



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS

PROYECTO TERMINAL

**CONTROL Y MONITOREO DE LA CADENA DE
FRÍO A TRAVÉS DE IOT**

**Para obtener el grado de
Maestro en Internet de las Cosas**

PRESENTA

Víctor Alberto Pérez Jiménez

Director

Dr. Juan Bacilio Guerrero Escamilla

Comité tutorial

Mtro. Melecio Sanchez Ruiz
Dr. Sócrates López Pérez
Dr. Juan Bacilio Guerrero Escamilla

Mineral de la Reforma, Hgo., a 21 de febrero de 2025.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS

PROYECTO TERMINAL

**CONTROL Y MONITOREO DE LA CADENA DE
FRÍO A TRAVÉS DE IOT**

Para obtener el grado de

Maestro en Internet de las Cosas

PRESENTA

Víctor Alberto Pérez Jiménez

Director

Dr. Juan Bacilio Guerrero Escamilla

Comité tutorial

Mtro. Melecio Sanchez Ruiz

Dr. Sócrates López Pérez

Dr. Juan Bacilio Guerrero Escamilla

Mineral de la Reforma, Hgo., a 21 de febrero de 2025.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Área Académica de Computación y Electrónica

Department of Electronics and Computer Science

Mineral de la Reforma, Hgo., a 21 de febrero de 2025

No. de Control: ICBI-AACyE/246/2025

Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial del **PROYECTO TERMINAL** del programa educativo de posgrado titulado “**CONTROL Y MONITOREO DE LA CADENA DE FRÍO A TRAVÉS DE IOT**”, realizado por el sustentante **VÍCTOR ALBERTO PÉREZ JIMÉNEZ** con número de cuenta **120068** perteneciente al programa de **MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS**, una vez que se ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

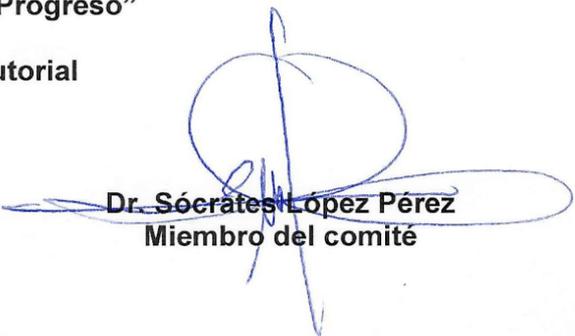
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial


Dr. Juan Bacilio Guerrero Escamilla
Miembro del comité


Dr. Sócrates López Pérez
Miembro del comité


Mtro. Melecio Sánchez Ruiz
Miembro del comité

C.c.p. Archivo
MSR



**ÁREA ACADÉMICA DE
COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA**

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40052, 40053
aacye_icbi@uaeh.edu.mx, jesus_ordaz@uaeh.edu.mx



INDICE

RESUMEN	8
SUMMARY	9
PREFACIO	10
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO I. IMPACTO Y APLICABILIDAD DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA ...	15
1.1 INTRODUCCIÓN	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.3 ANTECEDENTES	23
1.4 DINÁMICA DEL FENÓMENO EN ESTUDIO	28
1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	32
1.5.1 Objetivo	32
1.5.1.1 Objetivo General.....	32
1.5.1.2 Objetivos Específicos.....	32
1.5.1.3 Importancia del Proyecto.....	34
1.6 ALCANCES Y LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN	38
1.6.1 Alcances de la investigación	38
1.6.2 Límites de la Investigación	39
1.6.3 Resumen de los Alcances y Límites	41
1.7 SUSTENTO METODOLÓGICO	41
1.7.1 Tipo de investigación: Investigación aplicada.....	41
1.7.2 Enfoque: Cuantitativo	42
1.7.3 Diseño de investigación: Pre-experimental.....	42
1.7.4 Población y muestra	42
1.7.5 Técnicas de recolección de datos	42
1.7.6 Análisis de datos.....	43
1.7.7 Validación de resultados.....	43
1.8 CONCLUSIONES DEL CAPITULO	43
CAPÍTULO II. ESTRUCTURA CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES RELEVANTES	46
2.1 INTRODUCCIÓN	46
2.2 MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO	46
2.3 TRABAJOS ENFOCADOS AL TEMA	49
2.4 SUSTENTO TEÓRICO	50
2.4.1 Tecnologías IoT y la cadena de frio	50
2.4.2 IoT y la competitividad empresarial.....	51
2.4.3 La cadena de frio	53
2.4.4 Arquitectura IoT.....	55
2.4.5 LoRa.....	58
2.4.6 Gateway IoT.....	59
2.4.7 Chip de desarrollo IoT Heltec LoRa WiFi 32 V2.....	61
2.5 CONCLUSIONES DEL CAPITULO	67
CAPÍTULO III HARDWARE Y PROTOCOLOS	69
3.1 INTRODUCCIÓN	69
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	70

3.2.1 Selección de los sensores	71
3.2.1.1 Regresión lineal para validar sensores	73
3.2.1.2 Suavizado en MATLAB usando la función "fit"	75
CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	88
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO	88
4.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL MODELO	88
4.2.1 Tipos de sensores seleccionados	88
4.2.2 Criterios de selección	89
4.2.3 Distribución de los sensores en la cadena de frío	91
4.2.4 Ventajas de los sensores DHT22 en la solución IoT	92
4.2.5 Infraestructura de Comunicación	92
4.2.6 Prototipos	94
4.2.7 Visualización de datos.....	97
4.3 MODELADO MATEMÁTICO	101
4.3.1 Descripción de la metodología de modelado matemático	101
4.3.2 Captura de datos para el modelado matemático	103
4.3.3 Cálculos matemáticos	105
4.3.4 Interpretación de los cálculos matemáticos	106
4.4 VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE REGRESION LINEAL	107
4.4.1 Explicación del Intercepto	107
4.4.2 Cálculos de la regresión lineal	108
4.4.3 Interpretación de resultados de la regresion lineal	109
CONCLUSIONES FINALES.....	111
RECOMENDACIONES.....	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	Indice de popularidad de IoT a través del tiempo.....	27
FIGURA 2	Temperatura ideal de congelación.....	29
FIGURA 3	Temperatura ideal de refrigeración	30
FIGURA 4	Rangos óptimos de humedad relativa	31
FIGURA 5	Arquitectura en capas de IoT	56
FIGURA 6	Arquitectura IoT enfoque de 4 etapas	57
FIGURA 7	Muestras de humedad y temperatura capturadas	72
FIGURA 8	Modelo de regresión lineal simple.....	74
FIGURA 9	Suavizado y rangos de precisión agregados.....	75
FIGURA 10	Diagrama del código del gateway arduino IDE.....	79
FIGURA 11	Máquina virtual creada en Google Cloud.....	82
FIGURA 12	Interfaz de administración del servidor MQTT en MQX	83
FIGURA 13	Arquitectura Seleccionada	86
FIGURA 14	Características de operación de los sensores evaluados	90
FIGURA 15	Heltec WiFi LoRa	93
FIGURA 16	Modelos 3D de prototipos	94
FIGURA 17	Prototipo etapa de sensado	96
FIGURA 18	Prototipo funcional gateway.....	97
FIGURA 19	Datos suscritos del servidor MQTT	98
FIGURA 20	Dashboard MongoDB charts	100
FIGURA 21	Temperatura capturada en entorno controlado.....	104
FIGURA 22	Humedad relativa capturada en entorno controlado	104
FIGURA 23	Vibración capturada en entorno controlado	105
FIGURA 24	Visualización del intercepto en la regresión lineal.....	108
FIGURA 25	Comparación entre valores reales y generados por regresión lineal.....	109

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta el desarrollo de un modelo experimental basado en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo y control de variables críticas en la cadena de frío, como temperatura, humedad y ubicación, desde el transporte hasta la venta al cliente final. El modelo propuesto se compone de tres etapas: censado de datos, interconexión de sensores a la nube mediante un servidor MQTT, y análisis de datos para generar indicadores clave que optimicen la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida de la cadena de frío

La investigación incorpora una evaluación matemática que modela el flujo de información, el comportamiento de las variables monitoreadas y la eficiencia operativa del sistema propuesto. Se desarrollaron ecuaciones y algoritmos para representar el desempeño de la solución IoT y predecir su respuesta en condiciones reales. Además, se emplearon simulaciones computacionales utilizando datos que replican escenarios típicos de operación de la cadena de frío. Estas simulaciones permiten analizar el impacto de las variaciones en las variables críticas y validar la eficacia del sistema para identificar patrones, mejorar la gestión y optimizar procesos.

La implementación de la solución propuesta proporcionará a los actores de la cadena de frío (como productores, distribuidores y minoristas) acceso en tiempo real a información crítica sobre la calidad y seguridad de los productos en tránsito. Esto permitirá una gestión más eficiente y oportuna de la cadena de frío, asegurando que los productos mantengan condiciones óptimas de temperatura y humedad en todo momento, lo que contribuirá a reducir pérdidas económicas y a incrementar la satisfacción del cliente final.

Este estudio constituye una contribución significativa al desarrollo tecnológico, ya que integra herramientas avanzadas como simulaciones computacionales y una evaluación matemática robusta, garantizando la viabilidad y escalabilidad del modelo propuesto. Asimismo, la solución planteada puede ser utilizada como una referencia práctica y detallada para el diseño e implementación de proyectos similares en el futuro, destacando su potencial para optimizar la calidad, seguridad y eficiencia en la gestión de productos perecederos dentro de la cadena de frío.

SUMMARY

This research work presents the development of an experimental model based on the Internet of Things (IoT) for monitoring and controlling critical variables in the cold chain, such as temperature, humidity, and location, from transportation to the final sale to the customer. The proposed model consists of three main stages: data collection, interconnection of sensors to the cloud via an MQTT-based server, and data analysis to generate key indicators that optimize decision-making throughout the cold chain lifecycle.

The research includes a mathematical evaluation that models the flow of information, the behavior of the monitored variables, and the operational efficiency of the proposed system. Equations and algorithms were developed to represent the performance of the IoT solution and predict its response under real-world conditions. Additionally, computational simulations were conducted using data that replicate typical cold chain operation scenarios. These simulations allow for analyzing the impact of variations in critical variables and validating the system's effectiveness in identifying patterns, improving management, and optimizing processes.

The implementation of the proposed solution will provide cold chain stakeholders (such as producers, distributors, and retailers) with real-time access to critical information on the quality and safety of products in transit. This will enable more efficient and timely cold chain management, ensuring that products remain at optimal temperature and humidity conditions at all times, which will help reduce economic losses and increase customer satisfaction.

This study makes a significant contribution to technological development by integrating advanced tools such as computational simulations and a robust mathematical evaluation, ensuring the viability and scalability of the proposed model. Furthermore, the solution presented can be used as a practical and detailed reference for the design and implementation of similar projects in the future, highlighting its potential to optimize quality, safety, and efficiency in the management of perishable products within the cold chain.

PREFACIO

La realización de este proyecto terminal no solo representa un logro académico, sino también un viaje personal en el cual he tenido la oportunidad de sumergirme en el fascinante mundo de las tecnologías emergentes, específicamente en el Internet de las Cosas (IoT). A lo largo de este proceso, he explorado su aplicación en un área crucial, pero a menudo desafiada por problemas complejos: la gestión de la cadena de frío. Esta investigación nace de una profunda motivación por contribuir a resolver problemas reales que afectan a sectores tan importantes como la industria alimentaria, farmacéutica y logística.

El desafío de garantizar la calidad y seguridad de los productos perecederos durante su transporte y distribución es una tarea de gran responsabilidad. Esta motivación personal se ha entrelazado con mi interés profesional por la tecnología y mi deseo de encontrar soluciones innovadoras que no solo mejoren procesos, sino que también marquen una diferencia significativa en las vidas de las personas al evitar pérdidas económicas y proteger la salud pública.

Durante el desarrollo de esta investigación, me encontré con diversos obstáculos que me llevaron a expandir mis conocimientos en múltiples áreas. Desde la selección de los sensores adecuados hasta el diseño de una red IoT eficiente, cada paso del camino ha sido un aprendizaje constante. La integración de tecnologías de vanguardia, como la conectividad LoRa, redes móviles, y protocolos como MQTT, ha requerido un enfoque interdisciplinario que ha enriquecido este proyecto.

No obstante, esta investigación también me ha brindado la oportunidad de reflexionar sobre la importancia del trabajo en equipo y del acompañamiento de expertos en diversas disciplinas. Agradezco profundamente a mi asesor el Dr. Juan Bacilio Guerrero Escamilla, cuya orientación y visión me han permitido llevar a cabo esta investigación con una base sólida. Sus valiosos comentarios y su apoyo continuo me han motivado a seguir adelante en los momentos más complejos del trabajo.

Además, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi esposa, Katia quien ha sido un pilar fundamental a lo largo de este proceso. Su comprensión incondicional, paciencia infinita y aliento constante han sido esenciales para completar este proyecto terminal. También quiero agradecer a mis colegas y amigos por su apoyo continuo, sus ideas innovadoras y sus críticas constructivas que han enriquecido mi perspectiva durante la investigación.

Finalmente, este trabajo no solo busca aportar al ámbito académico, sino también ofrecer una solución práctica que pueda ser útil en la vida real. La implementación de una solución integral basada en IoT para el monitoreo y control de la cadena de frío tiene el potencial de transformar la gestión de productos perecederos, mejorando tanto la eficiencia como la seguridad en su distribución. Mi esperanza es que los resultados de este estudio puedan contribuir a avanzar en el uso de tecnologías IoT en la gestión de la cadena de frío y, de esta manera, impactar positivamente en la industria.

A lo largo de este trabajo, he aprendido no solo a superar los obstáculos técnicos que se presentaron, sino también a reconocer la importancia de la investigación aplicada como una herramienta poderosa para abordar desafíos reales en nuestra sociedad. Este proceso ha sido transformador tanto en el plano académico como personal y agradezco profundamente la oportunidad de haberlo vivido.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado el panorama de las industrias modernas, proporcionando soluciones innovadoras para una gran variedad de sectores. En particular, el uso de IoT en la gestión de la cadena de frío ha adquirido una relevancia creciente debido a la necesidad de asegurar la calidad y seguridad de los productos perecederos durante su transporte, almacenamiento y distribución. Sectores como la industria alimentaria, farmacéutica y logística dependen de una gestión eficiente de las condiciones ambientales, tales como temperatura, humedad y ubicación, para evitar la degradación de los productos y por lo tanto, minimizar las pérdidas económicas y los riesgos para la salud de los consumidores. Este tipo de control es especialmente crítico en la cadena de frío, donde pequeñas fluctuaciones pueden tener efectos devastadores en la calidad de los productos.

Este trabajo de investigación se centra en el desarrollo de un modelo experimental basado en IoT que permita el monitoreo y control efectivo de las variables críticas en la cadena de frío. El objetivo principal de este estudio es proporcionar una solución integral que cubra todo el ciclo de vida de los productos perecederos, desde el transporte hasta la venta al cliente final. Para lograrlo, se propone un modelo que se estructura en tres fases fundamentales: la recolección de datos, la interconexión de sensores a la nube mediante un servidor MQTT, y el análisis de los datos obtenidos para generar indicadores clave que faciliten la toma de decisiones informadas a lo largo de todo el proceso.

En la primera fase, se realizará una evaluación comparativa de diversos modelos de sensores digitales de temperatura y humedad, considerando criterios como la precisión, la estabilidad a largo plazo, el consumo energético y la compatibilidad con las infraestructuras de IoT disponibles. Dado que existen múltiples opciones en el mercado, es esencial realizar un análisis exhaustivo para seleccionar los sensores que garanticen la mayor fiabilidad y eficiencia para ser implementados en la cadena de frío.

Una vez seleccionados los sensores más adecuados, se implementará una red IoT que permita el monitoreo en tiempo real de las variables críticas en el transporte de los productos perecederos. Esta red estará basada en tecnologías avanzadas de comunicación, como LoRa y redes móviles, para garantizar una transmisión de datos segura, eficiente y de largo alcance. Además, se considerarán distintas arquitecturas y protocolos de conexión, como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) y HTTP (Hypertext Transfer Protocol), evaluando aspectos clave como el ancho de banda, la latencia y la seguridad de la comunicación.

Los datos recopilados a través de la red IoT serán almacenados en una base de datos centralizada, lo que permitirá su análisis posterior. Se utilizarán técnicas de minería de datos y aprendizaje automático para identificar patrones, tendencias y correlaciones, lo que facilitará la creación de modelos predictivos que optimicen la gestión de la cadena de frío. Estos modelos ayudarán a predecir posibles desviaciones en las condiciones críticas de temperatura y humedad, permitiendo una respuesta temprana ante posibles riesgos y mejorando la eficiencia operativa.

El modelo propuesto también incluye una evaluación matemática que modela el flujo de información dentro del sistema y la interacción de las variables monitoreadas. Se desarrollarán ecuaciones y algoritmos para representar el desempeño del sistema IoT y predecir su respuesta en condiciones reales de operación.

Este enfoque cuantitativo es clave para validar la eficacia del modelo y garantizar su viabilidad. Asimismo, se emplearán simulaciones computacionales utilizando datos sintéticos que replican escenarios típicos de la cadena de frío. Estas simulaciones permitirán analizar cómo las variaciones en las variables críticas, como la temperatura y la humedad, impactan en la calidad de los productos, y ofrecerán una base sólida para la toma de decisiones.

La implementación de esta solución IoT proporcionará a los actores clave de la cadena de frío como productores, distribuidores y minoristas un acceso en tiempo real a información vital sobre las condiciones de los productos en tránsito. Este acceso a datos en tiempo real permitirá una gestión más eficiente y ágil de la cadena

de frío, reduciendo la probabilidad de que los productos no cumplan con los estándares de calidad y seguridad requeridos. En consecuencia, se minimizarán las pérdidas económicas debido a productos deteriorados y se mejorará la satisfacción del cliente final, al garantizar que los productos lleguen en condiciones óptimas.

Este trabajo de investigación constituye una contribución significativa al desarrollo de soluciones tecnológicas avanzadas, integrando herramientas como simulaciones computacionales y una evaluación matemática robusta. La solución propuesta es escalable y adaptable a diversas infraestructuras y necesidades operativas, lo que la convierte en una referencia útil para el diseño e implementación de proyectos similares en el futuro. La optimización de la gestión de la cadena de frío es esencial no solo para mejorar la calidad y seguridad de los productos, sino también para incrementar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados con las pérdidas de productos perecederos.

En resumen, esta investigación ofrece una solución integral para la optimización de la cadena de frío mediante el uso de IoT, brindando herramientas clave que mejoran la toma de decisiones, la calidad del servicio y la satisfacción del cliente. Esta investigación es un paso hacia la evolución de las prácticas industriales, promoviendo el uso de tecnologías innovadoras para enfrentar los desafíos operacionales y garantizar la seguridad de los productos perecederos en el futuro.

CAPITULO I. IMPACTO Y APLICABILIDAD DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

1.1 INTRODUCCIÓN

La decisión que ha llevado al estudio de “CONTROL Y MONITOREO DE LA CADENA DE FRIO A TRAVES DE IOT” para la elaboración del presente proyecto terminal, responde a la necesidad de contar con soluciones IoT al alcance de todos, esta investigación muestra como es creado un sistema confiable para evaluar en todo momento y de manera centralizada las variables más importantes para el manejo de productos congelados (temperatura y humedad), en este caso alimentos, la temperatura de congelación para la mayoría de los alimentos debe ser menor a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, si se llega a incrementar la temperatura por encima de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ aunque sea de manera parcial por poco tiempo (minutos), la actividad microbiana se reanudara, esta rotura de la cadena de frio tiene consecuencias como el riesgo de intoxicaciones, reducción del tiempo de conservación, pérdida de calidad, aparición de bacterias, malos olores, etc.

La conservación por congelación mantiene la calidad de los productos agrícolas durante largos períodos de almacenamiento. Como método de conservación a largo plazo para frutas y verduras, la congelación se considera generalmente superior al enlatado y a la deshidratación, con respecto a la retención de los atributos sensoriales y las propiedades nutritivas (Fennema, 1977). La seguridad y la calidad nutricional de los productos congelados se acentúan cuando se utilizan materias primas de alta calidad, se emplean buenas prácticas de fabricación en el proceso de conservación y los productos se mantienen de acuerdo con las temperaturas especificadas.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura se pierden alrededor de 1.3 billones de toneladas de alimentos al año (1/3 del total de producción) por malos manejos en la cadena de frio (Kato, 2013).

La pérdida de calidad es un asunto tanto del tiempo, como del mal uso de la temperatura, el mal uso de la temperatura es un agravante, más aún y cuando sea por períodos cortos durante la carga, transporte y descarga.

Antes de abordar de lleno el tema, definiremos la diferencia entre refrigeración y la congelación, la cadena de frio y la cadena de suministro, así podremos visualizar el

panorama completo y poder comprender por qué el monitoreo de la cadena de frío es de suma importancia.

La refrigeración consiste en reducir la temperatura de los alimentos por debajo de la temperatura ambiente, pero por encima de los -1°C . De este modo, se consigue una conservación eficaz a corto plazo de los materiales alimentarios al retrasar muchas de las reacciones microbianas, físicas, químicas y bioquímicas asociadas al deterioro de los alimentos. A temperaturas de refrigeración (generalmente entre 0°C y $+5^{\circ}\text{C}$), el crecimiento de los microorganismos se produce lentamente y las reacciones de deterioro y descomposición de los alimentos se inhiben hasta tal punto que la seguridad y la calidad de los alimentos se conservan durante periodos prolongados, a menudo durante unos días, y a veces durante unas semanas, más que los alimentos frescos (DeWitt, 2021). Sin embargo, los alimentos refrigerados son perecederos y se deterioran progresivamente a lo largo de su vida. El crecimiento y la actividad de los microorganismos, que pueden estar presentes en los ingredientes de los alimentos o introducirse al manipularlos o procesarlos, pueden causar su deterioro. Los alimentos refrigerados seguros y de alta calidad requieren una contaminación mínima durante la fabricación (incluida la contaminación cruzada), una refrigeración rápida y temperaturas bajas durante el almacenamiento, la manipulación, la distribución, la exposición al por menor y el almacenamiento del consumidor.

Por otro lado, la congelación preserva la vida útil de los alimentos haciéndolos más inertes y ralentizando las reacciones perjudiciales que promueven el deterioro de los alimentos y limitan la vida útil de la calidad. Sin embargo, hay que reconocer que todavía pueden producirse una serie de reacciones físicas y bioquímicas y muchas de ellas se acentúan cuando no se mantienen las condiciones recomendadas de manipulación, producción y almacenamiento. Aunque son pocos los microorganismos que crecen por debajo de los -10°C , debe reconocerse que la congelación y el almacenamiento en congelador no es un biocida fiable. La producción de alimentos congelados seguros requiere la misma atención a las buenas prácticas de fabricación y a los principios que la contraparte refrigerada o fresca. Una falsa sensación de seguridad, basada en el buen historial de seguridad de los alimentos congelados, no debe reducir el cuidado y la diligencia a la hora de preparar, manipular o distribuir los alimentos congelados.

La cadena de frío se extiende desde el proveedor de materias primas (por ejemplo, la refrigeración de la leche en la granja) hasta el frigorífico/congelador del consumidor, y todos los pasos intermedios. La siguiente lista contiene algunos de los puntos más importantes que deben ser considerados por los productores de alimentos refrigerados y congelados:

1. Mantener altos niveles de higiene en todas las etapas de la vida del producto.
2. Enfriar o congelar los productos rápida y adecuadamente después de su preparación y fabricación.
3. Mantener rígidamente las temperaturas de refrigeración ($<5^{\circ}\text{C}$) o congelación ($<-18^{\circ}\text{C}$), siempre que sea posible, durante el almacenamiento y la distribución.
4. Mantener rigurosamente las temperaturas de refrigeración ($<5^{\circ}\text{C}$) y congelación ($<-18^{\circ}\text{C}$) en los almacenes y vitrinas.
5. Asegurarse de que los productos refrigerados o congelados se transfieren en una operación continua (sin paradas ni retrasos) entre las zonas de temperatura controlada, por ejemplo, de los camiones de reparto a los almacenes de retención; de las zonas de almacenamiento a las unidades de exposición al por menor (En este punto es donde se produce la mayor pérdida de producto por salirse dentro del límite permitido de temperatura y no garantizar la temperatura constante durante el transporte del producto).
6. Separar los productos refrigerados o congelados cocinados y no cocinados en los almacenes y vitrinas de venta al público, por ejemplo, separar las carnes no cocinadas de los productos cárnicos listos para el consumo. Se realizaron controles frecuentes y sistemáticos de la temperatura de los productos alimentarios refrigerados y congelados, utilizando instrumentos adecuados y calibrados.
7. No sobrecargue los armarios de venta al por menor de productos refrigerados o congelados con productos: consulte la capacidad y las pautas de carga recomendadas por el fabricante del armario. Formar y educar a todo el personal (incluidos los consumidores) en la correcta manipulación y

almacenamiento de los alimentos refrigerados y congelados.

8. Reeducar cuando se adopten nuevas prácticas. Es especialmente importante controlar las secciones de transporte y distribución de la cadena de frío para garantizar tanto la seguridad como la calidad.

La principal herramienta de la que disponemos es el control de la temperatura de los alimentos en cada punto de la cadena de frío por medio de termómetros (analógicos) o sensores de temperatura (digitales), la mayoría de estos sensores son sensores para consulta local únicamente, se requiere de un control estricto para poder garantizar la fiabilidad del consumo de los alimentos que han sido congelados o refrigerados, es aquí el punto crucial donde aplicara la solución de desarrollo descrita en este proyecto terminal, ya que se estudiara de manera profunda como crear una solución completa que va desde los sensores, la conexión, el manejo de datos y la visualización de la cadena completa de frío en todas las etapas y en un solo visualizador, así de esta manera se detectara cualquier anomalía de manera remota, durante el almacenamiento y transporte de productos refrigerados y congelados. En los siguientes párrafos se describirán los rangos de temperaturas de refrigeración y congelación para los alimentos congelados.

Para preservar la seguridad de los alimentos refrigerados, existen temperaturas máximas prescritas. Actualmente, el Acuerdo sobre el Transporte Internacional (ATP) de Productos Alimenticios Perecederos (United Nations Economic Commission for Europe, 2022) especifica los siguientes máximos para el transporte 7°C para las carnes; 6°C para los productos cárnicos, la mantequilla; 4°C para las aves de corral, la leche y los productos lácteos; 2°C para el pescado. Estas temperaturas son también una buena pauta a seguir en todas las etapas de la producción, incluyendo la distribución, el almacenamiento y la exposición al por menor.

Para preservar la calidad y la seguridad de los alimentos congelados, existen requisitos de temperatura para cada una de las principales etapas de la cadena de frío. Se recomienda que las temperaturas de los alimentos estabilizados se mantengan a -18°C o más frías, aunque se permiten excepciones durante breves periodos de tiempo durante el transporte o la distribución local, cuando se permiten -15 °C. Asimismo, las vitrinas de venta al por menor deben estar a -18°C,

en la medida en que sea compatible con las buenas prácticas de almacenamiento, pero no más calientes que -12°C . También hay que tener en cuenta las temperaturas probables que experimentan los alimentos dentro de los congeladores domésticos; esto depende de la "clasificación por estrellas" del congelador; un congelador de tres estrellas es capaz de alcanzar temperaturas inferiores a -18°C , un congelador de dos estrellas, temperaturas inferiores a -12°C , y un congelador de una estrella, -6°C . En este último, el tiempo de almacenamiento práctico de los productos congelados se limita a unos pocos días.

Para entender un poco mejor la importancia de mantener un control de temperatura estricto durante todo el ciclo de la cadena de frío, en los siguientes párrafos se mostrará con más detalle cómo se puede llegar a presentar deterioro de los alimentos.

Cualquier alimento se estropea de las siguientes 3 formas, deterioro microbiano, deterioro enzimático y deterioro oxidativo.

El deterioro microbiano es el más común de ellos y como es del conocimiento de todos los microbios forman parte de la naturaleza y están presentes en todos los entornos: agua, suelo y aire. Los alimentos procedentes de la tierra o del agua contienen microorganismos específicos de su entorno, pero la mayoría de los organismos patógenos (que causan enfermedades a los seres humanos) son de naturaleza terrestre. Los alimentos de origen terrestre pueden traer contaminaciones de la propia granja, como las hortalizas de raíz y los tubérculos. Las frutas y hortalizas de hoja pueden contaminarse a partir de los suelos en contacto, el polvo, los excrementos de las aves, los excrementos humanos, a través de los insectos que se encuentran en ese entorno. El agua utilizada en el riego también es una potente fuente de contaminación. Los 8 trabajadores agrícolas y los manipuladores de alimentos durante las operaciones posteriores a la cosecha pueden contribuir a la contaminación si ésta se realiza en condiciones antihigiénicas.

El deterioro enzimático se presenta debido a que los animales, los vegetales y las frutas tienen sus propias enzimas (Soluciones Post-Cosecha, 2013), que son esenciales para la digestión y otras actividades metabólicas mientras están vivos. Después de la muerte, estas enzimas comienzan a digerir sus propios tejidos y llevan a cabo la descomposición de proteínas, carbohidratos y grasas y

estropean el producto. Las reacciones enzimáticas son también como las microbianas y son directamente proporcionales a las temperaturas atmosféricas, por lo que con la reducción de la temperatura el deterioro enzimático se ralentiza y casi se detiene (aproximadamente el 90%) a -18 grados Celsius y el 100% a menos de -60 ° C.

El deterioro oxidativo ocurre debido a que todos los alimentos, ya sean de origen vegetal o animal, contienen algún porcentaje de aceite y grasas. En lenguaje químico se denominan triglicéridos (tres moléculas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerol) y son parcialmente inestables por naturaleza. Los triglicéridos siguen rompiéndose a temperaturas más altas en glicerol y ácidos grasos, alcanzando los niveles más altos a temperaturas de cocción o más bien de fritura. Al estar libres del enlace, se denominan ácidos grasos libres. Los ácidos grasos libres son altamente reactivos con el oxígeno que obtienen del aire circundante y se convierten en peróxidos y otros compuestos que no son de buen gusto y aroma y a veces tampoco son saludables.

Todos estos tres tipos de procesos de putrefacción están directa o indirectamente relacionados con el abuso de la temperatura y se pueden evitar o retardar manteniendo los alimentos en un ambiente de temperatura controlada constante. Podemos controlar los tres tipos de putrefacción congelando un producto a una temperatura de -18 ° C. Incluso a esta temperatura se producen algunas reacciones. Sin embargo, son muy lentas y no tienen ningún impacto en las cualidades comestibles hasta por lo menos 18 meses, si la temperatura se mantiene a -18 ° C. continuamente. En cualquier momento, si se permite que la temperatura del producto aumente, los tres procesos mencionados reanudarán sus actividades y harán que el producto no sea comestible o se estropee.

La calidad de los alimentos congelados siempre ha estado en entredicho. De hecho, los productos no congelados, llamados "FRESCOS", pueden no ser siempre frescos. Los vendedores guardan las frutas, verduras y productos cárnicos no vendidos para venderlos al día siguiente y este proceso continúa hasta que se venden o se estropean. Como la infraestructura de la cadena de frío en la México todavía no está muy extendida, las frutas y verduras se dejan a temperatura ambiente para su venta al día siguiente. Las verduras y las frutas siguen metabolizando la mayor parte de la energía y los nutrientes que tienen

almacenados y pueden haber consumido la mayor parte antes de que un cliente las compre al cabo de unos días. Si la misma verdura se ha congelado inmediatamente después de la cosecha y se ha almacenado a las temperaturas deseadas, seguirá siendo casi fresca y conservará plenamente sus valores químicos, organolépticos y nutricionales. Del mismo modo, los productos cárnicos también se deterioran lentamente, aunque se mantengan bajo refrigeración.

Otro factor muy importante en el manejo de productos congelados y refrigerados es la humedad relativa, por lo que es necesario también durante el manejo de la cadena de frío tener un buen monitoreo y control de la misma. La humedad relativa del aire se define como la relación entre la presión de vapor del aire y su presión de vapor de saturación (Decagon Devices, Inc, s.f). La humedad relativa de equilibrio (ERH) de un producto alimenticio se define como la humedad relativa del aire que rodea al alimento que está en equilibrio con su entorno. Cuando se obtiene el equilibrio, la ERH (en porcentaje) es igual a la actividad del agua multiplicada por 100, es decir, $ERH (\%) = AW \times 100$. (F. Kong, 2011) Cuando un alimento se expone a una humedad constante, el producto ganará o perderá humedad hasta alcanzar la ERH. La migración de la humedad afecta significativamente a las propiedades físicas y químicas del alimento, como se ha descrito anteriormente, por lo que lo más recomendable es mantener la humedad del aire lo más cercano posible a la humedad del producto alimenticio.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) ha informado que, en el año 2021, se perdieron aproximadamente el 14% de los alimentos producidos a nivel mundial debido a malas prácticas en el almacenamiento y distribución (Utkina, 2019). Esto se traduce en una pérdida alarmante de alrededor de 3,9 millones de toneladas de alimentos. La cadena de frío es un sistema logístico esencial para garantizar la calidad y seguridad de productos perecederos durante su transporte, almacenamiento y distribución. Sin embargo, gestionar de manera eficiente las condiciones críticas, como la temperatura y la humedad, sigue siendo un desafío para muchas empresas,

especialmente en sectores como la industria alimentaria, farmacéutica y logística. La falta de monitoreo en tiempo real y de sistemas integrados capaces de detectar problemas de manera oportuna contribuye a pérdidas económicas significativas y pone en riesgo la salud de los consumidores. Entre los principales problemas en la gestión de la cadena de frío se encuentra la carencia de visibilidad en tiempo real de las condiciones ambientales a lo largo del proceso. En muchos casos, el monitoreo se realiza con dispositivos independientes o métodos manuales que dificultan la recolección y análisis continuo de datos. Esta desconexión tecnológica impide la detección temprana de fallos en los equipos de refrigeración, retrasos en la logística o exposiciones prolongadas a condiciones inadecuadas. Estas limitaciones afectan la calidad de los productos perecederos y generan incertidumbre tanto para los productores como para los consumidores.

Aunque las soluciones basadas en el Internet de las Cosas (IoT) han mostrado un gran potencial para optimizar la cadena de frío, su adopción se ha visto limitada debido a diversos factores. Entre ellos se encuentran los costos de implementación, la complejidad en la integración de dispositivos y plataformas, y la falta de modelos que sean escalables y adaptables a diferentes contextos operativos. Esta falta de soluciones integrales deja a las empresas sin herramientas accesibles y efectivas para enfrentar los desafíos de monitoreo y gestión.

En este contexto, se identifica la necesidad de desarrollar un modelo experimental basado en IoT que permita integrar tecnologías disponibles para resolver los problemas actuales de la cadena de frío. Este modelo debe incluir sensores digitales de temperatura y humedad conectados a una red IoT mediante protocolos de comunicación confiables, como MQTT, y debe ser capaz de proporcionar información en tiempo real sobre las variables críticas. Además, la solución propuesta debe permitir analizar los datos recolectados para generar indicadores clave y patrones que faciliten la toma de decisiones informadas.

El análisis de estos datos será clave para identificar tendencias, predecir posibles desviaciones y optimizar los procesos de gestión de la cadena de frío. Asimismo, es fundamental evaluar la viabilidad y eficacia del sistema mediante simulaciones y modelos matemáticos que representen escenarios típicos de operación. Esto permitirá validar el desempeño de la solución propuesta y ofrecer recomendaciones para su futura implementación.

El problema radica en la falta de soluciones integrales que combinen accesibilidad, escalabilidad y efectividad en el monitoreo y gestión de la cadena de frío. Este vacío no solo genera pérdidas económicas y riesgos para la salud pública, sino que también limita el desarrollo tecnológico en esta área.

La presente investigación busca abordar esta problemática mediante el diseño y validación de un modelo IoT que permita optimizar el monitoreo y control de las variables críticas de la cadena de frío, asegurando así la calidad y seguridad de los productos perecederos durante todo su ciclo de vida

1.3 ANTECEDENTES

Para iniciar, es importante definir el concepto de Internet de las Cosas. Para ello, podemos recordar la evolución histórica de las telecomunicaciones e Internet a través del artículo "History of IoT" (Harwood, 2017) en Postcapes, el cual destaca los siguientes hitos:

1832: Un telégrafo electromagnético fue creado por el Barón Schilling de Rusia

1844: Samuel Morse envía el primer mensaje público en código Morse

1926: Nikola Tesla a la revista Colliers: "Cuando la tecnología inalámbrica se aplique perfectamente, toda la tierra se convertirá en un enorme cerebro, que de hecho lo es, siendo todas las cosas partículas de un todo real y rítmico... y los instrumentos mediante los cuales podremos hacerlo serán asombrosamente simples comparados con nuestro teléfono actual. Un hombre podrá llevar uno en el bolsillo del chaleco".

1950: Alan Turing en su artículo Computing Machinery and Intelligence en el Oxford Mind Journal "...También se puede sostener que lo mejor es dotar a la máquina de los mejores órganos sensoriales que el dinero pueda comprar, y luego enseñarle a entender y hablar. Este proceso podría seguir la enseñanza normal de un niño".

1964: Marshall McLuhan "... por medio de los medios eléctricos, establecemos una dinámica porque todas las tecnologías anteriores -incluidas las ciudades- se traducirán en sistemas de información".

1969: Se desarrolla ARPANET

1974: Inicio de TCP/IP

1989: Tim Berners-Lee propone la World Wide Web

1990: John Romkey crea la tostadora

1991: Primera página web

1995: Comienza el primer servicio de comercio electrónico (Amazon, Echo Bay o eBay).

1998: Se incorpora Google

1998: Mark Weiser: "La computación ubicua es más o menos lo contrario de la realidad virtual". Weiser escribió: "Mientras que la realidad virtual pone a las personas dentro de un mundo generado por ordenador, la computación ubicua obliga al ordenador a vivir en el mundo con las personas".

1999: El Internet de las cosas no es exacto, pero se introduce el concepto. El Centro de Identificación Automática Kevin Ashton describió Internet de las cosas "Podría estar equivocado, pero estoy bastante seguro de que la frase "Internet de las cosas" comenzó como el título de una presentación que vinculando la nueva idea de la RFID en la cadena de suministro de P&G con el entonces candente tema de Internet era algo más que una buena forma de llamar la atención de los ejecutivos. Resumía una idea importante que a menudo sigue siendo malinterpretada".

2000 a 2004: El término internet de las cosas o palabra conectada que se mantuvo en Guardian y otras revistas de Scientific American. Hubo algunas discusiones sobre que en un futuro próximo los dispositivos se conectarán automáticamente y funcionarán de forma independiente con muy pocas instrucciones. Cuando la RFID se desarrolló a gran escala, el concepto de IoT se hizo más y más claro.

2005: En 2005, tras la aparición de términos anteriores en Guardian y otras publicaciones científicas, el término publicaciones científicas, el término comienza a ganar más popularidad, por lo que la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) y se publica el primer informe: "Una nueva dimensión se ha añadido al mundo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC): de conectividad en cualquier momento y lugar para cualquier persona, ahora tendremos conectividad para cualquier cosa. Las conexiones se

multiplicarán y crearán una nueva red dinámica de redes: una Internet de las cosas".

2006-2008: La Unión Europea reconoció el término Internet de las cosas en una conferencia que se celebró la alianza IPSO (los miembros son: Ericsson, Google, Cisco, SAP, Sun, Fujitsu y Bosch, Intel) se abrió para estudiar la promoción de la red IP de objetos inteligentes y potenciar el IoT. (Alianza IPSO).

2011: Lanzamiento público de IPV6 -El nuevo protocolo permite 2¹²⁸ (aproximadamente 340 undecillones o 340.282.366.920.938.463.463.374.607.431.768.211.456) direcciones o, como dijo Steven Leibson, "podríamos asignar una dirección IPV6 a cada átomo de la superficie de la tierra, y aún nos quedarían suficientes direcciones para hacer otras 100+ tierras".

- Cisco, IBM y Ericsson producen grandes iniciativas educativas y de marketing sobre el tema.

- Arduino y otras plataformas de hardware maduran y hacen que el IoT sea accesible para los aficionados al bricolaje que se interesan por el tema.

- Adquisiciones e inversiones de capital riesgo en el sector, como la adquisición de la plataforma de IoT Pachube, la obtención de una ronda de financiación por parte de la empresa de seguridad de IoT Mocano y otras empresas de capital riesgo que se fijan en el sector.

Después de 2011, las grandes empresas como Cisco, Ericsson, IBM producen grandes programas educativos y de marketing para IoT, comienzan a aparecer términos como "Smart cities", "Machine to Machine", "Industrial IoT" podemos ver algunos hitos importantes que aparecen en artículo de dataversity (Foote, 2014):

2012, la Oficina Federal de Energía de Suiza puso en marcha un programa piloto llamado "Smart City Switzerland". Reunieron a representantes de universidades, empresas y administraciones públicas para debatir nuevas ideas para el entorno urbano. Smart City Switzerland tiene más de sesenta proyectos en marcha y apoya nuevas asociaciones científicas y la innovación. (Smart City Switzerland ha evolucionado hasta convertirse en algo impresionante).

La IIoT surgió aproximadamente en 2010, con varias grandes empresas desarrollando sus propios sistemas. Se atribuye a General Electric la creación del término "Industrial Internet of Things", en 2012.

2013 para este año el IoT se había convertido en un sistema que utilizaba múltiples tecnologías, desde Internet hasta la comunicación inalámbrica y desde los sistemas microelectromecánicos (MEMS) hasta los sistemas integrados.

2015 los teléfonos inteligentes forman parte del IoT y se han convertido en una importante herramienta de comunicación para muchas personas. En 2015, se incorporaron al IoT con un alto grado de entusiasmo por parte de los responsables de marketing. Los sensores de estos dispositivos son controlados por los departamentos de marketing, que envían determinadas promociones en función del cliente y de la ubicación del producto.

2021 en octubre de este año, May Mobility lanzó un programa piloto para probar su software de autoconducción.

2022, Para este año IoT incluye casi todo lo que se pueda imaginar, desde teléfonos móviles hasta el mantenimiento de edificios o el motor de un avión. Los dispositivos médicos, como un implante de monitor cardíaco o un transpondedor de biochip en un animal de granja, pueden transferir datos a través de una red y son miembros de la IoT.

A partir del año 2011, se observa un aumento constante en las búsquedas relacionadas con IoT, lo que sugiere un creciente interés y reconocimiento de su importancia en diferentes sectores. A medida que avanzan los años, el interés continúa en aumento, alcanzando su punto máximo en los últimos años.

Este patrón ascendente en las búsquedas refleja la creciente conciencia y adopción del IoT en diversas industrias y áreas de aplicación. La tecnología del IoT ha despertado el interés de profesionales, investigadores, empresas y el público en general, ya que se reconocen sus beneficios potenciales en términos de eficiencia, conectividad y mejora de la calidad de vida.

El análisis de las tendencias de búsqueda muestra un claro aumento en el interés por el IoT a lo largo del tiempo. Esta tendencia refuerza la importancia y relevancia del IoT como una tecnología en constante crecimiento y desarrollo, con un potencial significativo para transformar la forma en que interactuamos con el mundo y

abordamos los desafíos actuales y futuros.

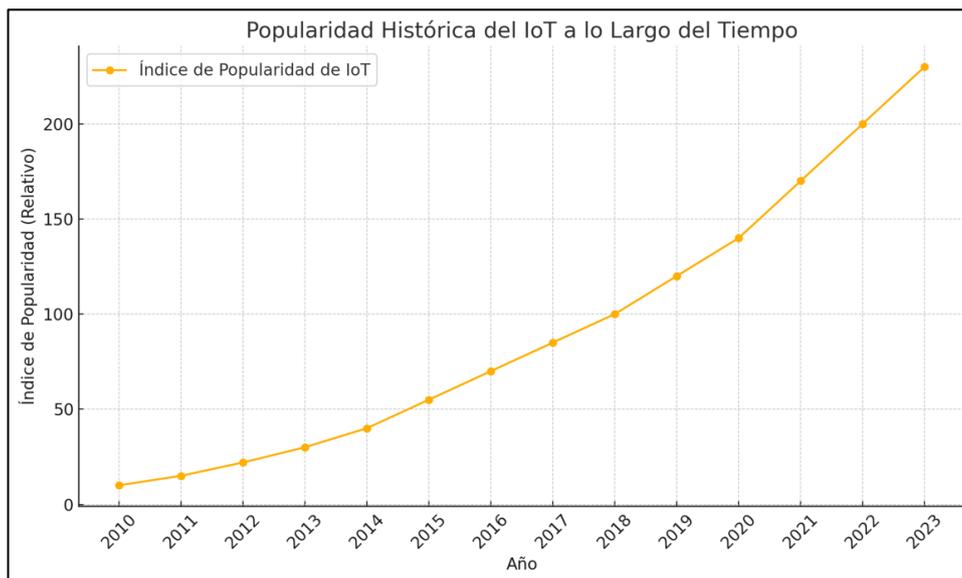


FIGURA 1 INDICE DE POPULARIDAD DE IOT A TRAVES DEL TIEMPO

El gráfico (Tokio School, 2025) mostrado en la Figura 1, presenta una visualización del crecimiento de la popularidad del Internet de las Cosas (IoT) a lo largo del tiempo, desde el año 2010 hasta 2023. La línea trazada ilustra un aumento constante y acelerado en el interés y la adopción de tecnologías IoT en diversos sectores, lo que refleja su creciente relevancia en el ámbito tecnológico y comercial. El eje horizontal representa los años del período estudiado, mientras que el eje vertical muestra un índice de popularidad relativo, que mide el interés generalizado en IoT. Los puntos marcados a lo largo de la línea indican hitos específicos, evidenciando un crecimiento significativo desde el 2010, con un incremento pronunciado a partir del 2015, cuando las tecnologías IoT comenzaron a consolidarse como soluciones clave en sectores como la logística, la salud y la industria manufacturera.

El comportamiento del gráfico resalta la aceleración en la popularidad durante los últimos años, atribuible a factores como la reducción de costos en sensores y dispositivos, el avance de la conectividad 5G, y la creciente adopción de tecnologías basadas en IoT en aplicaciones como hogares inteligentes, vehículos conectados y la industria 4.0.

La Figura 1 muestra cómo el IoT ha evolucionado de ser una tecnología emergente a convertirse en un componente esencial en las estrategias tecnológicas globales, lo que subraya su impacto y proyección futura en la transformación digital.

En la industria de la logística y el transporte, el uso de IoT puede tener un impacto significativo. Al integrar sensores y dispositivos IoT en los camiones que transportan productos congelados, se puede monitorear y controlar la temperatura y humedad de cada lote de productos individualmente en tiempo real. Esto permitiría a las empresas de transporte y almacenamiento tomar decisiones en tiempo real, evitando la pérdida de productos y optimizando la cadena de frío.

Además, el uso de IoT también puede tener un impacto en la eficiencia energética y la reducción de costos, al permitir una mejor planificación y gestión de las rutas de transporte y una mejor utilización de los recursos.

El potencial de IoT es enorme y puede tener un impacto significativo en la industria de la logística y el transporte, permitiendo una mayor eficiencia y reducción de costos, así como una mejor gestión de la cadena de frío y reducción de pérdida de productos.

1.4 DINÁMICA DEL FENÓMENO EN ESTUDIO

Las variables que intervienen en el fenómeno de estudio son 2: Temperatura y Humedad Relativa. Se han definido dos rangos principales los cuales serán tomados como valores normales de acuerdo a las normas que se han estandarizado en distintos países, la primera de ellas es la temperatura de congelación para alimentos, la cual está dentro del rango de a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$, como se muestra en la Figura 2.

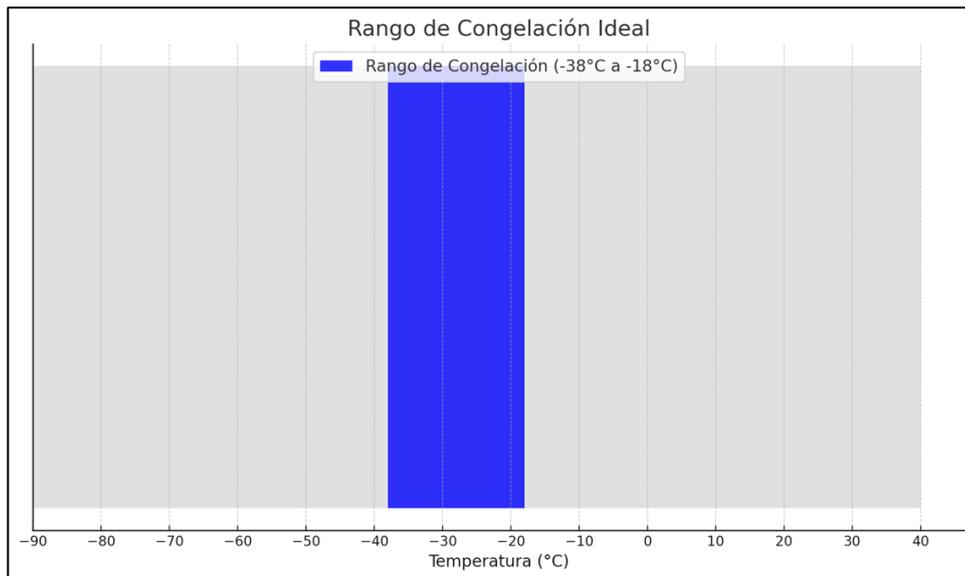


FIGURA 2 TEMPERATURA IDEAL DE CONGELACIÓN

Según la Administración de Alimentos y Medicamentos (U.S. Food and Drug Administration, s.f.), la temperatura ideal de refrigeración para alimentos perecederos es de 5°C o menos. Mantener los alimentos a esta temperatura inhibe el crecimiento de microorganismos, como la salmonela, la E. coli y la listeria, que pueden causar enfermedades transmitidas por los alimentos. Es importante seguir esta recomendación para prevenir la proliferación de estas bacterias y garantizar la seguridad alimentaria.

La Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) recomienda enfáticamente refrigerar los alimentos perecederos lo antes posible. Es importante seguir la regla de las dos horas y no dejar los alimentos que requieren refrigeración a temperatura ambiente durante más de dos horas, ya que las bacterias pueden multiplicarse rápidamente en la llamada "zona de peligro", que abarca temperaturas entre los 5°C y 60°C. Según el Departamento de Agricultura, algunas bacterias pueden duplicar su número en tan solo 20 minutos en estas condiciones. Por lo tanto, es fundamental mantener los alimentos refrigerados para prevenir la proliferación de bacterias dañinas. En la Figura 3 se muestra la temperatura ideal de refrigeración, a la cuál debe mantenerse constante.

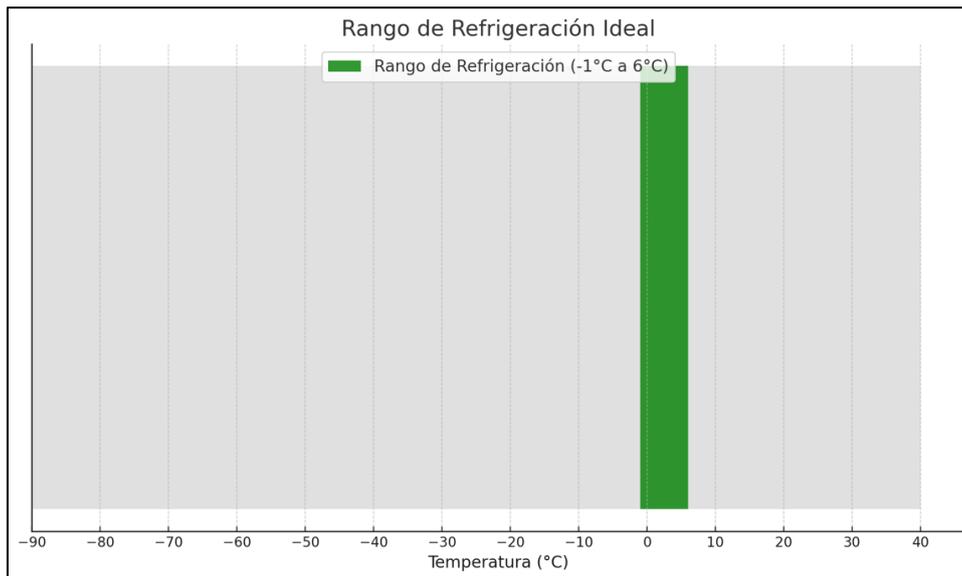


FIGURA 3 TEMPERATURA IDEAL DE REFRIGERACION

La humedad es una variable crítica en el transporte de alimentos ya que puede afectar la seguridad y la calidad de los mismos. La presencia de humedad puede promover el crecimiento de microorganismos como bacterias, moho y hongos, lo que puede resultar en productos inseguros y en mal estado. Por otro lado, la falta de humedad también puede ser perjudicial, ya que puede hacer que los alimentos se sequen, se endurezcan y pierdan su sabor y textura original.

La tasa de absorción o pérdida de humedad de un producto se mide a través de su Equilibrio de Humedad Relativa (ERH). Para minimizar la transferencia de humedad entre el producto y el entorno, es importante elegir el envase adecuado y mantener la humedad relativa (HR) cercana a la humedad del producto (ERH) durante el transporte y almacenamiento.

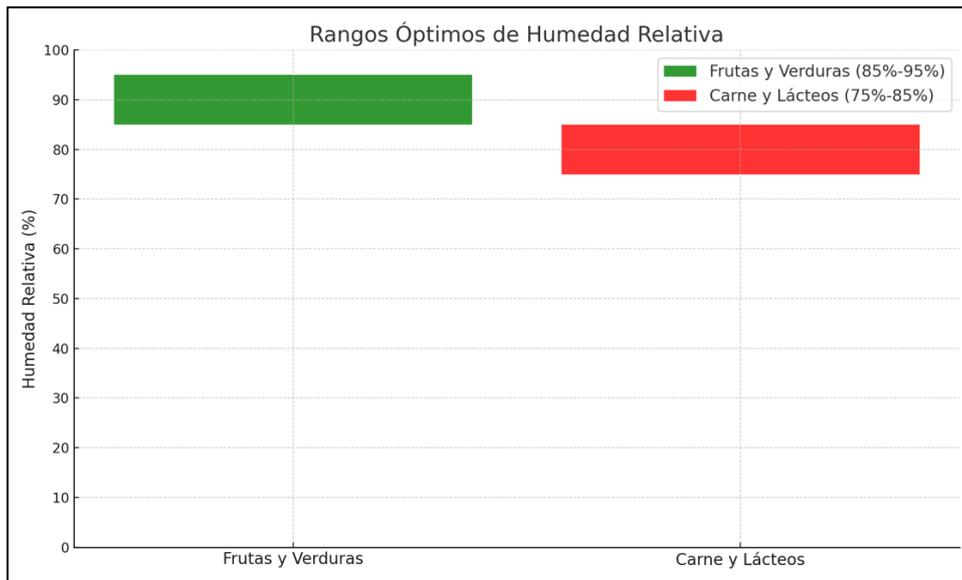


FIGURA 4 RANGOS OPTIMOS DE HUMEDAD RELATIVA

Tal como se muestra en la Figura 4, en el caso de la refrigeración, la humedad relativa óptima de los refrigeradores de frutas y verduras debe estar entre el 85% y el 95%, mientras que la humedad relativa de los almacenes frigoríficos de carne, productos lácteos y mixtos debe mantenerse entre el 75% y el 85% (Sistemas de Refrigeración, 2011). Si la humedad relativa es demasiado alta, los alimentos se volverán viscosos y se acelerará el crecimiento de bacterias, lo que acelerará el deterioro del producto. Si la humedad relativa es demasiado baja, los alimentos se secarán.

En el caso de la congelación, se debe mantener una humedad relativa elevada por encima del 95% para evitar que el aire seco y frío absorba los ingredientes de los alimentos y afecte su calidad. Además, es importante envolver los alimentos con materiales antihumedad o anti-evaporación para evitar la pérdida de humedad y la degradación de la grasa.

Por lo tanto, es fundamental monitorear de manera constante tanto la temperatura como la humedad durante el transporte y almacenamiento de alimentos para garantizar la calidad y seguridad de los mismos. La tecnología de control de temperatura y los sistemas de humidificación o deshumidificación son herramientas clave para mitigar los riesgos asociados con la humedad en el transporte de alimentos.

1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 OBJETIVO

En esta sección, se presenta un marco conceptual que define los alcances y los límites del estudio desarrollado en esta investigación. La delimitación de la investigación permite establecer un enfoque claro y estructurado hacia el cumplimiento de los objetivos planteados, optimizando así los recursos disponibles y garantizando la relevancia de los resultados obtenidos.

1.5.1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este proyecto es desarrollar, implementar y validar un modelo experimental basado en Internet de las Cosas (IoT) que permita el monitoreo y análisis remoto de variables críticas, como temperatura, humedad y ubicación, en la cadena de frío. Este modelo tiene como finalidad garantizar condiciones óptimas para la conservación de productos perecederos durante su transporte, almacenamiento y distribución, proporcionando una solución integral que combina hardware, software y análisis de datos avanzados para mejorar la eficiencia operativa y reducir pérdidas económicas.

El sistema diseñado integrará sensores digitales de alta precisión, dispositivos gateways para la transmisión de datos, un servidor MQTT propio, una base de datos centralizada para el almacenamiento seguro de información y herramientas de análisis automatizado. Adicionalmente, se emplearán simulaciones computacionales y modelado matemático para validar la eficacia del sistema en escenarios representativos, anticipando riesgos y optimizando procesos de decisión dentro de la cadena de frío.

1.5.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar y construir una red IoT para el monitoreo de variables críticas en la cadena de frío.

- Seleccionar e integrar sensores digitales avanzados que permitan medir con precisión las variables clave de temperatura, humedad y ubicación, asegurando compatibilidad con tecnologías IoT.

- Configurar un sistema de gateways que actúe como intermediario entre los sensores y la nube, utilizando protocolos de comunicación eficientes como MQTT y LoRa.
- Desarrollar un entorno de transmisión de datos confiable, que garantice la conectividad en tiempo real y la seguridad de la información recolectada, incluso en escenarios adversos.

Implementar una infraestructura de almacenamiento y procesamiento de datos en la nube

- Diseñar una base de datos centralizada que soporte la recepción, organización y análisis de grandes volúmenes de datos provenientes de los sensores.
- Configurar una plataforma basada en servicios de nube como AWS, Google Cloud o Azure, asegurando escalabilidad, accesibilidad y seguridad en el manejo de los datos.
- Definir los esquemas de almacenamiento y los procesos de preprocesamiento de datos, incluyendo técnicas de limpieza, normalización y consolidación para asegurar la calidad de los datos almacenados.

Validar el modelo propuesto mediante simulaciones computacionales

- Generar escenarios simulados que representen condiciones reales de operación en la cadena de frío, como fluctuaciones de temperatura, fallos en los equipos de refrigeración y variaciones en los tiempos de transporte.
- Simular eventos críticos en el sistema para evaluar la capacidad del modelo de responder de manera oportuna a anomalías y generar alertas.
- Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones para validar la funcionalidad, precisión y robustez del modelo propuesto.

Diseñar una interfaz de usuario accesible e intuitiva

- Crear un dashboard interactivo que permita a los usuarios monitorear en tiempo real las variables críticas, visualizar indicadores clave y acceder a reportes generados por el sistema.

1.5.1.3 IMPORTANCIA DEL PROYECTO

Este proyecto aborda una problemática clave en la industria de la cadena de frío: la falta de herramientas integrales para el monitoreo y control en tiempo real de las condiciones críticas que afectan la calidad de los productos perecederos. Al desarrollar una solución basada en IoT, se propone transformar la forma en que se gestiona la cadena de frío, proporcionando una solución tecnológica que optimiza procesos, reduce pérdidas económicas y garantiza la seguridad de los productos para los consumidores finales.

La propuesta no solo ofrece beneficios técnicos, sino también económicos y estratégicos, ya que permite:

1. Minimizar riesgos: Detectando de manera anticipada anomalías que podrían afectar la calidad de los productos.
2. Reducir pérdidas: Disminuyendo el deterioro de productos durante el transporte y almacenamiento.
3. Optimizar recursos: A través de un sistema eficiente que reduce costos asociados al monitoreo manual y mejora la logística operativa.

Finalmente, este modelo puede servir como referencia para futuros desarrollos en otras áreas industriales, destacando la adaptabilidad de las tecnologías IoT a diferentes aplicaciones críticas

1.5.2 Hipótesis

"La integración de una solución IoT compuesta por sensores DHT22 para la medición de temperatura y humedad, un gateway LoRa Heltec configurado para la transmisión eficiente de datos, y un servidor MQTT para la gestión en tiempo real de la información, permite monitorear y controlar las variables críticas de la cadena de frío. Esta solución minimiza las desviaciones de los parámetros ideales incluso en presencia de factores externos, como vibraciones o fluctuaciones de humedad,

garantizando así la preservación de las condiciones óptimas durante todo el ciclo logístico."

Esta hipótesis se sustenta en la capacidad de las tecnologías IoT para recolectar, transmitir y analizar datos en tiempo real, lo que posibilita la detección de anomalías y la adopción de medidas correctivas inmediatas. Además, propone que la solución desarrollada puede no solo superar desafíos logísticos como los cambios ambientales y las condiciones de transporte adversas, sino también garantizar que los productos mantengan su calidad e inocuidad hasta su punto de destino.

La validación de esta hipótesis requerirá demostrar que el sistema es capaz de:

1. Capturar datos precisos y confiables sobre las variables críticas.
2. Transmitir la información en tiempo real a través de un servidor MQTT, respetando los estándares de latencia y pérdida mínima de datos.
3. Procesar y visualizar los datos mediante herramientas analíticas que faciliten la interpretación y la toma de decisiones.
4. Probar la eficacia del sistema bajo condiciones simuladas y reales, asegurando que las desviaciones de temperatura, humedad y vibraciones se mantengan dentro de límites aceptables.

Esta hipótesis plantea una contribución significativa al ámbito de la logística y la gestión de la cadena de frío, demostrando cómo las tecnologías emergentes pueden integrarse de manera efectiva para resolver problemas prácticos relacionados con la preservación de productos perecederos. También subraya la importancia de seleccionar arquitecturas tecnológicas y protocolos de comunicación adecuados para garantizar el desempeño óptimo del sistema.

1.5.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo puede diseñarse e implementarse una red IoT eficiente para el monitoreo y control de la cadena de frío?

Para diseñar e implementar una red IoT eficiente, es esencial seleccionar sensores digitales avanzados capaces de medir variables como temperatura, humedad y ubicación en tiempo real. Los sensores deben ser compatibles con tecnologías IoT como BLE, LoRa o ZigBee, y los módulos GPS son fundamentales para monitorear la ubicación durante el transporte.

Los protocolos de comunicación más adecuados son MQTT, que garantiza una transmisión de datos confiable y eficiente incluso en redes con limitaciones, y LoRaWAN, que resulta ideal para distancias largas y entornos rurales. Además, es crucial implementar un análisis de datos en tiempo real mediante técnicas de minería de datos y aprendizaje automático para optimizar la toma de decisiones y prevenir fallos.

¿Cuáles son las mejores prácticas para optimizar el uso de tecnologías IoT en la cadena de frío?

La integración de sensores en puntos críticos, como cámaras frigoríficas y vehículos, combinados con gateways IoT que transmitan los datos a una base de datos centralizada en la nube, es fundamental para garantizar una operación eficiente. Esto permite la recolección continua de datos y su almacenamiento seguro.

El uso de algoritmos de aprendizaje automático, como la regresión lineal y los árboles de decisión, facilita la creación de modelos predictivos capaces de identificar tendencias y prevenir anomalías en el sistema. También es fundamental generar alertas automáticas en tiempo real para asegurar la calidad de los productos durante toda la cadena de frío.

¿Qué estrategias pueden implementarse para garantizar la viabilidad y escalabilidad de las soluciones IoT en la cadena de frío?

Es importante seleccionar sensores y dispositivos económicos pero confiables, priorizando aquellos que ofrezcan un equilibrio entre costo y funcionalidad. La infraestructura debe diseñarse de manera modular y adaptable a diferentes entornos operativos.

Las simulaciones computacionales son una herramienta clave para evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes escenarios, como fallos en la refrigeración o variaciones climáticas. Además, se debe desarrollar un dashboard intuitivo que permita visualizar los datos y emitir alertas automáticas en caso de emergencia, lo que mejora la capacidad de respuesta de los usuarios.

¿Cuáles son los principales desafíos en la adopción de tecnologías IoT para el monitoreo de la cadena de frío y cómo pueden superarse?

Uno de los principales desafíos técnicos es garantizar la conectividad en áreas remotas. Esto puede resolverse mediante el uso de redes híbridas que combinen LoRaWAN y 4G/5G. Otro reto es la duración limitada de las baterías de los sensores, lo que puede mitigarse seleccionando dispositivos de bajo consumo energético.

El avance de tecnologías como 5G e inteligencia artificial ofrece oportunidades para superar estos desafíos, proporcionando mayor capacidad de transmisión y automatización en la detección de problemas. Además, para garantizar la sostenibilidad económica y ambiental, es necesario implementar tecnologías eficientes en costos y respetuosas con el medio ambiente.

¿Qué impacto puede tener la implementación de soluciones IoT en la cadena de frío en términos de calidad del producto y reducción de pérdidas económicas?

La implementación de soluciones IoT permite detectar problemas en tiempo real, evitando que los productos se deterioren debido a desviaciones de las condiciones óptimas. Esto contribuye significativamente a reducir las tasas de desperdicio de alimentos y productos perecederos.

Indicadores como la reducción de productos dañados, la cantidad de alertas generadas y el ahorro en costos logísticos son útiles para medir el impacto de estas soluciones. Además, el retorno de inversión (ROI) puede calcularse al comparar los costos iniciales con los beneficios obtenidos a través de la optimización de procesos.

El uso de IoT también mejora la seguridad alimentaria y la satisfacción del cliente, al garantizar que los productos lleguen en condiciones óptimas al consumidor final.

1.6 ALCANCES Y LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

1. Diseño e implementación de un modelo experimental IoT:

La investigación se centra en el desarrollo de un modelo funcional que simule la operación de la cadena de frío, utilizando tecnologías IoT para monitorear variables críticas como temperatura, humedad y ubicación.

El modelo incluye sensores digitales, gateways, un servidor MQTT, una base de datos centralizada y un sistema de análisis automatizado de datos.

2. Monitoreo y análisis en tiempo real:

Se propone la recolección de datos generados por sensores en tiempo real, con un enfoque en la detección de patrones, tendencias y anomalías en las variables críticas.

La investigación abarca la creación de modelos predictivos y herramientas de visualización para facilitar la toma de decisiones informadas.

3. Simulación de escenarios operativos:

Se generarán datos en condiciones simuladas para replicar condiciones reales de operación en la cadena de frío, como fallos en la refrigeración, fluctuaciones climáticas y retrasos en el transporte.

Las simulaciones permitirán validar el desempeño del modelo en distintos escenarios y evaluar su capacidad para optimizar la gestión de la cadena de frío.

4. Desarrollo de infraestructura tecnológica:

Se diseñará una infraestructura de comunicación basada en tecnologías IoT como LoRa, y protocolos como MQTT, garantizando la transmisión eficiente y segura de datos.

5. Aplicabilidad y escalabilidad:

El modelo será diseñado de manera modular y escalable, permitiendo su aplicación en diferentes contextos operativos y su integración con tecnologías futuras.

Aunque la investigación se limita a una simulación experimental, el modelo desarrollado puede servir como referencia práctica para implementaciones reales en la industria.

1.6.2 LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN

1. Generación de datos en ambientes simulados:

La investigación no se basa en datos reales obtenidos de operaciones existentes en la cadena de frío. En su lugar, se emplearán datos generados mediante sensores en ambientes simulados para validar el modelo.

Esto implica que los resultados están limitados a las condiciones definidas en las simulaciones y podrían variar en un entorno real.

2. Alcance experimental:

El modelo desarrollado no será implementado en una operación real de la cadena de frío. Su aplicación se limita a un entorno controlado de simulación.

Por lo tanto, no se evaluará el impacto directo del modelo en una cadena de frío operativa.

3. Foco en variables seleccionadas:

La investigación se centra exclusivamente en las variables críticas de temperatura, humedad y ubicación. Otras variables relevantes, como la calidad del aire, vibraciones o iluminación, quedan fuera del alcance.

4. Infraestructura de prueba:

El sistema propuesto estará limitado a una configuración experimental y no considerará limitaciones de costos, restricciones legales o logísticas asociadas a implementaciones reales.

5. Limitaciones tecnológicas:

Aunque se utilizarán tecnologías IoT modernas, la investigación se restringe al uso de sensores, protocolos y plataformas accesibles dentro del alcance experimental. No se explorarán tecnologías avanzadas o en desarrollo, como sensores de próxima generación o inteligencia artificial aplicada en tiempo real.

6. Evaluación económica:

El proyecto no incluirá un análisis detallado de costos asociados a la implementación real del sistema IoT en la cadena de frío. Tampoco evaluará el retorno de inversión (ROI) ni el impacto financiero en un entorno industrial.

7. Actores involucrados:

No se contempla la interacción directa con actores reales de la cadena de frío, como productores, transportistas o minoristas. Los resultados se limitan a una perspectiva técnica basada en simulaciones y análisis matemáticos.

1.6.3 RESUMEN DE LOS ALCANCES Y LÍMITES

La investigación se centra en el desarrollo de un modelo experimental basado en IoT para optimizar el monitoreo y control de la cadena de frío, utilizando simulaciones y herramientas analíticas avanzadas para validar su eficacia. Sin embargo, su alcance no incluye la implementación en entornos reales, la interacción con actores de la industria ni la evaluación económica de la solución. Este enfoque experimental proporciona una base sólida para futuros estudios e implementaciones prácticas en la industria.

1.7 SUSTENTO METODOLÓGICO

1.7.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN: INVESTIGACIÓN APLICADA

Esta investigación tiene como objetivo principal desarrollar y validar un modelo práctico basado en IoT para el control y monitoreo de la cadena de frío. La investigación aplicada es el enfoque más adecuado, ya que busca resolver un problema práctico: mejorar la conservación de productos perecederos mediante tecnologías de monitoreo en tiempo real y análisis de datos. A diferencia de una investigación puramente teórica, esta propuesta se centra en diseñar una solución implementable y escalable, capaz de impactar positivamente la calidad y seguridad de los productos perecederos en diversas industrias.

1.7.2 ENFOQUE: CUANTITATIVO

El enfoque de esta investigación es predominantemente cuantitativo. Dado que el objetivo es medir variables críticas, como temperatura y humedad, a través de sensores IoT, el análisis se basará en datos numéricos y objetivos. Este enfoque permite evaluar la efectividad de la solución propuesta en términos de precisión, confiabilidad y capacidad para mantener las condiciones óptimas en la cadena de frío. Aunque no se incluirán datos cualitativos, se hará énfasis en simulaciones y validaciones computacionales para garantizar un análisis integral.

1.7.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: PRE-EXPERIMENTAL

El diseño preexperimental es apropiado para este estudio, ya que se evaluará el impacto de la solución IoT mediante una única intervención en un modelo simulado. En este caso, se medirán las variables antes y después de la implementación del sistema para analizar los cambios en las condiciones de conservación. La ausencia de un grupo de control se justifica por el enfoque práctico y experimental del estudio, que busca validar la funcionalidad del modelo en un entorno controlado.

1.7.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de estudio incluye productos perecederos que requieren monitoreo en la cadena de frío, como alimentos y productos farmacéuticos. Dado que los datos serán generados mediante simulaciones computacionales, la muestra representará diferentes escenarios y condiciones de operación típicas en la cadena de frío. Este enfoque garantiza que los resultados sean representativos y aplicables a una amplia gama de situaciones industriales.

1.7.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos se realizará exclusivamente mediante sensores IoT integrados en el modelo experimental. Estos dispositivos medirán variables como temperatura y humedad en tiempo real, simulando las condiciones de operación de una cadena de frío real. Los datos recopilados serán almacenados en una base de datos en la nube, desde donde se procesarán y analizarán utilizando herramientas

de minería de datos y aprendizaje automático. No se incluirán técnicas cualitativas ni encuestas, ya que el enfoque es completamente técnico y cuantitativo.

1.7.6 ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de datos será cuantitativo y utilizará herramientas estadísticas avanzadas y simulaciones computacionales. Se aplicarán técnicas como el análisis de varianza para evaluar la estabilidad de las variables monitoreadas, así como algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones y tendencias. La triangulación de datos entre las simulaciones y los modelos matemáticos desarrollados garantizará la validez y confiabilidad de los resultados.

1.7.7 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados se validarán mediante simulaciones cruzadas, en las que se replicarán múltiples escenarios de operación para evaluar la efectividad del sistema bajo distintas condiciones. Esto incluye la simulación de eventos críticos, como fallos en la refrigeración o fluctuaciones ambientales extremas, para comprobar la robustez del modelo.

1.8 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

En este capítulo se han presentado los hallazgos principales de esta investigación, resaltando la relevancia de las tecnologías de IoT como solución innovadora y efectiva para abordar los desafíos asociados con el monitoreo y control de la cadena de frío. Los resultados obtenidos sirven como base para futuras implementaciones y destacan la viabilidad del modelo propuesto.

La investigación subraya la importancia de mantener condiciones óptimas en la cadena de frío para garantizar la calidad y seguridad de los productos perecederos, particularmente en la industria alimentaria y farmacéutica. Las interrupciones en la cadena de frío pueden generar pérdidas económicas significativas y poner en riesgo la salud de los consumidores. La solución desarrollada en este proyecto terminal, basada en IoT, busca abordar estas problemáticas mediante el monitoreo y control constante de variables críticas como temperatura y humedad.

El modelo experimental desarrollado incorpora sensores digitales, protocolos de comunicación eficientes y una infraestructura de análisis de datos capaz de identificar patrones y generar alertas en tiempo real. Las simulaciones computacionales realizadas han demostrado que esta solución puede ser adaptada a diversos escenarios operativos, permitiendo su escalabilidad y aplicabilidad en diferentes industrias.

La implementación de esta solución IoT tiene el potencial de transformar la gestión de la cadena de frío, ofreciendo beneficios significativos:

- **Calidad del producto:** Al garantizar condiciones óptimas durante el transporte y almacenamiento, se asegura la frescura y calidad de los productos hasta llegar al consumidor final.
- **Reducción de pérdidas:** La detección temprana de anomalías permite mitigar el deterioro de los productos, reduciendo el desperdicio y maximizando la eficiencia operativa.
- **Confianza del consumidor:** La capacidad de cumplir con estándares de calidad y seguridad alimentaria fortalece la confianza de los consumidores en los productos y las marcas que los distribuyen.
- **Cumplimiento normativo:** Esta solución también ayuda a las empresas a cumplir con regulaciones internacionales y estándares de calidad, posicionándolas como líderes en la implementación de tecnologías avanzadas.

Además, esta investigación destaca la importancia del análisis de datos como herramienta para la toma de decisiones informadas. La capacidad de predecir fallos y optimizar procesos a través de modelos predictivos representa una ventaja competitiva clave para las empresas que operan en este sector.

Finalmente, se concluye que la solución propuesta no solo es viable desde un punto de vista técnico, sino que también tiene el potencial de contribuir al desarrollo tecnológico global, promoviendo la sostenibilidad y la innovación en la gestión de la cadena de frío. Este modelo puede servir como referencia para la implementación de soluciones similares en otros sectores que requieran un monitoreo crítico de variables ambientales.

Con este trabajo, se abre la posibilidad de expandir las aplicaciones de IoT hacia nuevos horizontes, integrando tecnologías avanzadas como inteligencia artificial y big data para mejorar aún más la eficiencia y la adaptabilidad de los sistemas de monitoreo en tiempo real.

CAPÍTULO II. ESTRUCTURA CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES RELEVANTES

2.1 INTRODUCCIÓN

En este segundo capítulo, se abordará el marco conceptual y teórico necesario para situarnos de manera adecuada en el tema de la cadena de frío y su monitoreo a través de IoT. En primer lugar, se revisarán los antecedentes relevantes para comprender el contexto histórico y social en el que se ha desarrollado esta problemática, así como las bases teóricas que han motivado este trabajo de investigación. Además, se analizarán las bases legales que regulan el monitoreo de la cadena de frío en México y su comparación con las normas internacionales.

A continuación, se revisarán los trabajos enfocados al tema, es decir, los estudios e investigaciones que ya se han realizado para el monitoreo de la cadena de frío a través de IoT. Este análisis permitirá identificar los enfoques más relevantes y las mejores prácticas, lo que será de gran utilidad para el diseño experimental que se propondrá en el capítulo siguiente.

Finalmente, en el último punto de este capítulo, se abordará el sustento teórico necesario para la implementación de la solución propuesta. Se revisarán los protocolos, estándares, normas e interconectividad necesarios para garantizar la viabilidad de la solución y su correcto funcionamiento en el monitoreo de la cadena de frío. Todo ello contribuirá a una investigación objetiva y fundamentada que permita diseñar una solución efectiva y aplicable a la problemática de la cadena de frío.

2.2 MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

El internet de las cosas, o IoT, es un sistema de dispositivos informáticos, máquinas mecánicas y digitales, objetos, animales o personas interrelacionados que están dotados de identificadores únicos y de la capacidad de transferir datos a través de una red sin que sea necesaria la interacción de persona a persona o de persona a ordenador.

Una cosa en la Internet de las cosas puede ser una persona con un implante de

monitor cardíaco, un animal de granja con un transpondedor de biochip, un automóvil que tiene sensores incorporados para alertar al conductor cuando la presión de los neumáticos es baja o cualquier otro objeto natural o artificial al que se le pueda asignar una dirección de Protocolo de Internet (IP) y que sea capaz de transferir datos a través de una red (Gillis, 2021).

Cada vez más, las organizaciones de diversos sectores utilizan el IoT para operar de forma más eficiente, comprender mejor a los clientes para ofrecer un mejor servicio al cliente, mejorar la toma de decisiones y aumentar el valor del negocio.

¿Cómo funciona IoT? Un ecosistema IoT está formado por dispositivos inteligentes habilitados para la web que utilizan sistemas integrados, como procesadores, sensores y hardware de comunicación, para recoger, enviar y actuar sobre los datos que adquieren de sus entornos. Los dispositivos IoT comparten los datos de los sensores que recogen conectándose a una pasarela IoT o a otro dispositivo de borde donde los datos se envían a la nube para ser analizados o se analizan localmente. A veces, estos dispositivos se comunican con otros dispositivos relacionados y actúan sobre la información que obtienen unos de otros. Los dispositivos hacen la mayor parte del trabajo sin intervención humana, aunque las personas pueden interactuar con los dispositivos, por ejemplo, para configurarlos, darles instrucciones o acceder a los datos.

La organización más importante de IoT es “The Global Standards Initiative on Internet of Things” (IoT-GSI), GSI pertenece a la “International Telecommunication Union” (ITU), El objetivo de la IoT-GSI es promover un enfoque unificado para el desarrollo de normas técnicas (Recomendaciones) que permitan el IoT a escala mundial. Las Recomendaciones elaboradas en el marco de la IoT-GSI en colaboración con otras organizaciones de normalización permitirán a los proveedores de servicios de todo el mundo ofrecer la amplia gama de servicios que espera esta tecnología. La IoT-GSI también pretende actuar como un parteaguas para el desarrollo de normas de IoT en todo el mundo (ITU, 2015).

La arquitectura del sistema IoT, vista de una manera simple, consta de tres niveles: Nivel 1: Sensores y dispositivos, Nivel 2: Gateway, Nivel 3: La nube.

Los dispositivos incluyen cosas conectadas en red, como los sensores y actuadores que se encuentran en los equipos de IoT, en particular los que utilizan protocolos como LoRa, Bluetooth, Zigbee, o protocolos propietarios, para

conectarse a un Edge Gateway. [La capa de Edge Gateway consiste en sistemas de agregación de datos de sensores llamados Edge Gateways que proporcionan funcionalidades, como el preprocesamiento de los datos, la seguridad de la conectividad a la nube, el uso de sistemas como WebSockets, el hub de eventos e, incluso en algunos casos, la analítica de borde o la computación de niebla (Traukina & Thomas., 2018). La capa de Edge Gateway también es necesaria para dar una visión común de los dispositivos a las capas superiores para facilitar la gestión.

El último nivel incluye la aplicación en la nube construida para el IoT utilizando la arquitectura de microservicios, que suele ser políglota y de naturaleza inherentemente segura utilizando HTTPS/OAuth. Incluye varios sistemas de bases de datos que almacenan los datos de los sensores, como las bases de datos de series temporales o los almacenes de activos que utilizan sistemas de almacenamiento de datos backend (por ejemplo, Cassandra, PostgreSQL) (Traukina & Thomas., 2018). El nivel de la nube en la mayoría de los sistemas de IoT basados en la nube cuenta con un sistema de colas de eventos y de mensajería que gestiona la comunicación que se produce en todos los niveles Algunos expertos clasificaron los tres niveles del sistema de IoT como borde, plataforma y empresa, (Hassan, Khan, & Madani, 2018) y estos están conectados por la red de proximidad, la red de acceso y la red de servicios, respectivamente.

IoT es un sistema que permite la interconexión de dispositivos inteligentes a través de una red, lo que les permite recolectar y compartir datos de forma autónoma sin necesidad de intervención humana. Esta tecnología tiene cada vez más aplicaciones en diversos sectores, como la industria, el transporte, la salud, entre otros, y su uso puede mejorar la eficiencia de los procesos, mejorar la toma de decisiones y ofrecer un mejor servicio al cliente.

En cuanto a su funcionamiento, los dispositivos IoT están equipados con sistemas integrados como procesadores, sensores y hardware de comunicación que les permiten recolectar y transmitir datos a través de la red. Estos datos se envían a una pasarela IoT o a otro dispositivo de borde donde se analizan localmente o se envían a la nube para su análisis. Los dispositivos pueden interactuar entre sí y actuar sobre la información que obtienen para llevar a cabo tareas específicas.

La organización más importante en la estandarización del IoT es la IoT-GSI,

cuyo objetivo es promover un enfoque unificado para el desarrollo de normas técnicas que permitan el IoT a escala mundial. La arquitectura del sistema IoT consta de tres niveles: sensores y dispositivos, gateway y nube, cada uno con su función específica. Los expertos clasifican los tres niveles del sistema de IoT como borde, plataforma y empresa, y estos están conectados por la red de proximidad, la red de acceso y la red de servicios, respectivamente.

IoT es una tecnología emergente que tiene un gran potencial para revolucionar la forma en que interactuamos con el mundo digital y físico. Su uso está en constante expansión y se espera que en un futuro cercano tenga un impacto cada vez mayor en diversos sectores de la sociedad.

2.3 TRABAJOS ENFOCADOS AL TEMA

Se han indagado diversos trabajos existentes referentes a la cadena de frío y IoT, los siguientes trabajos destacan ya que tiene una amplia similitud, el primero de ellos realizado en el año 2022 “Control térmico en el transporte de vacunas, usando tecnología IoT” (Peña, 2022) trabajo realizado por la Universidad Militar de Granada en Colombia, el diseño experimental descrito en este trabajo se enfoca a el monitoreo de las vacunas a través de una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi y a la creación de una aplicación de monitoreo remoto, sin embargo este trabajo esta mas enfocado a la realización de la API (Application Programming Interface), no hay una descripción de los sensores elegidos, además de que no se esta tomando en cuenta la variable de temperatura ni de los protocolos empleados, de este trabajo se puede destacar el almacenamiento de datos en una base de datos SQL y una visualización del promedio de los últimos datos recolectados.

De este trabajo se puede destacar el almacenamiento de los datos recolectados en una base de datos SQL, así como la visualización del promedio de los últimos datos recolectados. No obstante, sería importante que se profundice en la descripción de los sensores utilizados para la medición de la temperatura, y se detallan los protocolos empleados para garantizar una correcta cadena de frío durante el transporte de las vacunas. De esta forma, se podría obtener información más precisa y útil para su aplicación en la práctica.

Otro trabajo de investigación relevante dentro del tema de estudio es el titulado “Diagnóstico de sensores de temperatura en transportes frigoríficos basadas en tecnología Arduino & IoT para ENAPU S.A.” (Jimenez, 2020) de la Universidad Católica de los Ángeles Chimbote. Este estudio se enfocó en recolectar y analizar datos sobre el proceso de transporte de productos congelados de la empresa ENAPU, destacando las carencias tecnológicas en los servicios prestados, especialmente en el registro y control de la temperatura dentro de los transportes frigoríficos.

El principal aporte de esta investigación es la validación de que la integración de tecnologías IoT permitirá un control de la configuración de la temperatura y visualización del registro de la misma en tiempo real mientras el transporte tenga conexión a internet. Además, se concluye que el actual control de temperatura de productos perecederos tiene deficiencias debido a la falta de equipo adecuado e información asesorada sobre el tema, lo que resulta en la insatisfacción de los trabajadores encargados del transporte de perecederos.

En este contexto, la implementación de sensores de temperatura integrados con tecnología IoT busca mejorar el control de temperatura y garantizar la calidad de los cargamentos perecederos, automatizando el acondicionamiento interno y el registro automático de los valores detectados. La efectividad de esta solución se evaluó en la empresa ENAPU, y se concluyó que el uso de IoT para el monitoreo de la cadena de frío impactaría de manera positiva en la empresa.

Este estudio valida la importancia de la integración de tecnologías IoT en el control de la cadena de frío, especialmente en el transporte de productos perecibles, para mejorar la calidad del servicio y garantizar la seguridad de los productos transportados.

2.4 SUSTENTO TEÓRICO

2.4.1 TECNOLOGÍAS IOT Y LA CADENA DE FRIO

La visibilidad en tiempo real de la cadena de frío ha sido una meta deseada por los responsables de la cadena de frío desde hace tiempo. Sin embargo, en la

práctica, esta promesa inicial se ha visto obstaculizada por años de retrasos. Durante este tiempo, los registradores de temperatura han sido la práctica común para el control de la temperatura durante el transporte. Sin embargo, estos dispositivos solo permiten identificar los problemas de temperatura después de que ocurren, en lugar de informar sobre la toma de decisiones en tiempo real y prevenir la pérdida de producto. A pesar de esto, gracias al avance de la tecnología IoT, ahora es posible monitorear en tiempo real la temperatura de los productos durante todo el proceso de la cadena de frío, permitiendo tomar decisiones proactivas y prevenir posibles pérdidas de producto. Por lo tanto, la implementación de IoT en la cadena de frío se presenta como una solución más eficiente y efectiva para garantizar la calidad y seguridad de los productos perecederos (Leblanc, 2019).

2.4.2 IoT Y LA COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL

La implementación de tecnologías IoT en la cadena de frío no sólo mejora la eficiencia de la misma, sino que también puede tener un impacto positivo en la competitividad de las empresas que la adoptan. La conexión de dispositivos y sensores en la cadena de frío proporciona una mayor visibilidad y control en tiempo real, lo que puede llevar a una reducción en el desperdicio de productos y una mejora en la calidad del producto entregado. Esto puede resultar en una mejora en la satisfacción del cliente y en la reducción de costos operativos, lo que puede llevar a un aumento en la rentabilidad de la empresa.

Además, la implementación de tecnologías IoT en la cadena de frío también puede ayudar a las empresas a diferenciarse en el mercado y a mejorar su reputación de marca. Al demostrar un compromiso con la calidad y la seguridad de los productos entregados, las empresas pueden ganar la confianza y la lealtad de los clientes. También pueden utilizar la información recopilada por los dispositivos IoT para mejorar los procesos de producción y distribución, lo que puede llevar a una mayor eficiencia y ahorros en costos.

El Internet de las Cosas está transformando nuestro mundo y muchas empresas de distintos sectores se están beneficiando con la toma de decisiones mejorada basada en análisis de datos y la aceleración de los procesos empresariales.

Citando a Kevin Ashton director ejecutivo de Auto-ID Labs en el MIT. "Si tuviéramos ordenadores que supieran todo lo que hay que saber sobre las cosas, utilizando los datos que recopilan sin ninguna ayuda por nuestra parte, podríamos rastrear y contar todo y reducir enormemente los residuos, las pérdidas y los costes. Sabríamos cuándo hay que sustituir, reparar o retirar cosas y si están frescas o pasadas de moda". (Ashton, 2009)

Aquí es donde el IoT muestra su verdadero valor donde por un lado esta una empresa sin soluciones IoT y por el otro una empresa que entre los beneficios de la conectividad se incluyen el aumento de la automatización, la eficiencia de las operaciones, la supervisión de la seguridad y la reducción de costes, lo que se traduce en ventajas económicas derivadas de los datos recopilados, la información intercambiada y los datos analizados como resultado de esta conectividad. Pero, ¿qué significa esto realmente? ¿Tiene el Internet de las Cosas el potencial de cambiar el futuro de los negocios? Los siguientes estudios respaldan los beneficios y crecimiento de IoT en los próximos 5 años

Según un estudio de Euromonitor International, se estima que el número de dispositivos conectados a IoT activos aumente a 10 mil millones para 2020 y a 22 mil millones para 2025. (IoT Analytics, 2022)

Por su parte, la firma de análisis IoT Analytics señala que esta tecnología representó un mercado de 151 millones de dólares en 2018, cifra que llegará a los mil 567 millones en 2025. (IoT Analytics, 2022)

Datos de McKinsey Digital revelan que entre más casos de uso hay de IoT, se tiene un mayor impacto financiero, incluso con un efecto multiplicador. El valor económico potencial que IoT podría desbloquear es grande y creciente. Para 2030, se estima que podría generar entre 5.5 y 12.6 billones de dólares en valor a nivel mundial, incluido el valor captado por los consumidores y clientes de productos y servicios IoT. (Mckinsey-digital, 2022)

La adopción de tecnologías IoT en la cadena de frío puede mejorar significativamente la competitividad empresarial. Por ejemplo, la implementación de sensores y dispositivos IoT en la cadena de suministro puede proporcionar una mayor eficiencia al permitir la recolección de datos en tiempo real sobre el estado de los productos durante el transporte y almacenamiento. Con esta información, los problemas de temperatura y otros problemas relacionados con la cadena de frío

pueden identificarse y abordarse rápidamente, lo que ayuda a reducir la pérdida de productos y mejora la calidad de los mismos.

La adopción de tecnologías IoT también puede reducir los costos al optimizar el uso de los recursos y reducir los errores humanos en la gestión de la cadena de frío. Además, la implementación de tecnologías IoT en la cadena de frío puede diferenciar a las empresas en el mercado, ya que las empresas que implementan estas tecnologías pueden ofrecer un mayor nivel de transparencia y seguridad en la calidad de sus productos.

Es importante destacar que la adopción de tecnologías IoT en la cadena de frío no solo beneficia a las empresas, sino que también puede tener un impacto positivo en el medio ambiente al reducir el desperdicio de alimentos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción y transporte innecesario de productos dañados o en mal estado. En resumen, la adopción de tecnologías IoT en la cadena de frío es una inversión valiosa para las empresas que buscan mejorar su competitividad y sostenibilidad en el mercado actual.

2.4.3 LA CADENA DE FRIO

La cadena de frío implica el transporte de productos sensibles a la temperatura a lo largo de una cadena de suministro mediante métodos de envasado térmico y refrigerado y la planificación logística para proteger la integridad de estos envíos (Buske Logistics, s.f.).

Aunque las comunicaciones y transportes han hecho que la distancia relativa entre regiones del mundo sea mucho menor, la separación física de esas mismas regiones sigue siendo una realidad muy importante. Cuanto mayor es la separación física, más probabilidades hay de que los productos en la cadena de frío resulten dañados debido a las complejas operaciones de transporte que conlleva. Algunas mercancías pueden sufrir daños por golpes, mientras que las variaciones indebidas de temperatura pueden dañar otras. En el caso de una serie de mercancías etiquetadas como perecederas, en particular los alimentos, su calidad se degrada con el tiempo ya que mantienen reacciones químicas, cuyo ritmo puede mitigarse en su mayor parte con temperaturas más bajas. Se necesita tiempo y coordinación para mover un envío de forma eficiente, y cada

retraso puede tener consecuencias negativas, especialmente si esta carga es perecedera. Para garantizar que la carga no sufra daños ni se vea comprometida a lo largo de este proceso, las empresas de los sectores farmacéutico, médico y alimentario confían cada vez más en la cadena de frío respaldada por soluciones IoT.

La cadena de frío implica el transporte de productos sensibles a la temperatura a lo largo de una cadena de suministro mediante métodos de embalaje térmico y refrigerado y la planificación logística para proteger la integridad de estos envíos. Hay varios medios por los que se pueden transportar los productos de la cadena de frío, como camiones y vagones de ferrocarril refrigerados, buques de carga refrigerados, frigoríficos y carga aérea.

La cadena de frío es, por tanto, una ciencia, una tecnología y un proceso. Es una ciencia porque requiere comprender los procesos químicos y biológicos relacionados con el carácter perecedero. Es una tecnología, ya que se basa en medios físicos para garantizar unas condiciones de temperatura adecuadas a lo largo de la cadena de suministro. Es un proceso, ya que hay que realizar una serie de tareas para preparar, almacenar, transportar y controlar los productos sensibles a la temperatura. Los principales elementos de una cadena de frío son:

Sistemas de refrigeración. Llevar productos básicos como los alimentos a la temperatura adecuada para su procesamiento, almacenamiento y transporte.

Almacenamiento en frío. Proporcionar instalaciones para el almacenamiento de mercancías durante un período de tiempo, ya sea a la espera de ser enviadas a un mercado lejano, en un lugar intermedio para su procesamiento y distribución, y cerca del mercado para su distribución.

Transporte en frío. Disponer de medios de transporte para trasladar las mercancías manteniendo unas condiciones de temperatura y humedad estables y protegiendo su integridad.

El éxito de las industrias que dependen de la cadena de frío se reduce a saber enviar un producto con un control de temperatura adaptado a las circunstancias del envío. Las operaciones de la cadena de frío han mejorado sustancialmente en las últimas décadas, y la industria puede responder a las exigencias de una

amplia gama de productos. Diferentes productos requieren el mantenimiento de distintos niveles de temperatura para garantizar su integridad a lo largo de la cadena de transporte. La industria ha respondido con el establecimiento de normas de temperatura que se adaptan a la mayoría de los productos. Las normas de temperatura más comunes son "congelación" (-18 °C) y "refrigeración" (5 °C), cada una relacionada con grupos de productos específicos. Mantenerse dentro de este rango de temperaturas es vital para la integridad de un envío a lo largo de la cadena de suministro, y en el caso de los perecederos, permite garantizar una vida útil óptima. Cualquier divergencia puede provocar daños irrevocables y costosos; un producto puede perder sencillamente cualquier valor o utilidad en el mercado.

Desplazar un envío a lo largo de la cadena de suministro sin sufrir contratiempos ni anomalías de temperatura requiere el establecimiento de un proceso logístico completo para mantener la integridad del envío. Este proceso afecta a varias fases que van desde la preparación de los envíos hasta la verificación final de la integridad del envío en el punto de entrega.

Debido a la complejidad de la cadena de frío y a las pérdidas que se generan por malas prácticas es donde el IoT ofrece un valor agregado ya que se puede realizar un monitoreo constante permitiendo identificar e incluso anticipar a diversas anomalías en los alimentos durante el transporte o el almacenamiento de los mismos.

2.4.4 ARQUITECTURA IoT

Debido a la naturaleza en constante evolución de los dispositivos IoT y a la gran diversidad de sensores, no existe una arquitectura única para todos los proyectos IoT. Sin embargo, algunos de los componentes básicos serán similares de un proyecto a otro.

En primer lugar, tendrá que construir pensando en la escalabilidad. La cantidad de datos que recopilará con el tiempo adquirirá proporciones enormes y necesitará una plataforma que pueda adaptarse a ello a largo plazo.

También tendrá que garantizar una alta disponibilidad en todo momento. Tener fallos

en el sistema podría hacerle perder algo de negocio en el mejor de los casos, o podría tener consecuencias fatales en los peores.

Por último, necesitará un sistema lo suficientemente flexible como para adaptarse a cambios rápidos y frecuentes. A medida que evolucione su arquitectura o cambien sus necesidades empresariales, necesitará iterar rápidamente sin romper la arquitectura existente.

Si bien es cierto que no hay dos proyectos de IoT iguales, las capas principales siempre han permanecido constantes. Desde que se realizaron las primeras investigaciones sobre IoT, la arquitectura de tres capas ha sido el modelo dominante para las aplicaciones IoT.

Tal como se muestra en la Figura 5, las tres capas son Percepción (o Dispositivos), Red y Aplicación.

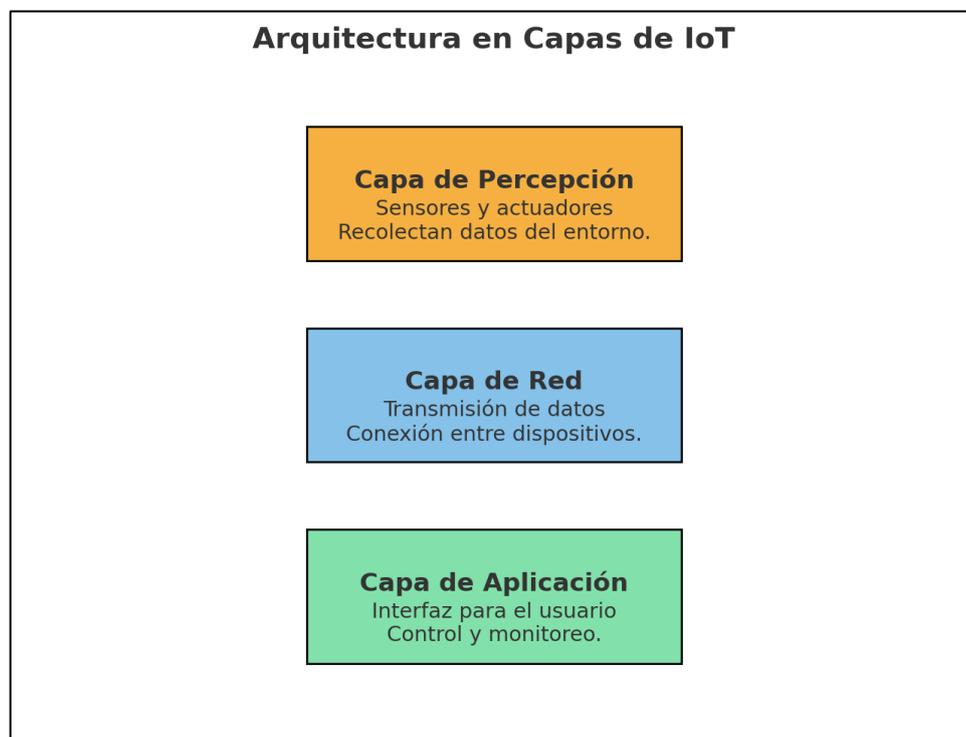


FIGURA 5 ARQUITECTURA EN CAPAS DE IOT

Percepción: Los propios sensores se encuentran en esta capa. De aquí proceden los datos. Los datos pueden proceder de cualquier número de sensores del dispositivo conectado. Los actuadores, que actúan sobre su entorno, también se encuentran en esta capa de la arquitectura.

Red: La capa de red describe cómo se mueven las grandes cantidades de datos a través de la aplicación. Esta capa conecta los distintos dispositivos y envía los

datos a los servicios back-end apropiados.

Aplicación: La capa de aplicación es lo que ven los usuarios. Puede ser una aplicación para controlar un dispositivo en un ecosistema doméstico inteligente, o un cuadro de mandos que muestre el estado de los dispositivos que forman parte de un Sistema (González & Estrada, 2019).

Otra forma de describir la arquitectura de una solución IoT es utilizando un enfoque de cuatro etapas tal como se muestra en la Figura 6 . Esta arquitectura describe los distintos bloques de construcción que constituyen la solución IoT (Gibert Renart, Balouek-Thomert, & Parashar, 2019). En este escenario, se hace más hincapié en el Edge computing que en los otros diseños propuestos.

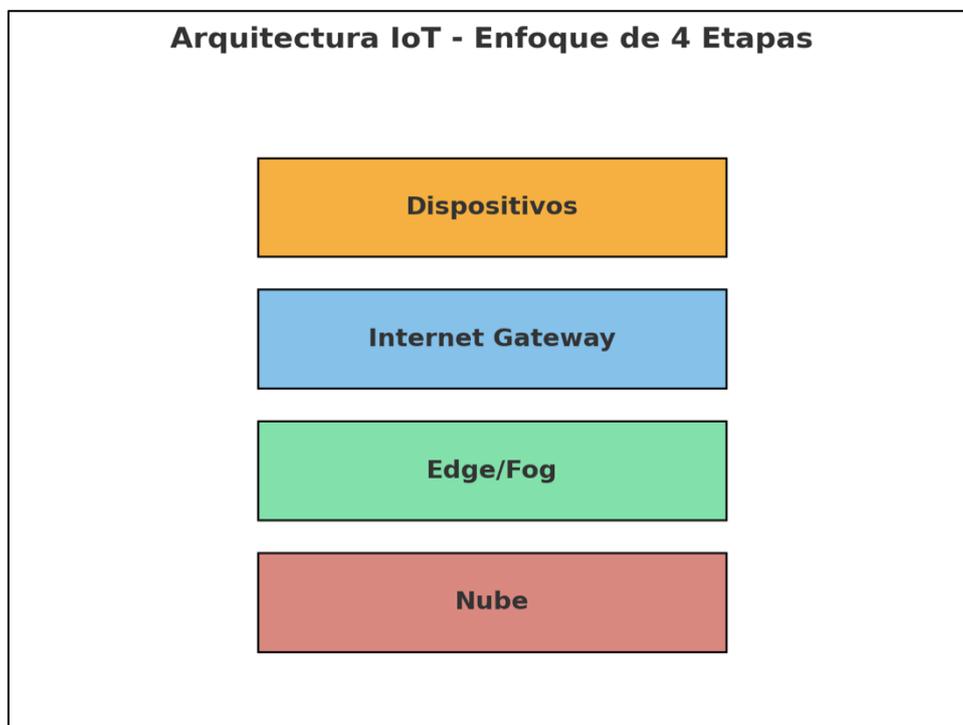


FIGURA 6 ARQUITECTURA IOT ENFOQUE DE 4 ETAPAS

Dispositivos: Esta etapa trata de los dispositivos reales en las soluciones IoT. Estos dispositivos pueden ser sensores o actuadores en la capa de percepción. Estos dispositivos generarán datos (en el caso de los sensores) o actuarán sobre su entorno (en el caso de los actuadores). Los datos producidos se convierten en forma digital y se transmiten a la etapa de pasarela de Internet. A menos que haya que tomar una decisión crítica, los datos suelen enviarse en bruto a la siguiente etapa debido a los recursos limitados de los propios dispositivos.

Pasarelas de Internet: La etapa de pasarela de internet recibirá los datos en bruto de los dispositivos y los preprocesará antes de enviarlos a la nube. Esta pasarela de Internet puede estar físicamente conectada al dispositivo o ser un dispositivo autónomo que puede comunicarse con los sensores a través de redes de baja potencia y transmitir los datos a Internet.

Edge o fog computing: Para procesar los datos lo más rápidamente posible, puede ser conveniente enviarlos al borde de la nube. Esto le permitirá analizar los datos rápidamente e identificar si algo requiere atención inmediata. Normalmente, esta capa sólo se ocuparía de los datos recientes necesarios para operaciones en las que el tiempo es un factor crítico. En esta fase también podría realizarse algún preprocesamiento para limitar los datos que se transfieren finalmente a la nube.

Nube o centro de datos: En esta etapa final, los datos se almacenan para su posterior procesamiento. Las capas de aplicación y negocio viven en esta etapa, donde los cuadros de mando o el software de gestión pueden alimentarse a través de los datos almacenados en la nube. El análisis profundo o las operaciones que consumen muchos recursos, como la formación en aprendizaje automático, tendrán lugar en esta etapa.

2.4.5 LoRa

LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance diseñada para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). A diferencia de Bluetooth Low Energy (BLE), que se centra en la comunicación a corta distancia, LoRa permite la transmisión de datos a larga distancia con un consumo de energía muy bajo. Utiliza un espectro de radio libre y puede alcanzar distancias de varios kilómetros en áreas urbanas y aún más en áreas rurales (ITA, 2023).

En el contexto de la cadena de frío, la tecnología LoRa puede ser utilizada para el monitoreo y control de la temperatura y otros parámetros ambientales en tiempo real. Esto se logra mediante el uso de sensores LoRa que recopilan datos de temperatura y humedad de los productos congelados y los transmiten a través de una red LoRa a una estación base o gateway.

Por ejemplo, los sensores LoRa pueden ser colocados en los contenedores de transporte refrigerado para recopilar datos de temperatura y humedad de los

productos. Estos datos son transmitidos a través de la red LoRa a una estación base que recopila y procesa la información. Los usuarios pueden acceder a estos datos a través de una interfaz de usuario o una plataforma de monitoreo remoto, lo que les permite supervisar y controlar la cadena de frío en tiempo real.

Además del monitoreo de temperatura y humedad, la tecnología LoRa también puede ser utilizada para el seguimiento y localización de productos a lo largo de la cadena de suministro. Los dispositivos LoRa incorporados en los productos pueden transmitir su ubicación en tiempo real, lo que permite a los usuarios rastrear los productos y garantizar su correcto manejo y entrega.

La tecnología LoRa ofrece varias ventajas para la cadena de frío. Al ser una tecnología de largo alcance y bajo consumo de energía, permite el monitoreo continuo de los productos a lo largo de grandes distancias sin la necesidad de cambiar las baterías con frecuencia. Además, la cobertura de la red LoRa puede ser escalada y extendida según las necesidades, lo que facilita la implementación en entornos de cadena de frío de gran escala.

La tecnología LoRa proporciona una solución eficiente y confiable para el monitoreo y control de la temperatura y otros parámetros ambientales en la cadena de frío. Su capacidad de comunicación a larga distancia, bajo consumo de energía y escalabilidad hacen de LoRa una opción prometedora para mejorar la eficiencia y la calidad en la industria de la cadena de frío.

2.4.6 GATEWAY IOT

De manera general un Gateway o pasarela de red se define como un dispositivo o nodo que conecta redes dispares traduciendo las comunicaciones de un protocolo a otro.

Una pasarela de Internet de las cosas (IoT) es un dispositivo físico o un programa de software que sirve de punto de conexión entre la nube y los controladores, sensores y dispositivos inteligentes. Todos los datos que circulan entre los dispositivos IoT y la nube pasan por un gateway IoT, que puede ser un dispositivo de hardware dedicado o un programa de software. Un gateway IoT también puede denominarse pasarela inteligente o nivel de control. (Posey, 2022)

Un Gateway IoT actúa como un router de red, enrutando los datos entre los

dispositivos IoT y la nube. Al principio, la mayoría de los dispositivos de pasarela solo enviaban tráfico en una dirección: de los dispositivos IoT a la nube. Ahora, es habitual que un dispositivo de pasarela gestione tanto el tráfico entrante como el saliente. Los flujos de tráfico saliente se utilizan para enviar datos IoT a la nube, mientras que el tráfico entrante se utiliza para tareas de gestión de dispositivos, como la actualización del firmware del dispositivo o accionar actuadores.

Algunos Gateway IoT hacen algo más que enrutar el tráfico. Un Gateway puede utilizarse a veces para preprocesar esos datos localmente en el extremo antes de enviarlos a la nube. Al hacerlo, el dispositivo puede duplicar, resumir o agregar datos para reducir el volumen de datos que deben enviarse a la nube. Esto puede tener un gran efecto en los tiempos de respuesta y en los costes de transmisión de la red.

Un Gateway IoT suele ser más complejo que un router Wi-Fi es debido a que los dispositivos IoT utilizan varios protocolos diferentes. Algunos de estos protocolos son Z-Wave, Bluetooth Low Energy y Zigbee. Como tal, un Gateway IoT puede necesitar soportar una variedad de protocolos para dar servicio a todos los dispositivos IoT de una organización.

Además de admitir estos protocolos, la pasarela debe ser capaz de enrutar cada tipo de tráfico IoT al destino adecuado. Los datos de una colección de sensores industriales podrían tener que enviarse a una base de datos en la nube de AWS, y al mismo tiempo llevar un registro de eventos en una base de datos local.

Otra razón por la que las puertas de enlace IoT pueden ser más complejas que los routers Wifi es porque las puertas de enlace IoT pueden necesitar almacenar datos en caché localmente en caso de un corte de Internet o en caso de que la puerta de enlace se vea inundada con más datos de los que puede manejar.

Para el presente trabajo de investigación de creara un Gateway con una placa de desarrollo Heltec LoRa WiFi 32 v2, estaremos obteniendo los datos de los sensores a través de LoRa y estos datos serán direccionados a través de Wifi a un servidor MQTT remoto, el haber elegido la placa de desarrollo es una gran ventaja ya que soporta ambos protocolos necesarios para la realización del proyecto.

El Gateway es un componente clave en la cadena de frío para la transmisión de datos en tiempo real y la monitorización remota de los parámetros ambientales. En este caso, el Gateway específico está diseñado para recolectar los datos de

temperatura y humedad de los sensores LoRa instalados en los contenedores de transporte refrigerado.

Una vez que se recopilan los datos de los sensores LoRa, el Gateway procesará los datos y los identificará según la dirección MAC para asegurar que los datos correspondan a los sensores correctos. Luego, los datos se convertirán en formato JSON para ser transmitidos a través de las librerías MQTT, que son ampliamente utilizadas para la transmisión de datos de IoT.

La transmisión de los datos se realizará mediante la tecnología Wifi, lo que permitirá que los datos se transmitan de manera rápida y fiable al servidor MQTT. Una vez que los datos llegan al servidor MQTT, pueden ser procesados y analizados para garantizar que se mantengan las condiciones adecuadas de la cadena de frío en todo momento.

Con esta breve descripción nos damos cuenta de la gran importancia que tiene el Gateway para este proyecto y para la mayoría de los desarrollos de soluciones IoT. Se realizará la adecuación de la información al formato requerido antes del envío y la definición del tiempo de muestreo son aspectos clave para garantizar la eficiencia y precisión del monitoreo y control de la cadena de frío.

En cuanto a la placa de desarrollo Heltec LoRa WiFi 32 v2, es una plataforma IoT de bajo costo y bajo consumo de energía que combina Wi-Fi y LoRa. Es una opción popular para soluciones de IoT debido a su versatilidad, bajo costo y fácil integración con dispositivos y sensores.

Por otro lado, el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería para dispositivos IoT que se basa en el modelo publish-subscribe. Es decir, los dispositivos publican mensajes en un "tema" y los suscriptores interesados en ese tema reciben los mensajes. Esto permite una comunicación eficiente y escalable entre dispositivos IoT y servidores, lo que lo convierte en una buena opción para la solución de monitoreo y control de la cadena de frío. Además, MQTT tiene una alta eficiencia energética y soporta la transmisión de datos en tiempo real.

2.4.7 CHIP DE DESARROLLO IOT HELTEC LORA WIFI 32 V2

Heltec LoRa WiFi 32 V2 es una placa de desarrollo diseñada específicamente para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) que requieren conectividad de largo alcance (Heltec Automation, s.f.), bajo consumo energético y capacidad de procesamiento integrado. Fabricada por Heltec Automation, esta tarjeta combina un microcontrolador ESP32 de doble núcleo Tensilica LX6 con tecnología LoRa (Long Range), WiFi y Bluetooth, convirtiéndola en una herramienta ideal para sistemas de monitoreo y control a gran escala.

En su núcleo, el microcontrolador ESP32 opera a una velocidad de reloj de hasta 240 MHz, ofreciendo un rendimiento robusto para manejar múltiples tareas simultáneamente. La integración de LoRa permite una comunicación eficiente a distancias de hasta varios kilómetros, dependiendo del entorno, utilizando la banda ISM de 915 MHz (en América) o 868 MHz (en Europa), cumpliendo con los estándares globales de transmisión de datos. Este módulo LoRa cuenta con un chipset SX1276, conocido por su alta sensibilidad y robustez frente a interferencias. Además, la placa incorpora una pantalla OLED de 0.96 pulgadas que permite visualizar información en tiempo real, como datos de sensores, estado de conexión y configuraciones del sistema. Su diseño compacto y versátil incluye múltiples interfaces como GPIO, ADC y DAC, junto con conectividad WiFi y Bluetooth BLE, lo que la hace adecuada para diversas aplicaciones como monitoreo ambiental, agricultura inteligente y seguimiento de activos.

El Heltec LoRa WiFi 32 V2 ha pasado por rigurosas pruebas de cumplimiento normativo para garantizar su operación segura en diferentes países. Estas pruebas incluyen la certificación para emisiones no esenciales, potencia máxima de salida, densidad espectral y cumplimiento de ancho de banda, asegurando que su desempeño sea óptimo y acorde con las regulaciones internacionales.

Una ventaja significativa es su compatibilidad con entornos de programación como el IDE de Arduino, lo que facilita su uso para desarrolladores con diferentes niveles de experiencia. Además, cuenta con librerías específicas para la configuración del módulo LoRa y la pantalla OLED, simplificando la implementación de soluciones complejas.

En este proyecto de investigación, la Heltec LoRa WiFi 32 V2 se utiliza como Gateway para recolectar datos de sensores DHT22 y enviarlos al servidor MQTT mediante el protocolo LoRa. La tarjeta está configurada para recibir las mediciones

de temperatura y humedad, procesarlas localmente y transmitir las al servidor en tiempo real. Gracias a su arquitectura de bajo consumo y su capacidad de transmitir datos a largas distancias, esta tarjeta juega un papel crucial en garantizar el monitoreo continuo y confiable de las condiciones de la cadena de frío.

Heltec LoRa WiFi 32 V2 combina las mejores características de conectividad LoRa, procesamiento ESP32 y funcionalidad integrada, lo que la posiciona como una opción sobresaliente para aplicaciones IoT exigentes.

2.4.8 PROTOCOLO MQTT

El protocolo MQTT se creó en 1999 para su uso en la industria del petróleo y el gas. Los ingenieros necesitaban un protocolo con un ancho de banda mínimo y una pérdida de batería mínima para supervisar los oleoductos vía satélite. Inicialmente, el protocolo se conocía como Message Queuing Telemetry Transport debido al producto de IBM MQ Series que dio soporte a su fase inicial (Banks, Briggs, Borgendale, & Gupta, 2019). En 2010, IBM lanzó MQTT 3.1 como un protocolo libre y abierto para que cualquiera lo implementara, que luego se presentó, en 2013, al organismo de especificación Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS) para su mantenimiento. En 2019, OASIS publicó una versión 5 actualizada de MQTT. Ahora MQTT ya no es un acrónimo, sino que se considera el nombre oficial del protocolo.

MQTT es un protocolo de mensajería basado en estándares, o conjunto de reglas, que se utiliza para la comunicación entre máquinas. Los sensores inteligentes, los wearables y otros dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) suelen tener que transmitir y recibir datos a través de una red con recursos limitados y un ancho de banda limitado. Estos dispositivos IoT utilizan MQTT para la transmisión de datos, ya que es fácil de implementar y puede comunicar datos IoT de manera eficiente. MQTT permite la mensajería entre dispositivos y la nube, y de la nube al dispositivo. (AWS, 2023)

El protocolo MQTT se ha convertido en un estándar para la transmisión de datos IoT porque ofrece las siguientes ventajas:

Ligero y eficiente. La implementación de MQTT en el dispositivo IoT requiere recursos mínimos, por lo que puede utilizarse incluso en microcontroladores pequeños. Por ejemplo, un mensaje de control MQTT mínimo puede tener tan solo dos bytes de datos. Las cabeceras de los mensajes MQTT también son pequeñas, por lo que se puede optimizar el ancho de banda de la red.

Escalable. La implementación de MQTT requiere una cantidad mínima de código que consume muy poca energía en las operaciones. El protocolo también tiene características integradas para soportar la comunicación con un gran número de dispositivos IoT. Por lo tanto, puede implementar el protocolo MQTT para conectarse con millones de estos dispositivos.

Fiable. Muchos dispositivos IoT se conectan a través de redes celulares poco fiables con poco ancho de banda y alta latencia. MQTT incorpora funciones que reducen el tiempo que tarda el dispositivo IoT en volver a conectarse con la nube. También define tres niveles diferentes de calidad de servicio para garantizar la fiabilidad de los casos de uso de IoT: como máximo una vez (0), como mínimo una vez (1) y exactamente una vez (2).

Seguridad. MQTT facilita a los desarrolladores el cifrado de mensajes y la autenticación de dispositivos y usuarios mediante modernos protocolos de autenticación, como OAuth, TLS1.3, certificados gestionados por el cliente, etc.

Buena compatibilidad. Varios lenguajes como Python cuentan con un amplio soporte para la implementación del protocolo MQTT. Por lo tanto, los desarrolladores pueden implementarlo rápidamente con una codificación mínima en cualquier tipo de aplicación.

El protocolo MQTT implementa el modelo publish/subscribe definiendo clientes y brokers como se indica a continuación.

Un cliente MQTT es cualquier dispositivo, desde un servidor hasta un microcontrolador, que ejecute una librería MQTT. Si el cliente está enviando mensajes, actúa como publicador, y si está recibiendo mensajes, actúa como receptor. Básicamente, cualquier dispositivo que se comunique mediante MQTT a través de una red puede denominarse dispositivo cliente MQTT.

El broker MQTT es el sistema backend que coordina los mensajes entre los

diferentes clientes. Las responsabilidades del broker incluyen recibir y filtrar los mensajes, identificar a los clientes suscritos a cada mensaje y enviarles los mensajes. También es responsable de otras tareas como:

Autorizar y autenticar a los clientes MQTT

Pasar mensajes a otros sistemas para su posterior análisis

Gestión de mensajes perdidos y sesiones de clientes

Conexión MQTT

Los clientes y los brokers comienzan a comunicarse mediante una conexión MQTT. Los clientes inician la conexión enviando un mensaje CONNECT al broker MQTT. El broker confirma que se ha establecido una conexión respondiendo con un mensaje CONNACK. Tanto el cliente MQTT como el broker necesitan una pila TCP/IP para comunicarse. Los clientes nunca se conectan entre sí, sólo con el broker.

A continuación, se ofrece una descripción general del funcionamiento de MQTT.

Un cliente MQTT establece una conexión con el broker MQTT. Una vez conectado, el cliente puede publicar mensajes, suscribirse a mensajes específicos o hacer ambas cosas. Cuando el broker MQTT recibe un mensaje, lo reenvía a los suscriptores que estén interesados.

Topic MQTT, el término 'topic' se refiere a las palabras clave que el broker MQTT utiliza para filtrar los mensajes para los clientes MQTT. Los temas se organizan jerárquicamente, de forma similar a un directorio de archivos o carpetas. Por ejemplo, considere un sistema doméstico inteligente que opera en una casa de varios niveles que tiene diferentes dispositivos inteligentes en cada piso. En ese caso, el broker MQTT puede organizar los temas como: proyecto/fabrica/taller/temperatura

Publicación MQTT. Los clientes MQTT publican mensajes que contienen el tema y los datos en formato byte. El cliente determina el formato de los datos, como

datos de texto, datos binarios, XML o archivos JSON. Por ejemplo, una lámpara del sistema doméstico inteligente puede publicar un mensaje sobre el tema taller/temperatura.

Suscripción MQTT. Los clientes MQTT envían un mensaje SUBSCRIBE al broker MQTT, para recibir mensajes sobre temas de interés. Este mensaje contiene un identificador único y una lista de suscripciones. Por ejemplo, la aplicación de hogar inteligente de tu teléfono quiere mostrar cuántas luces hay encendidas en tu casa. Se suscribirá al tema luz y aumentará el contador de todos los mensajes encendidos.

La aplicación del protocolo MQTT en soluciones IoT resulta muy conveniente, ya que permite organizar de manera eficiente los diferentes dispositivos y sensores en una red de Internet de las cosas. Se puede publicar constantemente en el broker IoT y cada suscriptor solo recibirá la información a la que esté suscrito. Este enfoque de publicación y suscripción reduce el flujo de datos, lo que es especialmente útil en condiciones de ancho de banda limitado o cuando la suscripción es monetizada en función de la cantidad de datos consumidos.

Para nuestra solución IoT, se ha creado un broker MQTT personalizado en una máquina virtual alojada en Google Cloud. Esto nos permite tener un control total sobre el número de conexiones, el uso del procesador y la restricción de dispositivos, lo que facilita la administración de nuestra red de dispositivos IoT. Hemos elegido Google Cloud debido a la flexibilidad de escalabilidad que ofrece. Si en algún momento el número de dispositivos aumenta significativamente, podemos asignar más recursos a nuestro servidor o incluso crear otro servidor que funcione en paralelo. En el siguiente capítulo, se detallarán los pasos que se han seguido para crear el broker MQTT y cómo se administran los dispositivos dentro del mismo.

2.5 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

En este capítulo, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de los fundamentos teóricos, conceptos clave y tecnologías subyacentes que conforman la solución IoT propuesta para el control y monitoreo de la cadena de frío. Este análisis ha permitido identificar y comprender los elementos críticos necesarios para desarrollar una solución robusta y eficiente.

Se ha destacado la relevancia de la tecnología **LoRa**, reconociéndola como un pilar fundamental debido a su capacidad para proporcionar conectividad de largo alcance y bajo consumo energético. Estas características la posicionan como una opción ideal para aplicaciones IoT en entornos de cadena de frío, donde la conservación de energía y la cobertura en grandes áreas son esenciales. Además, se ha enfatizado cómo LoRa, combinada con redes LoRaWAN, permite la gestión eficiente de múltiples dispositivos, garantizando la integridad y continuidad en la transmisión de datos.

El protocolo **MQTT** ha sido identificado como un componente clave en la arquitectura IoT debido a su capacidad para facilitar una comunicación fluida y organizada entre los sensores, actuadores y sistemas back-end. Este protocolo no solo asegura la transmisión de datos en tiempo real, sino que también soporta mecanismos de publicación y suscripción, lo que permite un manejo eficiente de grandes volúmenes de información.

Asimismo, se ha analizado la importancia de contar con un **servidor MQTT**, alojado en una plataforma confiable como **Google Cloud**. Esta elección ofrece beneficios significativos, como la capacidad de escalar según la demanda, un control total sobre las conexiones y la gestión eficiente de los dispositivos conectados a la red LoRa. Google Cloud no solo facilita la administración de la infraestructura, sino que también garantiza la seguridad y fiabilidad del sistema, elementos cruciales en una solución destinada a sectores como la industria alimentaria y farmacéutica.

Además de los aspectos técnicos, este capítulo ha subrayado la importancia de una integración adecuada entre los diferentes componentes de la solución. La interoperabilidad entre LoRa, MQTT y Google Cloud constituye la base para garantizar el éxito de la solución IoT propuesta. La combinación de estas

tecnologías no solo permite un monitoreo continuo de variables críticas como temperatura y humedad, sino que también proporciona herramientas para predecir y prevenir posibles fallos en la cadena de frío.

Por último, se han establecido las bases para la implementación práctica de la solución, identificando las herramientas, protocolos y plataformas más adecuados. Este marco teórico no solo guía la siguiente fase del proyecto, que implica la configuración del servidor MQTT y la administración de los dispositivos en la red LoRa, sino que también sienta un precedente para futuros desarrollos en el campo de IoT aplicado a cadenas de frío y otras áreas sensibles.

En resumen, este capítulo ha proporcionado un sustento teórico sólido que respalda la viabilidad técnica de la solución IoT propuesta. El entendimiento profundo de los componentes y su integración refuerzan la importancia de una planificación cuidadosa y estratégica para garantizar el éxito del proyecto en las siguientes etapas.

CAPÍTULO III HARDWARE Y PROTOCOLOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presentará una descripción detallada de cada una de las partes que conforman la solución completa de IoT para el control y monitoreo de la cadena de frío. Se comenzará con la selección meticulosa de los sensores adecuados para la medición precisa de la temperatura y humedad en la cadena de frío. Se considerarán aspectos como la precisión, resolución, frecuencia de muestreo, comunicación inalámbrica y duración de la batería para garantizar un desempeño óptimo.

A continuación, se abordará la elección del hardware necesario para el desarrollo de la solución, centrándose en el chip de desarrollo ESP-32 y sus características principales. Se brindará un detallado proceso de programación de la placa de desarrollo y la configuración de los sensores, así como el envío de los datos a través del protocolo MQTT.

Asimismo, se describirán en profundidad los protocolos de comunicación utilizados para la interconexión de los distintos elementos de la solución. Esto incluirá la comunicación LoRa entre los sensores y el Gateway, así como la comunicación entre el Gateway y el servidor MQTT. Se explicará minuciosamente el funcionamiento del protocolo MQTT, sus características esenciales y su implementación para la creación del Broker propio en la nube.

Finalmente, se abordará la creación de la base de datos donde se almacenarán los datos provenientes de los sensores, permitiendo su acceso posterior para su análisis y visualización. Se explicará la elección del proveedor de servicios externos y la integración realizada con el Broker MQTT.

El objetivo principal de este capítulo es brindar un enfoque paso a paso del diseño y desarrollo de la solución completa de IoT para el control y monitoreo de la cadena de frío. Desde la selección de los sensores y el hardware, hasta la configuración de los protocolos de comunicación y la creación de la base de datos, se proporcionará una guía exhaustiva para garantizar la implementación exitosa de la solución propuesta.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el diseño experimental de la solución IoT para el control y monitoreo de la cadena de frío, es fundamental considerar una serie de aspectos y elementos clave. Se empleará LoRa (Long Range), una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo de energía, que resulta ideal para aplicaciones IoT en entornos extensos y con baja infraestructura de red.

En primer lugar, la selección de los sensores adecuados para medir la temperatura y la humedad en distintos puntos de la cadena de frío será crucial. Se buscarán sensores compatibles con la tecnología LoRa y que ofrezcan la precisión y resolución necesarias para obtener datos confiables.

En cuanto al hardware, se considerará el uso de dispositivos LoRaWAN como el módulo de desarrollo LoRaWAN basado en el chip ESP32. Esta elección permitirá una fácil programación y configuración de los sensores, así como una conexión eficiente con la red LoRa.

La comunicación entre los sensores y el Gateway se realizará a través de la tecnología LoRa, aprovechando su alcance extendido y su capacidad de penetrar obstáculos físicos. El Gateway, a su vez, se encargará de transmitir los datos a través de protocolos de comunicación como MQTT y LoRa hacia un servidor remoto. Para la creación del servidor MQTT, se considerará la implementación de un broker que se encargue de la gestión de los mensajes y la comunicación entre los dispositivos LoRa. Esta infraestructura permitirá la organización y el enrutamiento eficiente de los datos en la red LoRa.

Asimismo, se configurarán servicios externos que permitan la visualización y monitorización en tiempo real de los datos recopilados. Se utilizarán herramientas y plataformas compatibles con LoRa y MQTT.

Por último, se creará una base de datos que almacene los datos recopilados por los sensores, lo cual permitirá su análisis posterior y la generación de informes. Se emplearán bases de datos escalables y eficientes, como MongoDB, que se adapten a las necesidades de almacenamiento y consulta de grandes volúmenes de datos generados por la solución IoT.

El diseño experimental de la solución IoT para el control y monitoreo de la cadena

de frío involucra la selección de sensores LoRa, el uso de dispositivos LoRaWAN, la implementación de un servidor MQTT basado en LoRaWAN, la configuración de servicios externos compatibles y la creación de una base de datos para el almacenamiento y análisis de los datos recopilados. Estos elementos en conjunto permitirán desarrollar una solución completa y funcional que asegure el monitoreo preciso y eficiente de la temperatura y humedad en la cadena de frío.

3.2.1 SELECCIÓN DE LOS SENSORES

La cadena de frío se refiere al sistema de refrigeración que mantiene los productos refrigerados o congelados dentro de un rango de temperatura específico, desde su origen hasta su consumo final, para garantizar su calidad. Uno de los mayores desafíos en este sistema es el monitoreo preciso de la temperatura y la humedad durante el tránsito. Para abordar este reto, es crucial emplear sensores de temperatura y humedad confiables y bien calibrados que aseguren que las condiciones se mantengan dentro de los límites preestablecidos.

Los sensores de temperatura y humedad DHT22, aunque ampliamente utilizados, pueden variar en la precisión de sus mediciones dependiendo de las condiciones ambientales. Esto se debe a que cada sensor tiene un coeficiente de calibración único, almacenado en su memoria OTP (One-Time Programmable), que puede influir en la exactitud de las mediciones. Por lo tanto, la calibración adecuada de estos sensores es fundamental para obtener datos confiables en tiempo real durante el transporte. Una calibración precisa permite prevenir el sobrecalentamiento o el enfriamiento excesivo de los productos y facilita la toma de decisiones informadas al visualizar los datos recolectados de forma clara y precisa. Además, se reconoce que los coeficientes de calibración pueden variar incluso entre sensores del mismo fabricante (Beamex, s.f.), y que las condiciones ambientales internas y externas cambian continuamente durante el transporte. Por ello, es indispensable realizar un muestreo adecuado de las variables de temperatura y humedad para analizarlas estadísticamente. Esto no solo asegura un funcionamiento confiable de los sensores, sino que también permite identificar posibles problemas y realizar ajustes oportunos.

Para validar la confiabilidad de los sensores utilizados, se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

1. Se recopilaron muestras simultáneas de dos sensores DHT22 de temperatura y humedad del mismo fabricante.
2. La conexión física de los sensores se realizó a través de una tarjeta Arduino Uno, que envió los datos recopilados mediante el puerto serial a MATLAB.
3. Se definió un tiempo de muestreo durante el cual los datos se visualizaron gráficamente en tiempo real y se almacenaron en un archivo .CSV para su análisis posterior.
4. Los datos almacenados fueron procesados estadísticamente, generando información precisa sobre la exactitud y variabilidad de las mediciones realizadas por los sensores.

El análisis de estos datos permitió determinar la variabilidad entre los sensores en condiciones idénticas. Esto proporcionó información clave sobre la confiabilidad y el correcto funcionamiento de los sensores. En caso de identificar sensores con inconsistencias, se podrá descartar su uso en proyectos IoT relacionados con la cadena de frío, garantizando así la calidad y efectividad del monitoreo en tiempo real.

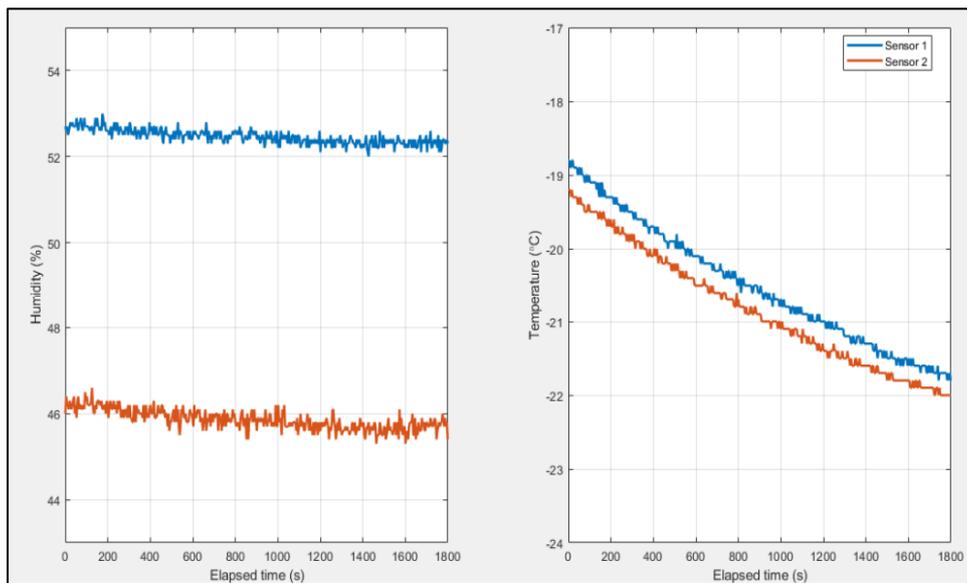


FIGURA 7 MUESTRAS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA CAPTURADAS

La Figura 7 muestra claramente que los datos capturados mantienen un comportamiento consistente a lo largo del tiempo. Sin embargo, se observa una diferencia notable que persiste durante todo el período, siendo el sensor 1 el que registra temperaturas más bajas y niveles de humedad más altos en comparación con el sensor 2.

3.2.1.1 REGRESIÓN LINEAL PARA VALIDAR SENSORES

Para evaluar la confiabilidad de estos resultados, se ha utilizado la regresión lineal, que se define de la siguiente manera:

Goodness of fit (Bondad de ajuste):

- Suma de los errores cuadráticos (SSE): 2.246
- Coeficiente de determinación (R-cuadrado): 0.9928
- Error cuadrático medio (RMSE): 0.07112

El modelo de regresión lineal simple se compone únicamente de dos variables estadísticas, denominadas X (Sensor 1) e Y (Sensor 2). Esta técnica asume que la relación entre estas dos variables es lineal, donde X es la variable independiente o explicativa, y Y es la variable dependiente o de respuesta. Para la regresión lineal simple, se parte de la suposición de que X e Y están relacionadas mediante una función lineal, siendo p_1 y p_2 los estimadores de esta relación.

El coeficiente de determinación, también conocido como R-cuadrado, evalúa la dispersión de los puntos de datos alrededor de la línea de regresión ajustada (Campbell, 2020). Representa la proporción de la variabilidad total de los datos que puede ser explicada por el modelo de regresión lineal. Valores más altos de R-cuadrado indican una menor diferencia entre los datos observados y los valores ajustados por el modelo.

El error cuadrático medio (RMSE) es una medida de la dispersión de los residuos, que son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el

modelo de regresión. Es una forma de evaluar la concentración de los datos alrededor de la línea de regresión ajustada. El RMSE se utiliza comúnmente en diversas disciplinas, como la climatología, la previsión y el análisis de regresión, para verificar la precisión de los resultados experimentales.

En resumen, el análisis de regresión lineal realizado en este estudio proporciona información sobre la relación entre los datos capturados por el sensor 1 y el sensor 2. Los resultados obtenidos indican una diferencia significativa en las mediciones de temperatura y humedad, respaldada por la bondad de ajuste del modelo de regresión lineal. El coeficiente de determinación (R-cuadrado) y el error cuadrático medio (RMSE) ofrecen una evaluación cuantitativa de la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos a través de la regresión lineal, tal como se muestra en la Figura 8.

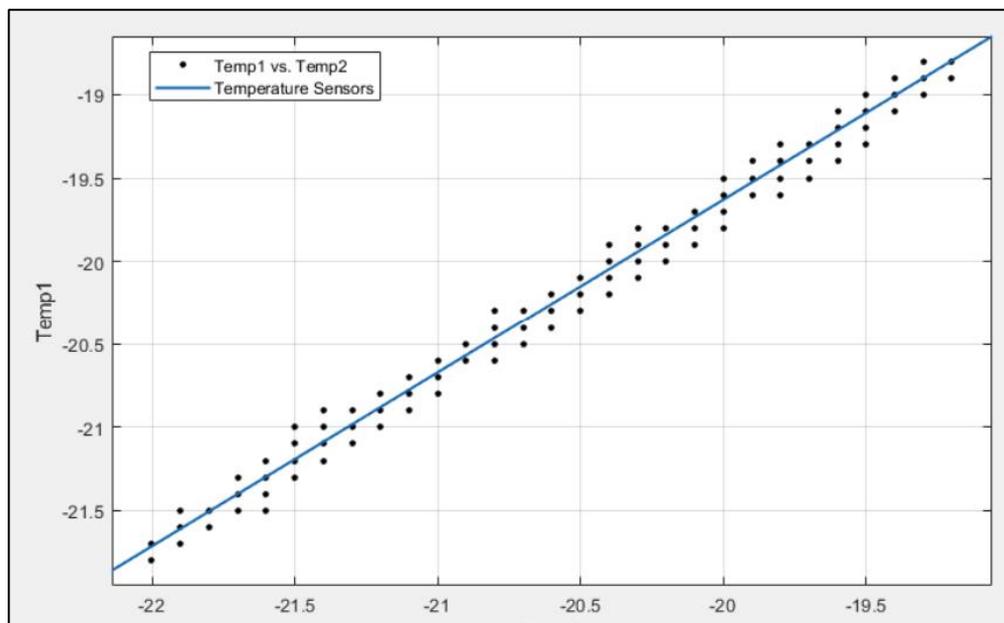


FIGURA 8 MODELO DE REGRESION LINEAL SIMPLE

En el resultado que se muestra para p , podemos ver que las variables predictoras son significativas para ambos valores de p , por lo que se corrobora su correlación. SSE es la suma del error de los cuadrados. El error es la diferencia entre el valor observado y el valor predicho, donde observamos el valor de SSE con un valor mínimo, en este caso el poder de la estimación de la regresión es muy bueno.

Mediante la regresión lineal aplicada a las variables capturadas por los sensores

se comprueba la correlación de ambas, sin embargo, siempre hay una diferencia que siempre estará presente debido al coeficiente de calibración único de cada sensor.

3.2.1.2 SUAVIZADO EN MATLAB USANDO LA FUNCIÓN "FIT"

El suavizado de los datos en tiempo real es una técnica útil para mejorar la calidad de la información obtenida. Permite eliminar ruido o fluctuaciones no deseadas que puedan estar presentes en los datos originales, lo que facilita la interpretación y detección de patrones más claros.

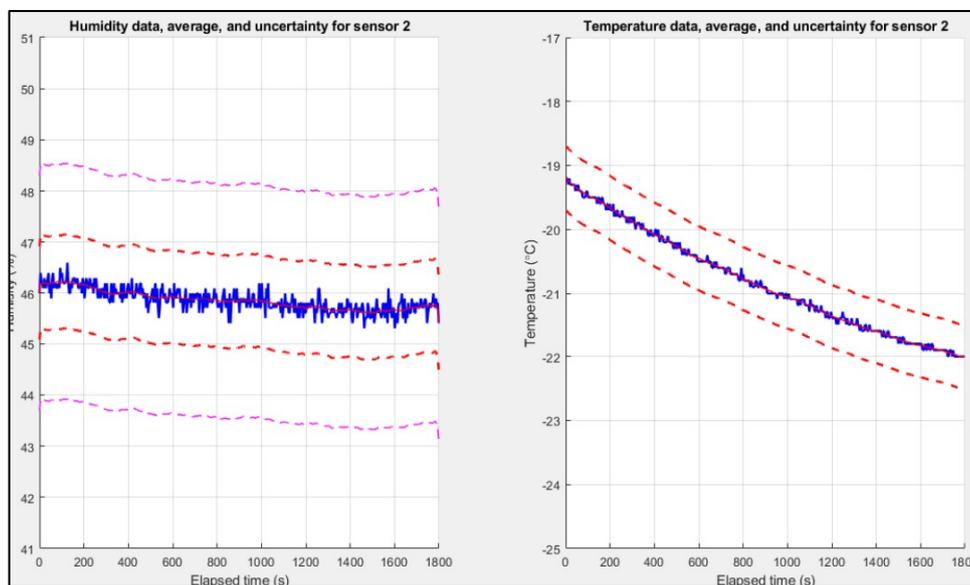


FIGURA 9 SUAVIZADO Y RANGOS DE PRECISIÓN AGREGADOS

En la Figura 9 se presenta el proceso de suavizado en tiempo real utilizando la función "fit" en MATLAB. Este proceso es utilizado para obtener una representación más suave de los datos, lo que facilita la visualización y análisis de las tendencias. Además, se muestran los límites superiores e inferiores de exactitud para cada sensor, lo cual proporciona una referencia de la precisión de las mediciones.

En el contexto de nuestra investigación, tengo la intención de utilizar la corrección de datos en tiempo real para obtener una única variable altamente confiable a partir de la información de varios sensores simultáneos. Esta corrección de datos consistirá en combinar y procesar los datos provenientes de diferentes sensores con el objetivo de obtener una medida más precisa y confiable.

La función fit de MATLAB es una herramienta potente utilizada para realizar ajustes de datos mediante diversos modelos matemáticos (MathWorks, s.f.). En el contexto del suavizado de datos, esta función permite representar un conjunto de datos mediante una curva o superficie ajustada que elimina el ruido inherente a las mediciones, facilitando la interpretación de las tendencias subyacentes.

La función "fit" de MATLAB funciona de la siguiente manera:

1. Entrada de datos: La función recibe dos vectores principales:
 - Eje X (variables independientes): Representa el tiempo, la posición o cualquier otra dimensión en función de la cual se recolectan los datos.
 - Eje Y (variables dependientes): Corresponde a los valores medidos, como la temperatura o la humedad.
2. Selección del modelo de ajuste: MATLAB permite especificar el modelo matemático que se desea utilizar para el ajuste, para este ejemplo se utilizó un polinomio cuadrático.
3. Optimización: La función ajusta los parámetros del modelo seleccionado para minimizar la diferencia entre los datos originales y la curva ajustada. Este proceso utiliza técnicas de minimización de error, como la suma de cuadrados mínimos.
4. Salida: La salida es un objeto que contiene:
 - La ecuación matemática ajustada.
 - Los parámetros estimados.
 - Información estadística del ajuste, como el coeficiente de determinación (R^2) que indica qué tan bien se ajusta el modelo a los datos.

En el monitoreo de variables críticas como la temperatura y la humedad, los datos recolectados en tiempo real pueden contener fluctuaciones aleatorias debido a interferencias externas, limitaciones de los sensores o cambios abruptos en las condiciones ambientales. La función fit se utiliza para:

- Eliminar el ruido: Genera una curva suavizada que filtra las variaciones no deseadas y resalta las tendencias generales de los datos.

- Visualizar tendencias: Proporciona una representación gráfica más clara y comprensible, que facilita la detección de patrones anómalos o puntos críticos.
- Analizar precisión: Al comparar los datos ajustados con los límites de exactitud superior e inferior de los sensores, se puede evaluar la confiabilidad de las mediciones

3.2.2 SELECCIÓN DEL GATEWAY

El uso del microcontrolador ESP32 LoRa como gateway en este proyecto de IoT para el monitoreo de la cadena de frío ofrece varias ventajas y justificaciones importantes.

En primer lugar, el ESP32 LoRa combina las funcionalidades del microcontrolador ESP32 con la capacidad de comunicación de largo alcance y baja potencia de LoRa (Long Range). Esta combinación permite establecer una conexión inalámbrica confiable y de largo alcance entre los dispositivos de la cadena de frío, como los sensores y el servidor MQTT, incluso a distancias significativas. La comunicación LoRa es ideal para aplicaciones en las que se requiere transmitir datos a través de largas distancias, como en el monitoreo de la cadena de frío en entornos logísticos extensos.

Además, el ESP32 LoRa ofrece una eficiente administración de energía, lo que es esencial en aplicaciones IoT que requieren una duración prolongada de la batería. El microcontrolador es capaz de operar en modos de bajo consumo, lo que permite un menor consumo de energía durante la transmisión y recepción de datos. Esto es especialmente relevante en el contexto de la cadena de frío, donde se necesita un monitoreo constante y prolongado para garantizar la integridad de los productos.

Otra ventaja del ESP32 LoRa es su versatilidad y capacidad de procesamiento. El microcontrolador cuenta con un potente procesador de doble núcleo y una cantidad adecuada de memoria, lo que le permite ejecutar algoritmos y tareas complejas en tiempo real. Esto es crucial para realizar el procesamiento y análisis de datos en el gateway, lo que puede incluir la agregación de datos de múltiples sensores, la validación de datos y la toma de decisiones basadas en reglas específicas.

Además, el ESP32 LoRa cuenta con una amplia comunidad de desarrolladores y una gran cantidad de recursos disponibles, lo que facilita su implementación y la resolución de posibles problemas o desafíos técnicos. Esto también implica que existen numerosas bibliotecas y ejemplos de código disponibles para aprovechar al máximo las capacidades del microcontrolador en proyectos de IoT.

El uso del microcontrolador ESP32 LoRa como gateway en este proyecto de IoT para el monitoreo de la cadena de frío se justifica por su capacidad de comunicación de largo alcance y baja potencia, su eficiente administración de energía, su versatilidad y capacidad de procesamiento, y el amplio soporte de la comunidad de desarrolladores. Estas características hacen del ESP32 LoRa una elección ideal para garantizar una conectividad confiable y eficiente entre los dispositivos de la cadena de frío y el servidor MQTT, proporcionando una solución robusta y escalable para el monitoreo de temperatura y otros parámetros críticos en tiempo real.

3.2.2.1 PROGRAMACIÓN DEL GATEWAY

Arduino IDE es un entorno de desarrollo integrado basado en el lenguaje de programación C++, diseñado específicamente para programar microcontroladores Arduino y otros dispositivos compatibles.

Arduino IDE proporciona una interfaz sencilla y amigable que permite a los desarrolladores escribir y cargar el firmware en los microcontroladores de manera fácil y rápida (Herrero Herranz & Sánchez Allende, 2015). Además, cuenta con una amplia comunidad de usuarios que comparten código y librerías, lo que facilita el desarrollo de proyectos de IoT.

El código del gateway se divide en varias secciones, cada una con una función específica en el proceso de control y monitoreo de la cadena de frío, como se muestra en la Figura 10. A continuación, se explicarán las principales partes del código:

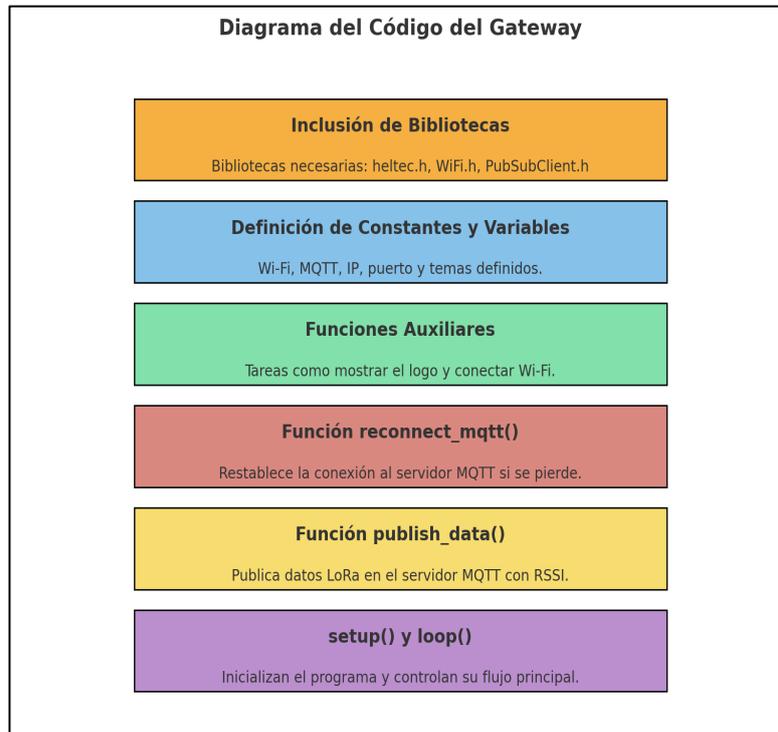


FIGURA 10 DIAGRAMA DEL CODIGO DEL GATEWAY ARDUINIO IDE

1. **Inclusión de bibliotecas:** Se incluyen las bibliotecas necesarias para el funcionamiento del programa. En este caso, se utilizan las bibliotecas "heltec.h" para la configuración del microcontrolador ESP32 LoRa, "WiFi.h" para la conexión a la red Wi-Fi y "PubSubClient.h" para la comunicación MQTT.
2. **Definición de constantes y variables:** Se definen las constantes y variables utilizadas en el programa. En este caso, se definen el nombre y la contraseña de la red Wi-Fi a la que se conectará el gateway, la dirección IP y el puerto del servidor MQTT al que se enviarán los datos, y el tema MQTT al que se publicarán los datos.
3. **Funciones auxiliares:** Se definen algunas funciones auxiliares que cumplen tareas específicas. Por ejemplo, la función "logo()" muestra el logo en la pantalla OLED al inicio del programa, y la función "setup_wifi()" se encarga de establecer la conexión a la red Wi-Fi.
4. **Función "reconnect_mqtt()":** Esta función se encarga de restablecer la conexión al servidor MQTT en caso de que se pierda. Utiliza un ID de cliente aleatorio para conectarse al servidor y muestra mensajes en la pantalla OLED indicando el estado de la conexión.

5. Función "publish_data()": Esta función se encarga de publicar los datos recibidos del LoRa en el servidor MQTT. Verifica si hay conexión al servidor MQTT y, si no está conectado, llama a la función "reconnect_mqtt()" para restablecerla. Luego, construye un mensaje con los datos recibidos y el valor RSSI (Received Signal Strength Indication) y lo publica en el tema MQTT definido. También muestra información en la pantalla OLED indicando el mensaje publicado y el valor RSSI.
6. Funciones "setup()" y "loop()": La función "setup()" se ejecuta una vez al inicio del programa y se encarga de inicializar la comunicación serie, el microcontrolador ESP32 LoRa y la pantalla OLED. Muestra mensajes en la pantalla OLED para indicar el éxito de la inicialización. La función "loop()" se ejecuta repetidamente en un ciclo infinito y controla el flujo principal del programa. En cada iteración, verifica si se ha recibido un paquete de datos del LoRa. Si hay datos disponibles, los lee y muestra información en la pantalla OLED. Luego, llama a la función "publish_data()" para publicar los datos en el servidor MQTT. Después de esto, configura el LoRa para recibir nuevos paquetes y envía un mensaje de estado "Gateway is Active" cada 5 segundos. Por último, verifica la conexión al servidor MQTT y procesa los mensajes.

El código del microcontrolador ESP32 LoRa utilizado como gateway es esencial para establecer las conexiones Wi-Fi y MQTT, recibir y publicar los datos del LoRa, y mostrar información en la pantalla OLED. Estas partes del código permiten el envío de datos en tiempo real al servidor MQTT, lo que facilita la supervisión y control de la cadena de frío a través de la monitorización de los parámetros de temperatura y humedad. Además, la visualización en la pantalla OLED brinda una interfaz intuitiva para seguir el estado y el flujo de los datos durante el proceso de monitoreo.

3.2.3 CREACIÓN DEL SERVIDOR MQTT

En el contexto de los proyectos de Internet de las cosas (IoT), el servidor MQTT juega un papel fundamental al permitir la comunicación y el intercambio de datos entre los dispositivos conectados. En el proyecto de monitoreo de la cadena de frío a través de IoT, es crucial contar con un servidor MQTT confiable y escalable para asegurar el control y supervisión de los parámetros de temperatura y humedad en tiempo real. Para este propósito, se ha seleccionado EMQX como servidor MQTT, el cual es una plataforma de mensajería MQTT de código abierto, altamente escalable, altamente disponible y de alto rendimiento. Además de su capacidad para soportar múltiples protocolos de IoT, EMQX ofrece características avanzadas de seguridad, como autenticación y autorización basadas en roles, cifrado de extremo a extremo y auditoría de seguridad (EMQX, s.f.), que son esenciales para proteger los datos del proyecto.

1. Escalabilidad: EMQX es una plataforma MQTT altamente escalable que puede manejar eficientemente un gran volumen de tráfico y proporcionar recursos adicionales según sea necesario. Esto es especialmente importante en proyectos de IoT donde la cantidad de dispositivos y mensajes puede aumentar con el tiempo. La capacidad de escalar de forma flexible permite adaptarse a las necesidades cambiantes del proyecto sin comprometer el rendimiento.
2. Alta disponibilidad: EMQX y Google Cloud garantizan la alta disponibilidad del servidor MQTT. Si se produce una interrupción o falla en el servidor principal, Google Cloud automáticamente redirige la carga a otro servidor en funcionamiento para asegurar que los dispositivos IoT y las aplicaciones conectadas sigan teniendo acceso a los servicios de mensajería MQTT sin interrupciones. Esta alta disponibilidad minimiza el tiempo de inactividad y garantiza un funcionamiento continuo del sistema.
3. Seguridad: EMQX ofrece características avanzadas de seguridad para proteger los datos y la infraestructura del proyecto de monitoreo de la cadena de frío. Estas características incluyen autenticación y autorización basadas en roles, lo que garantiza que solo los dispositivos y usuarios autorizados puedan acceder y publicar en los temas MQTT relevantes.

Además, EMQX admite el cifrado de extremo a extremo para garantizar la confidencialidad de los datos transmitidos y la integridad de la comunicación. Al alojar EMQX en Google Cloud, se aprovechan también las sólidas medidas de seguridad proporcionadas por la plataforma, como autenticación de usuario, encriptación de datos y firewall, para proteger tanto los datos como la infraestructura subyacente.

4. Facilidad de personalización y adaptación: EMQX tiene una arquitectura modular y extensible que permite personalizar y adaptar la plataforma según las necesidades específicas del proyecto. Esto brinda flexibilidad para agregar funcionalidades adicionales, integrarse con otros sistemas y adaptar la configuración según los requisitos del proyecto de monitoreo de la cadena de frío. La capacidad de personalización de EMQX permite optimizar la plataforma MQTT de acuerdo con las necesidades y objetivos específicos del proyecto.

Información básica	
Nombre	uaeh-iot-master-mqtt-server
ID de instancia	8865184308850923736
Descripción	Ninguna
Tipo	Instancia
Estado	✓ Activa
Hora de creación	ene 12, 2023, 7:30:49 p. m. UTC-05:00
Zona	us-east1-b
Plantilla de instancia	Ninguna
En uso por	Ninguno
Reservas	Elegir automáticamente
Etiquetas	Ninguna
Etiquetas 	— 
Protección contra la eliminación	Inhabilitado
Servicio Confidential VM 	Inhabilitado
Tamaño de estado preservado	0 GB

FIGURA 11 MÁQUINA VIRTUAL CREADA EN GOOGLE CLOUD

La elección de EMQX como servidor MQTT alojado en una máquina virtual en Google Cloud como se muestra en la Figura 11, se basa en la necesidad de garantizar un funcionamiento óptimo y confiable del sistema de monitoreo de la cadena de frío. EMQX, con su arquitectura modular y extensible, proporciona una solución flexible que se puede adaptar a las necesidades específicas del proyecto. Su escalabilidad permite manejar eficientemente el crecimiento del proyecto y asegurar

una comunicación continua entre los dispositivos IoT. Por su parte, Google Cloud ofrece ventajas significativas en términos de escalabilidad, alta disponibilidad y seguridad. Su infraestructura altamente escalable permite ajustar los recursos según la demanda y asegurar un rendimiento óptimo incluso en situaciones de tráfico intenso. Además, la alta disponibilidad de Google Cloud garantiza que el servidor MQTT esté siempre disponible, evitando interrupciones en la comunicación. La plataforma también proporciona una amplia gama de herramientas de seguridad, como autenticación de usuario, encriptación de datos y firewall, para proteger tanto la infraestructura como los datos del proyecto. En conjunto, la elección de EMQX alojado en Google Cloud brinda una solución robusta y confiable para el monitoreo de la cadena de frío a través de IoT, garantizando la calidad y seguridad de los productos perecederos, en la Figura 12 se muestra la interfaz del servidor MQTT activo y funcionando en EMQX alojado en el servidor de Google Cloud.

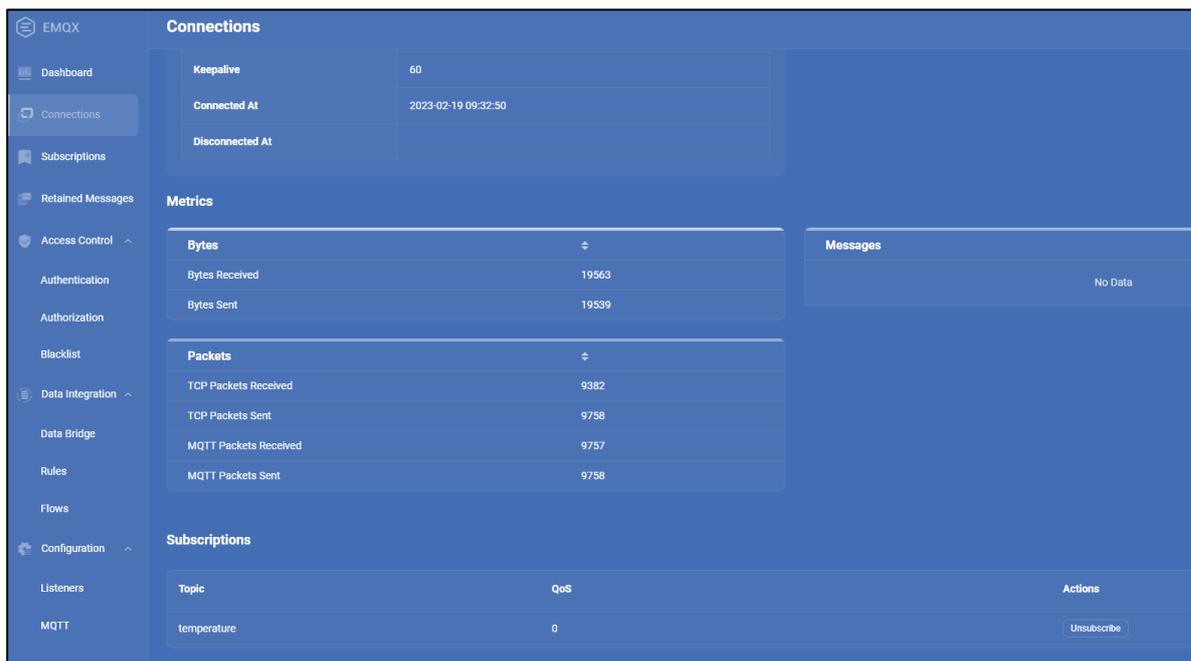


FIGURA 12 INTERFAZ DE ADMINISTRACION DEL SERVIDOR MQTT EN MQX

3.2.4 BASE DE DATOS

Se han evaluado bases de dato para ser usadas en el presente proyecto y se ha

elegido MongoDB en lugar de una base de datos tradicional SQL se debe a varias razones específicas para el proyecto de monitoreo de la cadena de frío a través de IoT.

En primer lugar, MongoDB se adapta mejor a la naturaleza de los datos recopilados en el monitoreo de la cadena de frío, que a menudo son semiestructurados o no estructurados. A diferencia de las bases de datos SQL, que requieren una estructura rígida y un esquema predefinido, MongoDB permite almacenar y procesar datos flexibles sin la necesidad de un esquema fijo. Esto es beneficioso cuando se trabaja con datos que pueden tener diferentes atributos o cambios en la estructura con el tiempo, como lecturas de sensores o eventos de seguimiento de productos.

Además, MongoDB ofrece una mayor escalabilidad horizontal en comparación con las bases de datos SQL tradicionales. Esto significa que es más fácil y eficiente escalar la base de datos agregando más servidores a medida que aumenta la carga de trabajo y los volúmenes de datos. Esto es particularmente importante en el contexto de IoT, donde se espera un crecimiento constante en el número de dispositivos y la generación de datos.

Otra razón importante es el rendimiento. MongoDB está diseñado para un alto rendimiento y ofrece capacidades de lectura y escritura rápidas, lo que es crucial para el monitoreo en tiempo real de la cadena de frío. Además, la capacidad de realizar consultas ad hoc y análisis en tiempo real permite obtener información valiosa de los datos recopilados y tomar decisiones rápidas y basadas en datos.

Finalmente, la integración de MongoDB con el ecosistema de IoT y su compatibilidad con lenguajes de programación populares como Python y JavaScript brindan una mayor flexibilidad y facilidad de uso en el desarrollo de aplicaciones y análisis de datos en el contexto de IoT.

En general, la elección de MongoDB sobre una base de datos tradicional SQL se basa en su capacidad para manejar datos flexibles y no estructurados, su escalabilidad horizontal, su alto rendimiento y su integración con el ecosistema de IoT. Estas características hacen de MongoDB la opción ideal para el proyecto de monitoreo de la cadena de frío a través de IoT, brindando un almacenamiento eficiente y un acceso rápido a los datos necesarios para garantizar la calidad y seguridad de los productos en la cadena de frío.

MongoDB es una base de datos NoSQL ampliamente utilizada y una excelente opción proyecto de monitoreo de la cadena de frío a través de IoT debido a varias características que ofrece:

1. **Modelo flexible y escalabilidad horizontal:** MongoDB utiliza un modelo flexible de documentos, lo que significa que los datos se almacenan en documentos BSON (Binary JSON) que se pueden representar en forma de objetos JSON. Esta flexibilidad permite almacenar y gestionar datos de manera eficiente, especialmente cuando se trata de datos no estructurados o semiestructurados, comunes en el monitoreo de la cadena de frío. Además, MongoDB ofrece escalabilidad horizontal, lo que permite agregar más servidores a medida que aumenta la carga de trabajo y los volúmenes de datos.
2. **Alto rendimiento:** MongoDB está diseñado para proporcionar un alto rendimiento en aplicaciones de alto volumen y alta velocidad. Su arquitectura distribuida y su capacidad para aprovechar el paralelismo de consulta permiten una rápida escritura y lectura de datos, lo que es esencial para el monitoreo en tiempo real de la cadena de frío. Además, MongoDB utiliza índices eficientes y técnicas de almacenamiento en memoria para mejorar aún más el rendimiento de las consultas.
3. **Alta disponibilidad y tolerancia a fallos:** MongoDB ofrece opciones para la configuración de réplicas, lo que permite la creación de copias sincronizadas de la base de datos en varios servidores. Esto garantiza la disponibilidad continua de los datos incluso en caso de fallos de hardware o interrupciones del sistema. Además, MongoDB cuenta con funciones automáticas de recuperación y detección de fallos, lo que garantiza la integridad y la continuidad del monitoreo de la cadena de frío.
4. **Integración con el ecosistema de IoT:** MongoDB se integra bien con el ecosistema de IoT gracias a su capacidad de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real y su compatibilidad con lenguajes de programación populares, como Python y JavaScript. También ofrece herramientas y bibliotecas específicas para IoT que facilitan la gestión y el análisis de datos provenientes de dispositivos IoT, lo que es crucial para el monitoreo y control de la cadena de frío.

5. Escalabilidad y crecimiento futuro: MongoDB es altamente escalable y se adapta a las necesidades cambiantes de cualquier proyecto. Puedes agregar nuevos sensores y dispositivos IoT a medida que la red se expanda, sin afectar el rendimiento del sistema. Además, MongoDB permite realizar consultas ad hoc y análisis en tiempo real, lo que te permite extraer información valiosa de los datos recopilados para tomar decisiones más informadas y mejorar continuamente la cadena de frío.

MongoDB es una base de datos ideal para tu proyecto de monitoreo de la cadena de frío a través de IoT debido a su flexibilidad, alto rendimiento, alta disponibilidad, integración con el ecosistema de IoT y su capacidad de escalabilidad. Estas características permitirán almacenar y gestionar eficientemente grandes volúmenes de datos en tiempo real, realizar análisis y tomar decisiones basadas en información precisa y confiable para garantizar la calidad y seguridad de los productos en la cadena de frío.

3.2.5 ARQUITECTURA PROPUESTA

La arquitectura propuesta para la solución de control y monitoreo de la cadena de frío a través de IoT consta de cuatro componentes principales: los sensores, el Gateway, el servidor MQTT y la base de datos, tal como se muestra en la Figura 13.

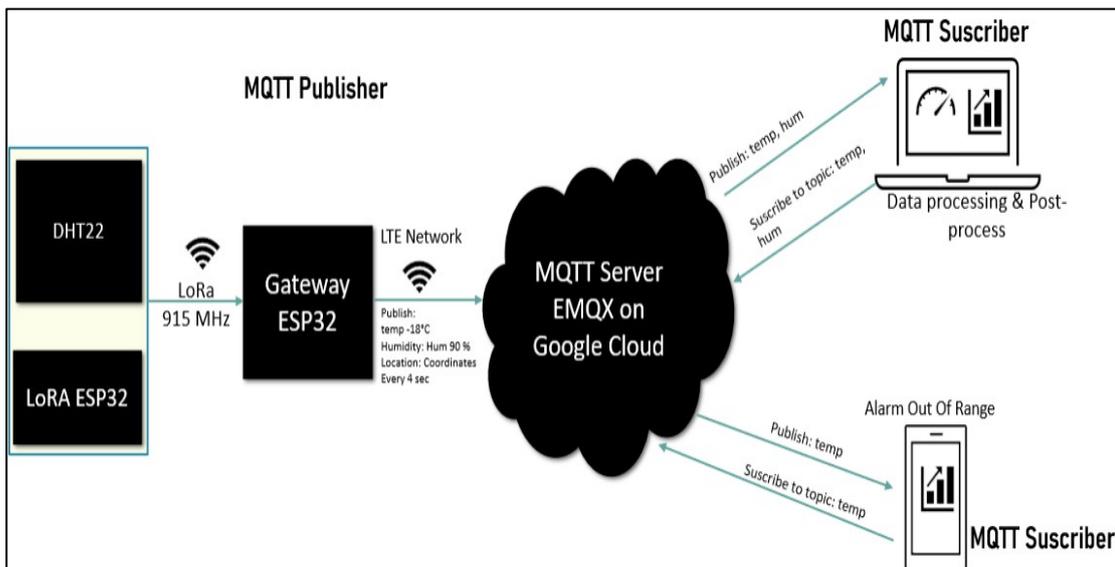


FIGURA 13 ARQUITECTURA SELECCIONADA

En la primera etapa, los sensores de humedad y temperatura LoRa desempeñan un papel fundamental al medir y recolectar los datos en tiempo real. Estos sensores, que están diseñados para proporcionar una comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo de energía, garantizan la captura precisa de los parámetros ambientales en diferentes puntos de la cadena de frío. Los datos recopilados por los sensores son transmitidos de manera inalámbrica al Gateway, que es un microcontrolador ESP32 LoRa. El Gateway es el encargado de recibir y procesar los datos provenientes de los sensores, y luego enviarlos al servidor MQTT a través del protocolo MQTT. El servidor MQTT, alojado en una máquina virtual en Google Cloud, desempeña un papel central en la arquitectura. Este servidor actúa como un intermediario entre el Gateway y los diferentes suscriptores. Recibe los datos enviados por el Gateway y los organiza en diferentes tópicos, que son canales de comunicación temáticos. Los suscriptores, que pueden ser aplicaciones o sistemas de monitoreo remoto, se suscriben a los tópicos relevantes y reciben los datos específicos que necesitan. Esta arquitectura de publicación y suscripción permite una distribución eficiente de los datos y facilita la escalabilidad del sistema, ya que nuevos suscriptores pueden ser agregados sin afectar la comunicación existente. La base de datos, en este caso MongoDB, desempeña un papel crucial en el almacenamiento y gestión de los datos recopilados. Los datos recibidos por el servidor MQTT son almacenados en MongoDB de manera flexible y estructurada en formato de documentos JSON. Esto garantiza su disponibilidad para análisis posteriores, generación de informes y toma de decisiones. La elección de una base de datos NoSQL como MongoDB se fundamenta en su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos no estructurados o semiestructurados, su escalabilidad horizontal y su flexibilidad para adaptarse a las necesidades dinámicas del sistema. La arquitectura propuesta aprovecha las capacidades de los sensores LoRa para capturar datos precisos de temperatura y humedad, el procesamiento y envío de información desde el Gateway, la distribución eficiente de los datos a través del servidor MQTT y el almacenamiento flexible en MongoDB. Esta arquitectura integral y escalable facilita el monitoreo y control efectivo de la cadena de frío en tiempo real, asegurando la calidad y seguridad de los productos transportados y proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas.

CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO

El modelo propuesto se basa en la integración de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo y control de las variables críticas de temperatura, humedad y ubicación en la cadena de frío. Este sistema busca optimizar la gestión de productos perecederos mediante una solución escalable, modular y eficiente que permita la captura, transmisión, almacenamiento y análisis de datos en tiempo real. El modelo tiene como finalidad proporcionar una solución integral que cubra todo el ciclo de vida de la cadena de frío, desde el transporte hasta la venta al cliente final, abordando los siguientes objetivos específicos:

1. Implementar un sistema de sensores inteligentes para la captura de variables críticas.
2. Diseñar un sistema de comunicación confiable que asegure la transmisión de datos en tiempo real.
3. Desarrollar un mecanismo de almacenamiento y procesamiento de datos en la nube que permita generar modelos predictivos y alertas.
4. Validar la eficiencia y viabilidad del modelo mediante simulaciones computacionales y análisis teóricos.

4.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL MODELO

4.2.1 TIPOS DE SENSORES SELECCIONADOS

Los sensores representan la base del modelo, ya que son responsables de capturar las variables críticas de temperatura, humedad y ubicación en tiempo real.

- Sensores de temperatura (DHT22): Los sensores DHT22 son dispositivos digitales de alta precisión, capaces de medir un rango de temperatura desde -40°C hasta 85°C con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Estos sensores son ideales para aplicaciones en la cadena de frío debido a su confiabilidad y bajo consumo energético. Proporcionan datos en tiempo real que son esenciales

para garantizar que los productos se mantengan dentro de los rangos de temperatura requeridos.

- Sensores de humedad (DHT22): Incorporan la capacidad de medir un rango de humedad relativa del 0% al 100% con una precisión de $\pm 2\%$ HR. Estos sensores ofrecen lecturas consistentes y estables, lo que permite controlar las condiciones de humedad dentro de cámaras frigoríficas, vehículos de transporte y áreas de exhibición, asegurando la conservación óptima de los productos.
- Módulos GPS: Los módulos GPS permiten monitorear en tiempo real la ubicación geográfica de los productos a lo largo de toda la cadena de frío. Esto es crucial para rastrear el trayecto del transporte, detectar posibles retrasos y garantizar la entrega puntual de los productos.
- Sensores adicionales:
 - Acelerómetros: Detectan impactos, vibraciones o movimientos bruscos que puedan comprometer la integridad de los productos. Estos datos son útiles para identificar problemas en el manejo o transporte.
 - Sensores de luz: Permiten detectar exposiciones no deseadas a la luz, especialmente en productos sensibles como alimentos o medicamentos, ayudando a identificar posibles fallos en el embalaje o la logística.

4.2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

- Precisión: La elección de los sensores DHT22 se basa en su capacidad para proporcionar mediciones exactas de temperatura y humedad. Esta precisión es fundamental para evitar el deterioro de los productos perecederos.
- Consumo energético: Los sensores DHT22 están diseñados para operar con bajo consumo energético, lo que los hace ideales para soluciones IoT donde los dispositivos funcionan con baterías de larga duración, como en vehículos en tránsito.

- **Robustez:** Los sensores seleccionados, incluidos los DHT22, son resistentes a condiciones ambientales adversas. Pueden operar de manera confiable en ambientes de alta humedad, vibraciones constantes y temperaturas extremas, como las que se encuentran en la cadena de frío.
- **Interoperabilidad:** Los sensores son compatibles con protocolos de comunicación IoT como LoRa, ZigBee y BLE, lo que facilita su integración en redes inalámbricas de monitoreo y en soluciones basadas en la nube para análisis de datos.

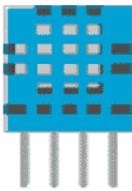
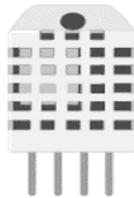
	 DHT11	 DHT22
Operating Voltage	3 to 5V	3 to 5V
Max Operating Current	2.5mA max	2.5mA max
Temperature Range	0-50°C / ± 2°C	-40 to 80°C / ± 0.5°C
Humidity Range	20-80% / 5%	0-100% / 2-5%
Sampling Rate	1 Hz (reading every second)	0.5 Hz (reading every 2 seconds)
Advantage	low cost	More Accurate

FIGURA 14 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS SENSORES EVALUADOS

En la Figura 14 se muestra la comparación de las principales características de cada sensor donde podemos destacar que el sensor DHT22 es significativamente más adecuado que el DHT11 para aplicaciones que requieren monitorear temperaturas por debajo de los 0°C, como en la cadena de frío. Mientras que ambos sensores operan dentro de un rango de voltaje de 3 a 5V y tienen un bajo consumo energético máximo de 2.5mA, el DHT22 destaca por su amplio rango de medición de temperatura de -40°C a 80°C, frente al limitado rango de 0°C a 50°C del DHT11. Además, el DHT22 ofrece una precisión superior de ±0.5°C, en comparación con los ±2°C del DHT11, lo que garantiza mediciones más confiables. En cuanto a la humedad, el DHT22 mide un rango completo de 0% a 100% de humedad relativa con una precisión de ±2-5%, superando al DHT11, que solo puede medir entre 20%

y 80% HR con una precisión de $\pm 5\%$. Aunque el DHT11 tiene una tasa de muestreo más rápida (1 Hz frente a 0.5 Hz del DHT22), este aspecto no es crítico en aplicaciones donde las condiciones no cambian rápidamente, como en el transporte refrigerado. Si bien el DHT11 es más económico y adecuado para proyectos básicos, el DHT22 justifica su costo ligeramente mayor al ofrecer un rango de operación más amplio, mayor precisión y capacidades críticas para entornos controlados. Estas características hacen del DHT22 la opción ideal para garantizar la calidad y seguridad de los productos perecederos en la cadena de frío, mientras que el DHT11 resultaría insuficiente para estas exigencias.

4.2.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS SENSORES EN LA CADENA DE FRÍO

- En almacenes:
 - Sensores DHT22 colocados estratégicamente dentro de cámaras frigoríficas para medir y monitorear las condiciones internas.
 - Acelerómetros y sensores de luz instalados en puertas y puntos críticos para detectar cambios que puedan comprometer la calidad del producto.
- En transporte:
 - Sensores DHT22 distribuidos en cajas refrigeradas y contenedores para garantizar que los valores de temperatura y humedad permanezcan dentro de los límites definidos.
 - Módulos GPS para rastrear la ubicación en tiempo real y optimizar rutas de transporte.
 - Acelerómetros para identificar impactos o vibraciones inusuales que puedan indicar problemas en la manipulación o el estado del vehículo.
- En puntos de venta:
 - Sensores DHT22 instalados en áreas de almacenamiento y exhibición para verificar que los productos se mantengan en condiciones óptimas antes de la venta.
 - Sensores de luz para garantizar que no haya exposición indebida a factores que puedan alterar la calidad del producto.

4.2.4 VENTAJAS DE LOS SENSORES DHT22 EN LA SOLUCIÓN IOT

- Bajo costo: Los sensores DHT22 ofrecen una relación costo-beneficio excepcional, siendo una opción accesible para proyectos a gran escala.
- Fácil integración: Estos sensores son compatibles con plataformas de microcontroladores como Arduino y ESP32, lo que facilita su implementación en sistemas IoT.
- Datos en tiempo real: La capacidad de recolectar y transmitir datos instantáneamente asegura un monitoreo continuo y eficiente.
- Durabilidad: Su diseño robusto permite que operen de manera confiable en entornos hostiles durante largos periodos.

4.2.5 INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIÓN

La tarjeta de desarrollo HELTEC WiFi LoRa 32 V2, ha sido configurada y programada específicamente para cumplir la función de gateway en este proyecto, es el dispositivo central en el sistema IoT diseñado para el monitoreo de la cadena de frío. Este gateway combina tecnologías LoRa y Wi-Fi para recibir datos de sensores distribuidos en áreas extensas y transmitirlos de manera eficiente a un servidor MQTT. Los sensores LoRa, como el DHT22, están diseñados para medir variables críticas como temperatura y humedad en tiempo real. Estos sensores envían los datos al gateway utilizando el protocolo LoRa, que opera en frecuencias específicas como 915 MHz. Gracias a su capacidad de comunicación de largo alcance y bajo consumo energético, el protocolo LoRa permite al gateway recibir datos incluso desde sensores ubicados a varios kilómetros de distancia.

El HELTEC WiFi LoRa 32 V2, programado para escuchar constantemente las señales transmitidas por los sensores, recibe los datos codificados, los decodifica y extrae información clave como la temperatura, la humedad y el RSSI (Received Signal Strength Indicator), que proporciona datos adicionales sobre la calidad de la señal recibida. Una vez procesados, estos datos se estructuran en formato JSON, incluyendo detalles como el ID del sensor, las mediciones ambientales y una marca de tiempo para su seguimiento histórico.

Posteriormente, el gateway utiliza su módulo Wi-Fi integrado para conectarse a una red local configurada previamente. Esta conexión se establece a través de credenciales programadas en el código, permitiendo al HELTEC comunicarse con un servidor MQTT, ya sea alojado localmente o en la nube. A través de la biblioteca PubSubClient, se define la dirección IP del broker MQTT, el puerto (habitualmente 1883) y el tema al que se publicarán los datos, como "chain_of_cold/data". Además, se ha programado una función de reconexión automática, `reconnect_mqtt()`, que garantiza la continuidad del sistema en caso de interrupciones en la red Wi-Fi o en la conexión al servidor MQTT. Para este Proyecto se estarán utilizando al menos 2 tarjetas de desarrollo una para recibir los datos del sensor de humedad y temperatura y transmitirlos a través de LoRa, y otra para hacer la función de gateway, esta última recibirá los datos a través de LoRa, se conectará por WiFi y enviará los datos al servidor MQTT.

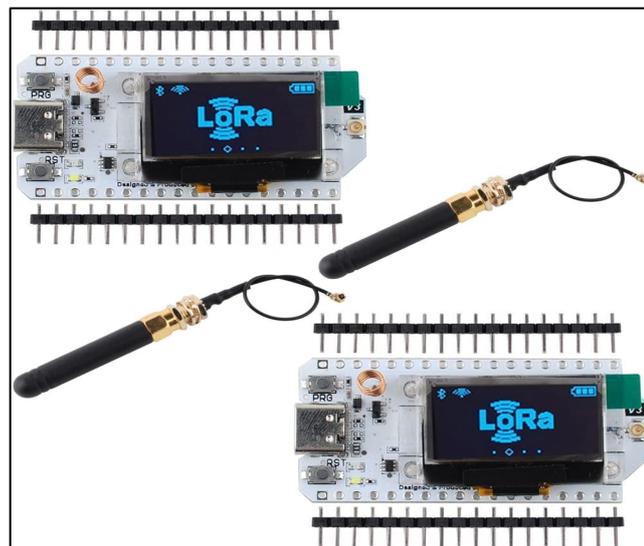


FIGURA 15 HELTEC WIFI LORA

La integración de la pantalla OLED en el HELTEC como podemos apreciar en la Figura 15, permite mostrar información en tiempo real, como el estado de las conexiones, los datos recibidos y los mensajes publicados en el servidor. Además, su capacidad para manejar múltiples sensores simultáneamente lo hace ideal para proyectos escalables (MOKO LoRa, 2021), donde se requiere monitorear varias áreas de la cadena de frío, como almacenes frigoríficos, vehículos refrigerados y puntos de almacenamiento.

La programación del HELTEC WiFi LoRa 32 V2 para esta función específica no solo asegura un monitoreo en tiempo real de las condiciones ambientales, sino que

también permite tomar decisiones basadas en datos procesados y visualizados a través de plataformas avanzadas como paneles de control web o aplicaciones móviles. Este sistema integral garantiza que los productos perecederos, como alimentos y medicamentos, se mantengan en condiciones óptimas durante el transporte y almacenamiento. En resumen, el HELTEC, programado como gateway, actúa como un puente eficiente entre los sensores LoRa y el servidor MQTT, integrando tecnologías avanzadas para garantizar la confiabilidad, escalabilidad y efectividad del monitoreo en la cadena de frío.

4.2.6 PROTOTIPOS

En el proyecto, se incluyen prototipos diseñados específicamente para alojar el gateway Heltec WiFi LoRa 32 V2 y otros componentes relacionados,



FIGURA 16 MODELOS 3D DE PROTOTIPOS

Estos modelos 3D han sido diseñados para optimizar la integración y proteger los dispositivos en entornos operativos. Los archivos STL presentados en la Figura 16 corresponden a las siguientes piezas:

1. Case-top.stl: Corresponde a la parte superior de la carcasa, con dimensiones de 70.50 mm x 36.50 mm x 6.70 mm. Esta pieza asegura el acceso a los componentes electrónicos mientras proporciona protección frente a elementos externos.
2. Case-bottom.stl: Constituye la base de la carcasa, con dimensiones de 70.50 mm x 36.50 mm x 8.70 mm. Incluye soportes y ranuras para fijar el circuito del gateway y la batería.
3. Heltec_LoRa_lid_45mmBattery.stl: Es una tapa diseñada para cubrir y proteger el espacio destinado a la batería de 45 mm. Sus dimensiones son 75.00 mm x 65.00 mm x 5.90 mm, lo que asegura un ajuste preciso.
4. Heltec_LoRa_case_45mmBattery.stl: Esta es la base principal de la carcasa para alojar tanto el gateway como la batería de 45 mm. Con dimensiones de 75.00 mm x 65.00 mm x 13.50 mm, ofrece espacio suficiente para instalar todos los componentes de manera segura.

Estas piezas fueron fabricadas utilizando tecnología de impresión 3D, que permite crear prototipos funcionales con alta precisión. El material seleccionado fue PLA (ácido poliláctico), debido a su resistencia mecánica y facilidad de impresión. Una vez impresas, las carcasas asegurarán la protección de los componentes electrónicos frente a factores externos como vibraciones, polvo y humedad. Además, su diseño modular facilita el montaje y desmontaje de los componentes, permitiendo realizar ajustes o mantenimientos con facilidad. Si se requieren ajustes en las dimensiones o configuraciones de los prototipos, se realizarán modificaciones en los archivos STL antes de la impresión.

Este proceso garantiza que el hardware del sistema esté protegido y sea fácilmente transportable, contribuyendo al éxito del monitoreo de la cadena de frío en condiciones óptimas.

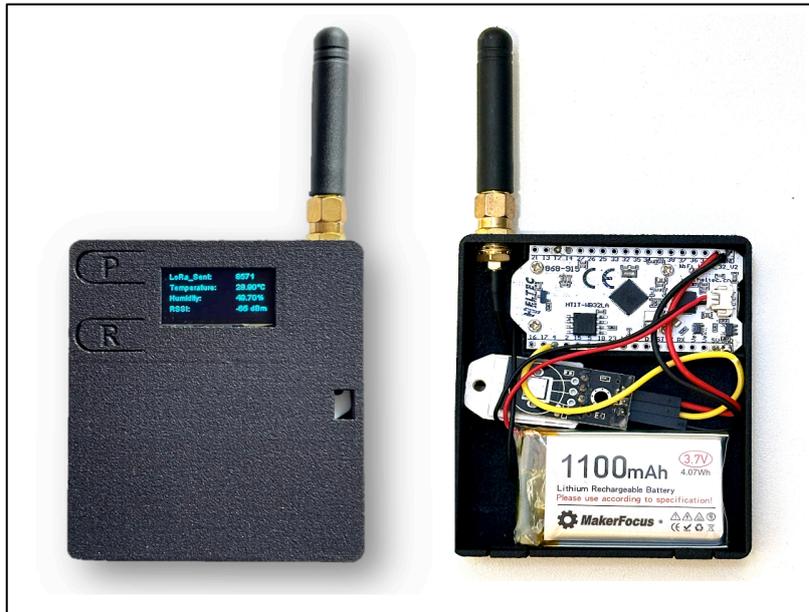


FIGURA 17 PROTOTIPO ETAPA DE SENSADO

La Figura 17 muestra un prototipo funcional para el monitoreo de la cadena de frío, que integra una tarjeta HELTEC WiFi LoRa 32 V2, un sensor DHT22, y una batería recargable de 1100 mAh. A la izquierda, se observa el dispositivo ensamblado con su carcasa protectora fabricada mediante impresión 3D. En la pantalla OLED integrada, se muestran lecturas en tiempo real de las variables monitoreadas: temperatura, humedad relativa, y la intensidad de la señal (RSSI). Esto proporciona una visualización clara y directa de los datos críticos recolectados por el sistema. En la imagen de la derecha, se aprecia el interior del prototipo, donde se destacan los componentes electrónicos organizados de manera eficiente. La tarjeta HELTEC se encuentra conectada al sensor DHT22, responsable de medir la temperatura y humedad del entorno. La batería recargable de 3.7 V está estratégicamente ubicada para alimentar el sistema, garantizando autonomía en aplicaciones móviles o remotas. El diseño del prototipo incluye una antena LoRa, que permite la transmisión de datos a largas distancias hacia un servidor MQTT para su análisis y gestión. Este prototipo representa una solución compacta, funcional y altamente eficiente para aplicaciones en la cadena de frío, asegurando un monitoreo continuo y confiable en condiciones operativas. El prototipo desarrollado para EL Gateway lora WiFi esta basado en la tarjeta HELTEC WiFi LoRa 32 V2, diseñado para recibir datos de sensores lora, procesarlos y transmitirlos a un servidor MQTT en tiempo real mediante su conectividad wifi, tal como se muestra en la Figura 18.



FIGURA 18 PROTOTIPO FUNCIONAL GATEWAY

La carcasa, fabricada mediante impresión 3D, proporciona protección y un diseño compacto, además de permitir un montaje sencillo. El dispositivo integra una antena LoRa para asegurar una comunicación de largo alcance con los sensores distribuidos en el entorno, lo que resulta ideal para aplicaciones en la cadena de frío. La pantalla OLED incorporada muestra información relevante en tiempo real, como el identificador del sensor, los valores de temperatura y humedad, y el indicador RSSI, permitiendo una visualización rápida y accesible de los datos más críticos sin necesidad de herramientas externas. Alimentado mediante un puerto micro USB, el Gateway permite ajustes y personalización del software de manera flexible. Este dispositivo actúa como el núcleo del sistema IoT propuesto, garantizando una comunicación eficiente entre los sensores y el servidor, además de ofrecer una solución escalable y confiable para el monitoreo y control continuo de las variables críticas en la cadena de frío.

4.2.7 VISUALIZACIÓN DE DATOS

La visualización de los datos recopilados por el sistema IoT es un elemento esencial para el monitoreo y control eficiente de la cadena de frío. En esta solución, los datos enviados por el gateway HELTEC WiFi LoRa 32 V2 se publican en un servidor

MQTT, donde están disponibles para su consulta en tiempo real. Los datos, previamente procesados y estructurados en formato JSON, incluyen información clave como las mediciones de temperatura y humedad, el ID del sensor, el valor RSSI, y una marca de tiempo, lo que facilita el análisis posterior y el seguimiento histórico.

Para acceder a estos datos, es necesario suscribirse al tópico MQTT adecuado, el cual ha sido definido previamente en la configuración del sistema. Un tópico es una etiqueta jerárquica utilizada en el protocolo MQTT para clasificar y organizar los mensajes publicados. Esta estructura jerárquica permite mantener los datos bien organizados, facilitando su acceso según las necesidades del usuario o del sistema. Por ejemplo, si se requiere monitorear exclusivamente los datos del sensor de temperatura ubicado en un vehículo de transporte, bastará con suscribirse al tópico correspondiente como "coldlink/vehicle01/temperature". Esta organización también es útil para gestionar alertas críticas, como valores fuera de los rangos permitidos, que podrían ser publicados en un tópico como "coldlink", garantizando una respuesta rápida.

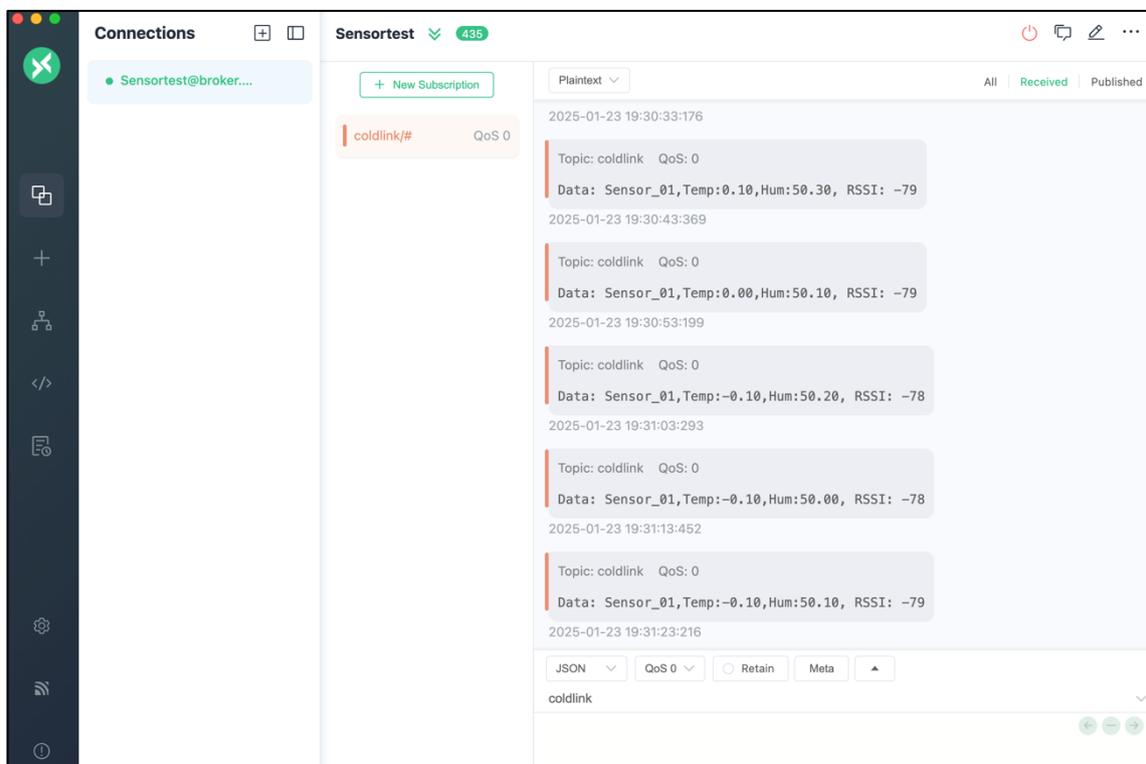


FIGURA 19 DATOS SUSCRITOS DEL SERVIDOR MQTT

La Figura 19 muestra una suscripción activa al servidor MQTT, donde el cliente está suscrito al tópico general coldlink/#, permitiendo recibir mensajes de todos los subtópicos asociados. En el panel se observan los mensajes publicados en tiempo real, incluyendo datos clave como el identificador del sensor (Sensor_01), la temperatura medida (Temp: -0.10°C), la humedad relativa (Hum: 50.10%), y el indicador de la intensidad de la señal RSSI (RSSI: -79). Cada mensaje está etiquetado con una marca de tiempo precisa, lo que facilita el seguimiento y análisis temporal de los datos. La visualización en formato JSON garantiza que la información se presente de manera estructurada y fácil de interpretar, destacando la funcionalidad del servidor MQTT para centralizar y organizar los datos transmitidos por los sensores en tiempo real.

La utilización de tópicos en MQTT no solo asegura que los datos estén bien estructurados, sino que también facilita la escalabilidad del sistema. En proyectos donde múltiples sensores están desplegados en distintas ubicaciones, la segmentación por tópicos permite un acceso más rápido a la información relevante, ya que los usuarios pueden suscribirse únicamente a los datos que necesitan sin recibir información innecesaria. Además, se reduce la carga en la red y en el servidor al optimizar la transmisión de mensajes, entregando solo los datos solicitados. Esto también facilita el monitoreo y análisis, ya que los tópicos específicos permiten diseñar aplicaciones de visualización personalizadas, como dashboards que representen gráficamente los valores en tiempo real.

Los datos publicados en los tópicos MQTT pueden ser consumidos y visualizados utilizando herramientas compatibles. Por ejemplo, dashboards basados en la web, como Node-RED, Grafana o ThingsBoard, pueden conectarse al servidor MQTT, suscribirse a los tópicos correspondientes y presentar la información en gráficos, tablas y alertas visuales. También es posible utilizar aplicaciones móviles como MQTT Dash o MQTT Explorer, que permiten la visualización de datos en dispositivos móviles de forma sencilla y en tiempo real. Además, mediante lenguajes de programación como Python o JavaScript, se pueden desarrollar interfaces específicas que integren la visualización de datos en soluciones adaptadas a las necesidades del proyecto.

El diseño basado en un servidor MQTT y el uso de tópicos bien definidos asegura que los datos recopilados estén siempre disponibles de manera organizada y accesible. La posibilidad de suscribirse a los tópicos relevantes garantiza que la información llegue a los usuarios adecuados en el momento oportuno, permitiendo tomar decisiones informadas para mantener la calidad y seguridad de los productos en la cadena de frío. Además, la compatibilidad con diversas herramientas de visualización amplía las opciones para el análisis y monitoreo, mejorando significativamente la gestión operativa del sistema.

En este trabajo de investigación, se ha implementado MongoDB Charts como la herramienta principal para la visualización de datos, aprovechando su capacidad nativa para integrarse directamente con las colecciones almacenadas en la base de datos MongoDB, lo que elimina la necesidad de exportar datos a plataformas externas y garantiza que los datos se presenten de manera segura y eficiente. El dashboard desarrollado permite una visualización clara y detallada de las variables monitoreadas en la cadena de frío, como la temperatura, la humedad y el RSSI, con datos actualizados en tiempo real provenientes de la base de datos. A través de gráficos interactivos, indicadores dinámicos y tablas de datos en bruto, los usuarios pueden observar las lecturas en diferentes formatos que facilitan la identificación de patrones, la detección de anomalías y el monitoreo continuo del sistema.

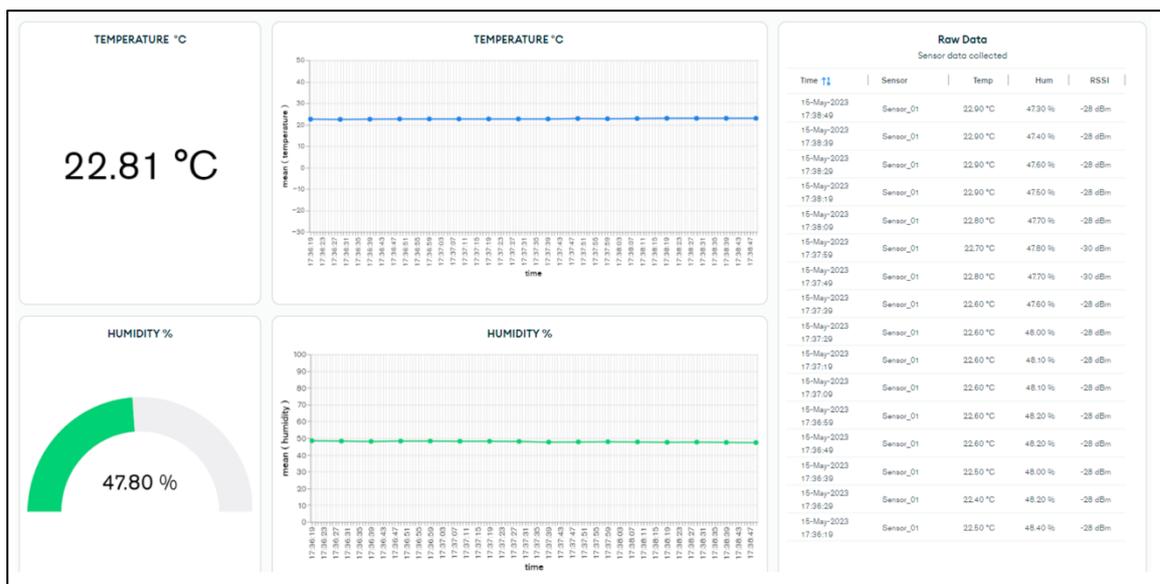


FIGURA 20 DASHBOARD MONGODB CHARTS

La Figura 20 muestra el dashboard creado en MongoDB Charts, incluye herramientas avanzadas de análisis que permiten a los usuarios filtrar la información por criterios como fecha, ubicación o tipo de sensor, ofreciendo un control granular sobre los datos presentados. También es posible agrupar los datos según diferentes variables para detectar tendencias a lo largo del tiempo y obtener información más profunda sobre las condiciones operativas de la cadena de frío. Por ejemplo, los usuarios pueden analizar cómo las condiciones de temperatura y humedad han variado en un transporte específico durante un intervalo de tiempo, permitiendo identificar problemas puntuales o recurrentes.

Otro aspecto clave es la capacidad de MongoDB Charts para generar alertas visuales cuando los datos se encuentran fuera de los rangos definidos como seguros, lo que contribuye a una respuesta rápida y a una mejor toma de decisiones. Estas características aseguran que los operadores puedan acceder a información procesable de manera sencilla, lo que no solo mejora la eficiencia del monitoreo, sino que también minimiza el riesgo de deterioro de los productos perecederos. La compatibilidad de MongoDB Charts con dispositivos móviles y su capacidad de integración con otras herramientas lo convierten en una solución escalable y versátil para proyectos IoT de cualquier tamaño.

Esta implementación no solo permite a los usuarios obtener una visibilidad completa de las operaciones de la cadena de frío, sino que también proporciona un entorno flexible para personalizar las visualizaciones y adaptar los dashboards a necesidades específicas. Como resultado, MongoDB Charts se posiciona como una herramienta esencial en este sistema, brindando una experiencia de análisis de datos optimizada, confiable y en tiempo real, que apoya la gestión eficiente y la toma de decisiones informadas basadas en datos precisos y oportunos.

4.3 MODELADO MATEMÁTICO

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MODELADO MATEMÁTICO

La ecuación básica para la temperatura se define como:

$$T(t) = T_{\text{inicial}} + f(\Delta H, \Delta t)$$

Donde:

- T_{inicial} : Es la temperatura inicial del sistema en el momento $t = 0$.
- ΔH : Representa los cambios en la humedad relativa ($H_{\text{final}} - H_{\text{inicial}}$).
- Δt : Es el tiempo de exposición en segundos o minutos.
- $f(\Delta H, \Delta t)$: Es una función que modela la relación entre las variables de humedad y el tiempo sobre la temperatura.

Datos necesarios:

- Registros iniciales de temperatura (T_{inicial}) y humedad (H_{inicial}).
- Cambios en la humedad ($H_{\text{final}} - H_{\text{inicial}}$) a lo largo de un período de monitoreo.
- Tiempo de exposición (Δt) registrado en intervalos regulares.
- Sensor utilizado: El sensor DHT22 integrado en el sistema, que mide tanto la temperatura como la humedad en tiempo real.

Efecto del transporte:

Para modelar el impacto de las vibraciones en los cambios de temperatura interna, se introduce una nueva variable (V) que representa las vibraciones. Esto se mide utilizando un acelerómetro integrado en el sistema. La ecuación se amplía como:

$$T(t) = T_{\text{inicial}} + f(\Delta H, \Delta t) + g(V)$$

Donde:

- $g(V)$: Es una función que modela el impacto de las vibraciones (V) en la temperatura interna.

Propuesta experimental

1. Configuración del sistema: Sensores DHT22 para medir temperatura y humedad, junto con un acelerómetro para registrar vibraciones.
2. Registro de datos: Colocar el prototipo en un entorno controlado y registrar mediciones a intervalos regulares.
3. Cálculo de variables: Generar datos para calcular ΔH , Δt y V en diferentes condiciones.
4. Ajuste del modelo: Utilizar técnicas de regresión no lineal o modelos estadísticos para establecer relaciones entre las variables.

Validación y análisis

- Utilizar Python (NumPy, SciPy) para analizar los datos y ajustar los modelos matemáticos.
- Validar el modelo comparando las temperaturas estimadas ($T(t)$) con las temperaturas medidas por los sensores.

Salida esperada

La validación de este modelo permitirá predecir cómo factores externos, como cambios en la humedad y las vibraciones, afectan la temperatura interna de los productos durante el transporte. Esto garantizará un diseño más robusto y eficiente para mantener los valores de temperatura dentro de los límites óptimos de la cadena de frío.

4.3.2 CAPTURA DE DATOS PARA EL MODELADO MATEMÁTICO

En este apartado se presentan las gráficas que muestran la evolución de las variables monitoreadas en los datos sintéticos generados para validar el modelo propuesto. La Figura 21 ilustra el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo, destacando los cambios ocasionados por variaciones en la humedad relativa y las vibraciones. La Figura 22 muestra las fluctuaciones de la humedad relativa durante el periodo de monitoreo, mientras que la Figura 23 representa las vibraciones registradas, que simulan el impacto del transporte en las condiciones

del sistema. Estas visualizaciones permiten identificar patrones, analizar tendencias y evaluar la interacción entre las variables críticas en un entorno controlado.

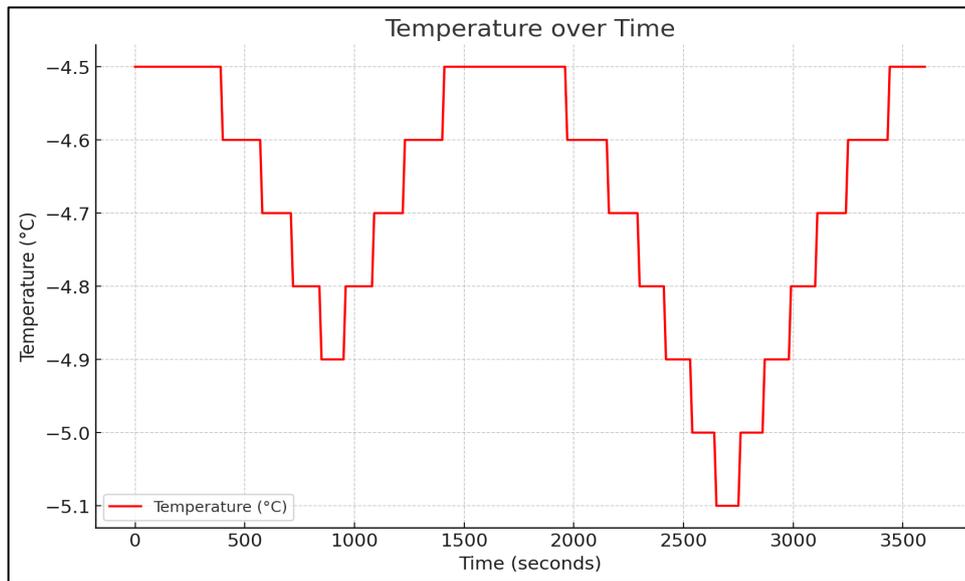


FIGURA 21 TEMPERATURA CAPTURADA EN ENTORNO CONTROLADO

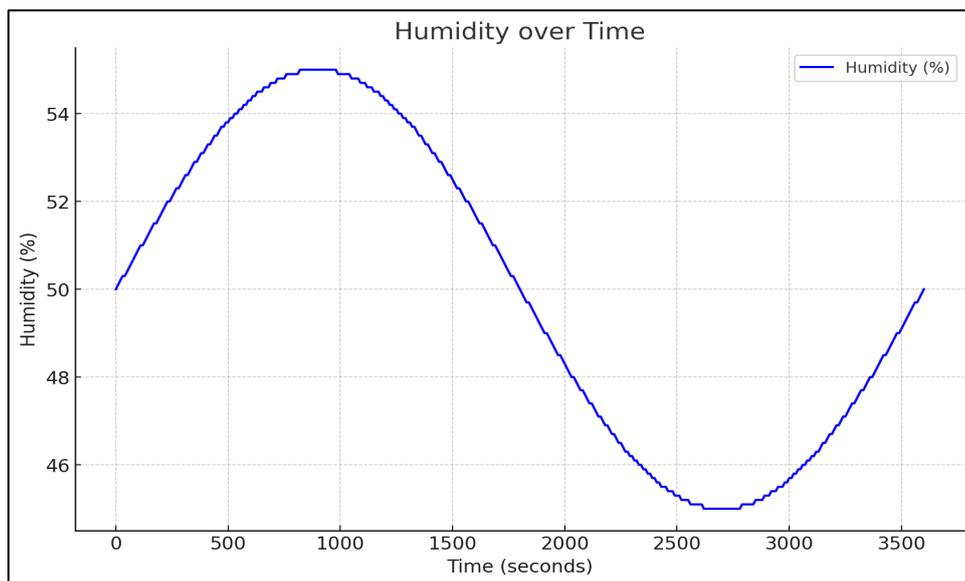


FIGURA 22 HUMEDAD RELATIVA CAPTURADA EN ENTORNO CONTROLADO

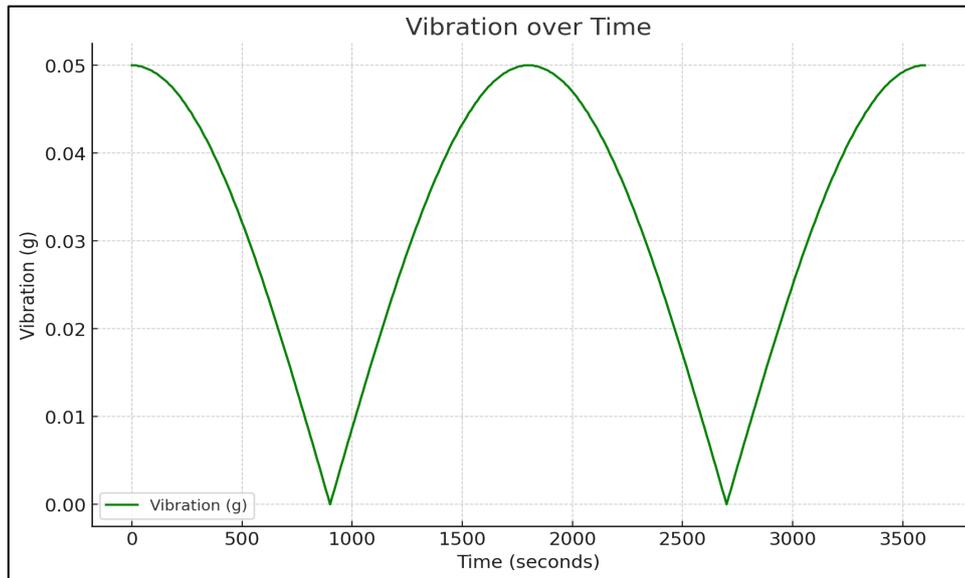


FIGURA 23 VIBRACION CAPTURADA EN ENTORNO CONTROLADO

4.3.3 CÁLCULOS MATEMÁTICOS

En este apartado se presentan los cálculos matemáticos necesarios para modelar y predecir la temperatura en función de las variables críticas involucradas, como los cambios en la humedad relativa y las vibraciones durante el transporte. Se detalla la ecuación inicial que integra las relaciones entre estas variables, así como las funciones simplificadas utilizadas para representar su impacto. Mediante un ejemplo práctico, se demuestran los cálculos paso a paso, desde la sustitución de valores hasta el resultado final de la temperatura estimada. Este análisis proporciona una base cuantitativa para evaluar y validar el modelo propuesto en el contexto del monitoreo de la cadena de frío.

Ecuación inicial:

$$T(t) = T_{\text{inicial}} + f(\Delta H, \Delta t) + g(V)$$

Funciones simplificadas:

- $f(\Delta H, \Delta t) = 0.02 \times \Delta H$

- $g(V) = 10 \times V$

Valores extraídos de datos capturados:

Temperatura inicial: $T_{\text{inicial}} = -4.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Cambio en humedad: $\Delta H = 0.0 \%$

Tiempo de exposición: $\Delta t = 0.0 \text{ s}$

Vibración: $V = 0.0500 \text{ g}$

Sustitución en las funciones simplificadas:

Para el cambio en humedad:

$$f(\Delta H, \Delta t) = 0.02 \times 0.0 = 0.0000 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para el impacto de la vibración:

$$g(V) = 10 \times 0.0500 = 0.5000 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Cálculo de la temperatura final $T(t)$:

$$T(t) = -4.5 + 0.0000 + 0.5000 = -4.0000 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Resultado final:

$$T(t) = -4.0000 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4.3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS CÁLCULOS MATEMÁTICOS

El resultado final $T(t) = -4.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ refleja cómo las variables críticas, como los cambios en la humedad relativa (ΔH) y las vibraciones (V), interactúan para influir en la temperatura del sistema. Partiendo de una temperatura inicial de $-4.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, el ligero aumento de temperatura a $-4.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se debe principalmente al impacto de las vibraciones ($V = 0.0500 \text{ g}$), mientras que los cambios en la humedad ($\Delta H = 0.0 \%$) no contribuyen significativamente en este caso.

Este resultado evidencia que, incluso en ausencia de variaciones en la humedad, las vibraciones generadas durante el transporte pueden causar un incremento en la temperatura del sistema. La capacidad del modelo para capturar y cuantificar estos

efectos es fundamental para diseñar estrategias de control que mitiguen las desviaciones de temperatura.

Además, el resultado resalta la importancia de implementar un monitoreo continuo en la cadena de frío, especialmente en entornos donde las vibraciones son frecuentes. Al identificar y mitigar estos factores, es posible garantizar que los productos se mantengan dentro de los límites de temperatura óptimos, preservando su calidad y seguridad durante el transporte. Este análisis subraya la relevancia de un sistema de monitoreo robusto y diseñado específicamente para condiciones reales de operación.

4.4 VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE REGRESION LINEAL

La sección dedicada a la regresión lineal tiene como objetivo analizar la relación entre las variables críticas del sistema, específicamente la vibración y la temperatura interna, mediante un modelo matemático simplificado. Esta técnica permite identificar patrones y tendencias que facilitan la predicción de cómo ciertos factores externos, como las vibraciones generadas durante el transporte, afectan la temperatura de los productos monitoreados en la cadena de frío.

4.4.1 EXPLICACIÓN DEL INTERCEPTO

El valor -5.9937 es el intercepto obtenido durante el cálculo de la regresión lineal, tal como se muestra en la Figura 24 este intercepto representa el valor de la temperatura estimada ($T(t)$) cuando todas las variables independientes (en este caso, humedad y vibración) tienen un valor de cero.

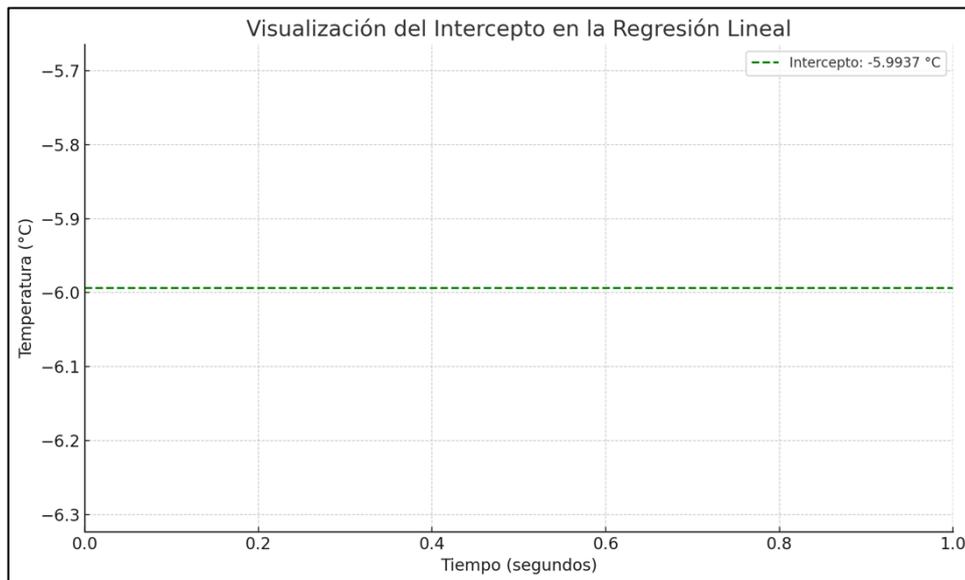


FIGURA 24 VISUALIZACION DEL INTERCEPTO EN LA REGRESION LINEAL

En el modelo de regresión lineal, la ecuación general es:

$$T(t) = \text{intercepto} + (\text{coeficiente1} * \text{Humedad}) + (\text{coeficiente2} * \text{Vibración})$$

El intercepto (-5.9937) es el punto en el eje Y donde la recta de regresión cruza dicho eje, asumiendo que las otras variables no tienen efecto (Humedad = 0 y Vibración = 0).

En un contexto práctico, este valor no siempre tiene un significado físico directo (especialmente si los valores de Humedad y Vibración nunca pueden ser cero en la realidad), pero es una parte matemática necesaria para ajustar el modelo y calcular los valores estimados de la temperatura.

4.4.2 CÁLCULOS DE LA REGRESIÓN LINEAL

Ecuación de la regresión lineal:

$$T(t) = -5.9937 + (0.0198 * \text{Humedad}) + (10.1032 * \text{Vibración})$$

Cálculo de los valores predichos:

Utilizando los coeficientes obtenidos, se calculan los valores de temperatura estimados (T_{predicho}) para cada registro de datos:

$$T_{\text{predicho}} = -5.9937 + (0.0198 * \text{Humedad}) + (10.1032 * \text{Vibración})$$

Resultados del modelo:

Error cuadrático medio (MSE): 0.0007

Coefficiente de determinación (R²): 0.9762

Coefficientes obtenidos:

Coefficiente para Humedad: 0.0198

Coefficiente para Vibración: 10.1032

4.4.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA REGRESION LINEAL

El modelo muestra que por cada incremento de 1% en la humedad relativa, la temperatura estimada incrementa en 0.0198 °C, mientras que, por cada incremento de 1 g en las vibraciones, la temperatura incrementa en 10.1032 °C. Estos resultados destacan la relevancia de ambas variables en la predicción de la temperatura dentro del sistema monitoreado.

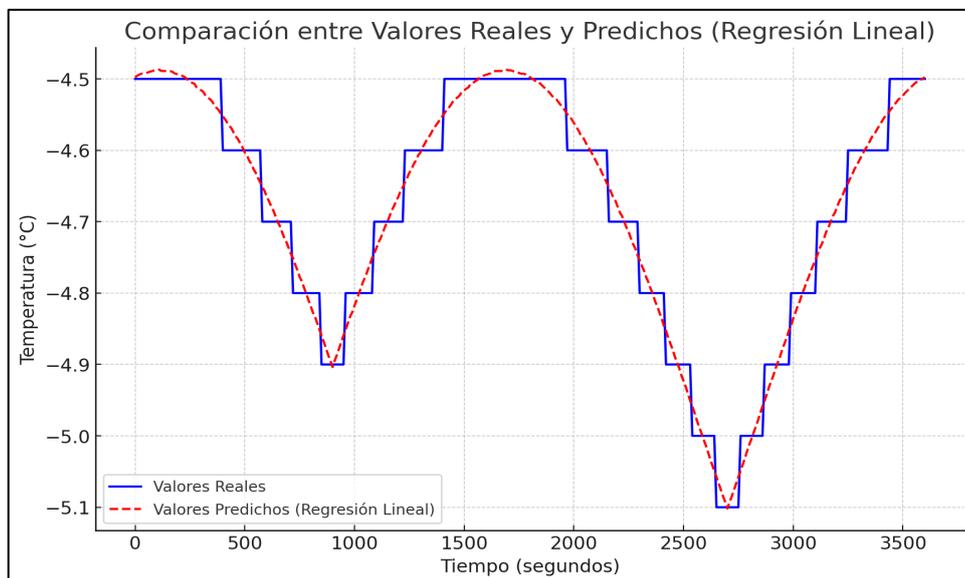


FIGURA 25 COMPARACION ENTRE VALORES REALES Y GENERADOS POR REGRESION LINEAL

En la Figura 25 se muestra que, en este análisis, se utilizó un modelo de regresión lineal para ajustar los datos reales en el ambiente simulado, obteniendo una

ecuación matemática que describe la relación entre las variables de entrada (vibración) y la variable de salida (temperatura). Los datos de vibración se generaron en intervalos de 10 segundos, mientras que los valores de temperatura fueron calculados utilizando la ecuación base del modelo térmico. A partir de estos datos, el modelo de regresión permitió generar predicciones que luego fueron comparadas con los valores reales capturados previamente.

La visualización de los resultados incluye una gráfica que ilustra la línea de regresión ajustada y su comparación con los datos reales. Esta gráfica demuestra la capacidad del modelo para aproximar con precisión los valores de temperatura en función de las vibraciones, proporcionando una herramienta útil para el monitoreo y control de las condiciones ambientales en el transporte de productos perecederos.

Además, se evaluaron métricas clave como el error promedio y el coeficiente de determinación (R^2) para validar la eficacia del modelo. Esta sección no solo refuerza la importancia de utilizar herramientas estadísticas en el análisis de datos de IoT, sino que también destaca la posibilidad de predecir comportamientos futuros, permitiendo optimizar la gestión de la cadena de frío.

CONCLUSIONES FINALES

El desarrollo del presente trabajo de investigación en IoT para el monitoreo y control de la cadena de frío demostró ser técnicamente viable y altamente funcional en un entorno simulado. A través de cálculos rigurosos y pruebas controladas, se validaron los modelos matemáticos utilizados para predecir las variaciones de temperatura interna bajo condiciones críticas como cambios en la humedad relativa, vibraciones y tiempo de exposición. Estos modelos permitieron evaluar con precisión las dinámicas térmicas de los productos en tránsito, confirmando su aplicabilidad práctica.

El análisis de regresión lineal realizado sobre los datos reales ofreció una herramienta complementaria para verificar la precisión de los modelos teóricos y garantizar la consistencia de los resultados. Este análisis mostró una alta correlación entre los valores reales y predichos, validando la confiabilidad de los datos generados. Esto refuerza la capacidad predictiva del sistema IoT en escenarios similares.

Además, se detalló exhaustivamente el proceso de desarrollo de la solución IoT, desde la elección de sensores DHT22 para el monitoreo de temperatura y humedad, hasta la configuración del gateway LoRa Heltec WiFi LoRa 32 V2 y el servidor MQTT para la transmisión de datos en tiempo real. En este desarrollo, se seleccionaron cuidadosamente la arquitectura del sistema y los estándares de conexión más convenientes, considerando las particularidades y demandas de los entornos propios de la cadena de frío. Asimismo, se incluyó la creación de un sistema de visualización eficiente mediante MongoDB Charts, que permitió analizar y monitorear los datos recopilados de manera clara, precisa y en tiempo real, mejorando así la capacidad de gestión y toma de decisiones.

En conjunto, esta investigación aporta un marco robusto para la implementación de soluciones IoT en la cadena de frío, destacando su utilidad en la industria alimentaria, farmacéutica y logística. Este trabajo no solo valida la efectividad técnica de la solución propuesta, sino que también resalta su impacto práctico al ofrecer herramientas concretas para garantizar la calidad y seguridad de los productos perecederos durante su transporte y almacenamiento. El proyecto

terminal contribuye significativamente al desarrollo tecnológico al integrar metodologías innovadoras, herramientas modernas y procesos bien documentados que pueden servir como referencia para futuros proyectos en este campo. Al combinar un análisis exhaustivo con la implementación práctica, este trabajo establece una base sólida para mejorar los estándares actuales de monitoreo en tiempo real, optimizar procesos logísticos y garantizar la satisfacción de las necesidades crecientes en el manejo de productos perecederos.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación se proponen las siguientes recomendaciones para fortalecer la implementación y desarrollo de soluciones IoT en la cadena de frío:

Validación de equipos y sensores: Antes de implementar el sistema en un entorno real, se recomienda realizar pruebas exhaustivas de calibración y validación de los sensores utilizados, como el DHT22. Esto garantizará la precisión de las mediciones y evitará errores que puedan comprometer la calidad de los productos.

Optimización de la red de comunicación: Considerar la evaluación de otros protocolos de comunicación IoT que complementen o mejoren la conexión LoRa en términos de cobertura, latencia y consumo energético. Esto podría ser útil en entornos de transporte a larga distancia o con obstrucciones físicas.

Ampliar el modelo matemático desarrollado para incluir otras variables externas que puedan influir en la temperatura y humedad: Como la radiación solar o la variación en altitudes durante el transporte. Esto aumentará la robustez y aplicabilidad del sistema en distintos contextos operativos.

Diseñar la solución IoT para permitir una escalabilidad gradual: Por ejemplo, incluir sensores adicionales u otros tipos de monitoreo, como cámaras

térmicas o sensores de gas, para diversificar el alcance del sistema y garantizar que pueda adaptarse a diferentes industrias.

Análisis continuo y mejoras iterativas: Implementar un sistema de monitoreo y análisis continuo para evaluar el rendimiento de la solución IoT en el tiempo. Los datos recopilados pueden utilizarse para identificar áreas de mejora, ajustar parámetros del sistema o actualizar los modelos de predicción.

Cumplimiento de normativas y estándares: Asegurar que la solución IoT cumpla con las normativas y estándares internacionales relacionados con la calidad y seguridad de los productos en la cadena de frío. Esto no solo garantizará el cumplimiento legal, sino que también aumentará la confianza del consumidor en la solución propuesta.

Estas recomendaciones buscan consolidar y maximizar el impacto de la solución IoT desarrollada en esta investigación, garantizando su eficacia y relevancia en la mejora de la cadena de frío en diferentes sectores industriales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, E., & Alexander, N. K. (2021). Evaluating suitability of a DS18B20 temperature sensor for use in an accurate air temperature distribution measurement network. *Department of Engineering and Mathematics, Sheffield Hallam University, UK*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/357774010>

Ashton, K. (2009). That 'Internet of Things' Thing. *RFID Journal*. Recuperado de <https://www.rfidjournal.com/expert-views/that-internet-of-things-thing/73881/>

AWS. (2023). MQTT Amazon Web Services. Recuperado de <https://aws.amazon.com/what-is/mqtt/>

Banks, A., Briggs, E., Borgendale, K., & Gupta, R. (2019). MQTT Version 5.0. *OASIS Standard*. Recuperado de <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>

Beamex. (s.f.). How to calibrate temperature sensors. *Beamex Blog*. Recuperado de <https://blog.beamex.com/how-to-calibrate-temperature-sensors>

Buske Logistics. (s.f.). Logística de cadena de frío: Definición y significado. Recuperado de <https://www.buske.com/es/what-is/cold-chain-logistics>

Campbell, H. (2020). A non-inferiority test for R-squared with random regressors. *arXiv Preprint*. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2002.08476>

DeWitt, C. (2021). Managing the cold chain for quality and safety. *Oregon State University*. Recuperado de <https://seafood.oregonstate.edu/sites/agscid7/files/snic/managing-the-cold-chain-for-quality-and-safety.pdf>

Decagon Devices, Inc. (s.f.). Fundamentals of Water Activity. Recuperado de <https://talcottlab.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/108/2019/01/Fundamentals-of-Aw-Decagon.pdf>

EMQX. (s.f.). Security & Trust Center. Recuperado de <https://www.emqx.com/en/security-and-trust-center>

Espressif Systems. (2020). FCC Compliance FCC PART 15.247. Recuperado de <https://fccid.io/pdf.php?id=2921007>

Espressif Systems. (2022). ESP32. Recuperado de <http://esp32.net/>

Fennema, O. (1977). *Nutritional Evaluation of Food Processing*. AVI Publishing Co. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-011-7030-7>

Foote, K. D. (2014). A Brief History of the Internet of Things. *DataVersity*. Recuperado de <https://www.dataversity.net/brief-history-internet-things/>

- Gillis, A. S. (2021). What is internet of things (IoT)? *IoT Agenda*. Recuperado de <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>
- Gibert Renart, E., Balouek-Thomert, D., & Parashar, M. (2019). Challenges in designing edge-based middlewares for the Internet of Things: A survey. *arXiv Preprint*. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/1912.06567>
- González, I., & Estrada, H. (2019). Arquitectura IoT para el desarrollo de sistemas de monitorización y análisis en el contexto de la salud. *Revista de Tecnología*, 18(2), 123-135. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7799074.pdf>
- Harwood, T. (2017). IoT History. Recuperado de <https://www.postscapes.com/iot-history/>
- Hassan, Q., Khan, A., & Madani, S. (2018). *Internet of Things: Challenges, Advances, and Applications*. CRC Press. Recuperado de <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315155005/internet-things-qusay-hassan-atta-ur-rehman-khan-sajjad-madani>
- Heltec Automation. (s.f.). WiFi LoRa 32(V2) — Phaseout. Recuperado de <https://heltec.org/project/wifi-lora-32v2/>
- Herrero Herranz, J. C., & Sánchez Allende, J. (2015). Una mirada al mundo Arduino. *Tecnología@ y desarrollo*, XIII, 1-14. Recuperado de https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/download/617/573
- IoT Analytics. (2022). IoT Analytics. Recuperado de <https://iot-analytics.com/reports-databases/>
- ITA. (2023, noviembre 1). LoRa y LoRaWAN: Comunicación Inalámbrica de Largas Distancias para IoT. Recuperado de <https://ita.tech/lora-lorawan-comunicacion-inalambrica-largas-distancias-iot>
- ITU. (2015). Internet of Things Global Standards Initiative. Recuperado de <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>
- Jimenez, C. (2020). *Diagnóstico de sensores de temperatura en transportes frigoríficos basados en tecnología Arduino & IoT para ENAPU S.A.* Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote. Recuperado de: <https://repositorio.uladech.edu.pe/handle/20.500.13032/28173>
- Kato, N. (2013). *Cold Chain Infrastructure and Related Industries: Contribution to Food Losses/Waste Reduction*. Symposium on Human Resource Development in Food-Related Areas. Recuperado de: https://www.maff.go.jp/e/pdf/3-3_kato.pdf
- Leblanc, R. (2019). The Importance of IoT for Cold Chain. *Packaging Revolution*. Recuperado de <https://packagingrevolution.net/the-importance-of-iot-for-cold-chain/>

Maksimović, M., Vujović, V., & Omanović-Miklićanin, E. (2015). Application of internet of things in food packaging and transportation. *International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics*, 1(4), 333–350. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/296486930_Application_of_Internet_of_Things_in_food_packaging_and_transportation

MathWorks. (s.f.). fit. Recuperado de <https://www.mathworks.com/help/curvefit/fit.html>

McKinsey-Digital. (2022). IoT Value Set to Accelerate Through 2030: Where and How to Capture It. Recuperado de <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/iot-value-set-to-accelerate-through-2030-where-and-how-to-capture-it>

MOKO LoRa. (2021, agosto 3). Cómo lograr el monitoreo de la cadena de frío con LoRaWAN. Recuperado de <https://www.mokolora.com/es/cold-chain-monitoring-with-lorawan/>

Peña Cortés, D. A. (2022). Control térmico en el transporte de vacunas, usando tecnología IoT. *Universidad Militar Nueva Granada*. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstreams/013a3780-dc4b-4e69-9f9c-564c2024b837/download>

Posey, B. (2022). *Tech Target*. Recuperado de <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/IoT-gateway>

Precedence Research. (2022). Frozen Food Market Size to Worth Around US\$ 504.41 Billion by 2030. *GlobeNewswire*. Recuperado de <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/06/14/2462321/0/en/Frozen-food-Market-Size-to-Worth-Around-US-504-41-Bn-by-2030.html>

Sistemas de Refrigeración. (2011, febrero 11). Humedad, aire y almacenamiento en frío. *Blogia*. Recuperado de <https://sistemasderefrigeracion.blogia.com/2011/021101-humedad-aire-y-almacenamiento-en-frio.php>

Soluciones Post-Cosecha. (2013). Principales causas del deterioro de los Alimentos. Recuperado de <https://solucionespost-cosecha.blogspot.com/2013/05/principios-de-la-aplicacion-del-frio.html>

Traukina, A., Thomas, J., Tyagi, P., & Reddipalli, K. (2018). *Industrial Internet Application Development: Simplify IIoT Development Using the Elasticity of Public Cloud and Native Cloud Services* (1st ed.). Packt Publishing. Recuperado de <https://github.com/PacktPublishing/Industrial-Internet-Application-Development>

United Nations Economic Commission for Europe. (2022). Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to be Used for Such Carriage (ATP). *United Nations*. Recuperado de <https://unece.org/transport/ATP>

United Nations UNECE. (2022). Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to Be Used for Such Carriage (ATP). Recuperado de https://unece.org/sites/default/files/2022-05/2201321E_pdf_web%20with%20corrections_protected.pdf

Utkina, I. (2019). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado de <https://www.fao.org/news/story/en/item/1238015/icode/>

U.S. Food and Drug Administration. (s.f.). Enfriar los alimentos. Recuperado de <https://www.fda.gov/food/people-risk-foodborne-illness/enfriar-los-alimentos-seguridad-alimentaria>