

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**Implementación de Procesos de Industria 4.0 para la
Automatización en el Control de Inventarios del Almacén de
Materia Prima**

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

PRESENTA:

Salvador Ivan Huitrón de Anda

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Judith Marisela Paz Delgadillo

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Juan Ricardo Salinas Martínez

Mexicali, B.C.

Diciembre de 2025

DEDICATORIA

A mi madre, por su ejemplo de fuerza, dedicación y por estar siempre a mi lado. Gracias por sus palabras de ánimo, por creer siempre en mí y por enseñarme el valor del trabajo, la disciplina y la constancia. Cada logro que he alcanzado se lo debo a ella, con su guía, su esfuerzo y amor que siempre está para mí.

A mi hermana, por estar presente a mi lado con su apoyo, su cariño y sus consejos en los momentos que más la necesite, recordándome siempre que debo creer en mí.

A mi familia, por acompañarme en cada etapa de este camino y brindarme su apoyo, comprensión y motivación. Su presencia ha sido un impulso constante para continuar avanzando y superar los desafíos que se a lo largo de este proceso académico.

A mis amigos y compañeros, por estar presentes con su amistad y ánimo, haciéndome sentir que nunca caminé solo.

A mí, por creer en mis capacidades incluso cuando en las noches de desvelo pensé en rendirme, y por demostrarme que la perseverancia siempre ayuda a enfrentar los retos.

AGRADECIMIENTOS

Este logro lo dedico a todas las personas que me brindaron su apoyo, pues cada una fue una parte importante en el desarrollo de este proyecto. Por ello, deseo expresar mis más profundos agradecimientos.

También quiero agradecer a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por brindarme el apoyo financiero que hizo posible continuar con mi formación y avanzar en este proyecto.

Al Instituto de Ingeniería de la UABC, por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y por el apoyo académico y formativo que recibí durante el proceso.

Debo agradecer de manera especial a la Dra. Judith Marisela Paz Delgadillo por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Sus conocimientos, su apoyo y confianza fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

A mi codirector, el Dr. Juan Ricardo Salinas Martínez, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN	11
1.1. Introducción	11
1.2. Planteamiento del Problema	12
1.3. Justificación	12
1.4. Objetivos	14
1.4.1. Objetivo General	14
1.4.2. Objetivos Específicos	14
1.5. Hipótesis	15
2 CAPÍTULO: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	16
2.1. Lean Six Sigma	16
2.1.1. DMAIC para la solución de problemas en PyMEs	17
2.2. Manufactura Avanzada	20
2.2.1. Definición y características	20
2.2.2. Clasificación de la Manufactura Avanzada	21
2.2.3. Antecedentes de la Manufactura Avanzada	21
2.2.4. Procesos de Industria 4.0	22
2.2.5. Internet de las Cosas (IoT)	23
2.2.6. Aplicaciones del IoT en la industria:	23
2.2.7. Computación en la Nube	24
2.2.8. Big Data	24
2.2.9. Inteligencia Artificial	25
2.3. Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs)	25
2.3.1. Clasificación de las PyMEs	25
2.3.2. Antecedentes históricos en México	26
2.3.3. PyMEs en Baja California	26
2.3.4. Principales retos de las PyMEs	27
2.4. Logística de almacenamiento	27
2.4.1. Siete principios del almacenamiento	27
2.4.2. Procesos de almacenamiento	29
2.4.3. Método PEPS (FIFO)	29
2.4.4. Tipos de almacenamiento de mercancías	30

2.5.	Sistema de Gestión de inventarios	31
2.5.1.	Tipos de Sistemas de Inventarios	31
2.5.2.	Herramientas para el control de inventarios	32
2.5.2.1.	Sistema RFID	32
2.6.	Aplicaciones de Microcontroladores	34
2.6.1.	Módulo ESP32-WROOM	34
2.6.2.	Módulo RC522	35
2.6.3.	Ordenador Raspberry	36
2.6.4.	Programación Python (software)	37
2.7.	Arquitectura de los sistemas IoT	38
3	CAPÍTULO: METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE INVENTARIOS.	41
3.1.	Metodología DMAIC	42
3.1.1.	Definir	42
3.1.2.	Medir	42
3.1.3.	Analizar	42
3.1.4.	Mejorar	43
3.1.5.	Controlar	43
3.2.	Criterios de diseño y lineamientos de la arquitectura del sistema	44
4	CAPÍTULO: RESULTADOS Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO	46
4.1.	Resultados	46
4.1.1.	Etapa. -Definir.....	46
4.1.2.	Etapa. -Medir	47
4.1.3.	Etapa. - Analizar.....	48
4.1.4.	Etapa 4. - Mejorar.....	49
4.1.5.	Etapa 5. Controlar.....	51
4.2.	Desarrollo del prototipo	52
4.2.1.	Diseño de la arquitectura del sistema de control.....	52
4.2.2.	Visión general de la arquitectura propuesta	52
4.2.3.	Relación de la arquitectura con las causas raíz y requerimientos identificados	55
4.3.	Construcción del prototipo.....	57
	57
4.3.1.	Etapa de Configuración Inicial	58
4.3.2.	Proceso de registro de materiales (Registro Principal)	65
4.3.3.	Proceso de registro de materiales (Registro Entrada).....	70
4.3.4.	Proceso de registro de materiales (Registro Salidas)	73

5 CAPÍTULO: DISCUSIÓN	78
5.1. Introducción	78
5.2. Contribución de la arquitectura al problema de inventarios	78
5.3. Relación con la literatura y el enfoque DMAIC–Industria 4.0	79
5.4. Potencial de mejora y evaluación futura.....	80
5.5. Limitaciones del estudio.....	81
6 CAPÍTULO: CONCLUSIONES	82
REFERENCIAS.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Arquitectura IoT del sistema de inventarios.	38
Fig. 2 Etapas y herramientas de la metodología DMAIC.....	43
Fig. 3 Carta de proyecto.....	46
Fig. 4 Herramienta 5W + 2H	47
Fig. 5 Diagrama SIPOC.....	48
Fig. 6 Diagrama de Ishikawa.	49
Fig. 7 Arquitectura del sistema de control de inventarios.....	55
Fig. 8 Proceso de logística de materiales.....	57
Fig. 9 Proceso de registro principal.....	58
Fig. 10 Asignación de nombre del dispositivo, usuario y contraseña.	59
Fig. 11 Configuración inicial de librerías mediante Windows PowerShell (SSH).	59
Fig. 12 Habilitado de conexión remota mediante VNC.....	60
Fig. 13 Proceso de registro de usuario y contraseña RealVNC View.	60
Fig. 14 Visualización sistema operativo Raspberry Pi.	61
Fig. 15 Interfaz del programa SQLite.	61
Fig. 16 Programa Thonny basado en Micro Python.....	62
Fig. 17 Configuración de puertos de comunicación USB.	62
Fig. 18 Instalación de Firmware módulo ESP32-WROOM.	63
Fig. 19 Validación correcta de la conexión por USB.	63
Fig. 20 Validación del sistema por medio de un programa predeterminando.	64
Fig. 21 Validación de la conexión a una red Wi-Fi.	64
Fig. 22 Listado de conexiones por medio de los puertos del módulo ESP32-WROOM.	65
Fig. 23 Lector 1.....	65
Fig. 24 Validación de conexión a una red Wi-Fi.....	66
Fig. 25 Validación de la conexión a MQTT.....	66
Fig. 26 Recepción de datos vía MQTT.....	67
Fig. 27 Proceso de Lectura de Tag.....	67
Fig. 28 Proceso de registro de información.....	68
Fig. 29 Registro de información recibida por el Bróker (MQTT).....	68
Fig. 30 Registro de información del proceso de entrada en SQLite.....	69
Fig. 31 Script Python para la creación de la dirección web.....	69

Fig. 32 Sitio Web de registro de inventarios de materiales.	70
Fig. 33 Lector 2.....	71
Fig. 34 Registro de entrada en sistema.....	71
Fig. 35 Información recibida por medio de MQTT.....	72
Fig. 36 Registro de información en SQLite.....	72
Fig. 37 Consulta de información en sitio Proceso de registro de materiales (Registro Salida).....	73
Fig. 38 Lector 3.....	74
Fig. 39 Proceso de lectura de tags.	74
Fig. 40 Inventario en sistema del tag leído.	75
Fig. 41 Registro manual de salida de material.	75
Fig. 42 Historial de Registros en script Python.	76
Fig. 43 Historial de registros SQLite.	76
Fig. 44 Historial de registros página WEB	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las PyMEs.....	26
Tabla 2 Relación de la arquitectura con las causas raíz y requerimientos identificados.....	56

RESUMEN

La industria 4.0, también conocida como transformación digital industrial, y asociada con la manufactura avanzada, está compuesta por tecnologías habilitadoras como el internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial, el análisis de datos y la robótica colaborativa. La implementación de estas herramientas ha logrado transformar los procesos productivos y logísticos en grandes corporativos, mejorando la eficiencia, la trazabilidad y la capacidad de respuesta en el mercado. No obstante, el costo y la complejidad asociada a la implementación de estas tecnologías hacen que su adopción sea poco frecuente en PyMEs, lo que reduce su competitividad y provoca rezagos en los sistemas de gestión de inventarios. El presente trabajo tiene como objetivo la aplicación de la metodología DMAIC utilizada en Six Sigma para la mejora de procesos existentes con un enfoque Industria 4.0, que permita la identificación, el análisis y la mejora de los procesos involucrados en el control de inventarios de PyMEs. Con base en los hallazgos, se desarrolló un prototipo integrado por módulos para la lectura, tecnología RFID para la identificación de materiales, un bróker MQTT y el administrador de datos a través de SQLite. El prototipo automatiza los tres procesos fundamentales del flujo de materiales: el registro inicial, la entrada y salida del almacén. En cada lectura se genera una base de datos estructurada, la cual es transmitida por MQTT y almacenada en la base de datos, esta puede ser consultada en tiempo real mediante una interfaz web. El diseño del prototipo y su bajo costo lo convierten en una alternativa viable y estratégica para las PyMEs que buscan incorporar soluciones automatizadas basadas en las tecnologías de Industria 4.0.

ABSTRACT

Industry 4.0, also known as advanced manufacturing or digital transformation, encompasses innovative technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, data analytics, and collaborative robotics. The implementation of these tools has transformed production and logistics processes in large corporations, improving efficiency, traceability, and market responsiveness. However, the cost and complexity associated with implementing these technologies make their adoption less frequent among small and medium-sized enterprises (SMEs), reducing their competitiveness and causing delays in inventory management systems. The objective of this work is the design, development, and validation of a technological prototype aimed at automating the processes involved in inventory control through IoT technologies and Industry 4.0 principles. To identify, analyze, and delimit the problem, the Six Sigma DMAIC methodology was applied, which guided the development of the project, enabling the identification, analysis, and improvement of inventory control processes. Based on the findings, a prototype was developed consisting of modules for data reading, RFID technology for material identification, a central server module, an MQTT broker, and a data manager through SQLite. The prototype automates the three fundamental processes of material flow: initial registration, warehouse entry, and warehouse exit. Each reading generates a structured database that is transmitted via MQTT and stored in the database, which can be consulted in real time through a web interface. The design of the prototype, together with its low cost, makes it a viable and strategic alternative for SMEs seeking to incorporate automated solutions based on Industrie 4.0 technologies.

1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Actualmente, la industria manufacturera atraviesa una etapa crucial de transformación impulsada por la Cuarta Revolución Industrial. Este nuevo paradigma tecnológico ha introducido herramientas avanzadas como la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IoT), la robótica colaborativa, la analítica de datos, entre otras, las cuales están revolucionando los procesos de producción, gestión y distribución de productos, trayendo un nuevo ecosistema que se caracteriza por la interconexión a través de la red de todos los procesos involucrados en la cadena de valor, dando lugar a lo que se conoce como la Industria 4.0 [1].

Estas tecnologías no solo incrementan la productividad, sino que también permiten una mayor flexibilidad operativa y la capacidad de desarrollar productos personalizados, adaptados a las necesidades del cliente. En este contexto, la logística de aprovisionamiento, almacenamiento y distribución juega un papel fundamental para garantizar la eficiencia en toda la cadena de valor [1].

El desarrollo tecnológico ha impulsado también el crecimiento exponencial del comercio electrónico, beneficiando especialmente a las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs). Este tipo de negocios ha logrado expandirse más allá de sus limitaciones geográficas tradicionales, accediendo a mercados globales. Sin embargo, este crecimiento también plantea nuevos desafíos logísticos que requieren de soluciones automatizadas y eficientes para el control y gestión de inventarios [2].

En respuesta a estos desafíos, la automatización de los procesos logísticos se ha convertido en una necesidad estratégica. La implementación de microcontroladores y otros sistemas es capaz de brindar alternativas para lograr la modernización de los procesos en los almacenes, optimizar recursos sin incurrir en altos costos operativos. Estas soluciones tecnológicas, alineadas con los principios de la Industria 4.0, permiten a las organizaciones reducir los tiempos de respuesta, disminuir errores y asegurar un control más preciso de los inventarios en tiempo real [3].

En este contexto, la presente investigación propone como contribución principal la mejora del sistema de control de inventarios en el almacén de materia prima con las características de una PyME manufacturera mediante la implementación de la metodología DMAIC, derivando de dicho análisis el diseño de una solución apoyada en tecnologías emergentes de la Industria 4.0, en particular dispositivos RFID y sistemas IoT. Esta propuesta integra de manera estructurada

herramientas de mejora de procesos con el diseño de una arquitectura tecnológica específica para el entorno de las PyMEs, orientada a fortalecer la estandarización, la trazabilidad y la disponibilidad de la información de los materiales, y sentando las bases para futuras implementaciones y evaluaciones en escenarios reales.

1.2. Planteamiento del Problema

En el entorno actual de la industria manufacturera, la eficiencia en la gestión de inventarios representa un desafío fundamental para garantizar la continuidad de la producción, evitar desperdicios y optimizar recursos. Las PyMEs, al no contar con grandes presupuestos o sistemas altamente sofisticados, suelen depender de procesos manuales o herramientas básicas para el control de sus almacenes de materia prima. Esto genera errores frecuentes como el registro duplicado de materiales, la pérdida de trazabilidad, el desabasto inesperado, o incluso el uso de insumos caducos en los procesos productivos.

Estas deficiencias se traducen en costos innecesarios, interrupciones operativas y una baja capacidad de respuesta frente a cambios en la demanda o en la cadena de suministro. Aunque las soluciones tecnológicas para la automatización de inventarios ya existen, muchas veces resultan inaccesibles para las PyMEs debido a su alto costo, complejidad técnica o falta de personal capacitado para su implementación.

La industria 4.0 plantea la oportunidad para reducir esta brecha mediante el uso de tecnologías accesibles como el internet de las cosas (IoT), la identificación por radiofrecuencia (RFID) y los microcontroladores. Sin embargo, en muchos casos, las empresas no cuentan con modelos de aplicación claros, escalables y de bajo costo que puedan integrarse fácilmente en sus procesos actuales sin una reingeniería total.

Por lo tanto, surge la necesidad de diseñar una solución tecnológica accesible que permita automatizar el control de inventarios en almacenes de materia prima, aprovechando herramientas de la industria 4.0, y que sirva como modelo replicable para otras organizaciones.

A partir del contexto descrito, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible la implementación de la metodología DMAIC para la mejora en el control de inventarios utilizando tecnologías habilitadoras de la industria 4.0?

1.3. Justificación

El control de inventarios en el almacén de materia prima es un proceso crítico para las PyMEs manufactureras, ya que de él dependen la continuidad de la producción, el cumplimiento de los

tiempos de entrega y el uso eficiente de los recursos. No obstante, en muchos casos estos procesos se llevan a cabo mediante registros manuales, formatos no estandarizados y sistemas poco integrados, lo que provoca errores frecuentes en la captura de datos, discrepancias entre el inventario físico y el inventario registrado, falta de trazabilidad en los movimientos de materiales, incumplimiento del principio de rotación FIFO y ausencia de indicadores clave de desempeño que permitan monitorear y mejorar la operación del almacén.

Al mismo tiempo, el desarrollo de la Industria 4.0 ha puesto a disposición de las organizaciones un conjunto de tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT), la identificación por radiofrecuencia (RFID) y las bases de datos ligeras, que facilitan la automatización de la captura de datos, el seguimiento de materiales y la disponibilidad de información en tiempo casi real. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías en las PyMEs suele ser limitada por restricciones económicas, falta de personal especializado y la inexistencia de metodologías que orienten su aplicación a problemas específicos, como el control de inventarios en almacenes de materia prima.

En este contexto, la presente investigación se justifica por su enfoque en la implementación de la metodología DMAIC como eje para la mejora del sistema de inventarios, donde el uso de tecnologías emergentes no se plantea como un punto de partida, sino como el resultado de un proceso estructurado de análisis. A través de las fases Definir, Medir y Analizar se busca comprender de manera profunda el funcionamiento actual del inventario, identificar las causas raíz de sus ineficiencias y traducir dichas causas en requerimientos funcionales y no funcionales de una solución de mejora. Con base en ello, en la fase Mejorar se propone una arquitectura de sistema inteligente para el control de inventarios que integra tecnologías habilitadoras orientada a la mejora, la estandarización, trazabilidad y disponibilidad de la información de los materiales en el almacén.

Además, en la fase Controlar se proponen indicadores clave de desempeño (KPIs) y lineamientos de evaluación que permitirán, en trabajos posteriores, medir el impacto de la implementación de la solución sobre el desempeño del sistema de inventarios. Aunque en esta investigación no se lleva a cabo la implementación ni la validación empírica del sistema, el aporte radica en dejar un modelo metodológico y una propuesta tecnológica concretos, adaptados a las condiciones de una PyME manufacturera, que pueden servir como base para futuros proyectos piloto.

Desde la perspectiva académica, la investigación contribuye a la integración de enfoques de mejora de procesos basados en Six Sigma (DMAIC) con el diseño de soluciones apoyadas en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0, ofreciendo un caso de estudio relevante para la

formación de profesionistas de posgrado en ingeniería y para el desarrollo de iniciativas de transformación digital en el sector productivo. De esta manera, la tesis aporta elementos tanto teóricos como prácticos para avanzar hacia sistemas de inventario más confiables, visibles y alineados con las exigencias de la manufactura moderna.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Implementar la metodología DMAIC en el proceso de control de inventarios del almacén de materia prima de una PyME manufacturera, con el fin de proponer una mejora del sistema de inventarios basada en el diseño de una solución apoyada en tecnologías emergentes de la Industria 4.0, orientada a optimizar la estandarización, trazabilidad y disponibilidad de la información de los materiales.

1.4.2. Objetivos Específicos

Con base en las necesidades que actualmente existen en las empresas PyMEs para el control de sus inventarios, se plantearon los siguientes objetivos:

- Definir el problema de control de inventarios en el almacén de materia prima de una PyME manufacturera, delimitando su alcance, actores involucrados y efectos operativos, mediante las herramientas de la fase *Definir* de la metodología DMAIC.
- Medir y describir el proceso actual de inventarios, identificando actividades, puntos de registro, tiempos y fuentes de error, utilizando herramientas como SIPOC, diagramas de flujo y 5W+2H, con el fin de contar con una línea base cualitativa del sistema.
- Analizar las causas raíz de las ineficiencias del sistema y derivar de ellas los requerimientos funcionales y no funcionales que debe cumplir una propuesta de mejora apoyada en tecnologías emergentes de la Industria 4.0.
- Diseñar una solución de mejora del sistema de inventarios utilizando tecnologías habilitadoras como resultado de la aplicación de la metodología DMAIC.
- Especificar los requerimientos del sistema orientados a mejorar la estandarización, trazabilidad y disponibilidad de la información de inventario.

- Proponer indicadores clave de desempeño (KPIs) y lineamientos de evaluación que permitan, en trabajos posteriores, medir el impacto de la implementación de la solución sobre el desempeño del sistema de inventarios.

1.5. Hipótesis

La aplicación de la metodología Six Sigma mediante el ciclo DMAIC al proceso de control de inventarios en un almacén de materia prima de tipo PyMEs manufacturera permite identificar de manera sistemática las causas raíz de ineficiencia y los requerimientos del proceso. Con base en este análisis es posible diseñar una arquitectura de sistema de control de inventarios basada en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 alineada con las necesidades operativas y las restricciones de las PyMEs.

2 CAPÍTULO: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Lean Six Sigma

Lean Six Sigma es una metodología de mejora continua que integra los principios de Lean Manufacturing con las herramientas estadísticas de Six Sigma, con el propósito de incrementar la eficiencia de los procesos y reducir la variabilidad asociada a la generación de defectos. Six Sigma, de manera particular, se enfoca en disminuir al máximo las variaciones de un proceso con el fin de evitar que el producto no cumpla con las especificaciones de calidad establecidas, apoyándose en el uso sistemático de datos y técnicas estadísticas avanzadas [4]. Por su parte, el enfoque Lean busca la eliminación de desperdicios (actividades que no agregan valor) y la optimización del flujo de trabajo a lo largo de la cadena de valor.

La integración de ambos enfoques permite que Lean Six Sigma no solo se oriente a la reducción de defectos, sino también a la disminución de tiempos de ciclo, costos operativos y actividades que no generan valor para el cliente. Aunque esta metodología surgió y se consolidó principalmente en el contexto de grandes organizaciones manufactureras, su aplicación se ha extendido a sectores de servicios, salud, logística y, más recientemente, a empresas tecnológicas que desarrollan productos digitales y no físicos [4] [5]. Esta versatilidad la convierte en una alternativa particularmente atractiva para las pequeñas y medianas empresas (PyMEs), que enfrentan restricciones de recursos, variabilidad en la demanda y necesidad de responder con rapidez a cambios en el mercado.

En las PyMEs manufactureras, Lean Six Sigma brinda un marco estructurado para identificar, priorizar y resolver problemas operativos críticos, tales como altos niveles de reproceso, tiempos muertos, cuellos de botella, fallas de calidad o tiempos de set-up excesivos. A través de herramientas como el mapeo de la cadena de valor, el diagrama de flujo de proceso, los estudios de tiempo, los diagramas de Pareto y las técnicas de análisis causa-efecto, es posible caracterizar el comportamiento del proceso y diferenciar entre actividades que agregan valor y aquellas que representan desperdicio. Al mismo tiempo, el uso de métricas de desempeño (por ejemplo, tasa de defectos, rendimiento de primera pasada, tiempo de ciclo o capacidad del proceso) permite cuantificar de manera objetiva los resultados de las mejoras implementadas.

La filosofía de Lean Six Sigma también enfatiza la orientación al cliente y el trabajo interfuncional. En el caso de las PyMEs, esto implica alinear los objetivos de la mejora de procesos con los requerimientos específicos de sus clientes, ya sean internos o externos, y fomentar la participación de diferentes áreas (producción, calidad, mantenimiento, logística, entre

otras) en la identificación de oportunidades de mejora [5]. De esta manera, la metodología contribuye a consolidar una cultura de mejora continua y toma de decisiones basada en datos, elementos clave para incrementar la competitividad y la sostenibilidad de las organizaciones de menor tamaño.

En contextos donde se requiere la remanufactura o actualización de productos con componentes obsoletos, como es el caso de tarjetas de circuito impreso (PCBs), Lean Six Sigma ofrece una base conceptual sólida para replantear el proceso, eliminar desperdicios asociados a operaciones innecesarias, movimientos, esperas o retrabajos, y reducir la probabilidad de defectos derivados de la integración de nuevas generaciones de componentes. Así, la metodología se convierte en un soporte fundamental para garantizar que las mejoras propuestas tengan un sustento metodológico claro y un impacto medible sobre los indicadores de desempeño del proceso.

2.1.1. DMAIC para la solución de problemas en PyMEs

La metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) constituye el eje operativo de Six Sigma y, por extensión, de Lean Six Sigma. Se trata de un marco estructurado que guía el ciclo de mejora de procesos desde la identificación del problema hasta la estandarización de las soluciones implementadas [6]. DMAIC es particularmente útil en las PyMEs porque organiza de manera clara las actividades de mejora, facilita el uso de datos objetivos para la toma de decisiones y permite gestionar proyectos con alcances bien delimitados, aun cuando los recursos disponibles sean limitados.

En términos generales, la fase Definir se centra en delimitar el problema de manera precisa, establecer los objetivos del proyecto, identificar a los clientes (internos y externos) y sus requerimientos, así como determinar el alcance y las restricciones del estudio. Posteriormente, en la fase Medir, se recopilan datos confiables sobre el desempeño actual del proceso, se seleccionan indicadores clave (tiempo de ciclo, defectos, tiempos de set-up, tiempos muertos, entre otros) y se valida la capacidad de los sistemas de medición. La fase Analizar se enfoca en estudiar los datos obtenidos para identificar patrones, causas raíz y relaciones entre variables de proceso y resultados. En la fase Mejorar se diseñan, prueban e implementan soluciones orientadas a eliminar las causas raíz identificadas. Finalmente, en la fase Controlar se establecen mecanismos de seguimiento y control para asegurar que las mejoras alcanzadas se mantengan a largo plazo [6].

En el contexto de las PyMEs manufactureras y de servicios, la metodología DMAIC se apoya en un conjunto de herramientas concretas en cada fase, que permiten abordar de manera

sistemática problemas tales como tiempos muertos, tiempos de preparación (set-up), variabilidad excesiva o defectos de calidad. De forma general, estas herramientas pueden agruparse de la siguiente manera:

1. Definir (Define): se utilizan instrumentos como el *Project Charter* para documentar el propósito del proyecto, los objetivos cuantificables (por ejemplo, reducir tiempos muertos o tiempos de set-up), los recursos disponibles y el cronograma; el diagrama SIPOC (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers) para describir el proceso a alto nivel e identificar los puntos en los que se generan esperas o reprocesos; y el análisis de partes interesadas para reconocer qué actores se ven afectados por las ineficiencias del proceso y quiénes pueden contribuir a la solución del problema.
2. Medir (Measure): en esta fase es habitual emplear hojas de verificación para registrar la frecuencia y duración de los tiempos muertos, paros de línea y actividades de set-up; diagramas de Pareto para priorizar las causas que aportan la mayor proporción de tiempo perdido; diagramas de flujo de proceso para visualizar la secuencia de operaciones y localizar posibles cuellos de botella; así como estudios de tiempo que permiten cuantificar con precisión la duración de las distintas tareas involucradas. Estas herramientas resultan especialmente relevantes en PyMEs donde, con frecuencia, los registros formales son limitados y es necesario estructurar desde cero la captura de datos.
3. Analizar (Analyze): el análisis de causa raíz se apoya en herramientas como el diagrama de Ishikawa o diagrama de causa-efecto, que facilita la categorización de las posibles causas de los problemas en dimensiones como mano de obra, maquinaria, materiales, métodos, medio ambiente y medición. El análisis de los 5 Porqués permite profundizar de manera iterativa en dichas causas hasta identificar los factores subyacentes que explican la presencia de tiempos muertos prolongados o tiempos de set-up elevados. Adicionalmente, el análisis estadístico de los datos y el mapeo de la cadena de valor (*Value Stream Mapping*) constituyen recursos valiosos para diferenciar entre actividades que agregan valor y aquellas que no lo hacen, lo que orienta la priorización de las mejoras en entornos de recursos restringidos como los de las PyMEs.
4. Mejorar (Improve): en esta fase se diseñan e implementan las soluciones propuestas. El *brainstorming* estructurado permite generar alternativas de mejora relacionadas con la redistribución de tareas, la mejora de la programación de producción, la implementación de sistemas de mantenimiento más efectivos o la simplificación de

- las actividades de set-up. La aplicación de la filosofía SMED (*Single Minute Exchange of Die*) se orienta a convertir actividades internas de preparación en actividades externas y a optimizar las tareas que no pueden eliminarse, con el fin de reducir significativamente el tiempo de cambio entre referencias. El uso de técnicas como el Diseño de Experimentos (DOE) proporciona un soporte estadístico para identificar la combinación óptima de parámetros de proceso que minimicen los tiempos de preparación y la generación de defectos. Finalmente, la implementación de esquemas de Mantenimiento Productivo Total (TPM) contribuye a disminuir fallas inesperadas de los equipos y, por ende, los tiempos muertos asociados a paros por avería.
5. Controlar (Control): una vez implementadas las mejoras, es necesario mantener la estabilidad del proceso. Para ello, se emplean gráficos de control que permiten monitorear en el tiempo los indicadores clave (defectos, tiempos muertos, tiempos de set-up, entre otros) y detectar desviaciones significativas. Asimismo, se elaboran procedimientos operativos estándar (SOPs) que documentan las nuevas condiciones de operación y las mejores prácticas identificadas, y se establecen planes de mantenimiento preventivo que aseguren la continuidad de las acciones de cuidado de los equipos. Las auditorías periódicas de proceso ayudan a verificar el cumplimiento de los procedimientos establecidos y a identificar nuevas oportunidades de mejora, cerrando el ciclo de la mejora continua.

Para las PyMEs que realizan procesos de manufactura y remanufactura, como aquellas que trabajan con tarjetas de circuito impreso y componentes electrónicos, la metodología DMAIC ofrece un marco robusto para abordar problemas complejos de forma ordenada y basada en evidencia. Al focalizarse en la reducción de tiempos muertos, la optimización de los tiempos de set-up y la disminución de la variabilidad en la calidad del producto, DMAIC contribuye directamente al incremento de la productividad, la reducción de costos y el cumplimiento consistente de los requisitos del cliente [6]. De este modo, la adopción de DMAIC no solo fortalece la capacidad de resolución de problemas de la organización, sino que también apoya la construcción de una cultura organizacional orientada a la mejora continua y a la innovación en los procesos.

La metodología Six Sigma, a través del ciclo DMAIC y herramientas como SIPOC, 5W1H, diagrama de Ishikawa y análisis de causa raíz, se emplea en esta investigación como marco estructurado para analizar el proceso actual de inventarios, identificar causas de ineficiencia y guiar el diseño del sistema propuesto. De este modo, el desarrollo del prototipo no solo responde

a una necesidad tecnológica, sino que se alinea con una estrategia formal de mejora continua orientada a la reducción de errores, tiempos y desperdicios en el almacén.

2.2. Manufactura Avanzada

La manufactura avanzada, es también conocida como fabricación inteligente o Industria 4.0, en la cual logramos observar la evolución de los procesos a través del tiempo. Se caracteriza por la integración de diversas tecnologías, como la automatización, análisis de datos y tecnologías digitales. Con las cuales se busca mejorar la eficiencia, flexibilidad y personalización en la fabricación de productos.

2.2.1. Definición y características

La manufactura avanzada utiliza tecnologías innovadoras para optimizar los procesos existentes, simplificar los flujos de trabajo de producción y potenciar la creación de nuevos productos [7]. Esta transformación digital permite contar con una mayor visibilidad y control sobre las operaciones, facilitando la toma de decisiones en tiempo real.

Entre las características principales de manufactura avanzada se incluye:

- **Automatización de procesos:** Implementación de sistemas automatizados con el objetivo de reducir la intervención humana y aumentar la precisión en ellos.
- **Conectividad:** Integración de sistemas a través del Internet de las Cosas (IoT) para una comunicación eficiente.
- **Análisis de datos:** Uso de Big Data y análisis predictivo para predecir tendencias y optimizar la producción.
- **Flexibilidad:** Cuenta con la capacidad para adaptarse rápidamente a cambios en la demanda o personalización de productos.

En el contexto mexicano, la manufactura ha demostrado tener un crecimiento sostenido. Según la INEGI, para enero de 2023, el sector manufacturero presentó una variación anual de 5.5 %, reflejando la adopción progresiva de tecnologías en el sector [8].

A nivel global, se espera que la implementación de tecnologías de manufactura inteligente continúe en ascenso. Se espera un crecimiento anual promedio del 3.57% en la industria manufacturera hasta 2028, impulsado por la digitalización y la automatización de procesos [9].

2.2.2. Clasificación de la Manufactura Avanzada

La manufactura avanzada agrupa una serie de tecnologías y métodos, los cuales, al ser implementados, logran transformar los procesos de producción tradicionales, mejorando su calidad, eficiencia y la adaptabilidad a los requerimientos del mercado.

A continuación, se describen las principales categorías:

- **Manufactura Digital:** Este tipo de manufactura está basada en el uso de tecnologías digitales para planear, simular y monitorear procesos de producción. Incluye herramientas como el diseño asistido por computadora (CAD), simulación de procesos y los gemelos digitales. Esta tecnología ayuda a detectar y reducir los errores antes de la fabricación del producto.
- **Manufactura Aditiva:** Nos permite la creación de objetos por medio de la adición de capas sucesivas de material, partiendo de un diseño digital. Los diseños pueden ser personalizados y permiten la creación de piezas complejas.
- **Robótica Avanzada y Automatización:** En esta clasificación se incluyen los robots colaborativos (cobots), visión por computadora, sensores inteligentes y sistemas de control inteligente. La implementación de estos sistemas permite tener el control, la precisión y la adaptabilidad de los procesos en los que se utilizan.
- **Sistemas Ciberfísicos e IoT Industrial.** Los sistemas integran sensores, software y redes para monitorear y controlar procesos físicos. Existe una conexión entre sí y con los humanos mediante el Internet de las Cosas (IoT), permitiendo mantener una supervisión y análisis continuo en tiempo real.
- **Big Data e Inteligencia Artificial (IA):** La información generada por los sistemas compuestos por sensores y máquinas, es analizada por la IA. Después de ese análisis se pueden predecir fallas, ajustar inventarios, optimizar procesos y generar diferentes escenarios para mejorar los procesos.

2.2.3. Antecedentes de la Manufactura Avanzada

La manufactura ha sido una actividad fundamental en la evolución de la humanidad, abarcando desde la producción artesanal hasta la implementación de tecnología avanzada en todos sus procesos. Los antecedentes de la manufactura avanzada se remontan a la Revolución Industrial en el siglo XVIII, en esta época los procesos productivos sufrieron un cambio debido al

uso de nuevas fuentes de energía y la implementación de maquinarias. Posteriormente, en el siglo XX, se sentaron las bases de la manufactura moderna gracias al manejo de la información y la automatización.

En la actualidad, la manufactura avanzada se caracteriza por la integración de tecnologías digitales, como el internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial y la robótica, que permiten una producción más eficiente, flexible y personalizada [7].

2.2.4. Procesos de Industria 4.0

La industria 4.0 representa la cuarta revolución industrial, se caracteriza por la integración de tecnologías digitales en los procesos de manufactura. Los cuales buscan optimizar la producción, mejorar los procesos y que se adapten a las necesidades cambiantes del mercado.

A continuación, describiremos las principales tecnologías que conforman la industria 4.0:

1. Automatización inteligente: se refiere a la automatización de los procesos empresariales, se ve favorecido por el análisis y la toma de decisiones de la Inteligencia Artificial [10].
2. Internet de las Cosas (IoT): Se prevé que conecte todo, desde terminales terrestres hasta no terrestres, donde se espera que se permita una comunicación fiable tanto en canales inalámbricos invariables en el tiempo como en canales variables en el tiempo. [11].
3. Big Data y Analítica Avanzada: es necesaria una transformación digital, ya que las fábricas y las empresas deben afrontar cambios rápidos en los procesos tecnológicos y flujos continuos de datos masivos para mejorar el proceso de toma de decisiones [12].
4. Computación en la nube: también conocida como externalización de datos, consiste en que un proveedor externo ofrece servicios de almacenamiento al cliente. Esto genera buenos resultados para los clientes sin incurrir en grandes gastos en equipos y programación para el almacenamiento de información [13].
5. Fabricación Aditiva: Es un conjunto de procesos de fabricación capaces de producir piezas complejas directamente a partir de un modelo informático de la pieza [14].
6. Realidad Aumentada (RA) y Realidad Virtual (RV): Constituyen tecnologías inmersivas que pueden aplicarse con la capacitación del personal, mantenimiento de equipos y diseños de productos, mejorando la comprensión y eficiencia de los procesos industriales [15].

7. Integración de sistemas: Se entiende como la unificación de procesos, sistemas informáticos y tecnologías digitales dentro de la organización (por ejemplo, ERP-MES-CPS) con el fin de facilitar la comunicación entre departamentos, optimizar flujos operativos y elevar la eficiencia integral de la cadena de producción [16].

2.2.5. Internet de las Cosas (IoT)

Es un tema emergente de gran importancia técnica, social y económica. Los productos de consumo, automóviles y camiones, bienes duraderos, componentes industriales y de servicios públicos, sensores y otros objetos cotidianos se combinan con la conectividad a Internet y potentes capacidades de análisis de datos, lo cual promete transformar nuestra forma de trabajar, vivir y divertirnos [17].

2.2.6. Aplicaciones del IoT en la industria:

- El internet de las Cosas (IoT) ha habilitado múltiples aplicaciones industriales orientadas a mejorar la productividad y confiabilidad de los procesos. Entre ellas destacan:
- Monitoreo en tiempo real: Sensores instalados en maquinaria trabajan para detectar fallas y anomalías antes de que se conviertan en problemas graves, habilitando estrategias y facilitando el mantenimiento predictivo [18].
- Optimización de procesos: La recopilación de datos permite ajustar y mejorar continuamente los procesos, mediante el continuo análisis en tiempo real de la información [19].
- Gestión de inventarios: la aplicación de estas tecnologías nos permite el seguimiento en tiempo real de productos y materiales, reduciendo las pérdidas y mejorando la logística de estos [20].

En México, la adopción del IoT en la industria ha ido en aumento, especialmente en sectores como la manufactura, la logística y la energía. Estudios recientes indican que la implementación de IoT en cadenas de suministros mexicanas mejora el desempeño operativo, la visibilidad del inventario y la competitividad internacional [21].

En el contexto de esta tesis, los conceptos de Internet de las Cosas y de Industria 4.0 se materializan en una solución de control de inventarios basada en microcontroladores ESP32,

lectores RFID y una Raspberry Pi como servidor local. Esta arquitectura permite capturar y transmitir en tiempo real la información de entradas y salidas de materiales en un almacén de materia prima, proporcionando visibilidad continua del inventario y sentando las bases para la automatización de procesos en PyMEs manufactureras con recursos limitados.

2.2.7. Computación en la Nube

La definición de computación en la nube del NIST (siglas de National Institute of Standards and Technology), en español: Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos, describe cinco características clave de la nube: autoservicio bajo demanda, amplio acceso a la red, agrupación de recursos, rápida elasticidad y servicio medido. Las cinco características deben estar presentes para que la oferta se considere una verdadera oferta de nube [22]. Este enfoque elimina la necesidad de mantener infraestructuras físicas locales, ofreciendo flexibilidad, escalabilidad y eficiencia en costos para la organización [23].

2.2.8. Big Data

El término Big Data hace referencia al manejo y análisis de grandes volúmenes de datos, los cuales recabados de diversas fuentes (sensores, transacciones digitales y dispositivos conectados) en los procesos. Esta tecnología no solo permite almacenar datos masivos, sino también analizarlos para obtener información valiosa que respalde la toma de decisiones estratégicas en tiempo real [24].

Las “5 Vs” del Big Data

Se caracteriza por 5 dimensiones fundamentales:

1. Volumen: Hace referencia a la gran cantidad de datos que son generados continuamente.
2. Velocidad: Capacidad de procesar los datos recabados en tiempo real.
3. Variedad: La versatilidad de manejar una diversidad de formatos (texto, video, sensores, etc.).
4. Veracidad: Precisión y confiabilidad de los datos que son recolectados por medio de los componentes.
5. Valor: Capacidad de extraer conocimiento útil para las empresas [25].

2.2.9. Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA) es una rama de la informática que busca el desarrollo de sistemas capaces de realizar tareas que no requieran inteligencia humana. Estas tareas comprenden el razonamiento, el aprendizaje y la toma de decisiones. En el contexto de la Industria 4.0, se pretende que la implementación de la IA logre automatizar y optimizar los procesos industriales.

La implementación de la IA en entornos industriales ha transformado significativamente la manera en que las empresas están operando. Algunas de las aplicaciones más destacadas incluye:

- **Mantenimiento predictivo:** La IA analiza datos de sensores en tiempo real para predecir fallos en maquinaria, permitiendo intervenciones antes de que ocurran [26].
- **Optimización de la cadena de suministros:** La inteligencia artificial contribuye al análisis de grandes volúmenes de datos generados en los procesos de la cadena de suministro. Esto permite una planificación más eficiente de la producción y la logística, al considerar diversos factores externos. [27].
- **Control de calidad automatizado:** Con la aplicación de sistemas de Visión Artificial impulsados por IA, se pueden detectar defectos en los productos durante el proceso de fabricación, asegurando que se cumplan los estándares de calidad que cada empresa maneja [27].
- **Automatización de procesos:** Con la implementación de esta tecnología se pueden automatizar las tareas repetitivas y complejas, aumentando su eficiencia y reduciendo o evitando el error humano.

2.3. Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs)

Las pequeñas y medianas empresas son entidades económicas fundamentales para el desarrollo económico y social de México. Representan la mayoría del tejido empresarial del país y son clave en la generación de empleos y en la distribución de ingresos.

2.3.1. Clasificación de las PyMEs

En México, las PyMEs se clasifican según la Ley de Desarrollo de la Competitividad de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa, en la cual se establecen los criterios basados en el número de empleados y el sector económico al que pertenecerán. Esta ley define las siguientes categorías [28]:

Tabla 1 Clasificación de las PyMEs.

	Tipo de Empresa	Rango de Empleados	Min	Max
Pequeña	Microempresa	1 a 10	1	10
	Industrial/Servicios	11 a 50	11	50
	Comercio	11 a 30	11	30
Mediana	Industrial	51 a 250	51	250
	Comercio	31 a 100	31	100
	Servicios	51 a 100	51	100

Nota: fuente https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5226587

2.3.2. Antecedentes históricos en México

Las PyMEs en México tienen sus raíces en las economías preindustriales, caracterizadas por unidades productivas familiares, talleres artesanales y sistemas de producción a escala. Con la Revolución Industrial, aunque surgieron grandes fábricas, también se fortalecieron las pequeñas y medianas empresas, las cuales lograron adaptarse a las nuevas tecnologías y métodos de producción permitiéndoles su consolidación como parte del tejido empresarial del país. [29].

En el siglo XX, en especial en el contexto de los procesos de industrialización, el gobierno mexicano implementó políticas para apoyar a las empresas PyMEs debido a su papel estratégico en el desarrollo económico nacional. Instituciones como Nacional Financiera (NAFIN) reorientaron sus esfuerzos para atender las necesidades de estas empresas, mediante programas de financiamiento, capacitación y asistencia técnica [30].

2.3.3. PyMEs en Baja California

En Baja California, las PyMEs desempeñan un papel crucial en la economía regional, representando la mayor parte del crecimiento empresarial del estado. Según datos de la Secretaría de Economía e Innovación del estado, el crecimiento empresarial se ha sustentado principalmente en la expansión de micro, pequeñas y medianas empresas, más que en la industria de exportación, lo que evidencia su relevancia en la estructura productiva local [31].

Además, el gobierno estatal ha implementado programas de apoyo para fortalecer a las PyMEs, ofreciendo financiamiento, capacitación y asesoría para fomentar su desarrollo, competitividad y facilitar su integración a mercados amplios.

2.3.4. Principales retos de las PyMEs

A pesar del surgimiento e importancia, las PyMEs en México enfrentan diversos desafíos que limitan su crecimiento y sustentabilidad:

- Acceso limitado a financiamiento: Muchas PyMEs tienen dificultades para obtener créditos o los créditos disponibles tienen intereses elevados.
- Transformación digital: La implementación de tecnologías digitales es baja, lo cual afecta su competitividad en el mercado.
- Cumplimiento normativo y legal: Las regulaciones fiscales y administrativas pueden ser complejas, representando un reto.
- Capacitación y desarrollo del personal: La falta de programas de capacitación limita la profesionalización y eficiencia de estas.

2.4. Logística de almacenamiento

El proceso de logística en la cadena de almacenamiento de materiales es esencial, debido a que esta asegura que las mercancías se reciban, se almacenen y se distribuyan de una forma eficiente a los procesos consiguientes.

El buen funcionamiento de las operaciones que se realizan en la logística de almacenaje de material depende, entre otras cosas, del tipo de tecnología que utilizan y de su utilización [32] [33].

2.4.1. Siete principios del almacenamiento

Los estudios realizados para el diseño y operación de almacenes han logrado identificar siete principios claves para una gestión eficiente, el uso de espacio y la productividad del sistema logístico:

1. Definir objetivos operativos del almacén. Toda instalación debe definir con claridad su propósito, el tipo de material que será almacenado y la rotación estimada del inventario. Estos elementos permiten alinear la operación con los requerimientos productivos y garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos [33].
2. Optimización del Layout, incluyendo los flujos de mercancía y las zonas con más frecuencia de uso. El diseño del almacén debe de cumplir los objetivos planteados, en el diseño se debe de contemplar los siguientes aspectos:

- Tamaño interior del almacenamiento.
 - Espacio exterior.
 - Ubicación.
 - Composición estructural (Tener en cuenta para la instalación de equipos especializados).
 - Aprovechamiento vertical del espacio, mediante la implementación de estanterías dinámicas que logren maximizar la capacidad del almacén [34].
3. La implementación de estanterías de alta densidad o dinámicas permite maximizar la capacidad del almacén sin necesidad de realizar cambios en las dimensiones actuales. La estructura debe cumplir con las capacidades de carga, resistencia y requisitos de elevación, garantizando seguridad u continuidad del flujo de materiales [35].
 4. Adopción de tecnologías modernas como racking automatizados, RFID para aumentar precisión y eficiencia. La implementación de sistemas automatizados aumenta considerablemente la ventaja y los ingresos de las empresas, minimiza todos aquellos costos que se requieren para su operación y elimina la probabilidad de los errores humanos. Añaden eficiencia en los procesos de almacenaje y aprovechan de una manera eficaz los espacios dentro del almacén. Los almacenes automatizados brindan una mejor calidad en los servicios y se vuelve más eficaz el procesamiento de grandes volúmenes de datos [33].
 5. Capacitación y ergonomía del personal, son parte esencial para garantizar que las operaciones sean seguras y eficientes. La capacitación en el uso de herramientas, equipos automatizados y buenas prácticas reduce riesgos y aumenta la productividad [34].
 6. Mejora continua mediante la implementación de herramientas Six Sigma y el uso de indicadores internos como KPIs. Las empresas deben adoptar metodologías de mejora continua, como Six Sigma, para lograr optimizar sus procesos logísticos y eliminar variabilidad. Los indicadores KPI son claves en el cumplimiento de los objetivos de una empresa, especialmente cuando se utilizan para compararlos con otras empresas que pertenecen al mismo sector. Además, brindan información acerca del cumplimiento de los objetivos internos de cada departamento, permitiendo revisar sus logros [33].

7. Sostenibilidad en operaciones de almacén. La logística de almacenamiento moderno integra prácticas de sostenibilidad, como reducción de residuos, eficiencia energética y uso responsable de recursos. Estas acciones son importantes por que ayudan a disminuir el impacto ambiental y mejoran la eficiencia operativa de las organizaciones [32].

2.4.2. Procesos de almacenamiento

Los procesos de almacenamiento que se llevan a cabo en los centros logísticos y almacenes industriales están estructurados para garantizar eficiencia, trazabilidad y control en el flujo de los materiales.

Los principales procesos son:

1. Recepción de mercancías: Este proceso consiste en validar, inspeccionar y revisar la calidad de las mercancías. El objetivo es evitar errores en el flujo logístico desde el inicio [35].
2. Almacenaje: Es el 2.º paso en este proceso, en el cual se realiza la ubicación en espacios definidos de los productos (teniendo en cuenta su volumen, rotación y condiciones especiales de conservación). La asignación estratégica optimiza el uso de los espacios y mejora la eficiencia en el proceso [35].
3. Transporte interno: Se refiere a la logística que se realiza para el movimiento interno de los productos, utilizando herramientas, bandas transportadoras o sistemas automatizados. Logrando tener una mayor precisión y velocidad en la movilización interna de los productos [33].
4. Preparación de pedidos (picking) y embalaje: En este proceso se realiza la recolección precisa de los productos que han sido requeridos, se realiza revisión y un embalaje adecuado para el siguiente proceso [33].
5. Despacho o salida de mercancías: Se lleva a cabo mediante una logística organizada hacia las áreas de producción o clientes finales, asegurando un registro y trazabilidad de productos [33].

2.4.3. Método PEPS (FIFO)

El método PEPS (First-In, First-Out, FIFO) consiste en garantizar que los productos que ingresaron primero sean los primeros en salir. Este enfoque es primordial para evitar la

obsolescencia, el deterioro de productos y la acumulación de inventario antiguo. Este método contribuye a mejorar la rotación del inventario y la eficiencia operativa del almacén [33].

La implementación de sistemas automatizados, como RFID, algoritmos de asignación y sensores, permite una identificación automática por medio de etiquetas y registros de entrada y salida en tiempo real, eliminando los errores humanos [36].

2.4.4. Tipos de almacenamiento de mercancías

Actualmente los almacenes modernos cuentan con diversos sistemas de almacenamiento según el tipo de producto, rotación deseada y disponibilidad de espacio. Además, integran configuraciones que permiten maximizar la eficiencia, la seguridad y la velocidad del flujo de materiales [33].

1. Racks selectivos y push-back: Los racks selectivos permiten tener acceso directo a cada pallet, son ideales para los productos con rotaciones variadas y además mantienen una relación óptima entre selectividad y capacidad [33]. Los sistemas push-back utilizan rieles comprimidos para almacenar múltiples pallets en profundidad, aumentando la densidad y reduciendo los pasillos necesarios, siendo adecuados para el tipo de producto que requiere rotación homogénea [37].
2. Sistema de alta densidad (drive-in/ AS/RS): Los sistemas drive-in/drive-thru cuentan con la opción de almacenamiento de pallets en múltiples profundidades, logrando así la eficiencia en los espacios (requieren planificación FIFO) mediante una correcta planificación [35]. Los AS/RS (Automated Storage and Retrieval Systems) es un sistema automatizado conformado por grúas, transelevadores y robots móviles, los cuales realizan los procesos de almacenaje y recuperación de materiales de una manera precisa y eficiente. Estos sistemas permiten reducir errores, aumentar la velocidad y mejorar la trazabilidad, la implementación de estos sistemas se debe de considerar una alta inversión y capacitación [38]
3. Flow racks y gravity flow. Los Flow racks o racks dinámicos trabajan de una forma fácil, aprovechan la gravedad para el desplazamiento de los pallets. Estos se cargan desde atrás y se descargan por delante, aplican FIFO de forma fluida [32].
4. Auto silos y almacenes verticales automatizados. Los almacenes verticales son utilizados para el almacenaje de productos y a su vez para aprovechar las áreas dentro de los almacenes. Estos almacenes trabajan de la mano con un sistema

informático que posee un software que controla todos los movimientos de pallets que se realizan en el almacén [32].

5. Cross-docking. Es una técnica logística que tiene el objetivo de acelerar la entrega de mercancías y aumentar la eficiencia en la cadena de suministros. La implementación de esta técnica permite que el material que se descarga proveniente de los vehículos que lo transportan sea transferido directamente a los siguientes vehículos donde será enviado, evitando que el material pase mucho o poco tiempo en el almacén. Esta técnica requiere una estrecha coordinación entre todos los departamentos involucrados en la logística de los materiales [39].

2.5. Sistema de Gestión de inventarios

2.5.1. Tipos de Sistemas de Inventarios

Actualmente existen distintos sistemas de inventarios, los cuales permiten controlar, planificar y registrar los movimientos de materiales dentro de una organización. La elección del sistema del nivel de automatización, precisión y frecuencia de actualización:

- Inventario manual o periódico. Este inventario se basa en el uso de papel o Excel, para realizar los registros realizados. Su desventaja es que se considera poco confiable y propenso a errores humanos [40].
- El inventario periódico realiza una contabilidad física en intervalos (mensual, trimestral), actualizando los registros administrativos. Es común en PyMEs por su bajo costo y facilidad operativa, aunque presenta desventajas en precisión y visibilidad [40].
- Inventario Perpetuo. Este sistema cuenta con la ventaja de que la información de cada operación es actualizada automáticamente, brindando visibilidad en tiempo real y mejorando el control contable. Este sistema es utilizado en empresas con mayores requerimientos de exactitud y control [41].
- Sistemas avanzados (ER/RFID/MRP/IoT). Los sistemas ERP/MRP trabajan por medio de reglas de reorden y previsión, integrando la planificación y control de producción. Los sistemas inteligentes basados en IoT, RFID y análisis Big Data permiten realizar una captura automática y en tiempo real de los movimientos realizados de los materiales. Tienen la capacidad de mejorar la reducción de errores, realizar trazabilidad y previsión de materiales [41].

2.5.2. Herramientas para el control de inventarios

Actualmente las empresas tienen la oportunidad de poder elegir aquellas herramientas modernas, que les brinden la opción de resolver sus necesidades en la cadena de logística de sus almacenes.

- Sistema ERP (Enterprise Resource Planning). Esta herramienta tiene la cualidad de centralizar los datos y mostrar una visibilidad en tiempo real de los inventarios, la producción y los procesos administrativos. Además, mejora la coordinación entre áreas, reduce la duplicidad de datos y facilita la toma de decisiones estratégicas para la compra, finanzas y planeación de producción [42].
- Tecnología RFID (Radio Frequency identification). Esta tecnología nos permite realizar la identificación automática de productos mediante la utilización de ondas de radio, lo que facilita la captura y transmisión de datos sin intervención manual. Nos brinda una mejor trazabilidad, reduce errores en los conteos realizados y acelera los procesos de ingreso y salida, Además, contribuye a un control más preciso del inventario en tiempo real [43]. Es un sistema desarrollado para el escaneo de etiquetas, a las cuales previamente se les registró una información, estas etiquetas RFID son escaneadas automáticamente al ingresar o salir del almacén (con ayuda de antenas), registrando cada movimiento y registrándolo en una base de datos la cual puede consultarse en tiempo real.
- Códigos de barras y escáneres portátiles. Esta es una de las alternativas utilizadas actualmente en los almacenes, para el control de los inventarios.
- IoT (Internet de las cosas). Una de las tecnologías nuevas de la industria 4.0, la cual está conformada por sensores que permiten monitorear diferentes variables dentro del almacén, como son: la temperatura, ubicación o cantidad en tiempo real. Su aplicación es ideal para mercancías con fechas de caducidad o de manejo especial.
- Software de gestión de inventarios (WMS). Son aplicaciones diseñadas para el control de operaciones específicas dentro de la logística del control de inventarios. Tienen la particularidad de trabajar con sistemas de planificación de recursos empresariales o sistemas RFID [44].

2.5.2.1. Sistema RFID

La tecnología RFID es un sistema de identificación automática de objetos a través de etiquetas electrónicas que cuentan con la capacidad de almacenar datos. En los sistemas de gestión de almacenes, las antenas lectoras tienen la capacidad de detectar automáticamente las etiquetas. Cada que se realiza un evento de lectura se genera un registro que es enviado a un sistema encargado de la gestión de datos en tiempo real, lo que permite realizar el seguimiento continuo de los movimientos en los inventarios, brindando información de los movimientos y reduciendo errores humanos en los registros durante las operaciones logísticas [43].

Este sistema está compuesto por los siguientes componentes, los cuales trabajan de manera conjunta para lograr la identificación automática de objetos:

1. Etiquetas RFID (tags): Este elemento está compuesto por un microchip y una antena que se encarga de enviar y recibir información a través de ondas de radios cuando son activados por el lector. Las etiquetas pueden ser pasivas, activas o semipasivas, dependiendo de la fuente de alimentación [45].
2. Lectores RFID: Dispositivo que emite señales de radio encargadas de activar las tarjetas y a su vez recibir y decodificar la información emitida por las etiquetas [46].
3. Antenas: Elementos encargados de la comunicación física entre el lector y las etiquetas, determinando el rango de lectura y el desempeño del sistema [43].
4. Sistema de gestión de datos: Adicionalmente se requiere de un software encargado de procesar, almacenar y analizar la información recibida [43].

Ventajas:

- Realizar de manera simultánea la lectura de múltiples etiquetas.
- Ofrece mayor velocidad y precisión en la captura de datos.
- Integración con otras tecnologías pertenecientes a la industria 4.0 (IoT, WSN y análisis predictivo).
- La implementación ayuda considerablemente en la reducción de errores humanos [45].

Con la implementación del sistema RFID se logra la identificación y el rastreo de objetos, a los cuales se les adhieren etiquetas que contienen un chip y una antena, las cuales por medio de ondas de radio transmiten la información a un lector RFID. Esta tecnología tiene aplicación en la gestión de inventarios, mejorando la trazabilidad y reduciendo errores humanos, además, logra optimizar los procesos y automatiza la captura de datos [45].

En comparación con los métodos tradicionales que son utilizados actualmente (Códigos de barra), el Sistema RFID no requiere contacto directo ni línea de visión, agilizando la lectura de varios artículos simultáneamente. Facilitando el control en tiempo real de los inventarios.

Está demostrado que los sistemas que utilizan esta tecnología para el control y monitoreo en tiempo real mejoraron la precisión en el registro de datos y en la reducción de pérdida de material [47]. La integración del sistema RFID con redes de sensores inalámbricos (WSN) permite obtener una mejor rastreabilidad de mercancías durante el proceso de transporte [48].

La implementación de RFID en la cadena de suministros aumenta la visibilidad de inventarios en los entornos dinámicos y ayuda a la reducción de costos operativos [49]. Es de resaltar que la integración de RFID con sistemas encargados del análisis de datos potencia la toma de decisiones estratégicas y como resultado se obtiene una mejora en el proceso de la logística de materiales [50].

2.6. Aplicaciones de Microcontroladores

2.6.1. Módulo ESP32-WROOM

El módulo mencionado pertenece a la familia de módulos de microcontroladores diseñados por Espressif System, los cuales son ampliamente utilizados en soluciones de IoT debido a que cuentan con capacidades avanzadas y conectividad integrada.

Composición y hardware integrado.

- Está basado en un microcontrolador SoC (System on Chip) ESP32, el cual incluye conectividad dual: WI-FI (802.11 b/g/n) y Bluetooth (Classic y BLE).
- El módulo posee un procesador de doble núcleo de 32 bits, el cual está basado en la arquitectura Tensilica Xtensa LX6, capaz de operar hasta 240 MHz.
- Dispone de aproximadamente 520 Kib de SRAM y 4 MB de memoria flash, lo que lo convierte en un módulo versátil y capaz de ejecutar múltiples tareas [51].

Conectividad y periféricos.

- En cuestión de conectividad, este módulo ofrece una amplia gama de interfaces: GPIOs, ADC, DAC, SPI, I2C, UART, PWM y más opciones como CAN bus, interfaces de tarjeta SD/SDIO y más.

- Dentro de los componentes que tiene integrados, se pueden mencionar la antena, amplificadores de RF, filtros y reguladores. Estos componentes reducen las necesidades de hardware externo y simplifican su implementación [51] [52].

Ventajas clave.

- Bajo consumo energético. Este componente es ideal para dispositivos portátiles o alimentados por baterías, gracias a sus múltiples modos de suspensión.
- Confiabilidad en ambientes industriales. Tiene la capacidad de operar en rangos de temperatura extendida (hasta -40 C a + 125 C) [51] .

2.6.2. Módulo RC522

El Módulo RC522 es un lector/escritor que tiene la capacidad de operar a una frecuencia de 13.56 MHz bajo el estándar ISO/IEC 14443A. Cuenta con un diseño compacto, es de bajo costo y tiene la compatibilidad con microcontroladores como Arduino y ESP32 [53], lo que lo ha convertido en una solución ampliamente adoptada en proyectos que están enfocados en la automatización, trazabilidad y control de acceso [54].

Este dispositivo permite la lectura de tarjeta MIFARE, cuando se realiza una lectura se le asigna un número de identificación único (UID) que puede vincularse a registros específicos en una base de datos [55] .

Componentes y señales. El módulo está integrado por una antena impresa, el IC MRFC522, reguladores y pines para SPI (CK, MOSI, MISO, SS), además de RST e IQR para gestión de eventos. El software usa librerías MRFC522 y marcos como Arduino/ESP-IDF para operaciones de selección, autenticación y lectura/escritura de bloques en tarjetas MIFARE/NTAG [56].

Operación básica. El lector genera el campo RF a 13.56 MHz, se inicia el protocolo ISO/IEC 14443A, esto ejecuta la anticolidión y se obtiene un UID, selecciona la tarjeta, se realiza una validación por el sector/clave, se procede a realizar la lectura/escritura en memoria de tag [55].

Ventajas.

- Costo y disponibilidad: Módulo económico y generalizado.
- Ecosistema de software: Existen abundantes librerías y ejemplos para su aplicación.
- Integración simple: Buses estándar (SPI) y alimentación 3.3 V.

Desventajas:

- Alcance corto (cms), esta característica es propia de HF 13.56 MHz (no es un UHF).
- Ambiente: metales/campos cercanos pueden interrumpir la lectura de la antena-tag [56].

2.6.3. Ordenador Raspberry

El Raspberry Pi es un ordenador de placa única (single-board computer, SBC) que actualmente ha ganado bastante popularidad en el ámbito académico e industrial debido al bajo costo que tiene, la versatilidad y facilidad de integración en proyectos de automatización. Este ordenador tiene la capacidad de ejecutar sistemas operativos basados en Linux, lo que lo convierte en una plataforma flexible para las aplicaciones de la Industria 4.0 que realizan procesamientos de datos en tiempo real, realizan conectividad de red y soporte para múltiples periféricos [57].

Aspectos técnicos y relevantes:

- Procesador y memoria: Las versiones más recientes que se encuentran disponibles integran procesadores RAM multinúcleo y memoria RAM que van de 2 GB hasta 16 GB, ofreciendo un mejor procesamiento en paralelo [58] [59].
- Interfases de entrada/salida: El ordenador dispone de pines GPIO y buses estándar como SPI, I2C, UART, además de puertos USB, conector Ethernet, salidas HDMI y conectividad inalámbrica por medio de WI-FI y Bluetooth en las versiones más nuevas [58] [60] .
- Almacenamiento: El sistema utiliza principalmente una tarjeta MicroSD para el arranque y almacenamiento, el rendimiento del dispositivo depende en gran medida de la tarjeta que se utiliza [61].
- Software: Tiene la compatibilidad con sistemas operativos Linux y soporta lenguajes como Python y C/C++, lo que es útil para la aplicación en entornos educativos e industriales [62] [60].

Ventajas del uso de Raspberry Pi en automatización e IoT.

- Computación en el borde (Edge computing): Permite el procesamiento de datos de manera local antes de ser enviados a la nube, reduciendo latencia y consumo de banda ancha [61] [63].

- Flexibilidad de integración: Su ecosistema de hardware y software permite la integración de múltiples sensores y periféricos en un mismo dispositivo [62].
- Ecosistema y comunidad: El sistema tiene la característica de contar con librerías, documentación y proyectos de referencia que sirven como ejemplos para el aprendizaje y desarrollo [62].
- Economía frente a beneficios: Ofrece potencia suficiente para aplicaciones de PyMEs a un costo relativamente bajo [61] [62].

Limitaciones y consideraciones

- Térmica y estabilidad: Bajo cargas intensas de trabajo, los dispositivos pueden presentar calentamiento si es que no cuentan con un sistema correcto para disipar el calor [61] [64].
- Rendimiento del almacenamiento: El desempeño de lectura/escritura depende de la calidad de la microSD utilizada, esto influye directamente en los tiempos de arranque y estabilidad del sistema [61].
- Seguridad y robustez: En aplicaciones IoT conectadas a internet se recomienda integrar un sistema cifrado y mecanismos de actualización para mantener la robustez del sistema [63].

2.6.4. Programación Python (software)

Python es un lenguaje interpretado, multiparadigma y de alto nivel que poco a poco ha ganado gran aceptación en entornos de IoT y automatización. Debido a que maneja una sintaxis clara, amplia, contiene bastantes librerías y soporte en comunidades dedicadas a la programación [65].

Ventajas de aplicar Python en el desarrollo del prototipo.

- Rápido Modelado: Permite reducir el tamaño de los códigos para la programación, sin afectar las funciones complejas y el desarrollo del prototipo.
- Amplio ecosistema: Cuenta con una vasta lista de librerías, las cuales facilitan la implementación de la comunicación, procesamiento de datos y los servicios web.
- Portabilidad y modularidad: Los programas tienen la capacidad de adaptarse o modificarse a nuevas necesidades.

- Compatibilidad con microcontroladores: gracias a MicroPython, es posible la integración de dispositivos como ESP32 y Raspberry de forma directa [66].

2.7. Arquitectura de los sistemas IoT

Los sistemas de Internet de las cosas (IoT) están integrados por múltiples capas funcionales, las cuales permiten la conexión, obtener, procesar y entregar los datos desde un dispositivo físico hasta aplicaciones de usuarios. Actualmente la arquitectura comúnmente utilizada es la que está compuesta por cinco capas [67] :

- Capa de Percepción. En esta capa se incluyen sensores, actuadores y dispositivos encargados de la recolección de datos.
- Capa de Transporte. Esta capa se encarga de gestionar los datos a través de la comunicación entre los componentes físicos.
- Capa de Procesamiento. En esta capa se realiza el almacenamiento, análisis y la transformación de los datos.
- Capa de Aplicación. Encargada de la entrega de los servicios específicos a los usuarios.
- Capa de Negocio. Realiza la vinculación de los resultados del sistema con los componentes organizacionales [68].

La aplicación de una buena arquitectura IoT permite que los componentes heterogéneos (dispositivos, redes, plataformas de datos, aplicaciones) funcionen de forma integrada y segura [69]. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el contexto del diseño del prototipo de automatización de inventarios para PyMEs.

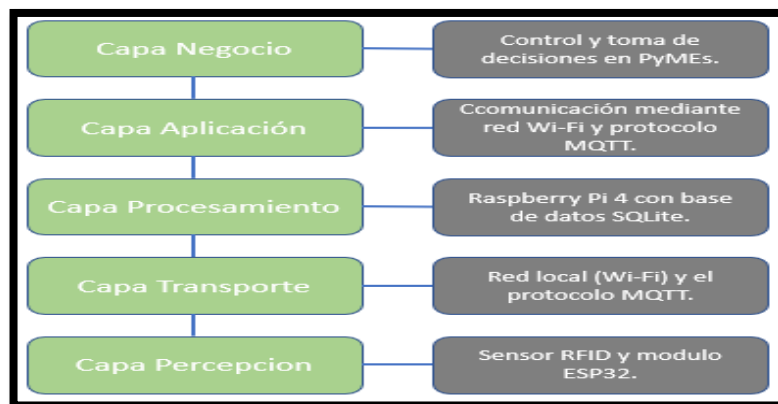


Fig. 1 Arquitectura IoT del sistema de inventarios.

Diversos estudios han explorado el uso de tecnologías de la Industria 4.0 para mejorar la gestión de inventarios, particularmente en el contexto de las PyMEs. En [70] analizan cómo los sistemas de inventario habilitados por IoT, basados en sensores y etiquetas RFID, permiten a las PyMEs mejorar la visibilidad en tiempo real de sus existencias, reducir costos operativos y tomar decisiones apoyadas en datos, enfatizando la importancia de soluciones escalables y de bajo costo.

En una revisión sobre la integración de RFID e IoT en la cadena de suministro, se señalan en [71] que la combinación de estas tecnologías incrementa la precisión del inventario, la transparencia de datos y el aprovechamiento de recursos, al facilitar el seguimiento continuo de materiales a lo largo de los procesos logísticos.

Un sistema de seguimiento de inventarios basado en IoT para cocinas comerciales se presenta en [72], donde se utiliza un microcontrolador, celdas de carga, un bróker MQTT y una aplicación web/móvil para monitorear en tiempo real los niveles de inventario y generar patrones de consumo. Aunque el caso se centra en alimentos, el trabajo demuestra la viabilidad de soluciones inalámbricas y de bajo costo para el control automatizado de existencias.

De forma similar, en [73] se proponen un sistema de monitoreo de almacén que integra dispositivos IoT de bajo costo, un microcontrolador ESP32 y un módulo RFID para control de acceso, conectados a una plataforma en la nube (Blynk) para la visualización y generación de alertas en tiempo real. Los autores muestran que este tipo de arquitectura reduce la dependencia de supervisión manual y mejora la seguridad y el control operativo del almacén.

En el contexto específico de las PyMEs, en [74] se presenta un sistema de gestión de inventarios mediante la integración de IoT y automatización de procesos (RPA) para una empresa de autopartes en Perú. El sistema utiliza lectura NFC e indicadores como tiempo de búsqueda de producto, precisión de inventario, reducción de costos operativos y ahorro de horas-hombre, mostrando mejoras significativas tras la implementación de la solución.

Por otro lado, en [75] se documenta la aplicación de la metodología Six Sigma, a través del ciclo DMAIC y herramientas como 5W-2H, análisis de causa raíz, diagrama de Ishikawa y SIPOC, para mejorar las operaciones de inventario y almacén en una empresa embotelladora internacional. El estudio evidencia que el uso sistemático de estas herramientas permite reducir sobre inventarios, desperdicios y tiempos de espera en el almacén.

En conjunto, estos trabajos coinciden en que la combinación de tecnologías IoT/RFID y metodologías de mejora de procesos, como Six Sigma, ofrece mejoras relevantes en precisión, eficiencia y visibilidad del inventario.

No obstante, persiste una oportunidad en el diseño de soluciones específicas para PyMEs manufactureras, basadas en hardware de bajo costo como ESP32 y lectores RFID, integradas con una base de datos local y desarrolladas bajo un enfoque DMAIC. La presente tesis busca contribuir en este punto, proponiendo y evaluando un prototipo orientado al control de inventarios de materia prima en un entorno simulado de PyMEs manufacturera.

3 CAPÍTULO: METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE INVENTARIOS.

La metodología central de esta investigación es el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), propio de Six Sigma, el cual se emplea para abordar de manera estructurada el problema de control de inventarios en un almacén de materia prima de tipo PyME manufacturera.

En la fase Definir se delimita el problema de inventarios mediante la carta del proyecto y la herramienta 5W+2H, se caracteriza el proceso actual y se identifican las necesidades del almacén en términos de precisión, trazabilidad y eficiencia operativa.

Durante la fase Medir se determinan los indicadores relevantes del proceso y se identifican las fuentes de información disponibles, con el propósito de comprender el desempeño actual del sistema de inventarios y los puntos críticos donde se generan errores o retrasos, en esta etapa se utilizan las herramientas SIPOC y Swim Lane.

En la fase Analizar se emplea el diagrama de Ishikawa para identificar las causas raíz de las ineficiencias del proceso, así como los requerimientos funcionales y no funcionales que debe cumplir una solución tecnológica para atender dichas causas.

A partir de estos hallazgos y mediante una lluvia de ideas, en la fase Mejorar se diseña una arquitectura de sistema basada en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 (microcontroladores, lectores RFID, comunicación inalámbrica e infraestructura de cómputo local), orientada a automatizar el registro de materiales y a mejorar la trazabilidad del inventario. En esta tesis, el alcance se limita al diseño conceptual y funcional de dicha arquitectura, sin llegar a su implementación ni validación en entornos reales o simulados.

Finalmente, en la fase Controlar se proponen indicadores de desempeño, lineamientos y recomendaciones para la futura implementación y seguimiento del sistema en una PyME manufacturera, de modo que el diseño arquitectónico quede listo para ser llevado a cabo y evaluado en trabajos posteriores.

De este modo, la metodología DMAIC no solo guía la comprensión del problema de inventarios, sino que estructura el proceso de diseño de una solución tecnológica basada en la Industria 4.0, dejando explícito el alcance de la presente tesis.

3.1. Metodología DMAIC

Como se menciona anteriormente, la metodología seleccionada para la solución del problema de inventarios es DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), la cual es parte de la filosofía Six Sigma. [76]. En cada una de las etapas de la metodología se tiene la disponibilidad de varias herramientas, sin embargo, enseguida se mencionan las que se eligieron desarrollar para la búsqueda de la solución del problema de inventarios, como podemos observar en la (Fig. 2):

3.1.1. Definir

En la etapa de Definir, se utilizaron las siguientes herramientas.

- Carta del proyecto: Nos ayudó con la preparación para el escenario del proyecto. Con esta herramienta definimos varios conceptos importantes para el desarrollo del proyecto como son: área de mejora, roles y responsabilidades, justificación, alcance del proyecto, objetivo general y la forma en que se trabajará.
- 5W+2H: Esta herramienta tiene una aplicación muy simple, su forma de operación consiste en contestar 5 preguntas que en inglés comienzan con W (what, where, when, who, why) y 2 preguntas que comienzan con H (how much, how) con las respuestas se forma el enunciado del problema a resolver.

3.1.2. Medir

En la etapa Medir, se usaron las herramientas.

- SIPOC: El acrónimo se genera con las palabras S=Supplier/Proveedor, I=Input/Entrada, P=Process/Proceso, O=Output/Salida y C=Control/Control. La implementación de esta herramienta nos ayudó a obtener un mapa general de los departamentos/individuos involucrados en el proceso completo y así generar ideas de mejoras.
- Swim Lane: Es un diagrama que nos permitió visualizar el flujo y las actividades realizadas por cada departamento, los cuales están involucrados en la logística del proceso que estamos evaluando.

3.1.3. Analizar

En la etapa Analizar, se utilizó la herramienta.

- Diagrama de Causa-Efecto o Ishikawa: Esta herramienta se empleó con la finalidad de ayudarnos a encontrar la causa raíz del problema a través de la clasificación de categorías pertenecientes al problema y de la colaboración de un equipo preseleccionado para la recopilación de información.

3.1.4. Mejorar

En la etapa de Mejorar, se utilizó la herramienta.

- Lluvia de ideas: La implementación de esta herramienta nos brindó la oportunidad de encontrar soluciones innovadoras y efectivas, las cuales podremos llevar a cabo para solucionar el problema.

3.1.5. Controlar

En la etapa de Controlar, se utilizó la herramienta.

- Plan de Control: Es la herramienta indicada para el seguimiento, la evaluación de las acciones y los resultados obtenidos en las etapas iniciales del proyecto. Aunque el proyecto no avance a la etapa de implementación, el plan nos ayudó a determinar las características y métodos para mantener la propuesta de implementación en funcionamiento.

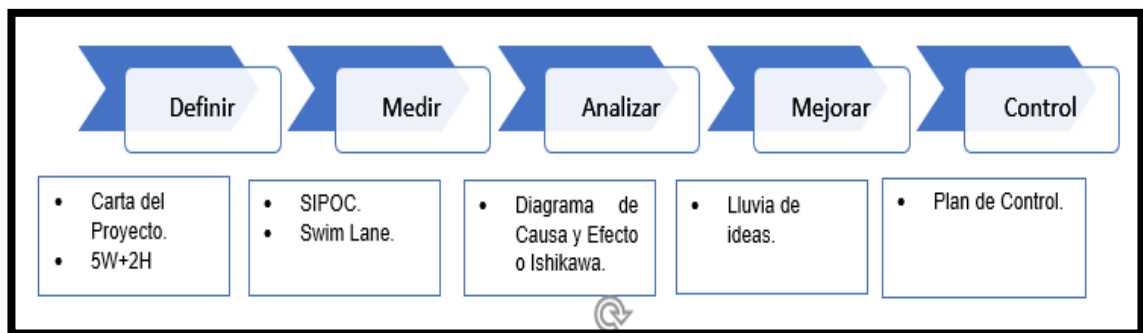


Fig. 2 Etapas y herramientas de la metodología DMAIC.

3.2. Criterios de diseño y lineamientos de la arquitectura del sistema

Dado que el alcance de la presente tesis se limita al diseño de la arquitectura del sistema de control de inventarios, el resultado principal del enfoque DMAIC es la definición de una solución tecnológica conceptualmente robusta y viable para su posterior implementación en una PyME manufacturera.

A partir de las fases Definir, Medir y Analizar, se establecen los siguientes elementos para el diseño de la arquitectura:

1. Requerimientos funcionales, tales como:
 - Registrar el alta inicial de materiales en el almacén;
 - Registrar entradas y salidas de materiales;
 - Asociar cada movimiento con una identificación única (etiqueta RFID, código de material, ubicación, fecha y hora);
 - Permitir la consulta del estado del inventario y del historial de movimientos.

2. Requerimientos no funcionales, tales como:
 - Uso de tecnologías de bajo costo y fácil adquisición para PyMEs;
 - Escalabilidad para aumentar el número de puntos de lectura;
 - Posibilidad de operar con infraestructura local (servidor en sitio);
 - Simplicidad en la operación para el personal del almacén.

Con base en estos requerimientos se proponen los criterios de diseño de la arquitectura:

- Utilización de microcontroladores con conectividad inalámbrica para integrar lectores RFID;
- Adopción de una base de datos local que centralice la información de inventario;
- Definición de un flujo de datos desde los puntos de lectura hacia el servidor;
- Diseño de una capa de aplicación para consulta y gestión del inventario.

La arquitectura resultante se describe en el Capítulo IV, donde se presentan:

- El diagrama general de componentes;
- Los módulos lógicos y físicos del sistema;
- Los flujos de información entre dispositivos y base de datos.

- Indicadores propuestos para la evaluación futura.

Aunque en esta tesis no se lleva a cabo la implementación ni la validación del sistema, se definen los siguientes indicadores de desempeño como referencia para futuras evaluaciones:

- Precisión del inventario (%): relación entre el inventario físico y el inventario registrado en el sistema.
- Tiempo promedio de registro (s/movimiento): tiempo estimado que debería requerir el sistema para registrar cada alta, entrada o salida.
- Número de errores de registro (errores/movimiento): errores potenciales que se espera reducir (registros incompletos, duplicados o con códigos incorrectos).
- Tiempo de recuperación de información (s/material): tiempo estimado para localizar el historial de un material mediante la interfaz del sistema.

Estos indicadores, derivados de la fase Medir y formalizados en la fase Controlar, constituyen la base para que, en futuras etapas de desarrollo, la arquitectura aquí propuesta pueda implementarse y evaluarse de manera cuantitativa en un entorno real o simulado.

4 CAPÍTULO: RESULTADOS Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

4.1. Resultados

4.1.1. Etapa. -Definir

Las Herramientas aplicadas en esta etapa fueron las siguientes:

- Carta de Proyecto

Es donde se muestra la información clave de una manera clara y concisa, en ella se incluye la justificación, el alcance, el objetivo y la forma en que se desarrolló el proyecto (Fig. 3).

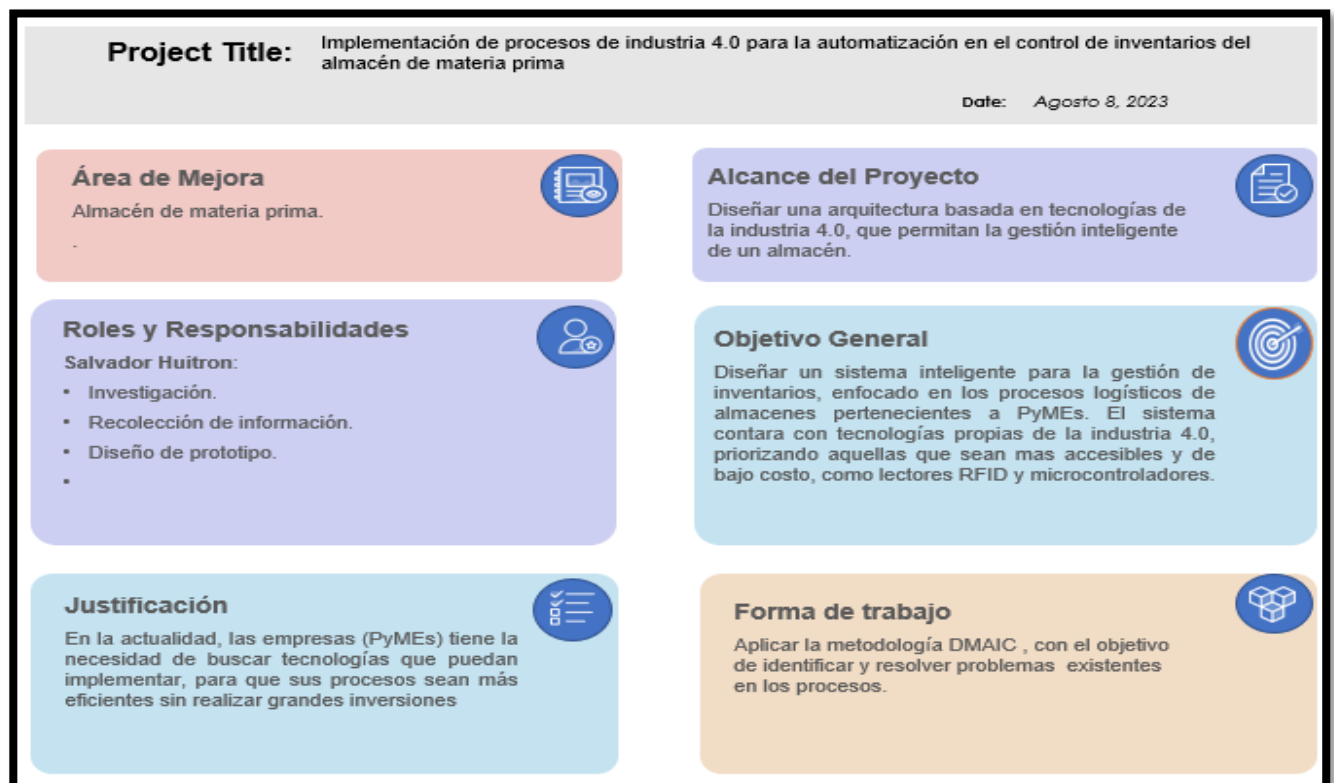


Fig. 3 Carta de proyecto

- Herramienta 5W+2H

Para el análisis de la situación actual se utilizó la herramienta 5W+2h (Fig. 4), la cual nos permitió estructurar la información mediante las preguntas claves pertenecientes a la herramienta. Esta metodología nos ayuda con la identificación precisa del problema, la delimitación de responsabilidades entre los departamentos involucrados y la estrategia clara y variable.

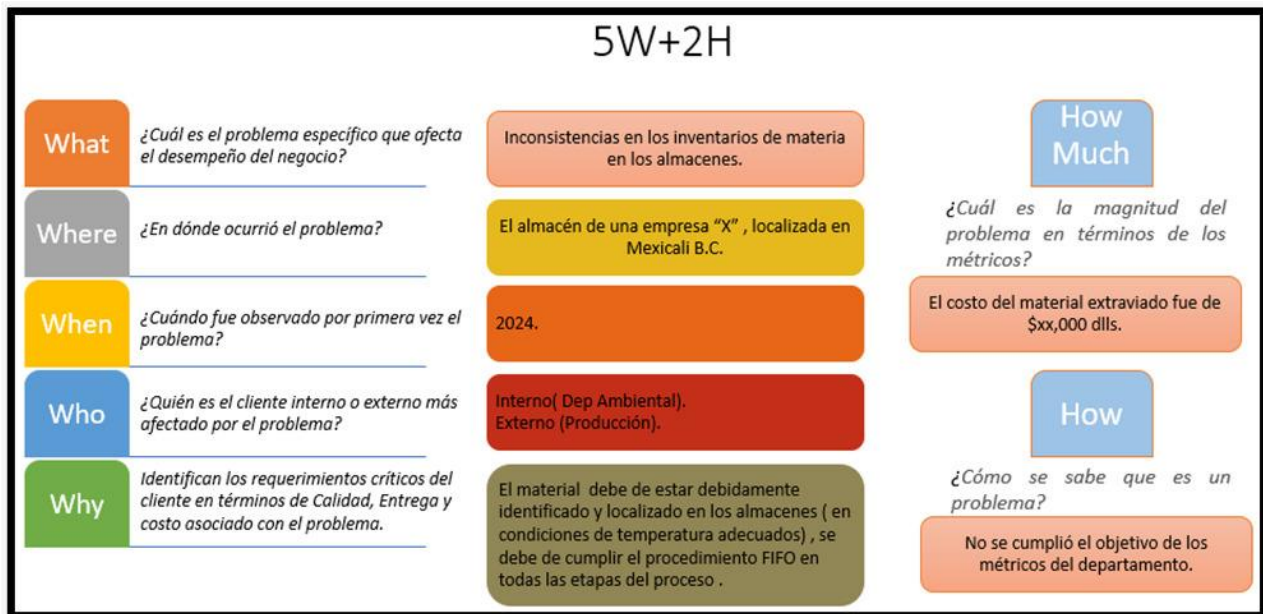


Fig. 4 Herramienta 5W + 2H

La herramienta 5W+2H consta de dos etapas, la primera etapa está compuesta por 5 preguntas:

- What ¿Qué? – Esta pregunta nos permite analizar cuál es el problema específico que está afectando el desempeño del proyecto.
- Where, ¿Dónde? – Pregunta acerca del lugar donde se localiza el problema a tratar.
- When, ¿Cuándo? – Solicita información de cuándo se suscitó el problema (Fecha exacta).
- Who, ¿Quién? – En esta etapa se define quiénes son las personas que llevan a cabo las actividades dentro del proceso.
- Why, ¿Por qué? - Ayuda a identificar los requerimientos críticos del cliente e identifica las posibles causas a resolver.

4.1.2. Etapa. -Medir

En el diagrama SIPOC (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se muestra la representación gráfica del proceso completo que se lleva a cabo para la logística de los materiales. En este diagrama se identificaron los proveedores de información, entradas, actividades realizadas, salidas y los usuarios que están involucrados. Además, también nos ayudó a visualizar los límites del proceso y definir cada uno de los elementos que influyen en él.

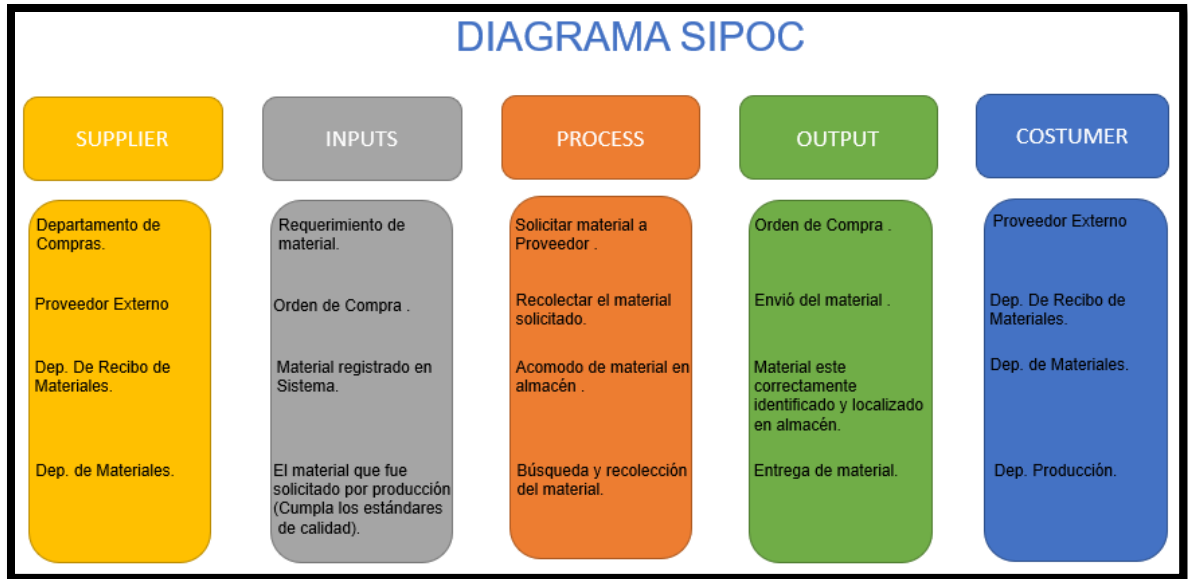


Fig. 5 Diagrama SIPOC.

Con la ayuda de la herramienta Swim Lane logramos representar los flujos de trabajo y las responsabilidades asignadas a cada área perteneciente al proceso de logística de los materiales. Además, nos permitió detectar las oportunidades de mejora en cada actividad perteneciente al proceso.

4.1.3. Etapa. - Analizar

En esta etapa se identificaron las causas raíz de los problemas detectados en las dos etapas anteriores. Mediante la aplicación de la herramienta “Diagrama de Ishikawa”, se lograron identificar y organizar las posibles causas en diferentes categorías de análisis: Método, Mano de Obra, Máquina, Material, Medición y Medio Ambiente.

En la (Figura 6). Diagrama Ishikawa se muestran las clasificaciones y el análisis de causas:

- Método: Se identificó que los procesos de registro y acomodo de los materiales se realizan de forma manual y no están estandarizados, lo que aumenta la posibilidad del error humano. No se cumple el procedimiento establecido con el principio FIFO.
- Maquinaria: Se muestra la necesidad de contar con un sistema basado en tecnología inteligente (IoT), el cual tenga las características necesarias para el registro y seguimiento de los materiales.

- Mano de Obra: Se detectó que el principal generador de discrepancias en los registros físicos y digitales, se debe a que no se llevan a cabo los movimientos de inventario en el sistema. Esto es a consecuencia de la falta de un sistema automatizado y de capacitación en herramientas tecnológicas.
- Material y Medio Ambiente: Se identificaron varios factores dentro de esta categoría, como lo son: la falta de una infraestructura adecuada para los materiales que requieren ciertos requisitos para su almacenaje, no contar con un sistema que permita priorizar los lotes según su vigencia.
- Medición: Esta categoría nos reveló la causa principal del problema, al evidenciar la falta de un sistema sistematizado para el proceso de control de los materiales en los almacenes. La falta de trazabilidad digital genera errores y pérdidas de materiales afectando las operaciones siguientes.

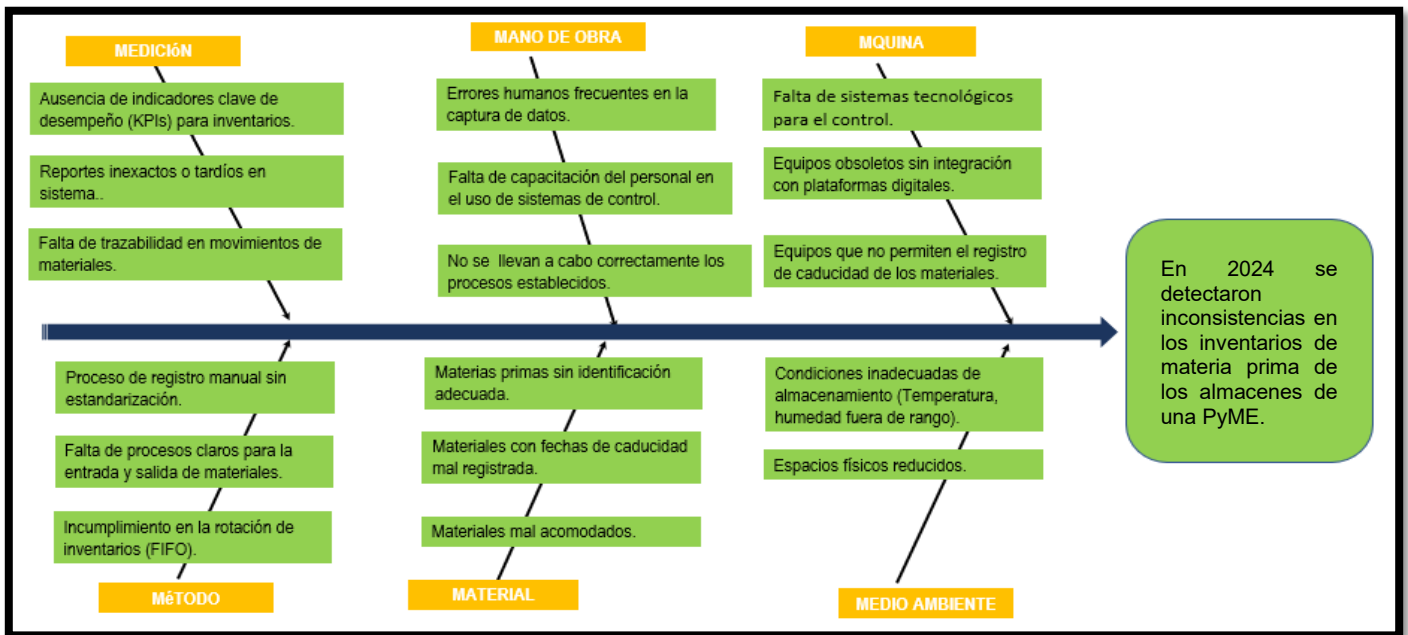


Fig. 6 Diagrama de Ishikawa.

El resultado del análisis nos permitió concluir que la causa raíz del problema en el proceso para el control de inventarios es la ausencia de un sistema automatizado para el control y exactitud de los materiales en el almacén.

4.1.4. Etapa 4. - Mejorar

Como parte de la fase de mejora, se llevó a cabo una sesión de lluvia de ideas con la finalidad de buscar alternativas de solución orientadas a atender la causa raíz identificada en la etapa de análisis.

Los participantes de las sesiones, previamente seleccionados, contribuyeron con propuestas dirigidas a optimizar la estandarización de la gestión de inventarios en el almacén.

Las ideas fueron clasificadas por temas como se muestra adelante:

1. +Mejoras en los procesos operativos.

- Mejorar los procedimientos existentes para el registro, recepción y surtido de materiales.
- Implementar controles visuales o digitales que faciliten el seguimiento de los materiales.
- Crear indicadores de desempeño (KPI) para monitorear el desempeño de cada proceso.
- Reducir el flujo operativo del almacén para reducir tiempos de búsqueda y traslado.

2. Incorporación de herramientas tecnológicas.

- Evaluar el uso de tecnología inteligente (IoT) en la logística de materiales.
- Implementar sistema tecnológico que detecte las entradas y salidas de los materiales por medio de arcos/Antenas.
- Incorporar sensores o dispositivos con tecnología que permitan la búsqueda de los materiales.
- Instalar pantallas o tableros electrónicos con información de los inventarios en tiempo real.
- Reemplazar las etiquetas con código de barra por un sistema de etiquetas RFID, para la identificación de los materiales.

3. Fortalecimiento del recurso humano.

- Mejorar la capacitación para el personal encargado de los procesos de logística del almacén.
- Realizar sesiones de retroalimentación y comunicación entre el personal encargado de la logística del almacén.
- Control y aseguramiento de la calidad.

- Realizar auditorías internas en los almacenes para validar la exactitud de los inventarios.
- Contar con un sistema de alarmas o avisos para los materiales que estén próximos a caducar.
- Optimización del espacio y recurso.
- Contar con un almacén con las capacidades y recursos necesarios para el almacenaje de los materiales.
- Utilizar un sistema de etiquetado especial para cada tipo de material.
- Estandarizar horarios y rutas de entrega de materiales.

Derivado de la lluvia de ideas, se procedió con el diseño, programación y ensamble de un prototipo funcional, lo cual queda plasmado en la sección 4.6. Desarrollo del prototipo de este Capítulo.

4.1.5. Etapa 5. Controlar

Como parte de la etapa de control se plantea una propuesta de planeación orientada a garantizar el funcionamiento correcto del prototipo una vez sea implementado en un entorno real. Debido a que el sistema aún no se encuentra implementado en un ambiente industrial, las actividades siguientes representarán las capacidades del prototipo, cumpliendo los requerimientos del proceso y las prácticas de gestión de inventarios bajo los lineamientos de la industria 4.0.

Objetivo del plan de control. - Establecer un conjunto de acciones preventivas, métodos de supervisión, indicadores claves y mecanismos de seguimiento que ayuden a mantener la confiabilidad del prototipo una vez implementado.

Alcance del plan. – El plan contempla las tres etapas del prototipo:

- Registro principal del material.
- Registro de entrada al almacén.
- Registro de salida del almacén.

También se incluirá la administración de datos en Raspberry PI, la comunicación mediante MQTT, la base de datos SQLite y la visualización en la interfaz web.

Actividades de Monitoreo Planeadas.

- Verificación semanal del funcionamiento del sistema: Validación de la conectividad Wi-Fi del módulo ESP32-WROOM, comprobación del enlace MQTT, revisión del estado del Raspberry Pi.
- Revisión periódica de la integridad de los datos: Detección de registros duplicados en la base de datos, validación de la correcta actualización del historial de movimientos.
- Indicadores clave (KPIs) propuestos: Precisión del inventario, trazabilidad de los materiales y eficiencia del registro.

4.2. Desarrollo del prototipo

4.2.1. Diseño de la arquitectura del sistema de control

En esta sección se presenta el diseño de la arquitectura del sistema de control de inventarios propuesto como resultado de la aplicación de la metodología DMAIC al proceso de almacén de materia prima en una PyME manufacturera.

A partir del análisis realizado en las fases Definir, Medir y Analizar, se identificaron las principales causas raíz de ineficiencia y los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema. Sobre esta base, en la fase Mejorar se diseñó una solución conceptual basada en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0, que integra dispositivos físicos, infraestructura de cómputo local y componentes de software para automatizar el registro y la gestión del inventario.

El diseño aquí presentado constituye el alcance principal de la tesis y tiene como propósito dejar una arquitectura clara, documentada y lista para su posterior implementación y validación en trabajos futuros.

4.2.2. Visión general de la arquitectura propuesta

La arquitectura propuesta para el sistema de control de inventarios se basa en un enfoque por capas, alineado con las arquitecturas IoT descritas en la literatura, pero organizado en cuatro niveles funcionales: captación de datos, comunicación y transporte, procesamiento y almacenamiento y aplicación y visualización. Esta arquitectura no solo se define de manera conceptual, sino que se materializa en un prototipo construido con dispositivos de bajo costo y alta disponibilidad, entre los que destacan los microcontroladores ESP32-WROOM, los lectores RFID MFRC522, una Raspberry Pi 4 como servidor local, un bróker MQTT, una base de datos

SQLite y una interfaz web desarrollada en Python, complementados con elementos de interacción como pantalla OLED, teclado, LEDs y buzzer.

En la capa de captación de datos se ubican los tres puntos de lectura físicos (Lector 1, Lector 2 y Lector 3), instalados en las etapas clave del flujo de materiales: registro inicial, entrada al almacén y salida hacia producción. Cada punto de lectura integra un módulo ESP32-WROOM y un lector RFID MFRC522, además de periféricos específicos: botones, LEDs y buzzer para confirmación de lectura en los lectores de alta y entrada, y una pantalla OLED y teclado en el lector de salidas, lo que permite capturar también la cantidad retirada del inventario. El ESP32-WROOM se eligió en lugar de microcontroladores más básicos (por ejemplo, Arduino UNO o MEGA con módulos Wi-Fi externos) debido a que integra en un solo dispositivo procesador de doble núcleo, conectividad Wi-Fi y soporte para MicroPython, reduciendo el número de componentes, el cableado y la complejidad de integración. Esta combinación facilita el desarrollo rápido de lógica embebida, mantiene el costo bajo y proporciona suficiente capacidad de cómputo para manejar las lecturas RFID, la construcción de mensajes y la comunicación de red. El lector MFRC522, por su parte, se seleccionó como tecnología RFID de frecuencia HF (13.56 MHz) de bajo costo, ampliamente soportada y con abundantes librerías y ejemplos, lo que lo hace más accesible para una PyME que lectores UHF industriales de mayor alcance pero costo considerablemente superior.

La capa de comunicación y transporte de datos se basa en una red Wi-Fi local que enlaza los ESP32-WROOM con la Raspberry Pi 4 y en el uso de un bróker MQTT para la mensajería entre dispositivos. Cada punto de lectura encapsula la información relevante (UID del tag, número de parte, descripción, unidad, cantidad, fecha de caducidad, tipo de movimiento y ubicación) en mensajes que se publican en tópicos MQTT específicos. Esta elección responde a varios criterios: MQTT es un protocolo ligero, orientado a eventos y diseñado para dispositivos IoT con recursos limitados, lo que lo hace más eficiente y sencillo de manejar que esquemas basados únicamente en peticiones HTTP periódicas. Al operar sobre una infraestructura Wi-Fi interna, la solución evita la dependencia de servicios en la nube y reduce costos recurrentes de conectividad, al tiempo que permite escalar en el número de lectores sin necesidad de modificar la lógica del servidor, únicamente suscripciones y tópicos.

En la capa de procesamiento y almacenamiento se encuentra la Raspberry Pi 4 funcionando como servidor local de cómputo en el borde (edge). Sobre este dispositivo se ejecutan los scripts en Python responsables de suscribirse al bróker MQTT, recibir los mensajes provenientes de los

lectores, validarlos y almacenarlos en una base de datos SQLite. La Raspberry Pi 4 se eligió frente a alternativas como PCs industriales o servidores dedicados debido a su bajo costo, reducido consumo energético, tamaño compacto y capacidad suficiente para ejecutar un sistema operativo basado en Linux, un bróker MQTT, servicios web y la base de datos en un mismo equipo. Esta elección reduce la inversión inicial y la complejidad de la infraestructura, al mismo tiempo que se mantiene una potencia de cómputo adecuada para el volumen de datos típico de una PyME.

La base de datos del sistema se implementó con SQLite, un gestor relacional embebido que almacena la información en un archivo local y no requiere un servidor de bases de datos independiente. SQLite ofrece soporte SQL estándar, integridad de datos y simplicidad de despliegue, lo que lo hace más adecuado para un entorno de un solo nodo y carga moderada que opciones más complejas como MySQL, PostgreSQL o SQL Server, cuyo despliegue y administración resultan más costosos y sobredimensionados para el contexto de la solución propuesta. Al mismo tiempo, representa una mejora significativa respecto a esquemas basados en hojas de cálculo o archivos planos, que son más propensos a errores, corrupción de datos y problemas de concurrencia. En esta base de datos se almacenan el catálogo de materiales, la relación entre materiales y etiquetas RFID, así como el historial de movimientos asociados a cada tag (altas, entradas y salidas con marcas de tiempo).

Finalmente, la capa de aplicación y visualización se implementa mediante una interfaz web ligera desarrollada en Python, que se ejecuta también en la Raspberry Pi 4 y es accesible desde navegadores web dentro de la red interna. Esta interfaz permite consultar las existencias actuales, revisar el historial de movimientos y visualizar en tiempo casi real la información registrada en SQLite, a través de una URL interna del tipo `http://<IP_Raspberry>:<puerto>/InventarioTabla`. El uso de una aplicación web, en lugar de clientes dedicados o aplicaciones móviles específicas, reduce la necesidad de instalar software adicional en los equipos del almacén y aprovecha herramientas ya disponibles (navegador web), lo que disminuye los requerimientos de capacitación del personal. Complementariamente, la pantalla OLED y el teclado del Lector 3 proporcionan una capa adicional de interacción local, permitiendo al operario visualizar la información del tag y registrar la cantidad de salida directamente en el punto de operación, sin depender de una computadora cercana.

La integración de estos componentes —ESP32-WROOM, lectores MFRC522, red Wi-Fi local, bróker MQTT, Raspberry Pi 4, SQLite, scripts en Python y una interfaz web accesible— da lugar

a una arquitectura IoT coherente con los principios de la Industria 4.0 y, al mismo tiempo, compatible con las restricciones de costo y simplicidad propias de las PyMEs manufactureras. Cada decisión tecnológica responde tanto a los requerimientos funcionales y no funcionales identificados mediante DMAIC (automatización del registro, trazabilidad, uso de tecnologías de bajo costo, operación con infraestructura local) como a la necesidad de contar con una solución escalable, replicable y mantenible, que pueda evolucionar en fases posteriores hacia esquemas de mayor integración con otros sistemas empresariales y herramientas de analítica avanzada.

La Fig. 7 muestra de manera esquemática la arquitectura general, resaltando la relación entre los dispositivos de campo, la infraestructura de comunicación, el servidor local y la interfaz de usuario.



Fig. 7 Arquitectura del sistema de control de inventarios.

4.2.3. Relación de la arquitectura con las causas raíz y requerimientos identificados

La arquitectura propuesta no se diseñó de forma aislada, sino como respuesta a las causas raíz y a los requerimientos del proceso de inventarios identificados durante la aplicación de la metodología DMAIC.

En la Tabla 2 se resume la relación entre:

- Las principales causas raíz detectadas (por ejemplo, errores en el registro manual, falta de estandarización en el llenado de formatos, ausencia de trazabilidad de los movimientos, demoras en la actualización del inventario);
- Los requerimientos funcionales y no funcionales derivados de estas causas;
- Los elementos específicos de la arquitectura que atienden cada uno de ellos.

Esta trazabilidad permite demostrar que cada componente de la solución propuesta tiene un propósito claro dentro del contexto del problema y que la arquitectura, en su conjunto, constituye una respuesta coherente a las necesidades del proceso de inventarios en una PyME manufacturera.

Tabla 2 Relación de la arquitectura con las causas raíz y requerimientos identificados.

Causa raíz / hallazgo (DMAIC)	Requerimiento del sistema	Elemento de la arquitectura que lo atiende
Ausencia de indicadores clave de desempeño (KPIs) para inventarios.	Definir y registrar datos que permitan calcular KPIs (exactitud de inventario, tiempos de registro, errores, rotación, etc.).	Modelo de datos en la base de datos local que guarda movimientos con fecha/hora, tipo de operación, cantidades y usuario, y módulo de reportes en la aplicación para calcular y mostrar KPIs.
Reportes inexactos o tardíos en sistema.	Generar reportes a partir de datos capturados automáticamente y actualizados casi en tiempo real.	Servidor local + base de datos que reciben lecturas automáticas desde los dispositivos IoT y una interfaz web que construye reportes directamente desde esos datos sin captura manual.
Falta de trazabilidad en movimientos de materiales.	Registrar cada movimiento (alta, entrada, salida) con identificador único, ubicación, cantidad y marca de tiempo.	Uso de etiquetas RFID asociadas a cada material, lectura en puntos clave del flujo y almacenamiento de un historial de movimientos en la base de datos, consultable desde la aplicación.
Proceso de registro manual sin estandarización.	Establecer un flujo único y automatizado de registro de movimientos, reduciendo la variabilidad entre personas.	Puntos de lectura RFID en las estaciones definidas del proceso (recepción, almacén, surtido) y reglas de negocio en el servidor que estandarizan cómo se registran los movimientos.
Falta de procesos claros para la entrada y salida de materiales.	Definir secuencias de operación y tipos de movimiento bien diferenciados (alta, entrada, salida, ajuste).	Modelo de procesos reflejado en la aplicación (formularios y opciones claras de movimiento) y en la lógica del servidor que clasifica y valida cada operación.
Incumplimiento en la rotación de inventarios (FIFO).	Registrar lote, fecha de ingreso y caducidad para poder sugerir la salida de materiales en orden FIFO.	Campos específicos en la base de datos (lote, fecha de ingreso, fecha de caducidad) y vistas en la aplicación que ordenan los materiales según antigüedad / vigencia para soportar decisiones FIFO.
Errores humanos frecuentes en la captura de datos.	Minimizar la captura manual y reemplazarla por lecturas automáticas de identificación.	Lectores RFID + microcontroladores que capturan automáticamente el ID de cada material, reduciendo la necesidad de escribir códigos o descripciones manualmente.
Falta de capacitación del personal en el uso de sistemas de control.	Disponer de una interfaz simple e intuitiva y documentación clara de uso.	Interfaz web amigable, con pantallas claras para registrar y consultar inventario, y posibilidad de incorporar mensajes de ayuda / manuales accesibles desde la misma aplicación.
No se llevan a cabo correctamente los procesos establecidos.	Hacer visibles y guiados los pasos del proceso dentro del sistema, para forzar su cumplimiento.	Flujos guiados en la aplicación (por ejemplo, pasos obligatorios en el registro de una entrada o salida) y registros de usuario/operación en la base de datos para auditoría.
Materias primas sin identificación adecuada.	Garantizar que todo material en almacén tenga un identificador único legible por el sistema.	Asignación de etiquetas RFID a cada material y asociación en la base de datos entre ID RFID y datos del material (código interno, descripción, unidad, ubicación).
Materiales con fechas de caducidad mal registrada.	Registrar las fechas de caducidad en campos estructurados y evitar captura libre sin formato.	Campos específicos para fecha de caducidad en la base de datos y formularios de la aplicación con validación de formato de fecha y campos obligatorios.

Materiales mal acomodados.	Contar con información clara de ubicación por material y reglas mínimas de acomodo.	Atributo de ubicación física en el registro del material, vistas en la aplicación por estantería / zona y posibilidad de mostrar mapas simples de ubicación en la interfaz.
Falta de sistemas tecnológicos para el control.	Introducir una solución tecnológica integral, de bajo costo y escalable, para gestionar inventarios.	Arquitectura IoT + servidor local + base de datos + aplicación web, que automatiza el registro y centraliza la información del inventario.
Equipos obsoletos sin integración con plataformas digitales.	Usar dispositivos actuales con conectividad nativa (Wi-Fi, protocolos ligeros) y capacidad de integrarse a otros sistemas.	Microcontroladores con Wi-Fi y un servidor local con servicios que pueden integrarse a futuros sistemas (ERP, WMS) mediante APIs o intercambio de datos.
Equipos que no permiten el registro de caducidad de los materiales.	Incorporar en el sistema campos específicos para información de caducidad, lote y vigencia.	Diseño del esquema de base de datos y de la interfaz para capturar y mostrar lote y caducidad, independientemente de las limitaciones de equipos anteriores.
Condiciones inadecuadas de almacenamiento (Temperatura, humedad fuera de rango).	Tener la posibilidad de monitorear variables ambientales que impactan la calidad de los materiales.	Arquitectura preparada para integrar sensores IoT adicionales (temperatura, humedad) conectados a la misma red y servidor, para registrar y visualizar condiciones de almacenamiento.
Espacios físicos reducidos.	Optimizar el acomodo mediante mejor visibilidad de ubicación y existencias, evitando sobreinventarios.	Información centralizada en la base de datos sobre cantidades y ubicaciones, y reportes en la aplicación para identificar materiales de baja rotación o sobreinventarios y reorganizar el espacio.
Ausencia de un sistema automatizado para el control y exactitud de los materiales en el almacén.	Diseñar un sistema automatizado que registre, almacene y muestre información de inventario con exactitud y oportunidad.	Conjunto completo de la arquitectura: dispositivos de lectura RFID, red de comunicación, servidor con base de datos y aplicación de consulta/gestión que automatizan el control de inventario.

4.3. Construcción del prototipo

El prototipo propuesto fue construido con dispositivos de bajo costo y de alta disponibilidad, con el objetivo de garantizar eficiencia y accesibilidad en su implementación. A continuación, como se muestra el proceso de logística de materiales y la interacción de las tres etapas del proyecto (Fig. 8).

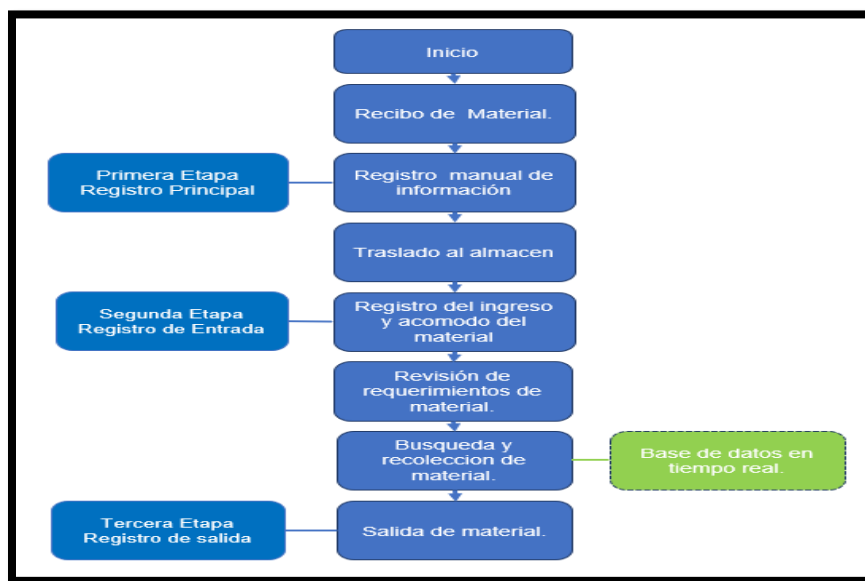


Fig. 8 Proceso de logística de materiales.

4.3.1. Etapa de Configuración Inicial

En esta etapa se realizará el registro de la información de todos los materiales que serán ingresados al almacén, mediante el dispositivo físico (hardware). Estos datos serán enviados y administrados en una base de datos por medio del programa creado y a los cuales serán visualizados en el momento en una página web (Fig. 9).

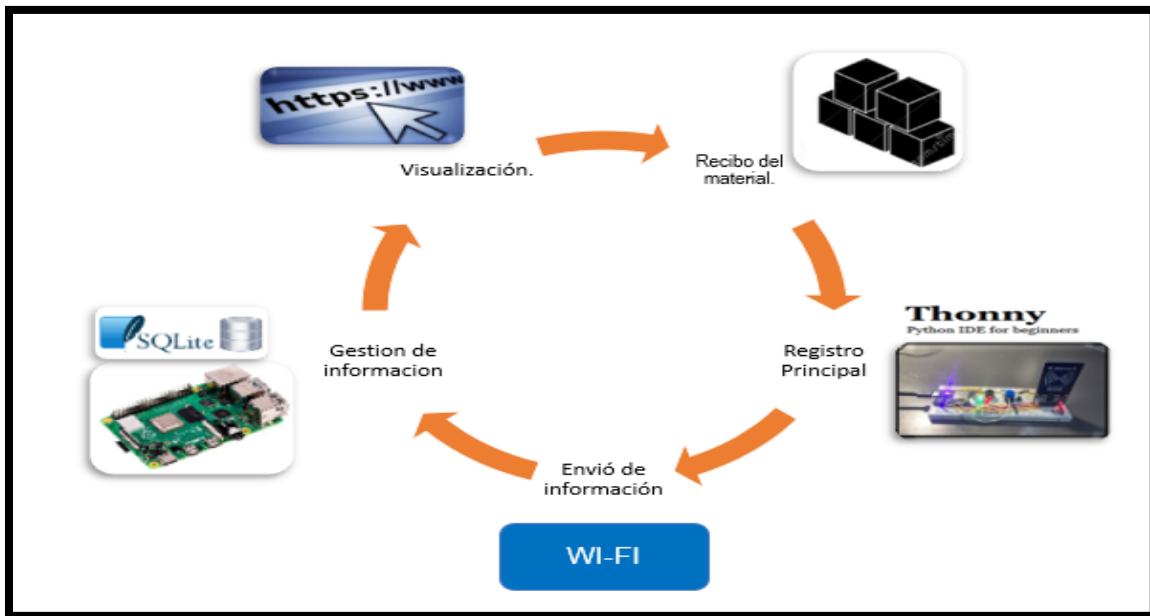


Fig. 9 Proceso de registro principal.

1. Configuración del entorno de desarrollo.

Se realizó el desarrollo y configuración de los programas encargados de la lectura, registro, envió y visualización de los datos obtenidos por el dispositivo físico.

2. Instalación y configuración de la Raspberry Pi 4.

Uno de los primeros pasos que se realizaron fue: la descarga e instalación del programa “Raspberry Pi Imager V1.9.6”, con el cual realizamos la configuración inicial del módulo Raspberry Pi 4 (Fig. 10; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Se utilizó una memoria USB, en la cual fue instalado el sistema operativo de 64 bits con los programas necesarios para el proceso de almacenamiento, procesamiento, envió y visualización de datos.

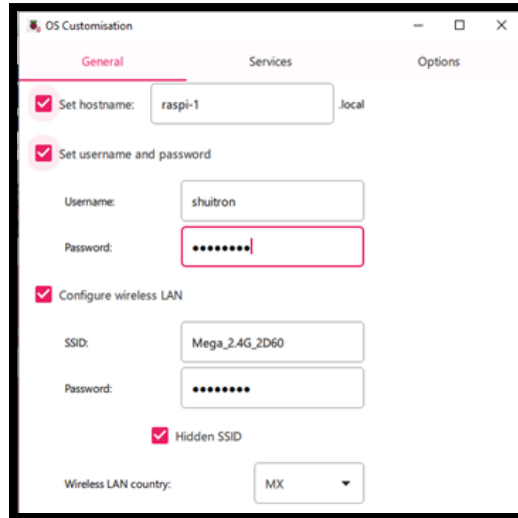


Fig. 10 Asignación de nombre del dispositivo, usuario y contraseña.

Al terminar la configuración, se inició la instalación de las librerías necesarias para el funcionamiento del módulo. Esa instalación se realizó a través del programa “Windows PowerShell” por medio de comandos específicos.

El primer comando que se utilizó fue: `ssh shuitron@IP Raspberry Pi` (Fig. 11).

```
PS C:\Users\Enano> ssh shuitron@192.168.1.18
shuitron@192.168.1.18's password:
Linux raspi-1 6.12.47+rpt-rpi-v8 #1 SMP PREEMPT Debian 1:6.12.47-1+rpt1-bookworm (2025-09-16) aarch64

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Tue Oct 7 19:53:32 2025
shuitron@raspi-1:~$
```

Fig. 11 Configuración inicial de librerías mediante Windows PowerShell (SSH).

Las siguientes librerías fueron instaladas por medio de los comandos:

- `sudo apt update`: Comando encargado de actualizar la lista de paqueterías necesarias para el sistema operativo.
- `sudo apt upgrade`: Actualiza las paqueterías a las versiones más recientes.
- `Sudo raspi-config`: Comando utilizado para configurar la conexión VNC dentro del módulo Raspberry Pi (Fig. 12). Con este comando lograremos visualizar el sistema operativo por medio de una conexión remota, sin necesidad de conectar un monitor adicional.

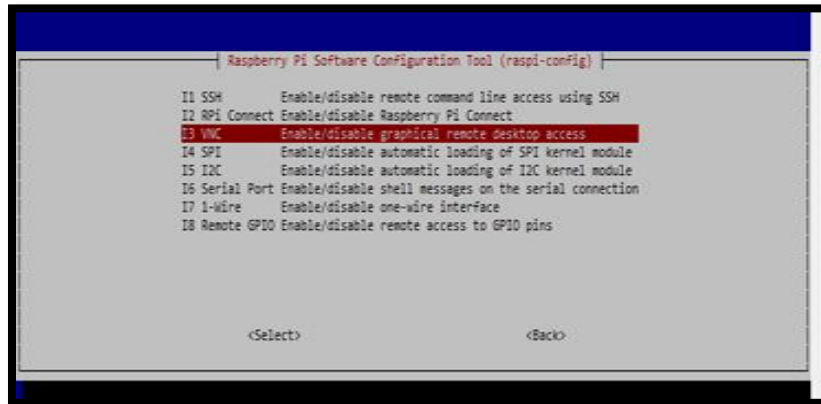


Fig. 12 Habilitado de conexión remota mediante VNC.

Una vez habilitada la opción VNC en la configuración, será necesario contar con un programa que nos permita visualizar el sistema operativo por medio de una conexión remota.

3. Instalación y configuración de RealVNC View.

Se realizó la descarga e instalación del programa, fue necesario realizar el registro de una cuenta en la página oficial del programa para poder trabajar con él. El programa requiere el usuario y password que asignamos en la configuración inicial del módulo Raspberry Pi, para lograr la conexión vía remota entre los dos (Fig. 13).

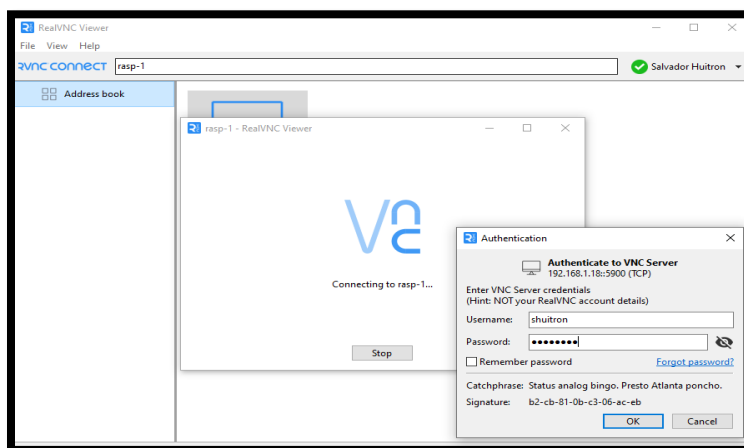


Fig. 13 Proceso de registro de usuario y contraseña RealVNC View.

Una vez que el programa realizó la validación de los datos, nos permitirá ingresar a la interfaz del módulo Raspberry Pi para realizar la configuración de los programas faltantes (Fig. 14).

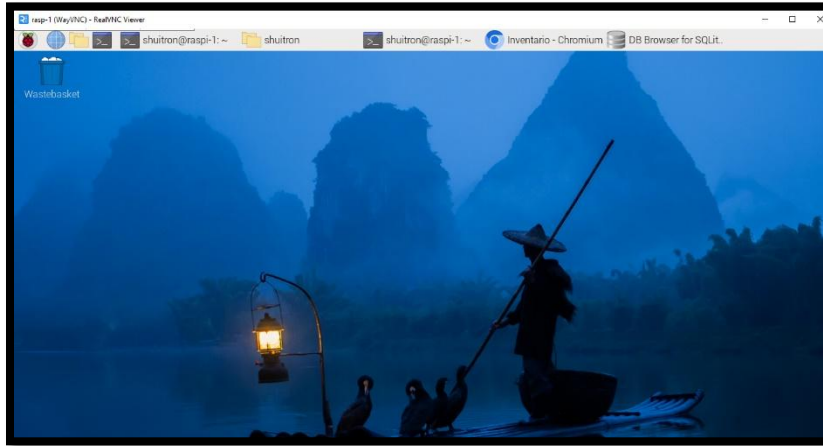


Fig. 14 Visualización sistema operativo Raspberry Pi.

Fue necesaria la instalación del programa SQLite (Bróker) y la creación de dos scripts en Python, para la gestión de la información que el módulo ESP32-WROOM enviará a través de la red Wi-Fi (Fig. 15).

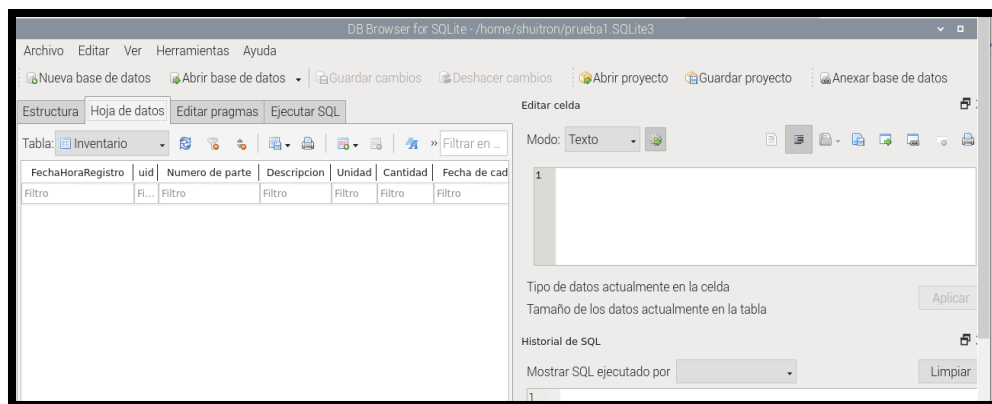


Fig. 15 Interfaz del programa SQLite.

4. Instalación del IDE Thonny

Se realizó la descarga del programa de la página oficial y una vez listo, comenzamos con la instalación en el equipo pc. Este programa cuenta con las características necesarias para la creación de programas utilizando el lenguaje Python y es compatible con los módulos ESP32-WROOM (Fig. 16).

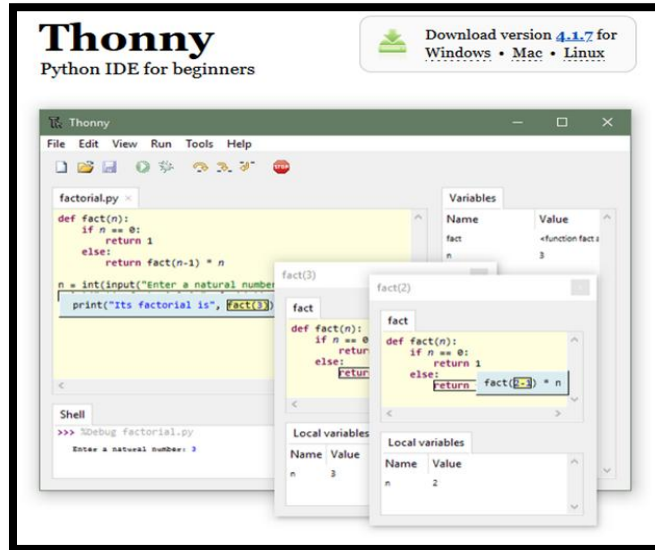


Fig. 16 Programa Thonny basado en Micro Python.

Una vez realizada la instalación del programa, comenzamos con el proceso de conectividad con el módulo ESP32-WROOM. El programa debe lograr identificar el módulo y así nos permita realizar la configuración necesaria para lograr cargar los programas en el módulo.

Validamos que el módulo ESP32-WROOM esté conectado en el mismo puerto USB que el programa Thonny (Fig. 17).

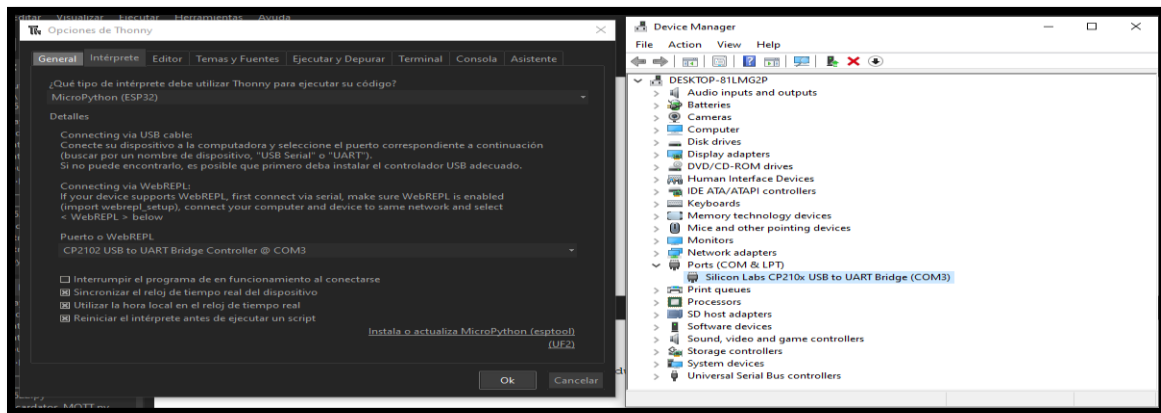


Fig. 17 Configuración de puertos de comunicación USB.

Fue necesario descargar el Firmware para el módulo ESP32-WROOM (Fig. 18).

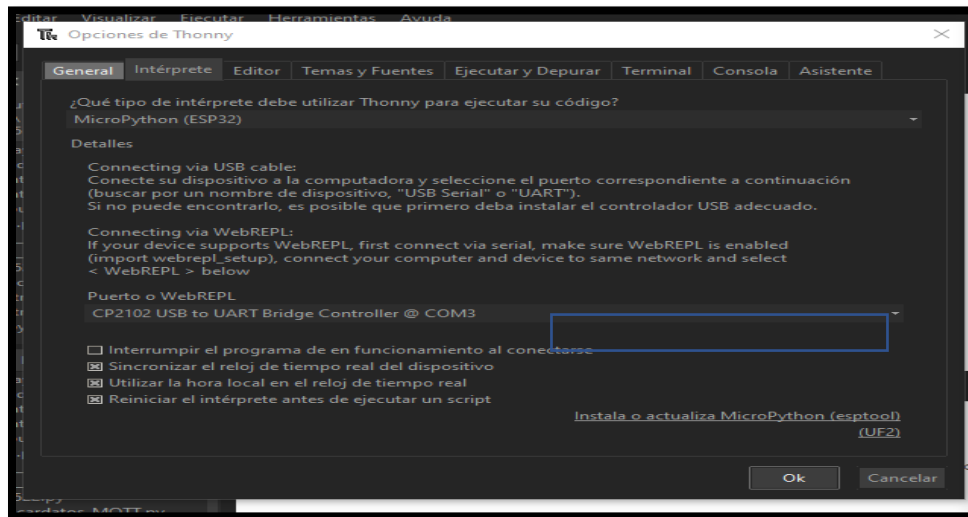


Fig. 18 Instalación de Firmware módulo ESP32-WROOM.

Una vez instalado el Firmware, el programa reconocerá el módulo y así se establecerá la comunicación entre ellos (Fig. 19).



Fig. 19 Validación correcta de la conexión por USB.

Como parte de la validación de la conexión entre el programa y el prototipo, se creó un programa llamado "test_led.py, el cual tiene la función de encender 3 leds en secuencia y un Buzzer (20).

```

1 from machine import Pin
2 import time
3
4 # Pines oficiales del sistema
5 led_azul = Pin(26, Pin.OUT) # LED Azul - Sistema listo
6 led_verde = Pin(2, Pin.OUT) # LED Verde - Registro exitoso
7 led_rojo = Pin(27, Pin.OUT) # LED Rojo - Error
8 buzzer = Pin(25, Pin.OUT) # Buzzer de confirmación
9
10 def test_leds():
11     print("🚀 Iniciando test rápido de LEDs y buzzer...")
12
13     # LED Azul
14     print("🟢 Encendiendo LED Azul (GPIO26)")
15     led_azul.on()
16     time.sleep(1)

```

Consola X

```

>>> %Run -c $EDITOR_CONTENT

MPY: soft reboot
🚀 Iniciando test rápido de LEDs y buzzer...
🟢 Encendiendo LED Azul (GPIO26)
🟢 Encendiendo LED Verde (GPIO2)
🟢 Encendiendo LED Rojo (GPIO27)
🔔 Activando Buzzer (GPIO25)
🔔 Encendiendo todos simultáneamente...
✅ Test completado.
>>>

```

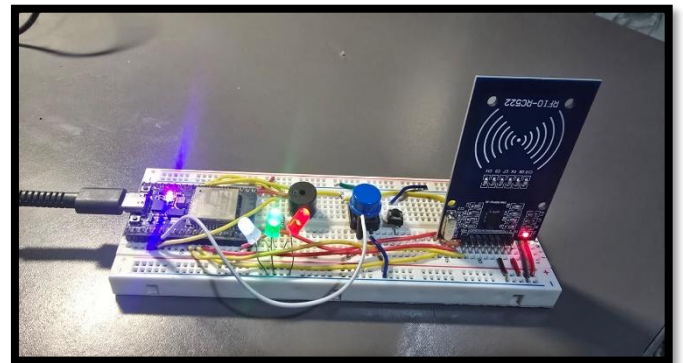


Fig. 20 Validación del sistema por medio de un programa predeterminando.

Como segunda prueba de validación, se buscó que el módulo ESP32-WROOM lograra establecer una conexión a la red Wi-Fi, por medio del programa “test_wifi.py” (Fig. 21).

```

1 from machine import Pin
2 import network
3 import time
4
5 # Pines oficiales
6 led_azul = Pin(26, Pin.OUT) # LED Azul - Conexión exitosa
7 led_rojo = Pin(27, Pin.OUT) # LED Rojo - Error de conexión
8
9 # Configura tu red aquí
10 SSID = "Mega_2.4G_2D60"
11 PASSWORD = " "
12
13 def conectar_wifi():
14     led_azul.off()
15     wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
16     wlan.active(True)
17
18     if not wlan.isconnected():
19         print("🔌 Conectando a la red WiFi...")

```

Consola X

```

>>> %Run -c $EDITOR_CONTENT

MPY: soft reboot
🔌 Test de conexión WiFi
🔌 Conectando a la red WiFi...
✅ Conectado a WiFi
📡 IP asignada: 192.168.1.21

```

Fig. 21 Validación de la conexión a una red Wi-Fi.

Se realizaron las conexiones físicas entre el módulo ESP32-WROOM y el lector RFID MFRC522 para lograr realizar las lecturas de los tags, para comprobar que las conexiones fueran correctas se realizó un programa “rfid.py. El cual al detectar uno, leerá su identificador único (UID) y lo compartirá con el módulo (Fig. 22).

Modulo RC522	ESP32-WROOM
SDA	Pin 05
SCK	Pin 18
MOSI	Pin 23
MISO	Pin 19
IRQ	No conectado
GND	GDN
RST	Pin 13
3,3 V	3,3 V

Fig. 22 Listado de conexiones por medio de los puertos del módulo ESP32-WROOM.

4.3.2. Proceso de registro de materiales (Registro Principal)

En esta etapa se realizará el registro de la información de cada uno de los tags que ingresen por el sistema automatizado de registro, estos tags representarán los materiales en todo el proceso de logística. Se creará una base de datos con la información, la cual servirá para la consulta y los movimientos de material en las 2 etapas siguientes.

El Lector 1 encargado de realizar las siguientes actividades:

- Detectar todos los tags que se pasen cerca del lector.
- Extraer el registro único (UID) de cada tag y compartirlo.

Y está conformado por los siguientes componentes (Fig. 23):

- Módulo ESP32-WROOM.
- Buzzer.
- Botón.
- Lector RFID MFRC522.
- Leds.

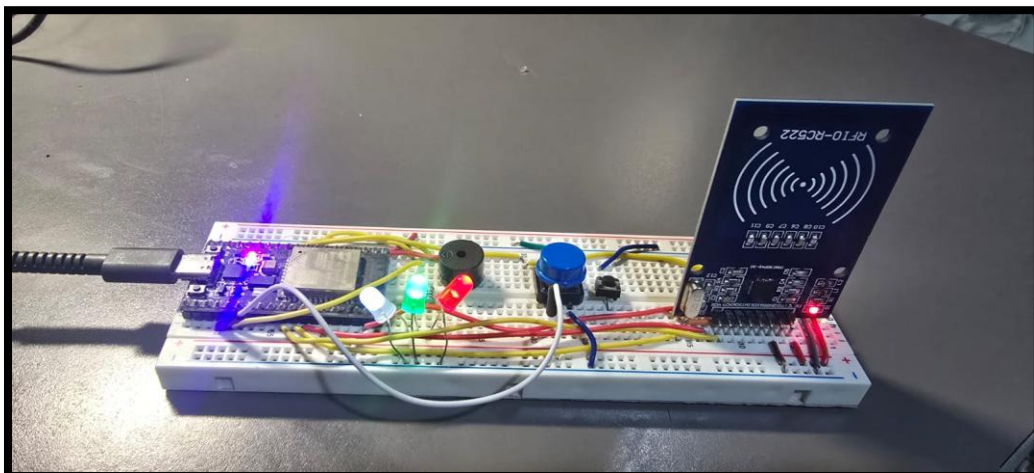


Fig. 23 Lector 1

Para el funcionamiento del proyecto, se creó un programa principal llamado "main.py", el cual tiene la función de realizar la lectura e identificación de los tags, asignación de la información y el envío de esta al módulo Raspberry Pi por medio del internet.

El programa principal está formado por subprogramas que se encargan de realizar actividades o validaciones necesarias para el buen funcionamiento de este.

Proceso conexión a internet. Este proceso se lleva a cabo por medio del programa "wifi_manager.py", una vez conectado a la red, mandará un mensaje de confirmación (Fig. 24).

```
10 # Datos de red
11 SSID = "Nombre de la red " #Cambia por tu red
12 PASSWORD = "Password" # Cambia por tu contraseña
13
14 def conectar_wifi():
15     led_azul.off()
16     wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
17     wlan.active(True)
18
19     if not wlan.isconnected():
20         print("🔌 Conectando a la red WiFi...")
21         wlan.connect(SSID, PASSWORD)
22
```

```
🔌 Conectando a la red WiFi...
✅ Conectado a WiFi: 192.168.1.24
```

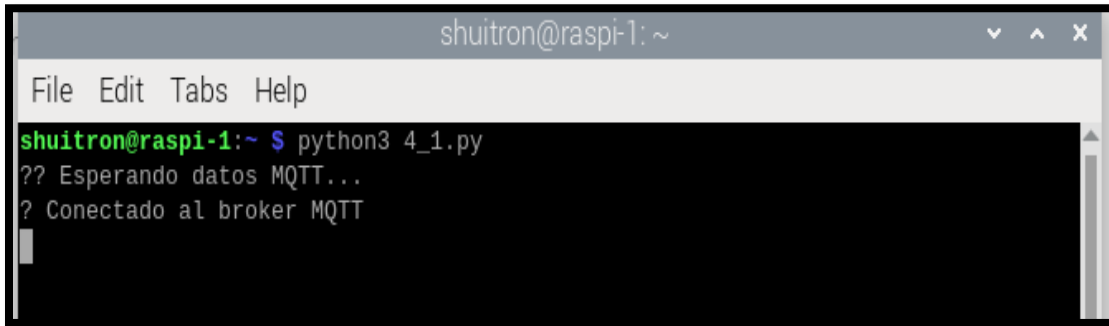
Fig. 24 Validación de conexión a una red Wi-Fi.

Proceso de conexión MQTT. Este programa valida que se realice con éxito la conexión entre el ESP32-WROOM y el Bróker (Fig. 25).

```
# Conectar MQTT
mqtt_client = MQTTClient(CLIENT_ID, MQTT_BROKER)
mqtt_client.set_callback(on_message)
mqtt_client.connect()
mqtt_client.subscribe(TOPIC_RESPUESTA)
print("✅ MQTT listo")
```

Fig. 25 Validación de la conexión a MQTT.

Dentro de la interfaz del módulo Raspberry Pi se creó un script en Python "4_1.py", el cual se encargará de validar la comunicación entre el módulo ESP32-WROOM y el MQTT(Bróker) (Fig. 26).

A terminal window titled 'shuitron@raspi-1: ~' with a menu bar containing 'File Edit Tabs Help'. The terminal output shows the execution of 'python3 4_1.py', followed by the messages '?? Esperando datos MQTT...' and '? Conectado al broker MQTT'.

```
shuitron@raspi-1: ~  
File Edit Tabs Help  
shuitron@raspi-1:~ $ python3 4_1.py  
?? Esperando datos MQTT...  
? Conectado al broker MQTT
```

Fig. 26 Recepción de datos vía MQTT.

Después de que el programa principal valide la conexión al bróker MQTT, solicitará que se presione el botón (físico) para que el lector comience el reconocimiento y lectura de los tags que estarán cerca de él (Fig. 27).

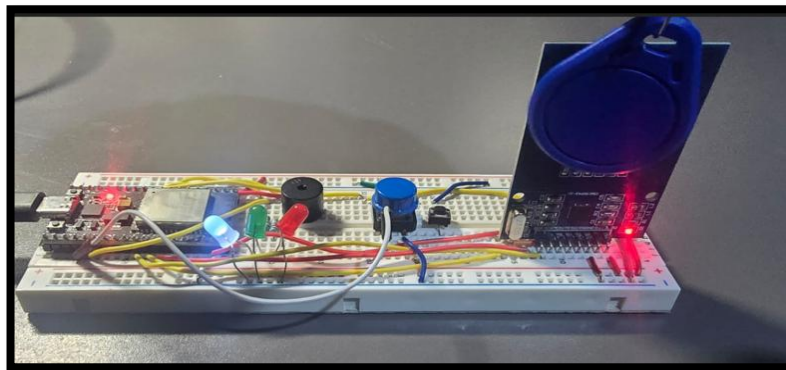


Fig. 27 Proceso de Lectura de Tag.

Al identificar el tag, el programa solicitará el registro de los siguientes datos como se muestran en la (Fig. 28):

- Número de parte.
- Descripción.
- Unidad (Es la unidad de medida del material, Kilos, Litros, Onzas, Galones)
- Volumen (Se considera 1 para todos los registros).
- Cantidad inicial.
- Fecha de caducidad (Considera las fechas de caducidad de los materiales, para implementación de un control FIFO).

```
Consola [X]
Sistema listo.
[✓] MQTT listo
[○] Presiona el botón para escanear un tag RFID...
[○] Escaneando...
[○] Escaneando... acerca el tag al lector RFID.
[✓] UID: BF8FC81FE7
[○] TAG nuevo detectado.
[○] ¿Deseas registrar este UID? (s/N): S
[○] Número de Parte (o 'CANCELAR'): P56-7890
[○] Descripción (o 'CANCELAR'): PINTURA
[○] Unidad (o 'CANCELAR'): LITROS
[○] Cantidad inicial (positivo): 90
[○] Fecha Caducidad (DD/MM/AAAA) o 'CANCELAR': 07/10/2026

==== Registro ====
UID: BF8FC81FE7
Número de Parte: P56-7890
Descripción : PINTURA
Cantidad : 90
Unidad : LITROS
Caducidad : 07/10/2026
=====

¿Los datos son correctos? (S=Enviar / E=Editar / C=Cancelar): S
[○] Datos enviados correctamente

[○] Presiona el botón para escanear un tag RFID...
```

Fig. 28 Proceso de registro de información.

Una vez capturados los datos, el programa mostrará el mensaje “Datos enviados correctamente” como parte de la confirmación del registro. Después de la confirmación de la captura de datos, el módulo ESP32-WROOM enviará la información al Bróker (MQTT) (Fig. 29).

```
shuitron@raspi-1: ~
File Edit Tabs Help
shuitron@raspi-1:~ $ python3 4_1.py
?? Esperando datos MQTT...
? Conectado al broker MQTT
?? Respuesta enviada para UID BF8FC81FE7: {'existe': False, 'registrado': False,
'datos': {}, 'todos': []}
? Inventario actualizado: P56-7890 (UID: BF8FC81FE7)
[ ]
```

Fig. 29 Registro de información recibida por el Bróker (MQTT).

Una vez que el programa SQLite recibe los datos, se encargará de crear la base de datos con la información de entrada de cada tag que sea leído por el receptor RFID (Fig. 30).

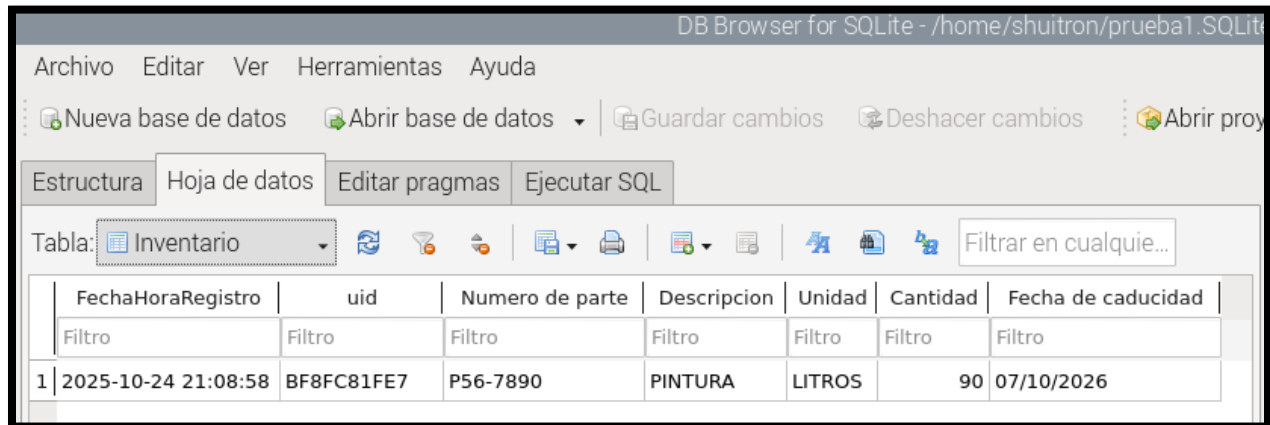


Fig. 30 Registro de información del proceso de entrada en SQLite.

Una vez que se realizó el registro, otro script en Python “paginasweb.py” se encarga de crear la dirección web de la página donde se visualizará el registro de la información de los tags leídos (Fig. 31).

```

shuitron@raspi-1: ~
File Edit Tabs Help
shuitron@raspi-1:~ $ python3 paginasweb.py
* Serving Flask app 'paginasweb'
* Debug mode: off
WARNING: This is a development server. Do not use it in a production deployment.
Use a production WSGI server instead.
* Running on all addresses (0.0.0.0)
* Running on http://127.0.0.1:5000
* Running on http://192.168.1.18:5000
Press CTRL+C to quit
192.168.1.18 - - [24/Oct/2025 21:10:09] "GET / HTTP/1.1" 404 -
192.168.1.18 - - [24/Oct/2025 21:10:10] "GET /favicon.ico HTTP/1.1" 404 -
192.168.1.18 - - [24/Oct/2025 21:10:13] "GET /InventarioTabla HTTP/1.1" 200 -

```

Fig. 31 Script Python para la creación de la dirección web.

La información administrada por el programa SQLite se podrá visualizar en el sitio web <http://192.168.1.18.500/InventarioTabla> (Fig. 32).

Fecha/Hora Registro	UID	Numero de parte	Descripcion	Unidad	Cantidad	Fecha de caducidad	Movimientos
24/10/2025 21:08:58	BF8FC81FE7	P56-7890	PINTURA	LITROS	90	07/10/2026	Ver movimientos

Fig. 32 Sitio Web de registro de inventarios de materiales.

4.3.3. Proceso de registro de materiales (Registro Entrada)

Una vez realizada la captura de información en la base de datos, el tag procederá a ser transportado al almacén para su acomodo. En la entrada del almacén se encontrará el lector 2, el cual se encargará de detectar y leer la información de cada uno de los tags previamente almacenada y automáticamente creará el registro de entrada en sistema. Esa información será compartirá por medio del Módulo ESP32-WROOM al módulo Raspberry Pi, una vez recibida el programa SQLite lo agregará a la base de datos y se podrá verificar en la página web en el momento.

Lector 2 estará encargado de recabar la información de los materiales que serán llevados dentro del almacén, está conformado por los siguientes componentes (Fig. 33):

- Listado de componentes:
- Módulo ESP32-WROOM.
- Botón.
- Lector RFID MFRC522.
- Leds.

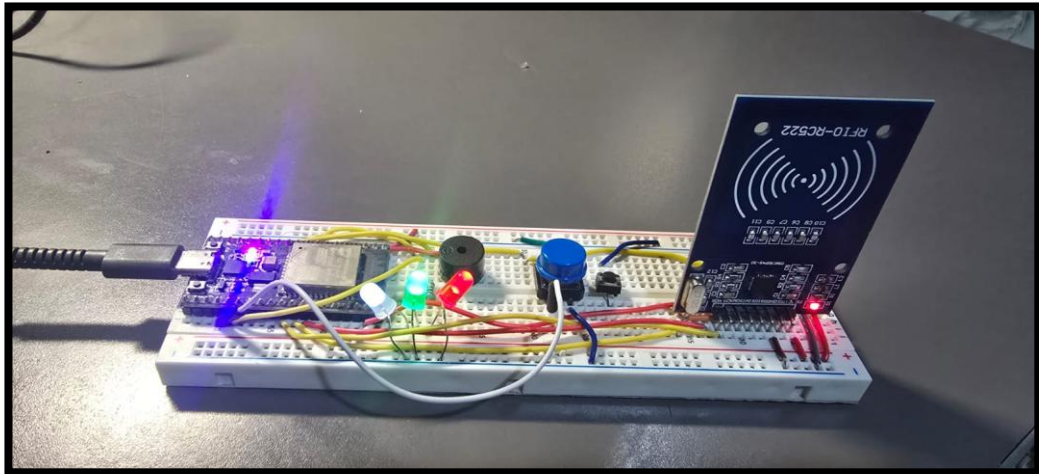


Fig. 33 Lector 2

El programa llamado main_entrada.py se encargará automáticamente del registro de la información del tag una vez es detectado por el lector 2 (Fig. 34).

```
Consola X
  Buzzer
  [x] Hardware verificado.
  [x] Conectando a WiFi...
  [x] Conectado a WiFi: 192.168.1.33
  [x] Conectado a WiFi
  [o] Verificando broker: 192.168.1.18
  [x] MQTT listo

  [o] Presiona el botón para iniciar la lectura del tag RFID...|

  [x] Inicio de lecturas.
  [x] Escaneando... acerca el tag al lector RFID.
  [x] UID: BF 8F C8 1F E7, Fecha: 2025/10/24 22:04:46
  [o] UID detectado: BF8FC81FE7

  [x] === Registro Existente ===
  [o] UID: BF8FC81FE7
  [o] Número de Parte: P56-7890
  [o] Descripción : PINTURA
  [o] Cantidad : 90
  [o] Unidad : LITROS
  [o] Caducidad : 07/10/2026
  =====

  [x] Entrada registrada UID BF8FC81FE7 con cantidad 90

  [o] Presiona el botón para registrar otro tag...
```

Fig. 34 Registro de entrada en sistema.

Una vez registrada la entrada del tag, la información será enviada al módulo Raspberry Pi. Esa información se podrá visualizar por medio de un script Python (Fig. 35) y será organizada por el programa SQLite ().

```

shuitron@raspi-1: ~
File Edit Tabs Help
shuitron@raspi-1:~ $ python3 4_1.py
?? Esperando datos MQTT...
? Conectado al broker MQTT
?? Respuesta enviada para UID BF8FC81FE7: {'existe': False, 'registrado': False,
'datos': {}, 'todos': []}
? Inventario actualizado: P56-7890 (UID: BF8FC81FE7)
?? Respuesta enviada para UID BF8FC81FE7: {'existe': True, 'registrado': False,
'datos': {'FechaHoraRegistro': '2025-10-24 21:08:58', 'uid': 'BF8FC81FE7', 'Numero de parte': 'P56-7890', 'Descripcion': 'PINTURA', 'Unidad': 'LITROS', 'Cantidad': 90, 'Fecha de caducidad': '07/10/2026'}, 'todos': [{'FechaHoraRegistro': '2025-10-24 21:08:58', 'uid': 'BF8FC81FE7', 'Numero de parte': 'P56-7890', 'Descripcion': 'PINTURA', 'Unidad': 'LITROS', 'Cantidad': 90, 'Fecha de caducidad': '07/10/2026'}]}
? Entrada ALMACEN A registrada para UID BF8FC81FE7

```

Fig. 35 Información recibida por medio de MQTT.

id	uid	tipo	fecha	hora ▲¹	ubicacion	cantidad
1	BF8FC81FE7	entrada	2025-10-24	22:04:46	ALMACEN A	90
2	BF8FC81FE7	entrada	2025-10-24	21:08:58	REGISTRO	90

Fig. 36 Registro de información en SQLite.

Al contar con la información guardada en el programa SQLite, será posible visualizarla en el sitio web previamente utilizado (Fig. 37).

Movimientos UID BF8FC81FE7				
Tipo	Fecha	Hora	Ubicacion	Cantidad
entrada	2025-10-24	21:08:58	REGISTRO	90
entrada	2025-10-24	22:04:46	ALMACEN A	90

Fig. 37 Consulta de información en sitio Proceso de registro de materiales (Registro Salida).

4.3.4. Proceso de registro de materiales (Registro Salidas)

En esta etapa del proyecto, se lleva a cabo el registro de todas las salidas de material que está dentro del almacén. Este proceso se realiza por medio del lector 3, el cual al detectar y leer un tag validara la información guardada en la base de datos. El lector 3 cuenta con una pantalla, en la cual podrá visualizar la información correspondiente a ese tag y con el teclado se tendrá la opción de escribir cuántas piezas saldrán del inventario existente.

Esta información será enviada (Fig. 38) al módulo Raspberry Pi para que sea actualizada la base de datos y se registren los cambios necesarios en los inventarios.

Listado de componentes:

- Módulo ESP32-WROOM.

- Lector RFID MFRC522.
- Leds.
- Pantalla Oled.
- Teclado.

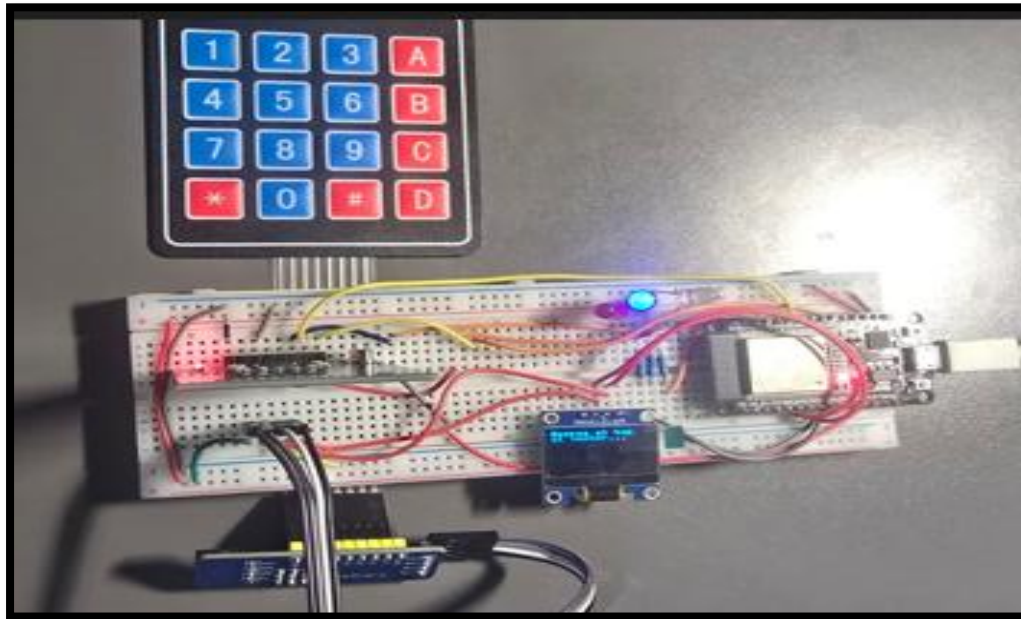


Fig. 38 Lector 3.

En la pantalla del Lector 3, se puede apreciar la indicación “Acercar un tag al lector” (Fig. 39).

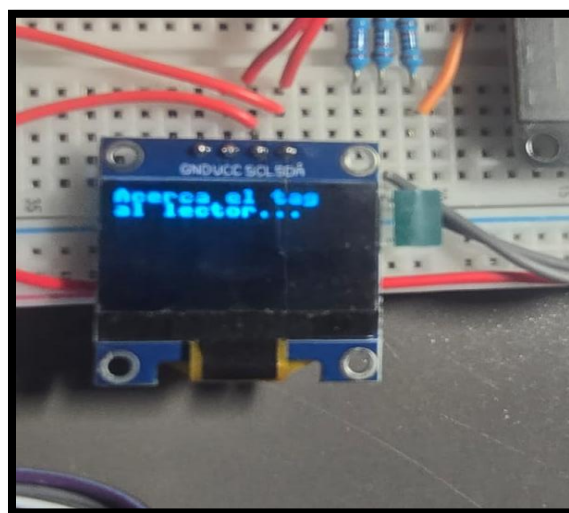


Fig. 39 Proceso de lectura de tags.

Una vez que se lea el tag, la pantalla mostrara la información guardada en la base de datos correspondiente al tag leído (Fig. 40).



Fig. 40 Inventario en sistema del tag leído.

Como siguiente paso, se procederá a escribir por medio del teclado la cantidad que se va a retirar del almacén (Fig. 41).

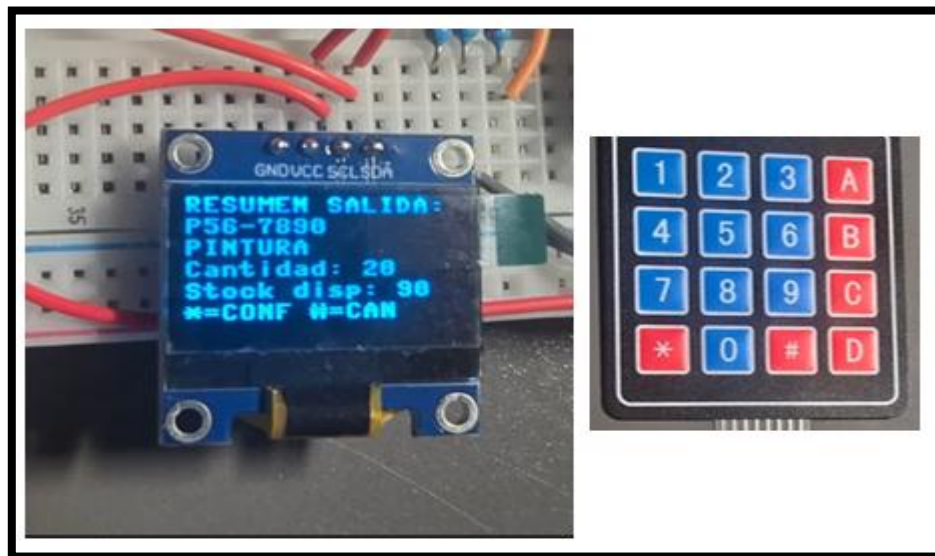


Fig. 41 Registro manual de salida de material.

Una vez realizada la operación, en la pantalla se visualizará el mensaje "Salida registrada".

Al finalizar el registro, la información llegará al módulo Raspberry Pi donde será registrada en la base de datos existente. Los scripts que están funcionando registrarán el último movimiento realizado (Fig. 42).

```

shuitron@raspi-1: ~
File Edit Tabs Help
shuitron@raspi-1:~ $ python3 4_1.py
?? Esperando datos MQTT...
? Conectado al broker MQTT
?? Respuesta enviada para UID BF8FC81FE7: {'existe': False, 'registrado': False,
'datos': {}, 'todos': []}
? Inventario actualizado: P56-7890 (UID: BF8FC81FE7)
?? Respuesta enviada para UID BF8FC81FE7: {'existe': True, 'registrado': False,
'datos': {'FechaHoraRegistro': '2025-10-24 21:08:58', 'uid': 'BF8FC81FE7', 'Numero de parte': 'P56-7890', 'Descripcion': 'PINTURA', 'Unidad': 'LITROS', 'Cantidad': 90, 'Fecha de caducidad': '07/10/2026'}, 'todos': [{'FechaHoraRegistro': '2025-10-24 21:08:58', 'uid': 'BF8FC81FE7', 'Numero de parte': 'P56-7890', 'Descripcion': 'PINTURA', 'Unidad': 'LITROS', 'Cantidad': 90, 'Fecha de caducidad': '07/10/2026'}]}
? Entrada ALMACEN A registrada para UID BF8FC81FE7
?? Respuesta enviada para UID BF8FC81FE7: {'existe': True, 'registrado': True, 'datos': {'FechaHoraRegistro': '2025-10-24 21:08:58', 'uid': 'BF8FC81FE7', 'Numero de parte': 'P56-7890', 'Descripcion': 'PINTURA', 'Unidad': 'LITROS', 'Cantidad': 90, 'Fecha de caducidad': '07/10/2026'}, 'todos': [{'FechaHoraRegistro': '2025-10-24 21:08:58', 'uid': 'BF8FC81FE7', 'Numero de parte': 'P56-7890', 'Descripcion': 'PINTURA', 'Unidad': 'LITROS', 'Cantidad': 90, 'Fecha de caducidad': '07/10/2026'}]}
? Salida registrada UID BF8FC81FE7, Cantidad 20
  
```

Fig. 42 Historial de Registros en script Python.

El programa SQLite también registrará la información recibida del proceso de salida (Fig. 43).

	id	uid	tipo	fecha	hora ▲ ¹	ubicacion	cantidad
	Fi...	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	6	BF8FC81FE7	Salida	2025-10-24	22:18:36	ALMACEN B	20
2	5	BF8FC81FE7	entrada	2025-10-24	22:04:46	ALMACEN A	90
3	4	BF8FC81FE7	entrada	2025-10-24	21:08:58	REGISTRO	90

Fig. 43 Historial de registros SQLite.

Finalmente se podrá consultar el inventario y movimientos realizados del tag, por medio del sitio web creado (Fig. 44).

The image shows two browser screenshots. The top screenshot displays the 'Inventario' page with a table containing one record. The bottom screenshot displays the 'Movimientos UID BF8FC81FE7' page with a table showing three movement records.

Inventario

Fecha/Hora Registro	UID	Numero de parte	Descripcion	Unidad	Cantidad	Fecha de caducidad	Movimientos
24/10/2025 21:08:58	BF8FC81FE7	P56-7890	PINTURA	LITROS	70	07/10/2026	Ver movimientos

Movimientos UID BF8FC81FE7

Tipo	Fecha	Hora	Ubicacion	Cantidad
entrada	2025-10-24	21:08:58	REGISTRO	90
entrada	2025-10-24	22:04:46	ALMACEN A	90
Salida	2025-10-24	22:18:36	ALMACEN B	20

Fig. 44 Historial de registros página WEB

5 CAPÍTULO: DISCUSIÓN

5.1. Introducción

En este capítulo se discuten los principales resultados de la investigación, entendidos como la aplicación de la metodología DMAIC al proceso de control de inventarios de una PyME manufacturera y el diseño de una arquitectura de sistema basada en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0.

La discusión se organiza en torno a cuatro ejes: (i) la contribución de la arquitectura propuesta a la solución del problema de inventarios identificado, (ii) su coherencia con la literatura existente sobre el uso de tecnologías digitales e IoT en la gestión de inventarios, (iii) el potencial de mejora que podría alcanzarse en futuras implementaciones, y (iv) las limitaciones del presente estudio y las derivaciones para trabajos posteriores.

5.2. *Contribución de la arquitectura al problema de inventarios*

La aplicación de la metodología DMAIC permitió identificar, de manera estructurada, las principales causas raíz que afectan el desempeño del proceso de control de inventarios, así como los requerimientos funcionales y no funcionales que debería cumplir una solución tecnológica para atenderlas. A partir de esos hallazgos se diseñó una arquitectura de sistema de control de inventarios basada en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0, cuyo propósito es automatizar y estandarizar el registro de materiales, mejorar la trazabilidad de los movimientos y apoyar la toma de decisiones en el almacén.

La Tabla 2 muestra la relación entre las causas raíz identificadas, los requerimientos derivados y los elementos específicos de la arquitectura que los atienden. Esta relación evidencia que la propuesta no se limita a la incorporación aislada de dispositivos IoT, sino que responde a necesidades concretas del proceso. Por ejemplo, la ausencia de indicadores clave de desempeño (KPIs) y los reportes inexactos o tardíos se abordan mediante el diseño de un modelo de datos estructurado en la base de datos y la inclusión de un módulo de reportes en la capa de aplicación. De esta forma, el sistema queda preparado para calcular, en futuras implementaciones, métricas como la precisión del inventario, los tiempos de registro y la rotación de materiales.

De manera similar, problemas como la falta de trazabilidad, el registro manual sin estandarización, los errores humanos frecuentes y la falta de procesos claros para la entrada y salida de materiales se atienden mediante la introducción de puntos de lectura RFID en ubicaciones clave del flujo, la definición de tipos de movimiento estandarizados y la

automatización del registro de las transacciones en la base de datos. Con ello se busca reducir la dependencia de capturas manuales y asegurar que cada movimiento quede asociado a un identificador único, una ubicación y una marca de tiempo.

Por otro lado, las causas relacionadas con la mala gestión de la caducidad y el acomodo de materiales (fechas mal registradas, materiales mal acomodados, incumplimiento del principio FIFO) se traducen en requerimientos de registro estructurado de lote, fecha de ingreso y caducidad, así como en la necesidad de vistas que permitan ordenar y priorizar los materiales según su antigüedad y vigencia. Estos requerimientos se incorporan en el diseño del esquema de base de datos y en las funcionalidades previstas para la interfaz de usuario.

Finalmente, la falta de sistemas tecnológicos, la existencia de equipos obsoletos y las condiciones limitadas del entorno (espacios reducidos, ausencia de automatización) se abordan con una arquitectura modular, basada en dispositivos de bajo costo con conectividad inalámbrica, un servidor local y una aplicación web ligera. Esta configuración busca equilibrar las restricciones típicas de las PyMEs con la necesidad de avanzar hacia esquemas de control de inventarios apoyados en tecnologías digitales.

5.3. *Relación con la literatura y el enfoque DMAIC–Industria 4.0*

La revisión de literatura presentada en el Capítulo II muestra que numerosas investigaciones han explorado el uso de tecnologías digitales, particularmente IoT, RFID y sistemas de información, para mejorar la gestión de inventarios y la trazabilidad en cadenas de suministro. En general, estos trabajos coinciden en que la automatización del registro de movimientos, la identificación electrónica de materiales y la disponibilidad de información en tiempo casi real contribuyen a reducir errores, disminuir tiempos de operación y mejorar la visibilidad del inventario.

La arquitectura propuesta en esta tesis se encuentra alineada con dichas tendencias, al plantear una solución que integra dispositivos de captura de datos (lectores RFID y microcontroladores con conectividad inalámbrica), una infraestructura de procesamiento y almacenamiento local, y una capa de aplicación para consulta y gestión del inventario. Sin embargo, a diferencia de enfoques centrados exclusivamente en la tecnología, el diseño aquí presentado se deriva explícitamente de la aplicación de la metodología DMAIC, lo que garantiza que cada decisión de diseño esté justificada por un análisis previo de causas raíz y requerimientos del proceso.

En este sentido, la presente investigación se posiciona en el punto de intersección entre la gestión de calidad y la transformación digital de los procesos de almacén. Por un lado, retoma el

uso de herramientas clásicas de Lean Six Sigma (SIPOC, 5W+2H, diagrama de Ishikawa) para comprender el problema y estructurar la mejora; por otro lado, incorpora tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 como medio para materializar la solución. Esta combinación metodológica refuerza la idea de que la adopción de tecnologías digitales debe estar precedida por un análisis riguroso de procesos y no responder únicamente a criterios de disponibilidad tecnológica o moda.

Asimismo, el enfoque explícito en el contexto de una PyME manufacturera contribuye a la literatura al mostrar que es posible concebir arquitecturas de sistemas de inventario basadas en tecnologías emergentes utilizando componentes de bajo costo y una infraestructura local, sin depender necesariamente de soluciones comerciales complejas o de alto presupuesto. De esta forma, se aporta una referencia técnica que puede ser adaptada y extendida en estudios e implementaciones posteriores orientadas al sector de las PyMEs.

5.4. *Potencial de mejora y evaluación futura*

Dado que el alcance de la presente tesis se limita al diseño de la arquitectura del sistema y no incluye su implementación ni validación en un entorno real o simulado, los beneficios esperados se plantean en términos de potencial de mejora, sustentado en el análisis del proceso y en la literatura revisada.

A partir de los indicadores propuestos en el Capítulo III, es posible delinear la forma en que la arquitectura podría evaluarse en trabajos futuros. Por ejemplo, la precisión del inventario podría medirse comparando el inventario físico con los registros del sistema, antes y después de la implementación de la solución; el tiempo promedio de registro de movimientos podría evaluarse cronometrando las operaciones de alta, entrada y salida en el procedimiento manual y en el procedimiento automatizado; y los errores de registro podrían cuantificarse mediante la identificación de registros incompletos, duplicados o incorrectos en ambos esquemas.

De manera similar, la trazabilidad de materiales podría analizarse mediante el tiempo requerido para recuperar el historial de un material específico y la integridad de la información disponible en el sistema. Finalmente, la disponibilidad de datos estructurados abriría la posibilidad de incorporar, en fases posteriores, técnicas de analítica y visualización más avanzadas, como tableros interactivos o modelos de pronóstico de demanda.

En conjunto, estos indicadores conforman una base sólida para que, en futuras implementaciones piloto, se puedan cuantificar los efectos de la arquitectura propuesta sobre el desempeño del proceso de inventarios y valorar su contribución a la competitividad de las PyMEs manufactureras.

5.5. Limitaciones del estudio

La primera limitación de esta investigación está relacionada con su alcance: la tesis se centra en la aplicación de la metodología DMAIC para el análisis del proceso de inventarios y el diseño de una arquitectura de sistema basada en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0, sin abordar la etapa de implementación y validación empírica de la solución. En consecuencia, no es posible reportar resultados cuantitativos sobre mejoras efectivas en precisión del inventario, tiempos de registro o reducción de errores; dichos resultados quedan como objetivo de trabajos posteriores.

En segundo lugar, la caracterización del proceso y la identificación de causas raíz se realizaron con base en la información disponible para un caso particular de PyME manufacturera, lo que puede limitar la generalización directa de los hallazgos a otros contextos. No obstante, la metodología empleada y la arquitectura propuesta han sido concebidas de manera modular, con el fin de facilitar su adaptación a diferentes tipos de empresas y entornos.

Finalmente, si bien se consideraron criterios de bajo costo y simplicidad tecnológica en el diseño de la arquitectura, la adopción real de la solución en una PyME implicará enfrentar retos adicionales, como la disponibilidad de infraestructura de red, la capacitación del personal y la integración con otros sistemas existentes. Estas dimensiones organizacionales y de cambio tecnológico no se abordan en profundidad en el presente trabajo, pero representan líneas relevantes para futuras investigaciones.

6 CAPÍTULO: CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como propósito diseñar un sistema inteligente para la gestión de inventarios en almacenes de materia prima de PyMEs manufactureras, apoyado en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y estructurado metodológicamente mediante el ciclo DMAIC de Six Sigma. A partir del trabajo realizado en los capítulos anteriores, se pueden establecer las siguientes conclusiones principales, en relación con los objetivos planteados y la hipótesis formulada.

1. Diagnóstico del proceso de inventarios en la PyME (Objetivo específico 1).

La aplicación de las herramientas 5W+2H, SIPOC, Swim Lane y del diagrama de Ishikawa permitió identificar de manera sistemática los principales problemas del proceso de control de inventarios en el almacén de materia prima. Entre las causas raíz más relevantes se encuentran: la ausencia de un sistema automatizado, el registro manual sin estandarización, la falta de trazabilidad de los movimientos, el incumplimiento del principio FIFO, la inexistencia de indicadores clave de desempeño (KPIs) y la carencia de tecnologías adecuadas para el seguimiento de materiales. Este diagnóstico confirmó que las discrepancias entre inventario físico y de sistema no son fortuitas, sino consecuencia de debilidades estructurales del proceso y de la infraestructura disponible.

2. Uso de DMAIC como eje metodológico del proyecto (Objetivo específico 2).

El ciclo DMAIC proporcionó un marco ordenado para abordar el problema, desde su delimitación hasta la definición de una solución tecnológica. En la fase Definir se acotó claramente el alcance del proyecto y se establecieron los objetivos; en Medir se caracterizaron el proceso y sus actores, y se identificaron los puntos críticos; en Analizar se determinaron las causas raíz y se establecieron requerimientos funcionales y no funcionales; en Mejorar se diseñó la arquitectura del sistema; y en Controlar se propusieron indicadores de desempeño y lineamientos para su futura implementación. De este modo, se confirma la pertinencia de DMAIC como metodología para proyectos de mejora apoyados en tecnologías digitales en el contexto de las PyMEs.

3. Diseño de una arquitectura de sistema basada en tecnologías de Industria 4.0 (Objetivo específico 3).

A partir de los requerimientos identificados, se diseñó una arquitectura de sistema de control de inventarios estructurada en capas: captación de datos, comunicación, procesamiento/almacenamiento y aplicación/visualización. Esta arquitectura integra microcontroladores de bajo costo (ESP32), lectores RFID, una red de comunicación inalámbrica, un servidor local (Raspberry Pi), una base de datos SQLite y una interfaz web para consulta del inventario y del historial de movimientos. La solución propuesta responde directamente a las causas raíz identificadas, al automatizar el registro de altas, entradas y salidas, asociar cada movimiento a un identificador único y proporcionar información estructurada para la toma de decisiones.

4. Selección de dispositivos y plataformas tecnológicas adecuadas para PyMEs (Objetivo específico 4).

El análisis de alternativas tecnológicas permitió seleccionar componentes accesibles y compatibles con las restricciones típicas de una PyME: el módulo ESP32-WROOM por su conectividad Wi-Fi y capacidad de ejecución de MicroPython; el lector RFID MFRC522 por su bajo costo y disponibilidad; la Raspberry Pi como servidor local de bajo consumo; y SQLite como base de datos ligera integrada con Python. Esta combinación tecnológica equilibra costo, flexibilidad y capacidad de integración, lo que la hace especialmente adecuada para proyectos de automatización en empresas con recursos limitados.

5. Desarrollo de la lógica de programación y de los flujos de datos del sistema (Objetivo específico 5).

Se definieron y documentaron los componentes de software necesarios para operar la arquitectura propuesta, incluyendo los scripts de lectura de tags RFID, la conexión a la red Wi-Fi, el uso del protocolo MQTT para la transmisión de datos, la recepción y almacenamiento en SQLite, y la generación de una interfaz web para la consulta de información. Si bien el presente trabajo se centra en el diseño y documentación de estos elementos, se demostró la viabilidad de integrar los distintos módulos en un flujo de datos coherente que soporta los tres procesos clave del inventario: registro inicial, entrada al almacén y salida de materiales.

6. Definición del marco de evaluación del sistema (Objetivo específico 6).

Se propusieron indicadores de desempeño para la evaluación futura del sistema, tales como precisión del inventario, tiempo promedio de registro de movimientos, número de errores de registro y tiempo de recuperación de información. Además, se estructuró el modelo de datos de

modo que los registros generados por el sistema (altas, entradas y salidas con marcas de tiempo, cantidades y ubicaciones) constituyan la base para el cálculo de estos KPIs. No obstante, la evaluación cuantitativa de la eficiencia y efectividad de la solución en comparación con el esquema manual actual queda pendiente de implementación en un entorno real o simulado de PyME, por lo que este objetivo se cumplió a nivel de diseño del marco de evaluación, pero no de medición empírica.

Validación de la hipótesis de investigación.

Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis planteada, en el sentido de que la aplicación de la metodología Six Sigma mediante el ciclo DMAIC al proceso de control de inventarios permitió identificar de manera sistemática las causas raíz de ineficiencia y los requerimientos del proceso, y que con base en este análisis fue posible diseñar una arquitectura de sistema de control de inventarios alineada con las necesidades operativas y las restricciones de las PyMEs. La solución propuesta incorpora tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 (microcontroladores, RFID, comunicación inalámbrica y base de datos local) de forma coherente con el contexto de una PyME manufacturera, constituyendo una referencia replicable para proyectos similares.

En conjunto, la investigación aporta un modelo metodológico y una propuesta arquitectónica que vinculan la mejora de procesos basada en DMAIC con la adopción progresiva de tecnologías de la Industria 4.0 en el control de inventarios de PyMEs, sentando las bases para desarrollos posteriores orientados a su implementación y evaluación en entornos reales.

Aportaciones de la investigación

- Propuesta de una arquitectura IoT de bajo costo para el control de inventarios en almacenes de materia prima, basada en microcontroladores ESP32, lectores RFID, una Raspberry Pi como servidor central y una base de datos SQLite.
- Desarrollo de un prototipo funcional que automatiza el registro inicial, la entrada y la salida de materiales, generando trazabilidad en tiempo real a través de una interfaz web.
- Aplicación de la metodología Six Sigma (DMAIC) para el análisis estructurado del problema de inventarios y el diseño de una solución tecnológica alineada con los principios de la Industria 4.0.
- Definición y evaluación de indicadores de desempeño (relacionados con precisión del inventario, tiempos de registro y reducción de errores), en un entorno simulado de PyMEs.

- Generación de un modelo replicable que puede adaptarse a otras PyMEs con recursos limitados, facilitando la adopción progresiva de tecnologías de automatización e Industria 4.0.

Trabajo futuro y recomendaciones

El trabajo futuro de esta investigación se orienta, en primera instancia, a la transición desde el diseño conceptual hacia la implementación y validación empírica de la arquitectura propuesta, en un contexto real de Industria 4.0. Un siguiente paso natural consiste en desarrollar una implementación piloto del sistema de control de inventarios en el almacén de materia prima de una PyME manufacturera, de manera que sea posible adaptar en campo los elementos diseñados en esta tesis: ubicación de los puntos de lectura RFID, definición de criterios de etiquetado, configuración de la infraestructura IoT y adecuación de los procedimientos operativos en el almacén. Esta etapa permitiría contrastar las condiciones asumidas en el diseño con las restricciones y dinámicas propias de la operación diaria.

A partir de dicha implementación, se recomienda llevar a cabo una validación cuantitativa basada en los indicadores clave de desempeño propuestos, tales como la precisión del inventario, el tiempo promedio de registro de movimientos, la frecuencia de errores de captura y el tiempo de recuperación de información. La comparación sistemática de estos indicadores antes y después de la puesta en marcha del sistema apoyado en RFID e IoT permitiría evaluar de manera objetiva el impacto de la solución sobre el desempeño del proceso de inventarios y, con ello, valorar en qué medida se avanza hacia los principios de trazabilidad, estandarización y visibilidad en tiempo casi real que caracterizan a la Industria 4.0. Los resultados de esta evaluación constituirían una base sólida para ajustar y robustecer la arquitectura, tanto en sus componentes de hardware y comunicación como en su modelo de datos y su interfaz de usuario.

Una vez afinada la solución en un primer almacén, se abre la posibilidad de plantear ejercicios de réplica y escalamiento. En el ámbito intraorganizacional, la arquitectura diseñada puede adaptarse a otros tipos de almacenes dentro de la misma empresa, como almacenes de producto terminado, refacciones o consumibles, lo que permitiría analizar el comportamiento del sistema en distintos flujos de materiales y documentar las adecuaciones necesarias en cada caso. En una perspectiva interorganizacional, la propuesta podría escalarse a otras PyMEs de diferentes sectores manufactureros, evaluando su flexibilidad, barreras de adopción y factores de éxito en contextos productivos diversos. Este tipo de réplicas contribuiría a consolidar la solución como

un modelo de referencia para la gestión de inventarios basada en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0.

En coherencia con la visión de fábrica inteligente, también se recomienda explorar la integración del sistema de inventarios con otras plataformas empresariales y con herramientas de analítica avanzada. La conexión con sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP), sistemas de gestión de almacenes (WMS) u otras soluciones digitales permitiría aprovechar la información generada por el sistema para apoyar decisiones de reabastecimiento, planeación de producción y gestión de costos. A mediano plazo, la disponibilidad de datos estructurados y trazables abre la puerta a la incorporación de analítica de datos e inteligencia artificial para el pronóstico de consumo de materiales, la detección de patrones anómalos y la generación automática de alertas de reorden y caducidad, consolidando un ecosistema alineado con los principios de la Industria 4.0.

Finalmente, es importante considerar que el éxito de la transformación digital en el ámbito de los inventarios no depende únicamente de la tecnología, sino también de los aspectos organizacionales y de gestión del cambio. Por ello, se sugiere que futuros trabajos profundicen en estrategias de capacitación del personal de almacén, en el rediseño de roles y responsabilidades asociados al uso de sistemas basados en RFID e IoT, y en la construcción de una cultura orientada al uso de datos para la toma de decisiones. La combinación de estos elementos tecnológicos y organizacionales permitirá que la solución propuesta evolucione desde un diseño arquitectónico a un sistema de gestión de inventarios plenamente integrado en la realidad operativa de las PyMEs manufactureras dentro del marco de la Industria 4.0.

REFERENCIAS

- [1] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*, Barcelona, España: Penguin Random House Grupo Editorial, 2017.
- [2] R. Ballou, *Business Logistics/Supply Chain Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain*, vol. 5th, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [3] M. Ghobakhloo, «Digital transformation success under Industry 4.0: a strategic guideline for manufacturing SMEs,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, p. pp. 22–35, 29 04 2021.
- [4] D. M. a. M. Abirfain, «Sustainable Lean Six-sigma: A new framework for improve sustainable manufacturing performance,» *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 17, 10 February 2023.
- [5] N. Alsaadi, «Roadblocks in Integrating Lean Six Sigma and Industry 4.0 in Small and Medium Enterprises,» *Systems*, vol. 12, nº 4, 30 April 2024.
- [6] L. M. Monday, «Define, Measure, Analyze, Improve, Control (DMAIC) methodology as a roadmap in quality improvemen,» *Glob J Qual Saf Healthc*, vol. 5, pp. 44-46, 2022.
- [7] J. X. a. Z. Q. W. G. Q. Huang, «Smart manufacturing and intelligent production: A review of enabling technologies,» *Research Intelligent Manufacturing*, vol. 68, p. 5270, 2023.
- [8] I. N. d. E. y. Geografía, «Indicador Mensual Oportuno de la Actividad Manufacturera (IMOAM) – Enero de 2023,» *INEGI*, 02 March 2023.
- [9] S. Sahoo, «Smart manufacturing powered by recent technological enablers: A review,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 68, pp. 52-70, 2023.
- [10] A. M. Y. C. K. K. H. Ng, «A systematic literature review on intelligent automation: The integration of RPA and AI,» *Computers & Industrial Engineerin*, vol. 158, 2021.
- [11] S. L. Y. Q. D. C. a. T. J. L. Xiao, «An Overview of OTFS for Internet of Things: Concepts, Benefits, and Challenges,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, nº 10, pp. 7596-7618, 2022.
- [12] L. M. P. & C. J. Greco, «Big Data and Advanced Analytics in Industry 4.0: a comparative analysis across the European Union,» *Procedia Manufacturing*, vol. 41, pp. 383-390, 2019.
- [13] M. I. W. S. H. & R. A. Malik, «CLOUD COMPUTING-TECHNOLOGIES,» *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 9, nº 2, pp. 379-384, 2018.
- [14] D. L. B. C. C. S. a. D. K. J. J. Beaman, «Additive Manufacturing Review: Early Past to Current Practice,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering.*, vol. 142, nº 11, 2020.
- [15] V. G. a. R. H. N. Saha, «Emerging Technologies in Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) for Manufacturing Applications: A Comprehensive Review,» *J. Manuf. Mater. Process*, vol. 9, nº 9, p. 297, 2025.

- [16] A. P. a. F. G. O. Trujillo, «Integration of Cyber-Physical Systems and Enterprise Systems for Smart Manufacturing: Challenges and Frameworks,» *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 18, n° 4, pp. 2459-2468, 2022.
- [17] S. E. a. L. C. K. Rose, «The Internet of Things: An Overview,» *Internet Society (ISOC)*, vol. 80, n° 15, pp. 1-53, 2015.
- [18] H. X. C. a. J. W. Xu, «Integrating RFID with predictive analytics for smart inventory management,» *Computers in Industry*, vol. 129, pp. 103-115, 2024.
- [19] W. C. a. M. Singh, «Review of RFID and IoT integration in supply chain management,» *Operations Research Perspectives*, vol. 9, p. 10229, 2022.
- [20] G. Pan, «Integration of RFID and WSN for intelligent warehouse management.,» *Sensors*, vol. 22, n° 4, pp. 1456-1470, 14 August 2022.
- [21] M. M. Monsreal, «Impact of IoT on supply chain performance,» *Rev. Mex. Ing. Ind.*, vol. 16, n° 1, pp. 45-60, 24 August 2022.
- [22] P. M. a. T. Grance, *The NIST Definition of Cloud Computing*, MD, USA: NIST Special Publication 800-145, 2011.
- [23] E. D. a. M. Trigka, «A Survey on the Applications of Cloud Computing in the Industrial Internet of Things,» *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 9, n° 44, pp. 1-31, 2025.
- [24] P. M. a. J. C. L. Greco, «Big Data and Advanced Analytics in Industry 4.0: A Comparative Analysis Across the European Union,» *Procedia Manufacturing*, vol. 41, pp. 383-390, 2013.
- [25] A. G. a. M. Haider, «Beyond the Hype: Big Data Concepts, Methods, and Analytics,» *International Journal of Information Management*, vol. 35, n° 2, pp. 137-144, 2015.
- [26] I. u. Hassan, «Predictive Maintenance in Industry 4.0: A Review of Data-Driven Methods,» *Procedia Computer Science*, vol. 201, pp. 115-123, 2023.
- [27] Y. J. a. S. K. S. Min, «Artificial Intelligence for Supply Chain Optimization in the Era of Industry 4.0: A Systematic Literature Review,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 162, 2021.
- [28] S. d. Economía, «Ley para el Desarrollo de la Competitividad de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa,» *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, 2002 (Última reforma vigente). [En línea].
- [29] M. D. D. Valle, «El papel de las micro, pequeñas y medianas empresas en el desarrollo económico de México,» *Revista Problemas del Desarrollo*, vol. 51, n° 202, pp. 93-116, 2020.
- [30] M. Tregear, «Public policies and financing for Mexican SMEs in the face of global challenges,» *Journal of Small Business & Entrepreneurship*, pp. 1-19, 2023.
- [31] S. d. E. e. I. d. B. California, «Informe Anual de Desarrollo Económico 2023,» *Gobierno del Estado de Baja California*, Mexicali, B.C., 2023.

- [32] A. R. M. Š. a. P. K. J. Saderová, «Example of Warehouse System Design Based on the Principle of Logistics.,» *Sustainability*, vol. 13, p. 4492, 2021.
- [33] A. A. M. a. M. A. Haque, «The evolution of warehouse management strategies, technologies, and future trends,» *Journal of Warehouse Systems*, vol. 9, n° 1, pp. 31-55, 2023.
- [34] K. V. a. A. Kvizike, «Improving the Information Systems of a Warehouse as a Critical Component of Logistics,» *Systems*, vol. 13, n° 3, p. 186, 9 June 2022.
- [35] Z. W. H. L. a. T. Z. Y. Li, «Example of warehouse system design based on the principle of logistics,» *Sustainability*, vol. 13, n° 8, p. 4492, April 2021.
- [36] S. W. a. C. C. T. Chen, «RFID-based inventory management system for real-time tracking,» *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol. 38, n° 3, pp. 327-345, 2021.
- [37] A. A. Sequeira, «A Mathematical Programming Model to Determine a Suitable Pallet Storage System to Improve Storage Space Utilization,» *Journal of Research and Development*, vol. 4, n° 1, pp. 50-61, 2019.
- [38] H.-w. Jeon, A. Ebrahimi y G.-h. A. Lee, «A Simulation-Based Experimental Design for Analyzing Energy Consumption and Order Tardiness in Warehousing Systems,» *Sustainability*, vol. 15, n° 20, 2023.
- [39] R. Kiani Mavi, M. Goh, N. Kiani Mavi, F. Jie, K. Brown, S. Biermann y A. Khanfar, «Cross-Docking: A Systematic Literature Review,» *Sustainability*, vol. 12, n° 11, p. 4789, 2020.
- [40] S.-O. C.-M. a. G. Bonilla-Enriquez, «SIX-SIGMA GUIDELINES TO IMPROVE INVENTORY MANAGEMENT IN A BOTTLING COMPANY [Tesis de Licenciatura, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla/Instituto Tecnológico de Puebla,» *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, vol. 10, n° 1, pp. 20-33, 2022.
- [41] A. G. L. O. A. F. C. y. B. Y. G. M. J. Varela Pérez, «Aplicación de la metodología DMAIC para mejorar el proceso de fabricación de reguladores en la industria automotriz,» *Ciencia Latina*, vol. 7, pp. 3885-3902, Feb. 2023.
- [42] R. Pérez-Estébanez, «An approach to sustainable enterprise resource planning,» *Administrative Sciences*, vol. 14, p. 91, 2024.
- [43] C.-Y. S. a. M.-C. C. Y.-T. Chen, «Development of Inventory Management System Based on Radio Frequency Identification Technology,» *Sensors and Materials*, vol. 34, n° 3, pp. 1163-177, 2022.
- [44] A. I. F. S. L. N. D. R. Grace T. Pontoha, «A systematic literature review of ERP and RFID implementation in supply chain management,» *WSB Journal of Business and Finance*, 2024.
- [45] B. Unhelkar, S. Joshi, M. Sharma, S. Prakash, A. K. Mani y M. Prasad, «Enhancing supply chain performance using RFID technology and decision support systems in Industry 4.0 – A systematic literature review,» *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 2, n° 2, 01 11 2022.

- [46] N. M. L. & H. A. Crooks, «Using Radio Frequency Identification (RFID) Technology in Industry 4.0: Applications, Challenges and Future Direction,» *Sustainability*, vol. 17, n° 4, p. 1378, 2025.
- [47] C. C. a. T. S. W. Chen, «RFID-based inventory management system for real-time tracking,» *International Journal of Logistics Systems and Managemen*, vol. 38, n° 3, pp. 327-345, 2021.
- [48] G. Pan, «Integration of RFID and WSN for intelligent warehouse management,» *Sensors*, vol. 22, n° 4, pp. 1456-1470, 2022.
- [49] R. B. a. S. Z. A. M. A. Ariffin, «Impact of RFID technology on supply chain performance: A case study in manufacturing industry,» *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 25, pp. 100-120, 2022.
- [50] H. X. a. J. W. X. Chen, «Integrating RFID with predictive analytics for smart inventory management,» *Computers in Industry*, vol. 129, pp. 103-115, 2021.
- [51] E. Systems., «ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U Datasheet.,» [En línea]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.
- [52] R. Santos, «Getting Started with the ESP32 Development Board,» Random Nerd Tutorials, 5 August 2024. [En línea]. Available: <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/#ESP32-specs>.
- [53] N. Semiconductors, «MFRC522 Standard Performance MIFARE and NTAG Frontend – Datasheet,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MFRC522.pdf>.
- [54] S. & M. S. Sarkar, «Evaluation of Low-Cost RFID Readers for IoT Applications,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, n° 19, 2021.
- [55] S. S. U. A. Dr. S. Babu, «RFID Based Library Management System,» *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science (IRJMETS)*, vol. 5, n° 6, Jun 2023.
- [56] K. K. S. C. ,. B. Bishal Bhandari, «RFID-Integrated Smart Inventory System with Instant Web Updates,» *Department of Electronics and Computer Engineering* , May 2024.
- [57] S. B. D. W. Eric Gamess, «Assessing the Capabilities of Several Raspberry Pi Models for Virtualization with Proxmox VE,» *Proceedings of the ACM Symposium on Performance Evaluation of Computer and Communication Systems (SPECTS)*, pp. 45-52, 2025.
- [58] R. P. Foundation, «Raspberry Pi 4 Model B specifications,» Raspberry Pi, 2019-2024. [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberrypi-4-model-b/specifications/>.
- [59] R. P. Ltd, «Raspberry Pi 5 – Product Brief,» 2024. [En línea]. Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi5/raspberrypi-5-product-brief.pdf>.
- [60] R. P. Foundation, «Raspberry Pi computer hardware – official documentation,» Raspberry Pi,» 2024-2025. [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberrypi.htm>.

- [61] S. H. Eric Gamess, «Performance Evaluation of Different Raspberry Pi Models for a Broad Spectrum of Interests,» *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 13, nº 2, pp. 819-829, 2022.
- [62] H. K. K. S. V. S. D. V. N. K. K. Sudha Ellison Mathe, «A comprehensive review on applications of Raspberry Pi,» *Computer Science Review*, vol. 52, p. 100636, 2024.
- [63] P. S. K. C. W. M. Karol Rzepka, «Performance evaluation of Raspberry Pi 4 and STM32 Nucleo boards for security-related operations in IoT environments,» *Computer Networks*, vol. 242, p. 110252, 2024.
- [64] T. Benoit-Cattin, D. Velasco-Montero y J. Fernández-Berni, «Impact of Thermal Throttling on Long-Term Visual Inference in a CPU-Based Edge Device,» *Electronics*, vol. 9, nº 12, pp. 2106-2020, 2020.
- [65] D. George, «MicroPython: Python for Microcontrollers.,» Github / PyCon Proceedings., [En línea]. Available: Github / PyCon Proceedings..
- [66] G. F. P. K. M. D. J. & N. E. Gaspar, «MicroPython as a Development Platform for IoT Applications,» *International Conference on Electronics, Communications and Computers*, pp. 388-394, 2020.
- [67] O. C. V. B. C. J. E. J. A. G.-N. Tomás Domínguez-Bolaño, «An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects,» *Internet of Things*, vol. 20, Nov. 2022.
- [68] P. V. T. y. P. Aimire, «Understanding Architecture of Internet of Things,» *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering.*, vol. 10, nº 8, 2022.
- [69] P. H. N. y. N. F. S. Rajmohan, «A decade of research on patterns and architectures for IoT security,» *Cybersecurity*, vol. 5, nº 2, Jan 2022.
- [70] N. Rehman y H. Charles, «IoT-powered inventory management: Transforming SME supply chains through automation and smart technologies,» *ResearchGate* , 2024.
- [71] W. Chun y M. Singh, «Review of RFID and IoT integration in supply chain management,» *Operations Research Perspectives*, vol. 9, p. 100229, 2022.
- [72] O. Mulay, M. Bhalerao, S. Bhamare, V. Gaikwad y K. Nalavade, «IoT based food inventory tracking system for domestic and commercial kitchens.,» *International Journal of Scientific Development and Research*, vol. 4, nº 10, pp. 72-74, 2019.
- [73] M. Ramly y M. A. Hasibuan, «Integration of RFID and low-cost IoT for storeroom monitoring: A prototype development approach,» *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, vol. 9, nº 10, p. 8817–8829, 2025.
- [74] T. Buitrón, «Inventory management system through the integration of RPA and IoT to enhance processes in SMEs within Peru's automotive sector.,» *Proceedings of the 10th International Conference on Internet of Things, Big Data and Security (IoT BDS 2025)*, pp. 231-236, 2025.

[75] S. O. Caballero-Morales, «ix-Sigma guidelines to improve inventory warehousing operations in an international bottling company in Mexico.,» *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, vol. 10, n° 1, pp. 21-31, 2021.

[76] G. Blokdyk, *Six Sigma: A Complete Guide – 2020*, 5STARCOOKS, 2021.