesta de Arquitectura Internet Industrial de las Cosas para una Planta Industrial: Caso  
de la Planta Didáctica de un Laboratorio de Ingeniería Industrial

Programa de Maestría en Ingeniería

Presentado por:

Hader Alberto Madera Bermeo  
Juan Sebastián Parrado Muñoz

Dirigido por:

Eugenio Tamura Morimitsu, Dr.Ing.

Pontificia Universidad Javeriana Cali  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Junio de 2025

# Propuesta de Arquitectura Internet Industrial de las Cosas para una Planta Industrial: Caso de la Planta Didáctica de un Laboratorio de Ingeniería Industrial

H. A. Madera-Bermeo\*, J. S. Parrado-Muñoz\*

\*Pontificia Universidad Javeriana – Cali

{hader.madera, jsparrado}@javerianacali.edu.co

**Resumen**—La Industria 4.0 ha impulsado la transformación digital en entornos industriales mediante la integración de tecnologías como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), permitiendo la automatización de procesos, la trazabilidad de productos y la toma de decisiones basada en datos. Sin embargo, su adopción en pequeñas y medianas empresas (PYMEs) y contextos educativos se ve limitada por desafíos como la falta de interoperabilidad entre sistemas, restricciones presupuestarias y escasa infraestructura tecnológica. Esta situación evidencia la necesidad de soluciones accesibles, replicables y técnicamente viables para entornos con recursos limitados. Ante esta problemática, se desarrolló una arquitectura IIoT aplicada a una planta industrial didáctica ubicada en un laboratorio universitario de Ingeniería Industrial. La solución integra sensores y actuadores con controladores Fischertechnik TXT 1.0, un sistema de Planificación de Recursos Empresariales (ERP) – específicamente, Odoo v18– y una plataforma de visualización en Node-RED, conectados mediante el protocolo de Transporte de Telemetría por Cola de Mensajes (MQTT) y Comunicación de Campo Cercano (NFC) para trazabilidad. Esta arquitectura fue validada experimentalmente como una arquitectura técnicamente viable y replicable para la automatización y trazabilidad en entornos educativos relacionados con procesos logísticos y de manufactura en el marco de la Industria 4.0.

## I. INTRODUCCIÓN

LA transformación digital y sus posibilidades tecnológicas y organizativas ofrecen a las empresas nuevas perspectivas sobre sus sistemas y capacidades, permitiendo flexibilizar y mejorar procesos, así como aprovechar potenciales de eficiencia [1]. En este contexto, la Industria 4.0 ha impulsado cambios significativos en los entornos de fabricación, donde máquinas, productos, materiales y humanos están cada vez más interconectados mediante la IIoT. Esta tecnología se basa en la conexión e interoperabilidad de sensores, dispositivos y sistemas industriales, facilitando la automatización, el monitoreo en tiempo real y la toma de decisiones basada en datos [2].

A diferencia del Internet de las Cosas (IoT) orientado a un ámbito más general, el IIoT responde a requerimientos industriales más exigentes, como alta confiabilidad, baja latencia y precisión operativa [3]. Su integración con Sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP) y de Ejecución de Manufactura (MES) potencia el valor de los datos operativos al alinearlos con la planificación estratégica y la gestión de recursos en entornos industriales [3], [4].

No obstante, la adopción de arquitecturas IIoT en entornos industriales reales enfrenta una serie de desafíos. Entre ellos se destacan la falta de interoperabilidad entre dispositivos y sistemas heterogéneos, la necesidad de infraestructuras tecnológicas robustas, la gestión segura de datos, y la dificultad de escalabilidad en contextos con recursos limitados y disponibilidad de interfaces abiertas [5], [6], [7]. Adicionalmente, muchas pequeñas y medianas empresas (PYMEs) y entornos educativos carecen de los medios técnicos y económicos para implementar soluciones completas de automatización y trazabilidad digital [7], [8]. Esta brecha limita tanto la modernización de procesos como la formación de talento humano con competencias prácticas en tecnologías emergentes.

Diversos estudios han abordado estas problemáticas proponiendo plataformas de simulación física y fábricas de aprendizaje como medios para explorar la viabilidad técnica del IIoT. Abele et al. [9] destacan el valor de las Fábricas de Aprendizaje (*Learning Factories*) como espacios experimentales para investigar soluciones aplicables a la Industria 4.0 al proporcionar modelos físicos de pequeña escala con sensores y actuadores que simulan entornos industriales reales, facilitando la experimentación a costos reducidos y asegurando la transferibilidad de los resultados a fábricas inteligentes. De forma complementaria Peter et al. [7] documentan casos exitosos de integración IIoT-ERP en PYMEs, destacando el papel de plataformas modulares y de código abierto para lograr trazabilidad operativa. Por su parte, Sala et al. [10] implementan una Sombra Digital en una planta educativa *Fischertechnik*, mostrando cómo los entornos didácticos permiten simular sistemas industriales reales y generar datos en tiempo real para análisis operativo. También se han propuesto arquitecturas distribuidas que combinan IIoT con tecnologías como computación en el borde y protocolos ligeros como MQTT, facilitando una implementación eficiente incluso en redes con recursos limitados [4], [11], [12].

En este contexto, el presente estudio propone el diseño e implementación de una arquitectura IIoT en una planta industrial didáctica perteneciente a un laboratorio universitario de Ingeniería Industrial. La solución integra controladores Fischertechnik TXT, sensores con tecnología NFC para trazabilidad, el sistema ERP Odoo v18, y una plataforma de visualización en Node-RED, todo conectado mediante el protocolo MQTT. Esta propuesta busca validar técnicamente la integración de tecnologías abiertas y accesibles en un entorno

simulado, replicando procesos industriales como recepción, almacenamiento, fabricación y despacho de productos. Además, pretende ofrecer una herramienta educativa práctica para la formación de estudiantes en: automatización, monitoreo distribuido e integración de sistemas industriales digitales.

Para validar esta propuesta, se empleó un enfoque experimental basado en la modernización de una planta Fischertechnik, integrando controladores, sensores NFC y plataformas de gestión de datos mediante programación en C++ y el protocolo MQTT. La arquitectura fue evaluada en un entorno didáctico simulado, permitiendo analizar su viabilidad técnica, interoperabilidad y capacidad de automatización en procesos logísticos y de manufactura.

## II. MÉTODOS

Este estudio empleó un enfoque experimental aplicado, con el propósito de diseñar, implementar y evaluar una arquitectura IIoT en un entorno educativo controlado. El objetivo fue simular procesos logísticos y de manufactura mediante tecnologías emergentes integradas en una planta industrial didáctica, permitiendo analizar su viabilidad técnica y sus posibilidades formativas. La metodología se organizó en dos componentes fundamentales: la caracterización del sistema base y el desarrollo de la solución tecnológica.

### II-A. Descripción de la planta didáctica antes de la intervención.

Para evaluar el diseño de la arquitectura IIoT, se utilizó un modelo de simulación física compuesto por componentes desarrollados por Fischertechnik (FT) como banco de pruebas (ver Figura 1). Estos modelos, conocidos como fábricas de aprendizaje, se emplean en la educación, formación e investigación en Industria 4.0 [9]. En este estudio, se amplió su alcance mediante la implementación de una arquitectura IIoT. Con esto, se desarrolló y evaluó nuevas estrategias antes de su aplicación en entornos industriales reales.

Esta fábrica funcionó como plataforma para simular, comprender e implementar procesos automatizados a pequeña escala, antes de escalar su aplicación. Consta de cuatro estaciones de trabajo industriales [13]:

- Robot de agarre por vacío (VGR): Cuenta con un robot equipado con una pinza de vacío.
- Almacén de gran altura (HBW): Contiene un almacén automatizado con estanterías de 3x3 espacios.
- Estación de procesamiento múltiple con horno (MPO): Simula un horno industrial y un banco de mecanizado.
- Línea de clasificación con detección de color (SLD): Equipada con una cinta transportadora, un sistema de detección de color y un separador de piezas.

Cada estación opera con su propio controlador basado en un microcontrolador ARM Cortex A8. Estos incluyen puertos de entrada/salida analógicos y digitales, ejecutando un núcleo Linux. En total, el sistema incluye:

- Nueve barreras de luz.
- Diez interruptores.
- Doce motores.

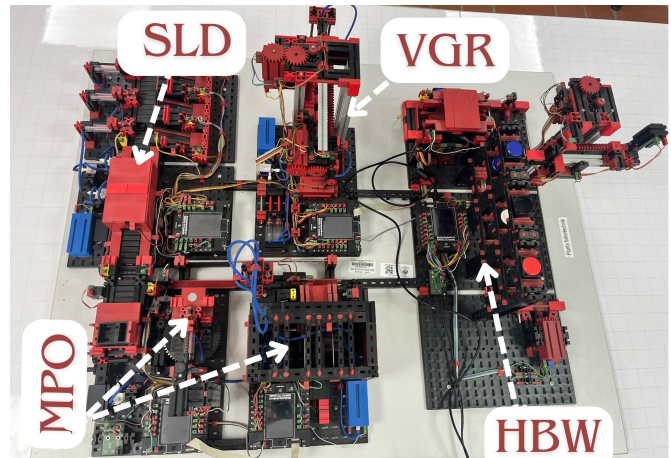


Figura 1. Fábrica de aprendizaje Fischertechnik 9V, adaptada de [13]

- Tres compresores.

La ejecución de la simulación implica el movimiento de pequeñas piezas de trabajo de diferentes colores (blanco, rojo y azul) a lo largo de la instalación.

La planta operaba en modo semi-automatizado, limitada a una secuencia de movimientos mecánicos preprogramados. Las características del sistema original eran las siguientes:

- Controladores Fischertechnik TXT 1.0 estándar, con funcionalidad local, sin conectividad externa ni soporte para protocolos industriales.
- Sensores de color en estaciones de clasificación, utilizados para identificar piezas por tonalidad, sin sistemas de trazabilidad individual.
- Actuadores de tipo servomotor y cinta transportadora, responsables del movimiento de piezas entre estaciones, sin coordinación sincronizada.
- Ausencia de sistemas de adquisición de datos, almacenamiento histórico o comunicación entre estaciones más allá del cableado interno.
- No existía conexión con sistemas ERP ni plataformas de visualización externa. Toda la interacción se realizaba a través del software ROBO Pro, un entorno de programación visual desarrollado por Fischertechnik para sus controladores [14].

### II-B. Fases de desarrollo del proyecto e integración de la arquitectura IIoT

*II-B1. Revisión de la infraestructura tecnológica:* Antes de la implementación, se realizó un diagnóstico de la infraestructura existente, identificando el estado actual de los componentes tecnológicos, redes de datos, capacidad de procesamiento, compatibilidad con sistemas ERP y disponibilidad de instrumentos de campo. Al igual que determinando el alcance en los siguientes aspectos:

- Capacidad para identificar de forma única cada pieza, utilizando etiquetas electrónicas.
- Registro digital de eventos logísticos y de manufactura en un sistema ERP (entradas, traslados, salidas, registro de tiempos, consumos de materiales).

- Comunicación estandarizada entre estaciones mediante un protocolo ligero y escalable.
- Integración de una interfaz de usuario que permitiera visualizar el estado del sistema en tiempo real.

*II-B2. Arquitectura propuesta:* Con base en el diagnóstico, se diseñó una arquitectura IIoT adaptada al contexto de la planta didáctica. La arquitectura propuesta se basó en una estructura modular y escalable. Este diseño contempló la selección de dispositivos inteligentes, nodos de borde, protocolos de comunicación (con énfasis en MQTT), así como la estructura jerárquica de los niveles de adquisición de datos, procesamiento local y visualización. Se definieron los flujos de datos, los mecanismos de interoperabilidad entre sistemas, y los componentes físicos y lógicos necesarios para soportar la integración de tecnologías como sensores, plataformas de control y servicios en la nube.

*II-B3. Integración de tecnologías:* Cada estación fue intervenida con sensores y controladores programados para ejecutar acciones específicas de acuerdo con la arquitectura propuesta. El flujo logístico y de manufactura modelado consistió en:

- Lectura NFC al ingresar la pieza (materia prima) a la planta (fase de recepción).
- Clasificación de la pieza mediante sensor de color y verificación cruzada con su Identificador Único (*UID*).
- Transporte automatizado hacia la ubicación de almacenamiento y centros productivos.
- Fabricación automatizada en los centros productivos.
- Registro de la gestión logística y de manufactura en Odoov18 y visualización en *FT Cloud* y Node-RED.

Se establecieron flujos de datos de ida y vuelta entre los componentes físicos y las plataformas digitales, garantizando la sincronización y trazabilidad de cada operación.

*II-B4. Verificación:* La última fase del proyecto consistió en la verificación cualitativa de la arquitectura IIoT implementada. Esta verificación se realizó mediante la observación directa del comportamiento del sistema durante la ejecución de escenarios simulados de recepción y almacenamiento de materia prima, manufactura y despacho de productos.

Se verificó la correcta detección de piezas mediante sensores NFC y de color, la activación automática de procesos, y la visualización en tiempo real del estado del sistema mediante paneles de control desarrollados en Node-RED. Asimismo, se confirmó la integración funcional con el ERP Odoov18, evidenciando sincronización entre eventos físicos y registros digitales.

La verificación permitió comprobar que el sistema opera de forma estable, coherente y alineada con los objetivos del diseño, destacando su aplicabilidad tanto en contextos educativos como en entornos industriales con recursos limitados.

### III. RESULTADOS

#### III-A. Revisión de la infraestructura tecnológica

Se realizó una revisión exhaustiva del estado y funcionamiento de los módulos industriales, identificando incompatibilidades en la comunicación y en la extracción de datos.

Durante la evaluación inicial, se identificaron limitaciones importantes en la planta didáctica basada en Fischertechnik.

El sistema operaba de forma semi-automatizada, con controladores TXT 1.0 que ejecutaban secuencias preprogramadas sin conectividad externa ni comunicación entre estaciones. No existía integración con sistemas ERP, ni trazabilidad digital de las piezas, y la interacción se realizaba exclusivamente mediante el entorno visual ROBO Pro.

Asimismo, se constató la ausencia de sensores con capacidad de identificación individual por pieza, almacenamiento histórico de eventos, o interfaces de monitoreo en tiempo real. Esta situación limitaba tanto la automatización como la posibilidad de enseñar conceptos clave de la Industria 4.0, como la interoperabilidad, la comunicación distribuida o la trazabilidad digital.

En respuesta a estos hallazgos, se estableció la necesidad de diseñar una arquitectura IIoT que integrara sensores NFC, conectividad mediante el protocolo MQTT, control distribuido con C++, conexión con un ERP (Odoov18) y visualización a través de Node-RED, todo ello adaptado a un entorno educativo con recursos limitados.

#### III-B. Diseño de una Arquitectura IIoT

El desarrollo de arquitecturas IIoT requiere una integración eficiente entre hardware y software para la recopilación, procesamiento y visualización de datos en tiempo real [15]. La arquitectura se organizó en capas funcionales (física, conectividad, procesamiento y empresarial), facilitando la interoperabilidad entre componentes heterogéneos y permitiendo una implementación escalonada y replicable.

Las capas funcionales están compuestas por los siguientes bloques:

- Capa física: Controladores Fischertechnik TXT 1.0, controlador [Raspberry Pi Modelo 4](#) para gestionar la comunicación con el gestor MQTT remoto, sensores de color, actuadores mecánicos y un módulo transceptor NFC [PN532](#). Etiquetas NFC ([NTAG213](#)) adheridas a cada pieza, codificadas con un UID y atributos logísticos y de manufactura.
- Capa de conectividad: Protocolo [MQTT](#) (utilizando un gestor [Mosquitto](#)), empleado para la comunicación entre estaciones y para la publicación de eventos de lectura, clasificación y transporte, bajo el esquema publicación-suscripción, asegurando interoperabilidad.
- Capa de procesamiento y visualización: Los nodos físicos ejecutaron programas desarrollados en C++ para gestionar su lógica operativa y comunicación. Además, se integró [FT Cloud](#) como plataforma remota para integrar controladores TXT 1.0 y poder monitorear, controlar y recolectar datos [16]. Servidor [Node-RED](#) que configuró los flujos de datos y el panel de supervisión en tiempo real.
- Capa de integración empresarial: Sistema ERP ([Odoov18](#)), en el que se configuraron módulos personalizados para la gestión logística y de manufactura de la planta FT.

El ERP se alimenta automáticamente a través de *end-points* conectados a Node-RED, estableciendo una sinergia IIoT-ERP.

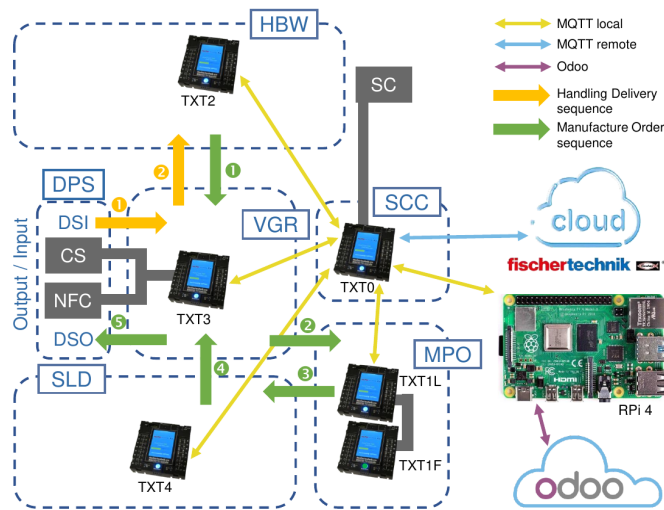


Figura 2. Arquitectura de Integración planteada

La arquitectura fue gestionada mediante cinco controladores Fischertechnik TXT 1.0 (TXT1L y TXT1F en configuración líder-seguidor, TXT2, TXT3, TXT4). Como se muestra en la Figura 2, para optimizar la conectividad y el flujo de datos en la planta industrial didáctica, se incorporó un sexto controlador, denominado TXT0, que cumple la función de gestor local MQTT. Este controlador centralizó la comunicación entre los distintos procesos de la planta y el panel de control en línea [10].

La comunicación bidireccional entre los controladores TXT distribuidos y el TXT0 se estableció mediante una red Wi-Fi, utilizando un router TP-Link, lo que permitió una integración inalámbrica eficiente. Se eligió el protocolo MQTT por su bajo consumo de ancho de banda y su eficacia en entornos con múltiples dispositivos IoT, características especialmente adecuadas para arquitecturas distribuidas [11], [12].

En el contexto de esta arquitectura IIoT, se integró el sistema empresarial Odoo, un ERP de código abierto que ofrece diversas aplicaciones para la gestión de múltiples áreas funcionales, incluyendo la Gestión de Relaciones con el Cliente (CRM), inventario, punto de venta, gestión de proyectos, entre otras [17].

La solución implementada se basa en un modelo de comunicación distribuida, en el cual TXT0 actúa como gestor local MQTT, recibiendo los mensajes publicados por los controladores TXT asociados a cada proceso de la planta (como recepción, almacenamiento, manufactura y despacho).

Estos mensajes, que contienen información clave sobre eventos de producción, tiempos operativos, recepción de materiales, consumo y entregas, son reenviados a un intermediario Odoo, que se ejecuta en una Raspberry Pi 4. Desde allí, los datos recibidos son procesados y transformados en solicitudes utilizando los protocolos Llamada a Procedimientos Remotos usando codificación JSON (JSON-RPC), y el protocolo de Llamada a Procedimientos Remotos usando XML (XML-RPC), ambos soportados por la interfaz remota de Odoo. Estas interfaces permiten la comunicación estructurada mediante objetos JSON o XML, respectivamente, y posibilitan la ejecución de operaciones como autenticación, lectura, escritura y actuali-

zación de registros. Gracias a estos mecanismos, se logra la actualización automática de los módulos de producción, inventario y logística del ERP en Odoo v18 (Odoo External API).”

### III-C. Integración de tecnologías

Se actualizó el *firmware* de los controladores TXT 1.0 a la versión 4.7, la más reciente compatible. Esta actualización habilita la programación en C++, facilitando la descarga de archivos ejecutables necesarios para el control eficiente de los módulos industriales puesto que contienen instrucciones en formato binario interpretables nativamente por los dispositivos de control.

Para la repotenciación de la planta se integró un módulo de recogida de piezas (DSI), un módulo de entrega de piezas (DSO), un módulo de cámara Red, Green, Blue, RGB (SC), un módulo de detección de color de piezas (CS), un lector/escritor de Comunicación de Campo Cercano (NFC), un controlador adicional (TXT-0), el cual actúa como gestor MQTT, como se ilustra en la Figura 3. Esto permitió rastrear cada pieza de trabajo y recuperar o ajustar las operaciones y parámetros necesarios durante la fabricación.

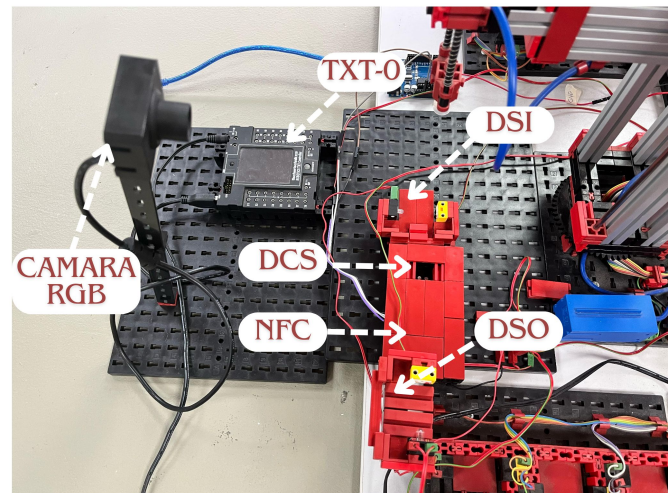


Figura 3. Componentes integrados a la planta Fishertechnik repotenciada

Las piezas para simular la fabricación fueron pequeños bloques cilíndricos (altura  $\approx 1.4$  cm, diámetro  $\approx 2.6$  cm) de colores blanco, azul y rojo. Cada uno se equipó con una etiqueta NFC que contiene información sobre la pieza individual, como su UID, el tipo (es decir, el color), el estado actual de producción y un historial de producción con marcas de tiempo, ya que originalmente tenía una pieza de madera que no permitía incluir una etiqueta para Identificación por Radio Frecuencia (RFID) en su interior.

Dado que la planta original no disponía de todos los recursos necesarios para una operación eficiente, se configuró una Red de Área Local (LAN) utilizando un *router* TP-Link para establecer la comunicación entre todos los controladores y el gestor local mediante el protocolo MQTT como se muestra en la Figura 3. Este protocolo, por su bajo consumo de ancho de banda y arquitectura de publicación/suscripción,

permitió una transmisión de datos eficiente, incluso en redes con recursos limitados. Cabe destacar que su compatibilidad con mecanismos de seguridad como cifrado *Transport Layer Security/Secure Socket Layer (TLS/SSL)* y autenticación lo convierte en una opción confiable para entornos industriales [18].

Esta red fue integrada en el sistema y su configuración se incorporó al programa desarrollado en C++, lo que permitió establecer una comunicación adecuada entre los distintos dispositivos y módulos de la planta. Con la implementación de la red LAN y la programación en C++, se buscó además mejorar la conectividad y optimizar los procesos de comunicación, facilitando así una mayor flexibilidad y control operativo.

Se incorporó un controlador Raspberry Pi Modelo 4 para gestionar la comunicación con el gestor MQTT remoto. Además se integró Node-RED para configurar flujos de datos y desarrollar el panel de supervisión en tiempo real.

**III-C1. Uso de código en C++:** Para garantizar la correcta integración entre los dispositivos IIoT y la supervisión del sistema, se utilizó un método de extracción y procesamiento de datos en C++.

El uso del código requirió la identificación y clasificación de las variables utilizadas en la arquitectura. Posteriormente, se utilizó código en C++ que se encarga de recibir los datos transmitidos por los dispositivos mediante el protocolo MQTT, para procesarlos y almacenarlos para su análisis y visualización.

Para evitar problemas de compatibilidad y mejorar la eficiencia del sistema, se emplearon bibliotecas especializadas escritas en C++ para la gestión de conexiones MQTT y la manipulación de datos en tiempo real. Esta implementación permitió la integración fluida entre los dispositivos físicos y la plataforma de monitoreo, optimizando la comunicación en la arquitectura IIoT.

El diagrama de bloques de la Figura 4 representa la secuencia estándar de fabricación con cada controlador TXT ejecutando código compilado en C++ específico para su estación asignada.

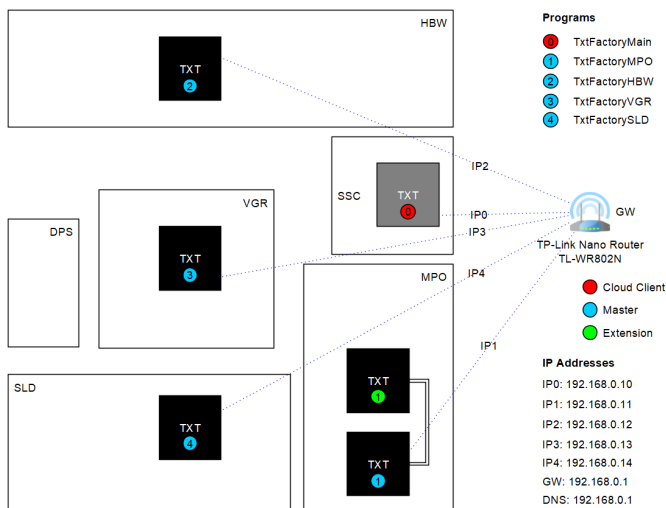


Figura 4. Diagrama de bloques de la planta Fishertechnik, adaptado de [13]

**III-C2. Uso de un panel de control personalizado con Node-RED:** Node-RED es una herramienta de desarrollo de código abierto basada en flujos para la integración de dispositivos de hardware IoT, Interfaces de Programación de Aplicaciones (APIs) y servicios en línea, desarrollada por la Corporación Internacional de Máquinas para Negocios (IBM) [19].

A través de Node-RED, se diseñó un panel de control personalizado para la visualización del estado de los procesos en tiempo real. Se analizaron los datos transmitidos por los controladores y sensores, organizándolos y representándolos en una interfaz gráfica que permitió un monitoreo eficiente del sistema.

Las estaciones conectadas a través de MQTT operaron sincrónicamente, demostrando robustez en la arquitectura distribuida. Las visualizaciones en Node-RED permitieron detectar eventos críticos como fallos en sensores o bloqueos de actuadores en tiempo real.

**III-C3. Configuración del ERP Odoos para su Integración con el gestor MQTT:** Se implementó un sistema ERP con el propósito de analizar los datos generados por la operación y asistir a los usuarios en la toma de decisiones sobre sus procesos empresariales [20].

El uso efectivo de estos sistemas permite a las organizaciones mantenerse competitivas, tomar decisiones fundamentadas en datos y fomentar la colaboración entre las partes interesadas, lo que contribuye a mejorar la eficiencia operativa y el éxito global [21].

El sistema ERP elegido, Odoos v18, es una solución de código abierto ampliamente utilizada que permite integrar funcionalidades como gestión de inventario, CRM, manufactura, punto de venta, compras y más, siendo ideal para entornos industriales que requieren flexibilidad y personalización [17].

El protocolo MQTT fue elegido por su bajo consumo de ancho de banda y su eficiencia en la comunicación entre múltiples dispositivos IoT, lo que lo convierte en una opción ideal para arquitecturas distribuidas como la propuesta en este sistema [11], [12].

**III-C3a. Configuración del gestor MQTT:** La configuración del gestor incluyó la creación de temas jerárquicos del tipo `iiot/recepcion`, `iiot/produccion`, etc., y se emplearon mecanismos de autenticación básica para garantizar la seguridad en la publicación de mensajes. La herramienta `MQTT Explorer` fue utilizada para verificar visualmente la recepción de mensajes correctamente estructurados.

**III-C3b. Prueba Inicial con MQTT:** Inicialmente, se desarrolló una arquitectura compuesta por los siguientes elementos: `scripts Python` que actúan como publicadores MQTT simulando sensores físicos, `scripts Python` que actúan como intermediarios Odoos, y una instancia de `Odoos v18 Enterprise` desplegada en la nube usando `Odoos.sh` donde se ejecuta otro `script Python` que actúa como suscriptor MQTT.

En esta fase preliminar del proyecto, se implementó un intercambio básico de publicación y suscripción utilizando el protocolo MQTT para verificar la transmisión de datos entre el entorno físico y el sistema empresarial. Se enviaron mensajes en formatos `JSON` y `XML` simulando eventos operativos como la recepción de productos, el registro de tiempos de producción

y movimientos de inventario. Esta prueba permitió verificar la correcta integración entre los flujos físicos y la interfaz de Odoo v18, confirmando la viabilidad de una arquitectura IIoT jerárquicamente distribuida.

Para facilitar las pruebas de la arquitectura sin depender completamente del hardware físico, se desarrollaron *scripts* en Python que simulan sensores industriales. Estos *scripts* generaban datos relativos a productos recibidos, tiempos de operación y otros eventos típicos de planta, los cuales eran publicados a través de MQTT hacia el gestor MQTT. Esta simulación permitió verificar la lógica de procesamiento y la interacción entre componentes IIoT en un entorno controlado.

Posteriormente, estos flujos fueron enlazados a formularios web. Al recibir un mensaje MQTT, este era procesado y transformado en una solicitud mediante el Protocolo de Transferencia de Hipertexto (*HTTP, por sus siglas en inglés: HyperText Transfer Protocol*), utilizando el protocolo JSON-RPC, lo cual ejecutaba una función dentro del sistema Odoo v18. Adicionalmente, se realizaron pruebas con el protocolo XML-RPC.

Para ello se desarrolló un intermediario Odoo que permite procesar datos provenientes de dispositivos conectados dentro de la arquitectura IIoT, empleando el protocolo MQTT para la comunicación transformándolos en solicitudes HTTP dirigidas a Odoo v18, permitiendo así la actualización automática de los registros en los módulos de producción, inventario y logística del ERP.

Por ejemplo, se automatizaba la actualización de una línea de recepción (*stock.picking*) o el registro de tiempos de operación en una orden de trabajo (*mrp.workorder*), lo que posibilita una integración robusta, extensible y en tiempo real entre el sistema físico y el ERP.

*III-C3c. Verificación de la Integración con Odoo:* La verificación de la integración entre Odoo v18 y la planta didáctica Fischertechnik se realizó a partir de una configuración inicial que implicó la creación de una base de datos e instancia en la plataforma `Odoo.sh`, seguida de la instalación de aplicaciones clave como Inventario, Compras, Manufactura e Internet de las Cosas (IoT).

Una vez configurada la instancia, se habilitaron accesos mediante credenciales de usuario con permisos administrativos, y se definieron los datos maestros, incluyendo productos, ubicaciones, listas de materiales y órdenes de fabricación.

*III-C4. Integración de Odoo vía el intermediario Odoo:* Posteriormente, con el objetivo de habilitar la automatización e interoperabilidad en la planta didáctica, se llevó a cabo la integración con el sistema ERP Odoo v18 utilizando el protocolo MQTT y el intermediario Odoo. Esta solución permitió recibir datos generados desde los sensores físicos y virtuales del entorno IIoT convirtiendo estos datos en solicitudes HTTP dirigidas a Odoo v18, actualizando directamente su base de datos.

A diferencia de configuraciones tradicionales donde se usa Mosquitto como gestor MQTT en un computador convencional, en esta implementación se utilizó el controlador Fischertechnik TXT0 como gestor MQTT local, reemplazando así el habitual servicio en un entorno de escritorio. Este controlador centralizó la comunicación entre los demás controladores TXT

clientes, distribuidos en los procesos de recepción, producción, almacenamiento y despacho de la planta didáctica.

En el intermediario Odoo (alojado en una Raspberry Pi 4), se configuró la suscripción a temas jerárquicos MQTT, permitiendo recibir datos tanto desde sensores simulados como desde los controladores TXT físicos, así como el envío a `Odoo.sh`.

La verificación se llevó a cabo al visualizar en tiempo real cómo los datos provenientes de la planta eran correctamente registrados y reflejados en la interfaz de Odoo, confirmando así una integración efectiva y bidireccional entre el sistema ERP y el entorno físico mediante el intermediario Odoo como *middleware* IIoT.

Por ejemplo, se automatizaba la actualización de una línea de recepción (*stock.picking*) o el registro de tiempos de operación en una orden de trabajo (*mrp.workorder*).

De forma análoga, se verificó el envío de tiempos a órdenes de trabajo activas, lo que permitió comprobar que el intermediario Odoo no solo permitía actualizar datos logísticos, sino también productivos, alineando la operación física con los registros digitales del ERP.

A futuro, habría que sopesar la conversión del intermediario Odoo a flujos Node-RED, lo que podría representar un avance hacia una solución visualmente programable. Esta migración posiblemente permitiría gestionar flujos de datos más complejos, integrar validaciones lógicas, conectar nuevas fuentes de datos y desplegar interfaces operativas en tiempo real. Además, podría facilitar la compatibilidad con múltiples protocolos, y la integración con herramientas externas como bases de datos, plataformas de visualización o inteligencia artificial, lo que abre la puerta a futuras extensiones de la arquitectura IIoT implementada.

### III-D. Verificación

La arquitectura fue verificada en una secuencia de operación en dos niveles: empresarial y planta.

*III-D1. Nivel Empresarial:* A continuación se describe en mayor detalle la operación del sistema mediante los dos casos de uso básicos del sistema: Compra de Materiales y Venta de Productos.

Los flujos de trabajo empresariales se describieron gráficamente empleando el *Modelo y Notación de Procesos de Negocio (BPMN)* para lo cual se tiene el flujo del [Proceso de Compra](#), que comprende desde una necesidad de materia prima hasta la conciliación bancaria posterior al pago, integrando procesos de abastecimiento, almacenamiento, contabilidad y tesorería. También está el flujo del [Proceso de Venta](#) que abarca desde la solicitud de un bien por parte del cliente hasta la conciliación bancaria posterior al cobro, integrando procesos de ventas, planeación de la demanda, abastecimiento, producción, almacenamiento, distribución, contabilidad, cartera y tesorería. A continuación se explicará lo ilustrado en los flujos de proceso:

*III-D1a. Procesamiento de la orden de compra de materiales:* El proceso inicia con la detección de la falta de materiales, lo que activa una planificación de abastecimiento por parte del Departamento de Logística. A partir de esta

necesidad, el sistema genera una orden de compra, en la que se detallan los artículos requeridos, proveedor, cantidades y condiciones de entrega.

Posteriormente, el Departamento Logístico valida la recepción de los materiales, los almacena en una ubicación y está pendiente de la factura enviada por el proveedor para su revisión, pues sin esta no podrá generarse la factura de compra desde la orden de compra.

Después de crear la factura de compra, es aquí donde el Departamento Financiero valida y confirma la factura de compra. Luego efectúa el pago de la factura y registra el pago saliente. Ya con eso puede realizarse la conciliación bancaria cargando los extractos para verificar que el desembolso corresponde al pago registrado.

Una vez se comprueba la disponibilidad de los materiales, estas se trasladan hacia los centros productivos donde serán consumidos. Esta integración con Odoo no solo centraliza la gestión operativa, sino que también posibilita la automatización de decisiones a través de sistemas IIoT, como sensores físicos, gestores MQTT y plataformas intermedias como Node-RED y Python, facilitando una respuesta inmediata ante cambios en la disponibilidad de insumos.

*III-D1b. Procesamiento de la orden de venta:* El proceso comienza cuando un cliente externo manifiesta la necesidad de un producto. A partir de este requerimiento, el Equipo de Ventas le genera y envía una cotización para su revisión y aprobación. Una vez aprobada, se genera una orden de venta y esta dispara automáticamente una orden de fabricación. Posteriormente, se notifica al Área de Planeación de la Demanda para que indique la cantidad a fabricar en la orden. Es claro precisar que para confirmar la orden de fabricación debe comprobarse la disponibilidad de materiales en inventario. En caso de no contar con los materiales requeridos, debe iniciarse un Proceso de Abastecimiento.

De acuerdo con lo anterior, después de contar con todos los recursos (materiales, máquinas, personas) para procesar la orden de fabricación, es aquí donde el Área de Producción planea el momento de fabricación a través del Cronograma Maestro de Producción (MPS). En la fecha de fabricación se procede a ejecutar la orden, consumiendo materiales y registrando tiempos de procesamiento en cada uno de los centros productivos. Una vez fabricado el producto, se traslada a la bodega de producto terminado y se almacena en una ubicación para que el Área de Distribución proceda con el despacho y la creación de la factura desde el pedido de venta.

Finalmente, el Departamento Financiero, valida y confirma la factura de venta para proceder con el cobro y registro del pago entrante, ya con eso puede realizarse la conciliación bancaria cargando los extractos para verificar que lo recaudado corresponde al pago registrado.

*III-D2. Nivel de planta:* Para efectos de ilustrar la operación en planta, se filmó un [vídeo corto](#).

Para el nivel de planta, la secuencia también se describió mediante los dos casos de uso básicos del sistema: [Proceso de recepción y almacenamiento de materiales](#) y [Proceso de manufactura](#). Para esto se usaron *Diagramas de Secuencia de Mensajes (MSC)* [22], una notación útil para describir sistemas distribuidos como el de este estudio.

*III-D2a. Proceso logístico inteligente de recepción y almacenamiento de materiales en zona 1 (DSI):* Este proceso inicia una vez que en el Proceso de Abastecimiento en el nivel empresarial se detecta que hacen falta materiales para poder manufacturar un producto.

La operación consistió en la colocación manual de la pieza sobre la plataforma destinada a la recepción de materiales DSI. Una vez la pieza es colocada en la estación DSI, inicia automáticamente el proceso de almacenamiento mediante VGR y lectura NFC. En dicha estación se lleva a cabo la eliminación de cualquier dato residual correspondiente a procesos anteriores. En caso que el lector NFC no detecte la presencia de una etiqueta en la pieza, esta es clasificada como “defectuosa” y retirada del sistema.

Posteriormente, se procede a la identificación cromática de la pieza mediante un sensor de color. Una vez determinado el color, la unidad NFC asigna a la pieza un código único de 14 caracteres, el cual integra información relativa a la ubicación de almacenamiento, el color detectado y el resultado del control de calidad. La determinación de la ubicación de almacenamiento se realiza de manera automática siguiendo una disciplina *First-In, First-Out (FIFO)*, y dicha información es transmitida a la plataforma *FT Cloud* para su utilización futura.

A continuación, el almacén de gran altura (HBW) localiza un contenedor vacío y lo traslada hasta la estación de transferencia, donde se deposita la pieza de trabajo. Finalizado este paso, el contenedor completo es reintegrado al sistema HBW.

Toda la información correspondiente al Gemelo Digital (*Digital Twin*) se encuentra disponible en la interfaz de la nube. Esta visualización muestra el sistema de almacenamiento: espacios disponibles, colores de productos y código NFC de cada pieza, lo que permitió asegurar su trazabilidad y correcta identificación.

*III-D2b. Proceso inteligente de producción y despacho de producto en zona 2 (DSO):* Este proceso inicia una vez que en el nivel empresarial se dispara una orden de fabricación.

La realización de un pedido únicamente es posible si las piezas requeridas han sido previamente registradas de manera digital, lo que garantiza su disponibilidad física en el sistema.

La transferencia de las piezas desde el sistema de almacenamiento hacia el actuador de vacío se lleva a cabo en la estación de transferencia correspondiente al sistema HBW. A continuación, VGR recoge la pieza solicitada y la traslada a la estación (llamada también centro productivo en el nivel empresarial) MPO, donde se simulan procesos industriales, tales como horneado y mecanizado (fresado), a través de tiempos de espera predeterminados.

Posteriormente, un manipulador de menor escala se encarga de transportar la pieza hacia el siguiente proceso. Una vez concluida esta etapa, la pieza es dirigida hacia la línea de clasificación con detección de color (SLD), donde se vuelve a detectar su color y se procede a su distribución en el contenedor de almacenamiento adecuado.

Seguidamente, el VGR extrae la pieza del contenedor correspondiente y la transporta nuevamente a la unidad NFC. En esta instancia, la información almacenada en la etiqueta NFC se amplía para incorporar los datos correspondientes a los pro-

cesos recientemente ejecutados, tales como “procesamiento” y “envío”. Una vez finalizada la escritura de estos datos, la pieza procesada es conducida hacia el área de expedición, donde queda disponible para su recolección manual.

Se documentó el comportamiento del sistema: mediante etiquetas NFC, se realizó la trazabilidad de piezas y la interacción con el sistema ERP para actualizar automáticamente registros de inventario.

Durante la verificación funcional se procesaron correctamente 3 piezas por ciclo de prueba, con una tasa de lectura NFC exitosa del 100 %. El tiempo promedio entre la lectura de la etiqueta y la actualización del pedido en Odoo fue de 3 a 5 segundos, dependiendo de la conectividad.

En la Tabla I se resumen los indicadores clave de desempeño técnico obtenidos durante las pruebas funcionales del sistema IIoT, incluyendo tiempos de ciclo, tasas de error y latencias.

Tabla I  
INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA IIoT IMPLEMENTADO

Indicador técnico	Valor observado
Número total de pruebas simuladas	5 ciclos
Tiempo promedio de ciclo completo	240 segundos
Tasa de detección automática por color	100 %
Errores de escritura en etiqueta NFC	0
Desfase entre lectura y actualización en Odoo	3–5 segundos
Tiempo de despliegue de visualización	<2 segundos

**III-D3. Integración Niveles empresarial y de planta:** En este caso, la secuencia también se describió mediante los dos casos de uso básicos del sistema: **Proceso de recepción y almacenamiento de materiales** y **Proceso de manufactura**.

Para esto se usaron diagramas MSC, una notación útil para describir el intercambio de datos e información en sistemas distribuidos, usando no solo mensajes sino también llamados remotos a procedimientos.

## IV. DISCUSIÓN

### IV-A. Análisis de los principales hallazgos

La implementación de la arquitectura IIoT demostró ser técnicamente viable en un entorno didáctico, con resultados que reflejan una correcta integración entre los controladores Fischertechnik y el sistema ERP Odoo mediante el protocolo MQTT y el intermediario Odoo. La actualización automática de registros de inventario en menos de cinco segundos evidencia la eficiencia del flujo de datos, aspecto crítico en sistemas logísticos.

El éxito del 100 % en las lecturas NFC y la operación continua sin errores durante múltiples ciclos de prueba validan la confiabilidad de la solución propuesta. A pesar de ello, esta eficiencia está condicionada por la estabilidad de la red inalámbrica, lo que se evidenció en pruebas con alta congestión de tráfico, lo cual también ha sido documentado en aplicaciones industriales donde se requiere baja latencia y alta confiabilidad [23].

### IV-B. Limitaciones y desafíos observados

Durante el desarrollo de la arquitectura IIoT, se identificaron diversos desafíos en la comunicación entre los controladores

Fischertechnik TXT y los gestores MQTT local y remoto. Se presentaron problemas tanto físicos como de software. En particular, se presentaron incompatibilidades de firmware y dificultades en la transmisión de datos en tiempo real.

Para solucionar esto, se actualizó el firmware de los controladores TXT FT a la versión 4.7, lo que permitió la compatibilidad con C++ y mejoró significativamente la estabilidad de la comunicación. No obstante, esta solución requirió un análisis acompañado de un proceso sistemático de prueba y ajuste, lo que retrasó parcialmente la implementación inicial. Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar plataformas con amplio soporte técnico y compatibilidad con protocolos industriales estándar. Estas limitaciones son comunes en proyectos IIoT que requieren integrar dispositivos con protocolos heterogéneos [24].

En el aspecto de hardware, la integración del *router* TP-Link para la red LAN resolvió parcialmente la conectividad. No obstante, se identificaron interferencias en la señal Wi-Fi cuando la red estaba congestionada. En el software, la implementación de Node-RED facilitó la visualización del intercambio de datos entre los diferentes controladores, aunque también introdujo retos en la integración con el ERP Odoo, debido a diferencias en el formato y la estructura de los datos transmitidos. Esta experiencia sugirió que la compatibilidad entre plataformas debe analizarse en etapas tempranas del diseño para evitar reconfiguraciones tardías.

Durante la implementación de la arquitectura IIoT con MQTT y su integración con Odoo v18, se identificaron diversos desafíos técnicos y operativos que deben ser considerados en entornos reales:

- **Gestión de seguridad en entornos MQTT:** El uso de comunicación anónima facilita el desarrollo y pruebas, pero no es viable en producción. Implementar autenticación, cifrado utilizando el protocolo TLS y control de acceso por tema representa un reto adicional en términos de configuración y mantenimiento.
- **Escalabilidad de los *scripts* Python:** Aunque funcional, el enfoque inicial con *scripts* puede volverse complejo y difícil de mantener en proyectos grandes. Esta limitación refuerza la necesidad del análisis de migración a Node-RED, que permite gestionar flujos visuales de forma más modular.
- **Sincronización con Odoo ERP:** Las operaciones en Odoo, como la búsqueda de preparación de pedidos y actualización de líneas de movimiento, requieren múltiples llamadas API. Esto puede generar latencias o errores si no se gestiona correctamente la autenticación de sesiones o se pierde conectividad.
- **Gestión de errores y trazabilidad:** La solución actual requiere robustecer el manejo de excepciones y registros de eventos para asegurar trazabilidad en caso de fallos de red, errores en la carga útil (*payload*) recibida o respuestas inesperadas del ERP.
- **Integración con sensores físicos reales:** La incorporación de hardware físico adicional (sensores, actuadores, Controladores Lógicos Programables –PLCs–) requerirá adaptaciones tanto en conectores físicos como en protocolos de comunicación, que podrían diferir de MQTT.

#### IV-C. Impacto académico y formativo

Desde una perspectiva de aprendizaje, en el desarrollo del proyecto se aplicaron conocimientos previos en IoT, comunicación de datos y programación en C++, al tiempo que requirió la adquisición de nuevas habilidades en la configuración de redes industriales, el uso de protocolos JSON-RPC y XML-RPC así como el uso de herramientas como Node-RED y Odo ERP.

Se identificó la necesidad de desarrollar estrategias más eficientes para la depuración de errores en sistemas industriales complejos, dado que la resolución de fallos de comunicación y procesamiento de datos requirió un enfoque sistemáticamente complejo de prueba y error.

Desde una perspectiva educativa, el sistema validado funcionó como una plataforma efectiva para la enseñanza aplicada de tecnologías emergentes como IIoT, integración ERP y monitoreo en tiempo real, en un entorno controlado.

#### IV-D. Propuesta de Recomendaciones para la Implementación en plantas industriales.

Teniendo en cuenta el trabajo realizado y la experiencia ganada en la implementación de la arquitectura IIoT en la planta industrial didáctica del Laboratorio de Ingeniería Industrial, se proponen las siguientes recomendaciones para su adopción en plantas industriales reales:

- El análisis y la evaluación de la infraestructura tecnológica existente es un paso fundamental previo a la implementación de cualquier solución IIoT. Resulta crucial identificar el estado actual de los componentes y dispositivos disponibles, ya que esto permite detectar necesidades específicas en cuanto a la disposición de redes de datos, capacidad de procesamiento, compatibilidad con sistemas ERP, y la disponibilidad de instrumentos de campo, como sensores y actuadores.
- Estándares de comunicación y protocolos abiertos. Para garantizar interoperatividad y escalabilidad futura, se aconseja utilizar protocolos estándar como MQTT o la *Open Platform Communications Unified Architecture (OPC-UA)*, lo que facilita la integración con plataformas ERP, paneles de visualización y plataformas en la nube.
- Capacitación del personal técnico y operativo. La adopción de IIoT requiere una curva de aprendizaje. Es recomendable formar al personal en el uso de interfaces, mantenimiento de sensores, interpretación de datos y toma de decisiones basadas en visualizaciones en tiempo real.
- Seguridad de la información y control de accesos. Se deben considerar medidas de ciberseguridad desde el diseño, como el cifrado de datos, autenticación de dispositivos, segmentación de redes y monitoreo de accesos, especialmente al trabajar con plataformas en la nube.
- Uso de paneles de visualización para la toma de decisiones. La implementación de sistemas de monitoreo, como Node-RED u otras soluciones de Sistemas de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (*SCADA*), resulta fundamental para realizar el seguimiento, la verificación y la visualización de la información relacionada con los estados operativos de la planta FT en tiempo real. Estas

herramientas ofrecen interfaces intuitivas que permiten a los operadores reaccionar rápidamente ante anomalías y contribuir a la optimización de los procesos.

- Evaluación continua del desempeño del sistema. Una vez implementada la arquitectura, es fundamental realizar un seguimiento del comportamiento del sistema, evaluando su desempeño a través de indicadores clave de rendimiento (*KPIs*). Este análisis permite identificar cuellos de botella y establecer propuestas de mejora continua que optimicen la eficiencia operativa.

## V. CONCLUSIONES

El diseño e implementación de una arquitectura IIoT en una planta didáctica de manufactura representó una solución viable para optimizar la gestión de inventarios y mejorar la supervisión de procesos logísticos mediante la integración de módulos automatizados Fishertechnik con controladores TXT, sensores NFC, los protocolos MQTT, JSON-RPC, XML-RPC, el sistema ERP Odo v18 y la plataforma de desarrollo visual Node-RED. Esta integración permitió automatizar operaciones como la recepción, almacenamiento, clasificación y despacho de productos, con trazabilidad completa de cada pieza mediante identificación por radiofrecuencia.

Los resultados evidenciaron que la digitalización de los procesos mejora la comunicación entre dispositivos y permite una mayor automatización en la gestión operativa.

Los resultados obtenidos permitieron verificar la factibilidad técnica y funcional del sistema propuesto. Durante las pruebas se alcanzó un 100% de éxito en la lectura de etiquetas, sincronización estable entre los dispositivos y el ERP, y una latencia inferior a cinco segundos en condiciones normales de red. Estas métricas muestran que una arquitectura distribuida y modular, incluso basada en componentes de bajo costo y herramientas de código abierto, puede cumplir con requisitos industriales esenciales como confiabilidad, trazabilidad y eficiencia operativa.

Durante la investigación, se identificaron desafíos en la integración de hardware y software. En particular, surgieron problemas de compatibilidad entre controladores y dificultades en la estabilidad de la red de comunicación. La solución implementada permitió superar estos retos y establecer una base funcional para futuras optimizaciones. Estos hallazgos subrayan la importancia de realizar pruebas exhaustivas antes de la implementación en entornos industriales a gran escala.

El desarrollo de esta solución no solo permitió verificar una arquitectura IIoT funcional en un entorno educativo, sino que también fortaleció el aprendizaje aplicado en automatización, trazabilidad e integración digital, consolidándose como una plataforma formativa replicable. Permitted aplicar competencias técnicas en un contexto interdisciplinario y aproximarse a problemáticas reales de la Industria 4.0. Asimismo, fortaleció habilidades de pensamiento crítico, resolución de problemas, documentación de procesos, y diseño orientado a la funcionalidad y escalabilidad. El uso de una planta didáctica de manufactura como entorno de validación aportó un marco ideal para el aprendizaje experiencial y la consolidación de saberes teóricos.

Este estudio demostró la viabilidad de integrar un sistema IIoT basado en MQTT con el ERP Odoo v18, mediante una arquitectura escalonada que incluye un gestor local y flujos de envío/recepción. La automatización de la recepción de productos mediante este enfoque permite verificar el potencial de esta arquitectura para entornos logísticos reales.

En términos de proyección, esta arquitectura tiene potencial para ser replicada en laboratorios de ingeniería, centros de formación técnica y, con los ajustes pertinentes, en pequeñas y medianas empresas que requieran soluciones accesibles para la gestión de inventario, trazabilidad de productos o automatización de procesos internos. La modularidad del sistema facilita su expansión con nuevas tecnologías, como analítica de datos, visión por computadora, monitoreo remoto o incluso algoritmos de inteligencia artificial enfocados en mantenimiento predictivo o logística avanzada.

La implementación resaltó la necesidad de reforzar aspectos como la seguridad, escalabilidad y robustez del sistema, especialmente en su tránsito hacia entornos de producción. Estos aprendizajes sientan las bases para avanzar hacia una digitalización industrial más confiable y eficiente.

Tanto la funcionalidad del sistema Fischertechnik repotenciado como la integración con ERP Odoo fueron verificados.

Como líneas futuras, se propone la incorporación de herramientas de inteligencia artificial para explorar estrategias avanzadas de análisis de datos, con énfasis en capacidades predictivas, así como el fortalecimiento de los mecanismos de seguridad en la red. La experiencia adquirida en este trabajo puede contribuir al desarrollo de soluciones formativas más robustas y transferibles a sectores productivos reales. Asimismo, se recomienda evaluar el impacto económico de la adopción de arquitecturas IIoT en distintos entornos industriales, y profundizar en la integración con plataformas ERP con el fin de lograr una gestión empresarial más eficiente y alineada con los principios de la Industria 4.0.

En resumen, la evaluación del impacto evidencia que la arquitectura IIoT no solo optimiza los procesos industriales en un entorno didáctico, sino que también representa un recurso pedagógico valioso para la formación de ingenieros altamente calificados.

## REFERENCIAS

- [1] F. Behrendt, O. Lehner, A. Rettmann, N. Schmidtke, and T. Wollert, "Process analysis of a teaching and learning factory environment to demonstrate Industry 4.0 solutions by using the Smart Logistics Zone approach," in *2022 IEEE 6th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, pp. 1–10, 2022.
- [2] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, "The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0," *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, 2017.
- [3] M. Rübmann, M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel, and M. Harnisch, *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*, vol. 9. Boston, MA, USA:, 2015.
- [4] T. Qiu, J. Chi, X. Zhou, Z. Ning, M. Atiqzaman, and D. O. Wu, "Edge computing in industrial internet of things: Architecture, advances and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2462–2488, 2020.
- [5] L. Malburg, R. Seiger, R. Bergmann, and B. Weber, "Using Physical Factory Simulation Models for Business Process Management Research," in *Business Process Management Workshops* (A. Del Río Ortega, H. Leopold, and F. M. Santoro, eds.), (Cham), pp. 95–107, Springer International Publishing, 2020.
- [6] M. Alabadi, A. Habbal, and X. Wei, "Industrial Internet of Things: Requirements, architecture, challenges, and future research directions," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 66374–66400, 2022.
- [7] O. Peter, A. Pradhan, and C. Mbohwa, "Industrial Internet of Things (IIoT): opportunities, challenges, and requirements in manufacturing businesses in emerging economies," *Procedia Computer Science*, vol. 217, pp. 856–865, 2023.
- [8] M. Ten Hompel, T. Bauernhansl, and B. Vogel-Heuser, *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 3: Logistik*. Springer, 2020.
- [9] E. Abele, G. Chryssolouris, W. Sihn, J. Metternich, H. ElMaraghy, G. Seliger, G. Sivard, W. ElMaraghy, V. Hummel, M. Tisch, and S. Seifermann, "Learning factories for future oriented research and education in manufacturing," *CIRP Annals*, vol. 66, no. 2, pp. 803–826, 2017.
- [10] R. Sala, F. Pirola, and G. Pezzotta, "On the development of the digital shadow of the fischertechnik training factory industry 4.0: an educational perspective," *Procedia Computer Science*, vol. 217, pp. 640–649, 2023.
- [11] J. R. Koelsch, "Why the MQTT Protocol is So Popular, [Online]." Available: <https://www.automationworld.com/factory/iiot/article/22080946/why-the-mqtt-protocol-is-so-popular>, 2022. [Accessed: 10 mayo 2025].
- [12] Systems 22 Pty Ltd, "The MQTT protocol: advantages for industrial networks, [Online]." Available: <https://www.processonline.com.au/content/industrial-networks-buses/article/the-mqtt-protocol-advantages-for-industrial-networks-1144397399>, 2022. [Accessed: 10 mayo 2025].
- [13] A. L. De Sousa and A. S. de Oliveira, "Order-controlled production employing multi-agent and flexible job-shop scheduling on a physical simulation platform," in *2022 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2022 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pp. 229–234, IEEE, 2022.
- [14] Fischertechnik GmbH, "ROBO Pro Software Manual, [Online]." Available: <https://www.fischertechnik.de/en/service/downloads/learning/robotics>, 2020. [Accessed: 12 mayo 2025].
- [15] P. Hu, "A System Architecture for Software-Defined Industrial Internet of Things," *arXiv preprint arXiv:1507.08810*, 2015.
- [16] Fischertechnik GmbH, "FT Cloud – Fischertechnik Cloud Platform, [Online]." Available: <https://www.fischertechnik.de/en/service/cloud>, 2023. [Accessed: 24 mayo 2025].
- [17] Team Bassam, "Odoo ERP Software Benefits and the Future of ERP, [Online]." Available: <https://bassaminfotech.com/odoo-erp-software-benefits/>, 2022. [Accessed: 10 mayo 2025].
- [18] A. Sánchez, "Importancia del protocolo MQTT en el IIoT, [Online]." Available: <https://digitaliot.mx/importancia-protocolo-mqtt-en-iiot/>, 2024. [Accessed: 10 mayo 2025].
- [19] Programming the IoT, "Node-RED Programming Guide [Online]." Available: <https://noderedguide.com/>, 2023. [Accessed: 22 marzo 2025].
- [20] E. J. Umble, R. R. Haft, and M. M. Umble, "Enterprise resource planning: Implementation procedures and critical success factors," *European journal of operational research*, vol. 146, no. 2, pp. 241–257, 2003.
- [21] J. Goldston, "The evolution of ERP systems: A literature review," *International Journal of Research*, vol. 50, no. 1, pp. 17–17, 2020.
- [22] International Telecommunication Union (ITU), "Message Sequence Charts (MSC). ITU Recommendation Z.120. [Online]." Available: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/11063>, 2011. [Accessed: 08 abril 2025].
- [23] T. Covas, S. V. Lopes, A. Martins, and C. Ferreira, "Node-RED for Supervisory Control and Data Acquisition: An Open-Source Approach," *Inventions*, vol. 1, no. 1, p. 5, 2016. Accessed: 2025-05-09.
- [24] J. Theocharis, "Node-RED in Industrial IoT: A Growing Standard, [Online]." Available: <https://learn.umh.app/blog/node-red-in-industrial-iiot-a-growing-standard/>, 2021. [Accessed: 20 mayo 2025].