

SISTEMA DE MONITOREO INTELIGENTE DE UNA CADENA DE SUMINISTRO DE FRÍO PARA PRODUCTOS BIOLÓGICOS

INTELLIGENT MONITORING SYSTEM OF A COLD SUPPLY CHAIN FOR BIOLOGICAL PRODUCTS

Fecha de aceptación: 01/11/2024

Elsa Estrada Guzmán

Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco. México
<https://orcid.org/0000-0003-2009-9661>
elsa.estrada@academicos.udg.mx

Sonia Osorio Angel

Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco. México
<https://orcid.org/0000-0003-4540-4191>
sonia.oangel.academicos.udg.mx

Adriana Peña Pérez Negrón

Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco. México
<https://orcid.org/0000-0001-6823-2367>
adriana.ppnegrón@academicos.udg.mx

Diego Israel Hernández Galindo

Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco. México
<https://orcid.org/0009-0000-2681-4502>
diegohergal@gmail.com

RESUMEN: Las fallas eléctricas o la falta de monitoreo pueden provocar la pérdida de reactivos biológicos, como vacunas y medicamentos, debido a variaciones de temperatura durante su refrigeración. El Internet de las cosas (IoT) se ha integrado en diversos trabajos para

el control inteligente de la red de frío, con propuestas que se enfocan principalmente en cadenas de suministro, aunque sin abordar este control de manera integral. En este trabajo se propone un sistema de monitoreo para el control de la temperatura de productos biológicos. El proyecto se basa en una arquitectura IoT de 6 capas: sensores o percepción, conectividad, gestión de servicios, middleware, aplicación y negocios. La propuesta integra tres módulos: control de temperatura, control de alertas y configuración. Se utiliza MQTT como estándar de comunicación para notificar si se excede el tiempo máximo en el que las puertas de un refrigerador pueden permanecer abiertas. Se incorpora un microcontrolador de doble núcleo para dar soporte al procesamiento de Big Data y el disparo de alarmas en sitio. Se implementa una aplicación web y un bot para facilitar la gestión del sistema. El sistema se evalúa conforme a las normas oficiales mexicanas, para verificar que los equipos mantengan una conservación adecuada de los productos almacenados.

PALABRAS CLAVE: Ciudades inteligentes, Internet de las cosas, suministro inteligente para red de frío, sistema de monitoreo y alertas.

ABSTRACT: Power failures or lack of monitoring can lead to the loss of biological reagents, such as vaccines and medications, due to temperature variations during refrigeration. The Internet of Things (IoT) has been integrated into various projects for the intelligent control of the cold chain, with proposals mainly focusing on supply chains but lacking a comprehensive approach. This paper proposes a monitoring system for the temperature control of biological products. The project is based on a 6-layer IoT architecture: sensors or perception, connectivity, service management, middleware, application, and business. The proposed system integrates three modules: temperature control, alert control, and configuration. MQTT is used as a communication protocol to notify if the maximum time that refrigerator doors can remain open is exceeded. A dual-core microcontroller is incorporated to support Big Data processing and trigger on-site alarms. A web application and a bot are implemented to facilitate system management. The system is evaluated according to Mexican official standards to verify that the equipment maintains adequate preservation of the stored products.

KEYWORDS: Smart cities, Internet of Things, smart supply chain for cold chain, monitoring and alert system.

INTRODUCCIÓN

Debido a la pandemia generada por el COVID-19, los requisitos y estándares de los sistemas de red de frío cobraron gran relevancia, con el objetivo de prevenir la contaminación de los artículos transportados. Entre los productos más importantes en este contexto se encuentran algunas vacunas, las cuales requieren ser transportadas y almacenadas a temperaturas de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su adecuada preservación (Naciones Unidas México, 2020). A nivel mundial, la demanda de redes de frío ha ido en aumento, no solo en el contexto de las vacunas, sino también en diversos sectores de la industria (Lloyd & Cheyne, 2017; He et al., 2022; Ramírez et al., 2022).

La red de frío es un sistema especializado de cadena de suministro en el que cada etapa preserva la calidad de los productos biológicos desde su fabricación hasta el momento de su administración, asegurando que se almacenen y transporten dentro de los rangos de temperatura adecuados (Fahrni et al., 2022), como se ilustra en la Figura 1.

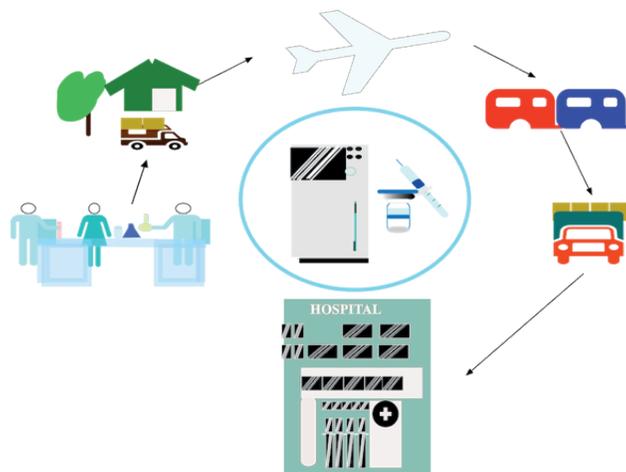


Figura 1. Red de frío para el control de temperatura de productos biológicos. Fuente propia.

En México, solo en el estado de Jalisco, de acuerdo con la unidad de transparencia del servicio de salud, se reportaron daños en más de 28 mil dosis de productos biológicos durante los años 2019 y 2020, debido a fallas en la red de frío que ocasionaron problemas de enfriamiento. Estas fallas resultaron en pérdidas al erario de aproximadamente 2.8 millones de pesos mexicanos. El sistema de monitoreo de la red de frío en Jalisco depende del personal de salud, quien realiza observaciones de las temperaturas internas y externas y lleva un registro únicamente manual, a menudo sin capacitación previa. Además, las fallas prolongadas en el suministro eléctrico pueden dificultar el mantenimiento de la temperatura adecuada, lo que compromete la efectividad de los productos biológicos, ya que las temperaturas de almacenamiento pueden superar los límites de conservación.

Para reducir los daños en este tipo de productos, es necesario un seguimiento continuo y sistemático del estado y condiciones del equipo especializado. Por ello, algunos procesos automáticos han ganado terreno en el mantenimiento de la red de frío.

Las Ciudades Inteligentes o *Smart Cities* representan un marco de desarrollo social y urbano que utiliza la tecnología para mejorar la calidad de vida de los habitantes en todas sus dimensiones: gobierno, sociedad, vivienda, economía, movilidad y medio ambiente. La implementación del monitoreo y la comunicación a través del IoT se evidencia en el Transporte Inteligente (*Smart Transportation*) (Fantin Irudaya Raj & Appadurai, 2022), la Agricultura Inteligente (*Smart Farming*) (Navarro et al., 2020), la Cadena de Suministro Inteligente (*Smart Supply Chain*) (Zhang et al., 2023), e incluye también la Red de Frío Inteligente (*Smart Cold Chain*) (Thiyaneswaran et al., 2022), entre otros.

El Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) proporciona la infraestructura tecnológica para todas las dimensiones de las *Smart Cities*, incluida la red de frío. El IoT puede integrarse en el sistema de suministro con beneficios significativos, como el

monitoreo en tiempo real de la red de frío, la detección temprana de anomalías, el apoyo al personal en la identificación de problemas, entre otros.

Existen investigaciones, aplicaciones web y móviles que asisten en el control y monitoreo de productos biológicos, aunque no de manera integrada. Este trabajo propone un dispositivo IoT para el control de la red de frío destinada a productos biológicos.

En la primera sección se describen los antecedentes; en la segunda sección se expone el marco legal como referencia para la red de frío de productos biológicos; en la tercera sección se presenta la metodología; y en la cuarta sección se muestran los resultados.

MARCO TEÓRICO

En respuesta a la demanda de soluciones para la refrigeración de vacunas, se han desarrollado diversas propuestas similares que varían en su arquitectura. Los objetivos de monitoreo y control establecen los requisitos de implementación de cada capa de la arquitectura. Por ejemplo, un sistema de refrigeración para el transporte hacia áreas remotas sin uso de electricidad (Li et al., 2016) es un prototipo básico que mantiene la temperatura de las vacunas en el rango adecuado durante su transporte, aunque no utiliza sensores.

Existen otras propuestas enfocadas en el monitoreo del producto durante su traslado. Por ejemplo, un sistema de monitoreo con fotorresistencias empleadas como sensores permite detectar si se abren los contenedores de vacunas (Hasanat et al., 2020). Este sistema asegura que las vacunas no sean robadas mediante una aplicación que envía notificaciones por SMS y su diseño está basado en las capas de la arquitectura IoT. Otras herramientas incluyen más parámetros, como humedad y geoposicionamiento, como en los modelos de Mohsin y Yellampalli (2017) y Balachandar y Chinnaiyan (2020), también fundamentados en la arquitectura IoT. En cuanto a los sistemas de monitoreo en sitio, la inteligencia depende del uso de la información proporcionada por sensores de temperatura dentro de los refrigeradores y su conectividad con la nube, que genera alertas. Ejemplos de esto son las propuestas de Qiao et al. (2017) y Mansingh y Prakash (2020).

Uno de los protocolos de IoT que se ha popularizado es MQTT, ya que permite una mayor integración entre el hardware y los sistemas digitales, y se ha convertido en un estándar para la transmisión de datos entre sensores, así como para la comunicación entre dispositivos y la nube. Un ejemplo de la implementación de MQTT es el sistema de monitoreo de temperatura y humedad de productos biológicos propuesto por Soto et al. (2019). A través de una interfaz gráfica, este sistema visualiza los datos en la plataforma BlueMix de IBM, almacena la información en una base de datos externa y envía alertas por correo electrónico.

La propuesta presentada en este trabajo es un sistema que incluye un dispositivo IoT de bajo costo para controlar y monitorear en tiempo real la temperatura y la apertura y

cierre de puertas de múltiples unidades de refrigeración conectadas mediante un protocolo IoT, garantizando la calidad del producto. El sistema incluye control de alertas a través de mensajes que notifican al administrador sobre el estado de la temperatura y humedad internas y externas del refrigerador. El diseño y desarrollo integran diferentes tecnologías de hardware y software, incluyendo el protocolo de comunicación MQTT, almacenamiento en la nube, una base de datos externa, un panel de control para la visualización del monitoreo y un chatbot para el envío de alertas.

Marco Legal para el Monitoreo de la Temperatura

En México, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) constituyen el marco de referencia legal. Las NOM que regulan directamente el almacenamiento y refrigeración de vacunas y hemoderivados son la NOM-253-SSA1-2012, que se refiere a la disposición de sangre humana y sus componentes terapéuticos¹, y la NOM-036-SSA2-2012², enfocada en la prevención y control de enfermedades. La primera norma establece que los equipos de refrigeración deben mantener una temperatura de entre 2 °C y 6 °C para la adecuada conservación de productos derivados de sangre y concentrados de eritrocitos. La segunda norma establece que, para la conservación de productos biológicos, la temperatura de refrigeración debe mantenerse entre los 2 °C y 8 °C.

Asimismo, en México, el Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud (CENETEC) proporciona información basada en evidencia para la toma de decisiones en materia de tecnologías para la salud. Entre las guías tecnológicas emitidas por CENETEC se encuentra la guía tecnológica #42, que establece los requisitos mínimos indispensables para equipos de refrigeración destinados al almacenamiento de vacunas, medicamentos y hemoderivados. Estos equipos deben contar con un sensor de temperatura con un rango de error de ± 0.5 °C, una resolución de 0.1 °C y alarmas auditivas en caso de fallas en el suministro eléctrico, en el sensor o por puerta abierta durante más de un minuto, para asegurar el buen estado de los productos almacenados en las unidades de refrigeración.

Estas normas fueron consideradas para el diseño del dispositivo IoT de monitoreo, tanto para establecer los rangos aceptables de temperatura del refrigerador de vacunas como para seleccionar sensores de temperatura con el mínimo rango de error.

METODOLOGÍA

El desarrollo de la solución propuesta en este trabajo se basó en la estructura de capas típica de la arquitectura IoT. Desde el enfoque de un *framework*, se diseñaron e implementaron tres componentes o módulos:

1 "Para la disposición de sangre humana y sus componentes terapéuticos", Norma Oficial Mexicana NOM-253-S-SA1-2012, Diario Oficial de la Federación, 18 de julio de 1994.

2 Prevención y control de enfermedades. Aplicación de vacunas, toxoides faboterapicos e inmunoglobulinas en el humano, Norma Oficial Mexicana NOM-036-SSA2-2012, Diario Oficial de la Federación, 28 de febrero de 2012.

1. Conexión de dispositivos IoT para refrigeración controlada
2. Implementación de microcontrolador para el análisis de datos y,
3. Visualizador de datos.

En la Figura 2 se presenta la estructura de la propuesta, donde se observa la arquitectura que comprende el flujo y la conexión entre los módulos. Para implementar las seis capas de la arquitectura, se llevaron a cabo diversas actividades en las que se añadieron y probaron componentes y funcionalidades.

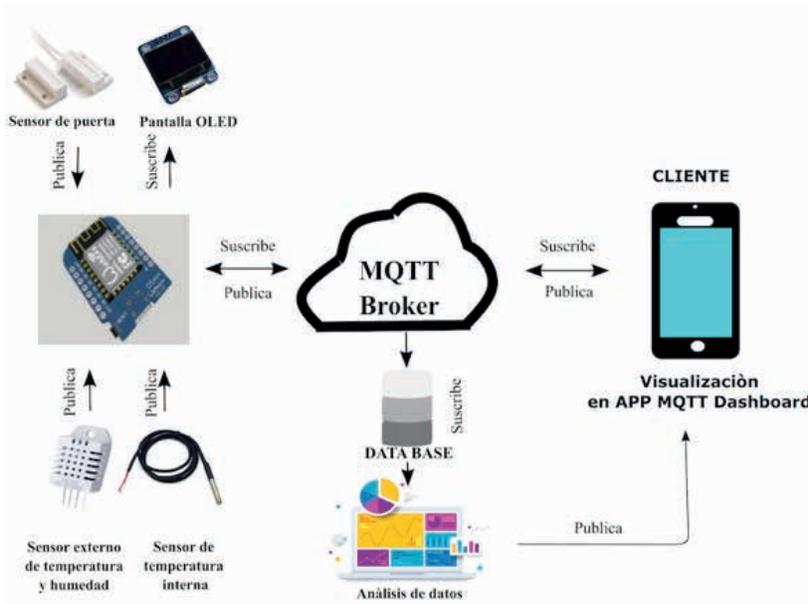


Figura 2. Estructura de la propuesta de dispositivo IoT. Fuente propia.

El sistema fue desarrollado en cinco fases, ya que algunas fases incluyen más de una capa IoT, y con frecuencia alguna capa es retomada en distintas fases para probar la integración de nuevos componentes.

Fase 1: Diseño de la placa de circuito impreso con integración de sensores a través de MQTT y comunicación con bot

En esta fase se implementaron la capa de sensores o percepción de datos y la capa de conectividad o red, para conectar los sensores y el microcontrolador. Se creó un bot para probar la conectividad y visualizar los mensajes reales emitidos por los sensores. Se diseñaron los tópicos de comunicación, iniciando así la implementación de las capas de gestión de servicios y de aplicación, que se completarán en fases posteriores. A continuación, se describen las actividades realizadas en esta fase:

- Se diseñaron placas de circuito impreso (PCB) para ubicar una en la parte externa del refrigerador. Se programó un microcontrolador para conectarse a los sensores de temperatura y humedad externos. En la PCB ubicada dentro de la unidad de refrigeración, se colocaron los sensores de temperatura interna, así como los sensores de apertura y cierre de la misma.
- Las tarjetas electrónicas se diseñaron utilizando *Proteus™ 8 Professional - 3D Visualizer*. En la Figura 3 se muestra el diseño de la PCB con los componentes montados.
- Se seleccionaron los sensores por su alta precisión y bajo costo, luego de realizar un estudio comparativo de diversos dispositivos. Además, se realizó un análisis de costos de los componentes requeridos por cada unidad de refrigeración y se calculó el total para las aproximadamente 945 unidades de salud en Guadalajara, Jalisco. La cifra se comparó con las pérdidas anuales actuales debido a la falta de control en el enfriamiento de productos biológicos, y se observó que este sistema puede ser una opción viable para reducir esas pérdidas.
- El diseño de los tópicos de comunicación se realizó mediante la plataforma de código abierto *Cloud-Native* utilizando el protocolo MQTT *Broker* para IoT (*EMQXTM*)³, lo cual permite la suscripción de clientes para la lectura de datos de telemetría.
- Se creó un bot en la aplicación *Telegram™* para enviar alertas cuando se superan los límites de temperatura establecidos en la unidad de refrigeración.

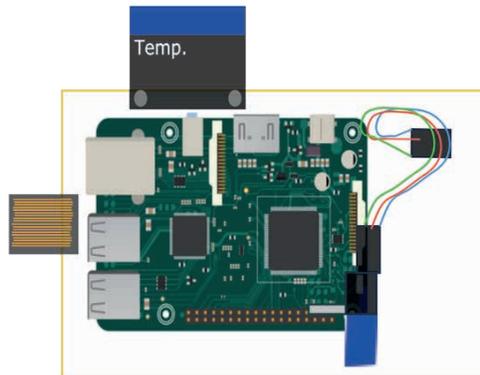


Figura 3. PCB externa con componentes montados. Fuente propia.

Fase 2: Base de datos y pruebas de suscripción al bróker

En esta fase se implementa la capa de *middleware* para la analítica y procesamiento de información en un entorno de múltiples tecnologías. Se crea una base de datos en MySQL, y las tablas de esta base de datos se estructuran en relación con las variables

³ <https://www.emqx.io/>

asociadas al monitoreo de un refrigerador. Las variables incluyen: ID de puerta del refrigerador, temperatura interna con la puerta cerrada, temperatura externa con la puerta cerrada, humedad interior con la puerta cerrada, fecha e identificación.

Durante esta fase, se continuaron las pruebas de conexión entre el microcontrolador, internet, la base de datos y el bróker, y se realizaron ajustes correctivos para asegurar la suscripción a los tópicos, así como para probar la alarma al comparar las temperaturas monitoreadas con los límites establecidos en la norma. Debido al gran volumen de datos a analizar, se identificó la necesidad de emplear un microcontrolador de múltiples núcleos para dividir tareas, optimizar el procesamiento y evitar errores de ejecución.

Fase 3: Implementación de panel en página web para suscripciones dinámicas de tópicos en conexión con el dispositivo IoT

Se implementó una aplicación web para las suscripciones dinámicas de los diferentes tópicos que reciben información del dispositivo IoT. Esta aplicación incluye la programación de funciones principales para el módulo de visualización de datos. Continúa la integración de diversas tecnologías, por lo que en esta fase se sigue trabajando con la capa de *middleware*.

Se utilizó un servidor privado virtual (*Virtual Private Server* o VPS) para controlar el *hosting*, facilitando el acceso a las bases de datos y al dominio web; esta configuración se realizó en un sistema operativo Ubuntu 12.04. Posteriormente, se instaló el bróker MQTT en el mismo VPS, en su versión gratuita. En cada conexión, es posible enviar información en un arreglo de n caracteres, donde cada posición del arreglo puede representar un sensor diferente. Se configuraron los puertos de comunicación segura para evitar interferencias con los ya utilizados en el panel de control y en el servidor MySQL.

En el *backend*, se desarrolló un script en NodeJS que corre en segundo plano, habilitando una conexión permanente a la base de datos y monitoreando tópicos predeterminados para escribir en la base de datos la información recibida desde el microcontrolador.

Fase 4: Desarrollo de microcontroladores y programación de segundo núcleo

En esta fase se desarrollaron nuevas versiones del microcontrolador y se añadieron funcionalidades para registrar datos en la base de datos. Se programó el segundo núcleo del microcontrolador para activar alarmas en el sitio y enviar alertas mediante *Telegram™*, así como notificaciones SMS a través de la API *Twilio™*. Además, se programó un ciclo de configuración para almacenar todas las variables de control, como el nombre de la unidad, contraseña, modo de ejecución, *chat ID* de *Telegram™*, y el bot de *Telegram™*.

Fase 5: Montaje y pruebas del prototipo en refrigerador

En esta fase se realizó una prueba integral de un prototipo en un refrigerador doméstico, evaluando todo su funcionamiento; en esta etapa se implementó la capa de negocios.

Para las pruebas se utilizaron: un eliminador de 5 volts a 1 amperio que conecta una parte del dispositivo, el prototipo y un cable UTP de 4 pares plano que conecta ambas partes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El prototipo IoT es uno de los principales resultados del desarrollo de tres módulos: la conexión de dispositivos IoT para la refrigeración controlada, la implementación del microcontrolador para el análisis de datos y el módulo de visualización. Este prototipo consiste en un microcontrolador al que están conectados una pantalla de visualización de temperatura interna, un sensor de temperatura, un sensor de humedad externa, una alarma auditiva y un dispositivo interno, los cuales permiten el monitoreo constante y el mantenimiento de las temperaturas recomendadas. En la Figura 4 se muestra cómo fue instalado el dispositivo en el exterior de un refrigerador. Los componentes principales de este dispositivo incluyen el dispositivo externo, la pantalla de mensajes y el dispositivo interno, como se observa en las Figuras 5 y 6.

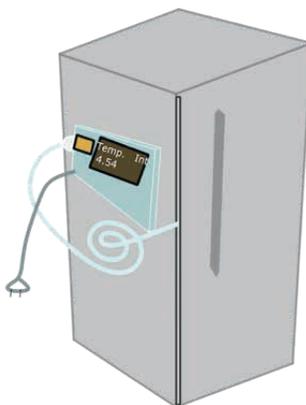


Figura 4. Dispositivo externo del Prototipo IoT conectado a un dispositivo interno de un refrigerador.
Fuente propia.



Figura 5. Pantalla de dispositivo externo de Prototipo IoT con mensaje de intento de conexión a Wi-Fi. Fuente propia.



Figura 6. Dispositivo interno IoT del refrigerador. Fuente propia.

En la pantalla se muestran mensajes para el personal encargado del proceso, incluyendo el estado del dispositivo y la temperatura interna de la unidad de refrigeración. Al conectarse el dispositivo a la red, muestra la temperatura interna del refrigerador mediante la conexión al dispositivo interno. Este dispositivo interno es una placa que tiene ensamblados los sensores de temperatura interna y de apertura y cierre de la puerta, los cuales envían parámetros de temperatura y estado de la puerta.

Visualización de los dispositivos IoT para monitoreo

Como resultado de este módulo se desarrollaron dos sistemas: una aplicación web que integra una interfaz para visualizar los dispositivos conectados a la red de frío, junto con un *dashboard* para el monitoreo de estos dispositivos, y un bot de Telegram. En la aplicación web se implementaron funciones para el registro de usuarios e inicio de sesión, así como un menú con tres opciones: *Dashboard*, *Agregar dispositivos* y *Eliminar dispositivos*. La Figura 7 muestra la interfaz principal de la aplicación web, que incluye el menú de opciones y un formulario para la incorporación de nuevos dispositivos IoT. En esta sección, se deben registrar la ubicación (alias) y el número de serie, que identifica cada refrigerador, ya que pueden existir varios en una misma ubicación. También se enlistan todos los dispositivos conectados a la red junto con las fechas de agregación. En la Figura 8 se observa cómo el *dashboard* muestra en tiempo real los parámetros de desempeño de las unidades de refrigeración monitoreadas por los dispositivos de la red de frío. En cada dispositivo aparecen la temperatura externa e interna, la humedad, el estado de la puerta (abierta o cerrada) y si está activa la alerta de temperatura (por exceder el límite indicado en la norma).

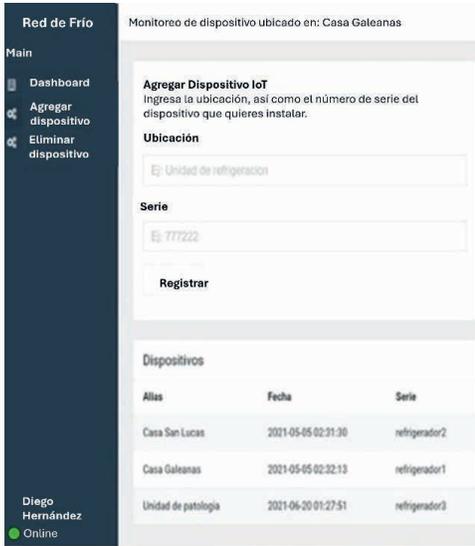


Figura 7. Interfaz para visualizar dispositivos de la Red de Frío. Fuente propia.

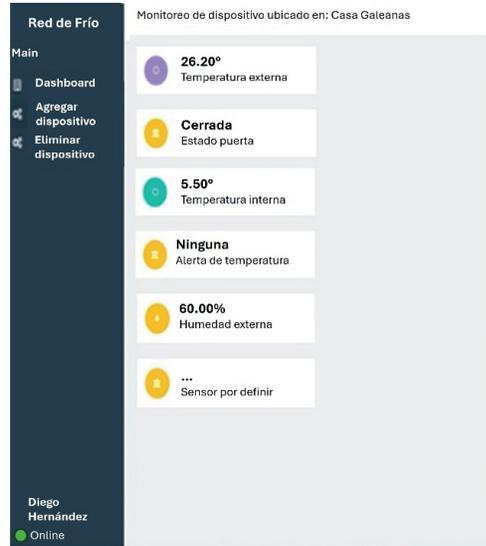


Figura 8. Pantalla de Dashboard para monitorear dispositivos de la Red de Frío. Fuente propia

Bot de Telegram

El bot de Telegram informa si la temperatura excede los límites establecidos o si se encuentra dentro del rango permitido. La Figura 9 muestra el bot recibiendo mensajes de datos sobre el refrigerador 1.

Bases de datos con registros de monitoreo de refrigeración de reactivos biológicos

Finalmente, se desarrolló una base de datos que almacena en tiempo real la información recibida desde los microcontroladores. Esta base de datos se compone de cuatro tablas: Puerta Abierta, Puerta Cerrada, Usuarios Registrados y Alarmas.

- En la tabla *Puerta Abierta*, se registran datos del momento en que la puerta del refrigerador está abierta, como la temperatura interna y externa, ya que esta última puede influir en la velocidad con la que se alcanza el umbral de activación de la alarma. Los atributos incluyen el ID de la unidad, temperatura interna al abrir la puerta, temperatura externa durante la apertura, temperatura final durante la apertura, humedad, tiempo de apertura y fecha.
- La tabla *Puerta Cerrada* almacena datos similares a los de la tabla *Puerta Abierta*, pero mientras la puerta está cerrada. Esto permite detectar posibles fallas eléctricas o mecánicas que podrían pasar desapercibidas para el personal encargado de la unidad de refrigeración. Los atributos son el ID de la unidad, temperatura interna, temperatura externa mientras la puerta está cerrada, humedad externa y fecha.

- La tabla *Alarmas* almacena cada alarma activada, permitiendo identificar patrones o causas que expliquen ciertas fallas. Los atributos incluyen el ID de alarma, dispositivo, tipo de alarma, temperatura externa en el momento de la alarma, temperatura interna en el momento de la alarma, humedad y fecha.
- La tabla *Usuarios Registrados* se utiliza para autenticar a los encargados de administrar sus respectivas unidades de una única red de frío. Los atributos son nombre, apellido, correo electrónico y contraseña.

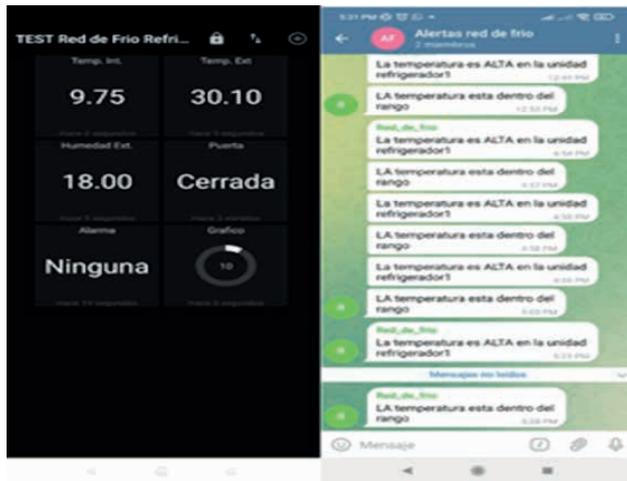


Figura 9. Bot recibiendo mensajes de refrigerador 1. Fuente propia.

Sumario de contribuciones teóricas y prácticas

El propósito de este trabajo es proponer un sistema de monitoreo IoT para refrigeradores de vacunas. Las contribuciones incluyen:

- **Contribuciones teóricas:** Esta propuesta presenta un modelo integral para comprender cómo emitir alertas para el control de la temperatura. Incluye diversas interfaces y la utilización de un microcontrolador de doble núcleo para soportar Big Data.
- **Contribuciones prácticas:** (i) Propuesta de un modelo económico en términos de dispositivos y elementos para su implementación. (ii) Un modelo implementado que cumple con las especificaciones de una norma específica y el marco legal para la refrigeración de vacunas.

CONCLUSIONES

Existen soluciones para el control de temperatura en la red de frío, pero generalmente utilizan tecnologías de forma aislada. En este trabajo se desarrolló un dispositivo IoT que

integra varias tecnologías, incluyendo un bot de Telegram, un *dashboard* y una base de datos. Esta integración permite satisfacer diversas necesidades, como el monitoreo de temperatura, la prevención mediante alertas y el registro constante del estado de las puertas de los refrigeradores, así como de su temperatura interna y externa, lo cual resulta de gran utilidad para la toma de decisiones futuras.

En cuanto al servidor, los procesos automáticos registran la información obtenida cada dos segundos, lo que permite disponer de un historial confiable de parámetros básicos, útil para un modelo de predicción preciso. Un riesgo potencial es que, si el dispositivo se desconecta de internet, si la conexión no es estable, o si la red no cuenta con una señal mínima de 2.4 GHz, la transmisión de la información al *broker* no se realizará correctamente.

REFERENCIAS

- Balachandar, S., & Chinnaiyan, R. (2020). *Reliable pharma cold chain monitoring and analytics through Internet of Things Edge*. In V. E. Balas, V. K. Solanki, & R. B. Kumar (Eds), *Emerging paradigms in intelligent innovation and analytics* (pp.133–161). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819593-2.00005-4>
- Fahrni, M. L., Ismail, I. A.-N., Refi, D. M., Almeman, A., Yaakob, N. C., Saman, K. M., Mansor, N. F., Noordin, N., & Babar, Z.-U.-D. (2022). Management of COVID-19 vaccines cold chain logistics: a scoping review. *Journal of Pharmaceutical Policy and Practice*, 15(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s40545-022-00411-5>
- Fantini Irudaya Raj, E., & Appadurai, M. (2022). Internet of Things-Based Smart Transportation System for Smart Cities. In S. Mukherjee, N. B. Muppalaneni, S. Bhattacharya, & A. K. Pradhan (Eds.), *Intelligent Systems for Social Good* (pp. 39–50). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0770-8_4
- Hasanat, R. T., Rahman, M. A., Mansoor, N., Mohammed, N., Rahman, M. S., & Rasheduzzaman, M. (2020). An IoT based Real-time Data-centric Monitoring System for Vaccine Cold Chain. *2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EWDTs50664.2020.9225047>
- He, X., Liu, X., Li, P., Wang, P., Cheng, H., Li, W., Li, B., Liu, T., & Ma, J. (2022). A Multi-Stage Green Barrier Strategy for the Control of Global SARS-CoV-2 Transmission via Cold Chain Goods. *Engineering (Beijing, China)*, 9, 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.013>
- Li, J. M., Friend, M., Miller, A., & Stone, S. (2016). A SDD and PCM solution for vaccine storage and outreach. *2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 555–562. <https://doi.org/10.1109/GHTC.2016.7857335>
- Lloyd, J., & Cheyne, J. (2017). The origins of the vaccine cold chain and a glimpse of the future. *Vaccine*, 35(17), 2115–2120. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2016.11.097>
- Mansingh, P. M. B., & Prakash, R. J. (2020). A Smart Medi-Care Refrigerator using IOT. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol*, 8(XI), 2321–9653. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.32055>
- Naciones Unidas México. (2020). La Temperatura, obstáculo para distribución de vacunas contra COVID-19. *Naciones Unidas México*. <https://coronavirus.onu.org.mx/la-temperatura-obstaculo-distribucion-de-vacunas-contra-covid-19>

- Mohsin, A., & Yellampalli, S. S. (2017). IoT based cold chain logistics monitoring. *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, 1971–1974. <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392059>
- Navarro, E., Costa, N., & Pereira, A. (2020). A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming. *Sensors*, *20*(15), 4231. <https://doi.org/10.3390/s20154231>
- Qiao, S., Zhu, H., Zheng, L., & Ding, J. (2017). Intelligent Refrigerator Based on Internet of Things. *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, *2*, 406–409. <https://doi.org/10.1109/CSE-EUC.2017.262>
- Ramírez, C., Rojas, A. E., & García, A. (2022). A Cold Chain Logistics with IoT and Blockchain Scalable Project for SMEs: First Phase. *IFAC-PapersOnLine*, *55*(10), 2336–2341. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.057>
- Soto, A. B. B., Coral, D. S. B., Parra, P. A. A., Charry, O. J. P., Muñoz, H. A. B., Torres, D. A. Q., & Rojas, J. S. S. (2019). IoT-based system for real-time monitoring of temperature and humidity variables in a pharmacy refrigeration equipment in a fourth-level hospital. *Proceedings of the 2nd Latin American Engineering Congress*, Cartagena de Indias, Colombia, 10–13.
- Thiyaneswaran, B., Anguraj, K., Kumarganesh, S., Sagayam, M. K., & Ghosh, S. (2022). IOT based smart cold chain temperatur monitoring and alert system for vaccination container. *Przeglad Elektrotechniczny*, *98*(8), 206–208.
- Zhang, G., Yang, Y., & Yang, G. (2023). Smart supply chain management in Industry 4.0: the review, research agenda and strategies in North America. *Annals of Operations Research*, *322*(2), 1075–1117. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04689-1>