



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL Y
MONITOREO MEDIANTE IoT DE LA CADENA DE FRÍO EN LA TRANSPORTACIÓN
DE MEDICAMENTOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica

AUTORES: NELSON ALFREDO PESANTES CASTRO
CAMILO DANIEL RODRÍGUEZ ZÚÑIGA
TUTOR: ING. RAFAEL FRANCO REINA, MSc.

Guayaquil – Ecuador
2024

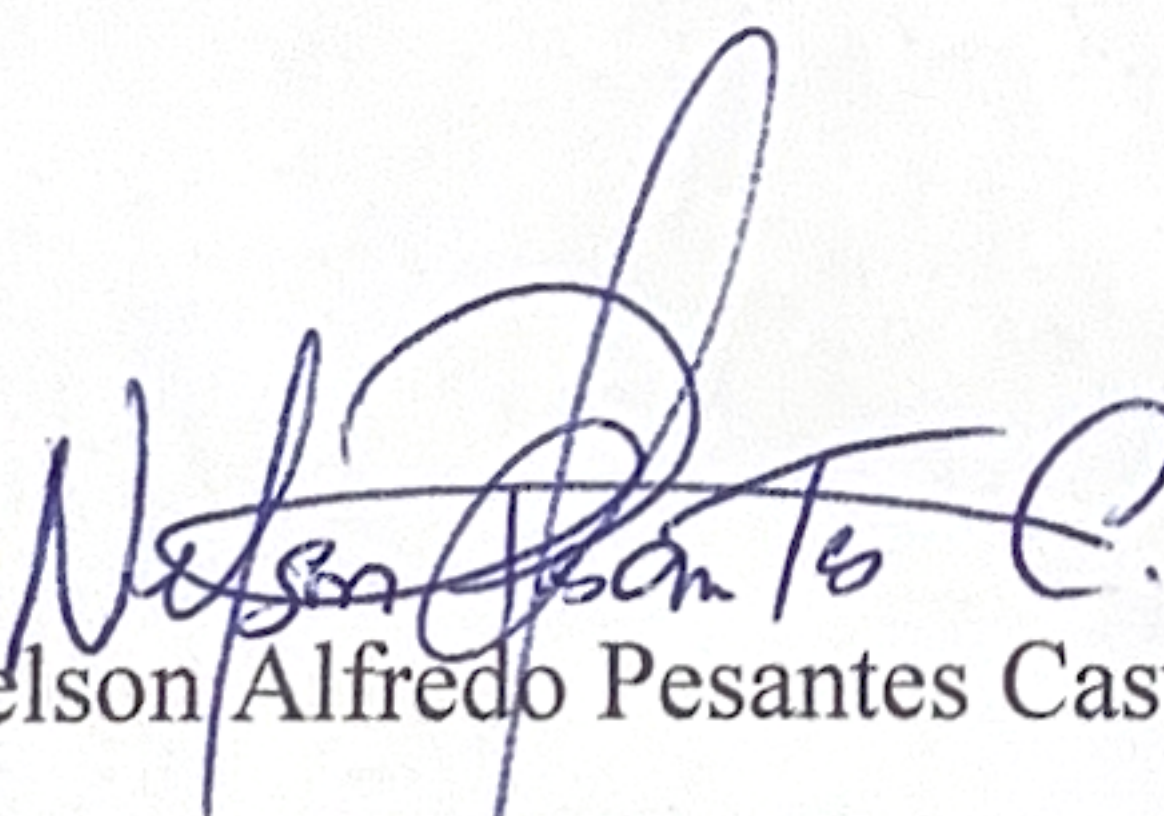
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

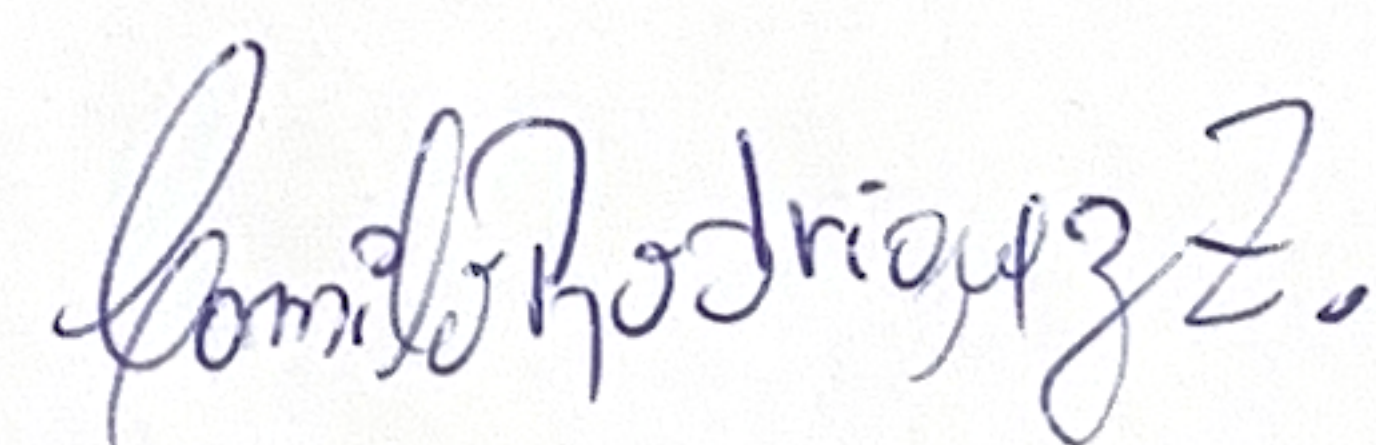
Nosotros, Nelson Alfredo Pesantes Castro con documento de identificación N° 0924629256 y Camilo Daniel Rodríguez Zúñiga con documento de identificación N° 0954292694, manifestamos que:

Somos las autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación

Guayaquil, 19 de septiembre del año 2024.

Atentamente,


Nelson Alfredo Pesantes Castro
092462925-6


Camilo Daniel Rodríguez Zúñiga
095518938-6

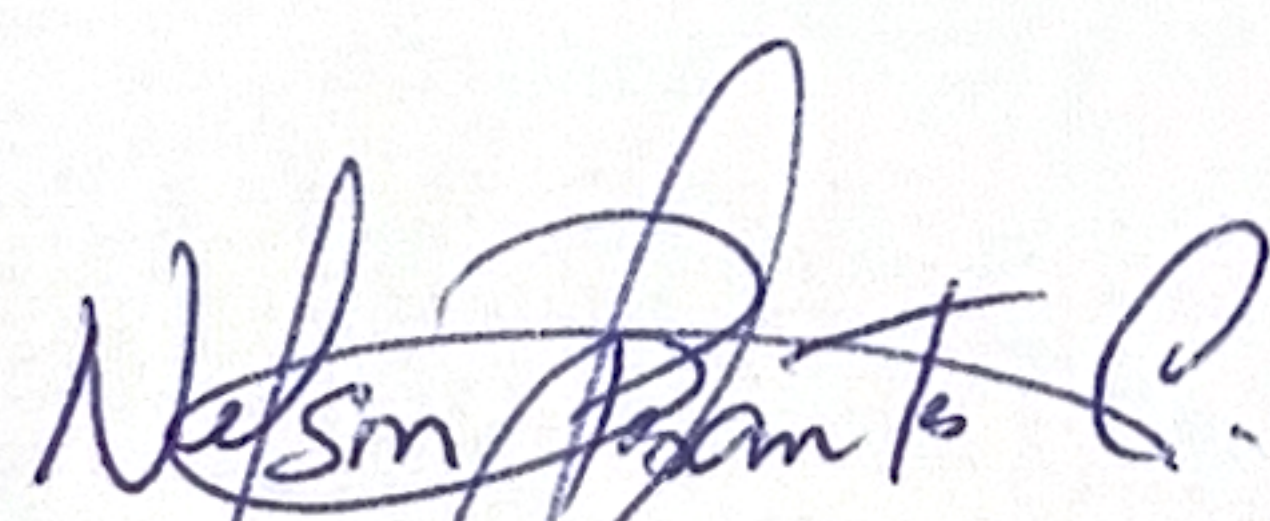
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Nelson Alfredo Pesantes Castro con documento de identificación N° 0924629256 y Camilo Daniel Rodríguez Zúñiga con documento de identificación N° 0955189386, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del Proyecto Técnico: “Diseño e implementación de un prototipo para el control y monitoreo mediante IoT de la cadena de frío en la transportación de medicamentos”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

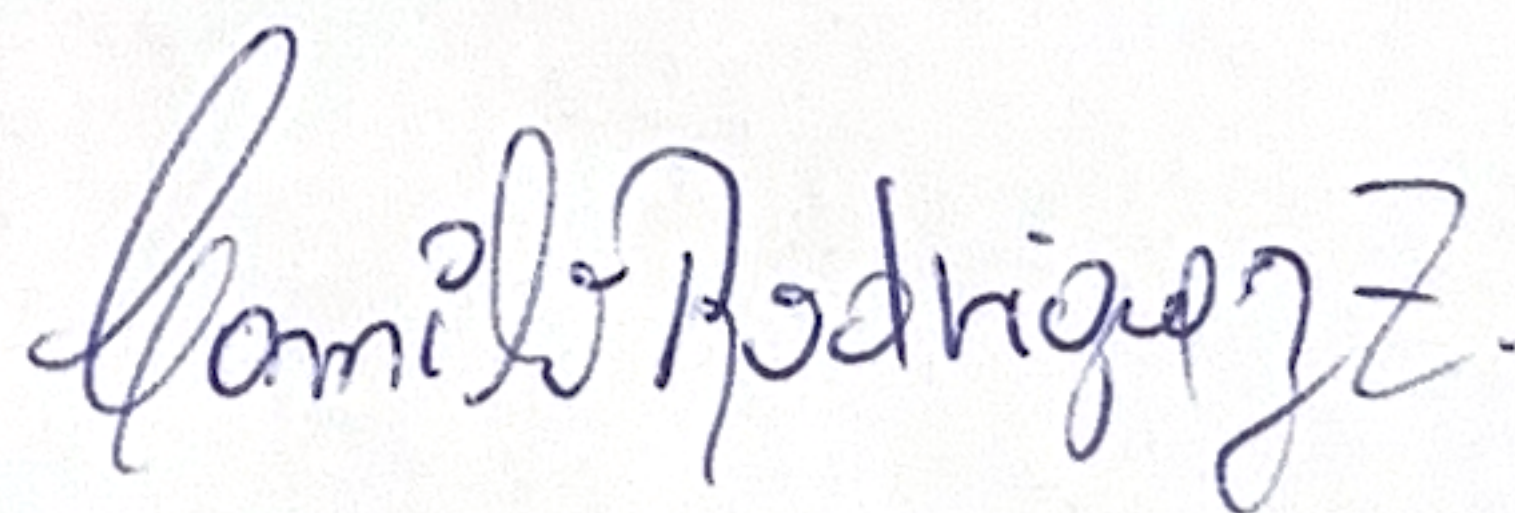
Guayaquil, 19 de septiembre del año 2024.

Atentamente,



Nelson Alfredo Pesantes Castro

092462925-6



Camilo Daniel Rodríguez Zúñiga

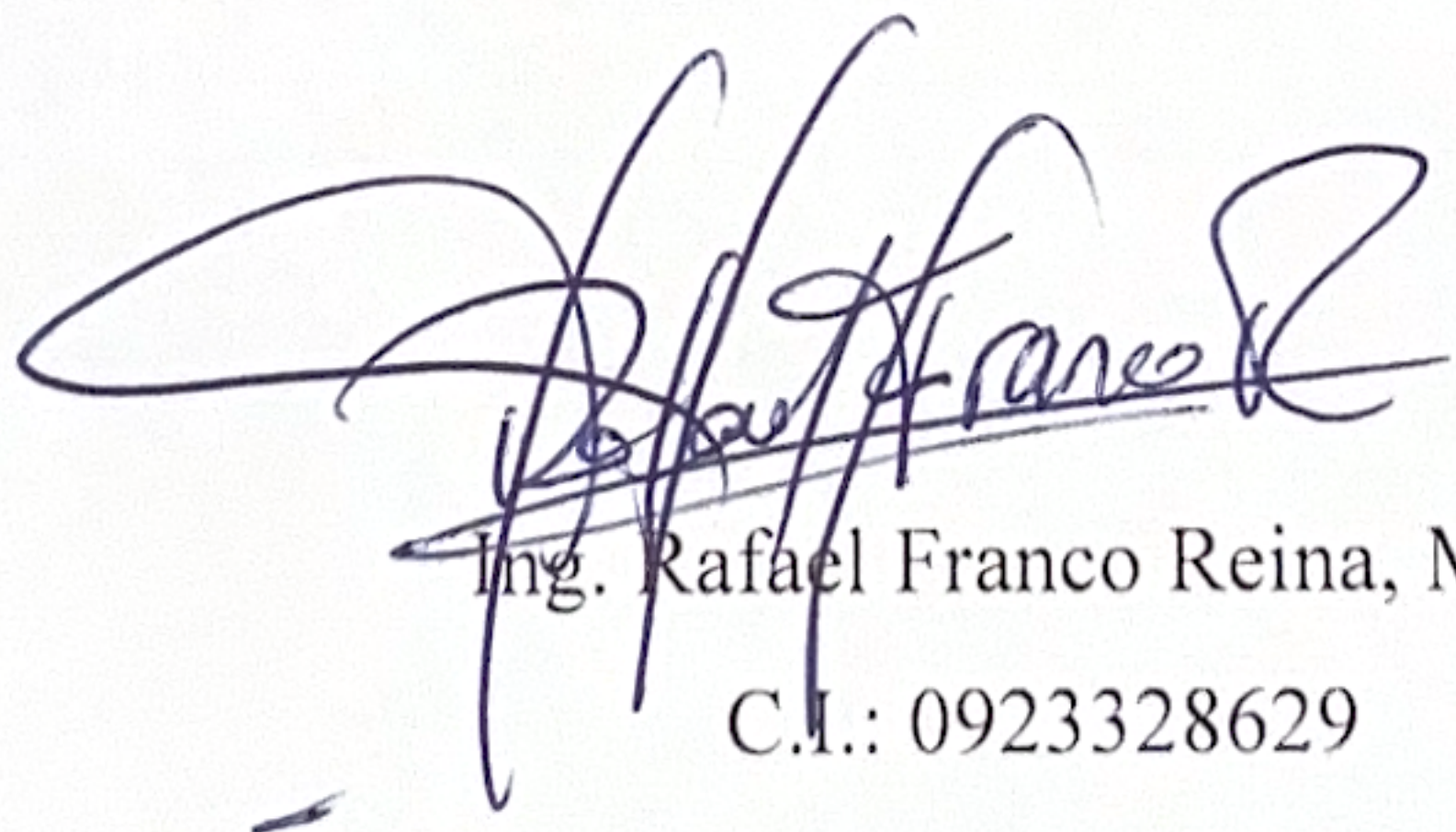
095518938-6

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rafael Franco Reina con documento de identificación N° 0923270136, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL Y MONITOREO MEDIANTE IoT DE LA CADENA DE FRÍO EN LA TRANSPORTACIÓN DE MEDICAMENTOS, realizado por Pesantes Castro Nelson Alfredo con documento de identificación N° 0924629256 y Rodríguez Zúñiga Camilo Daniel con documento de identificación N° 0955189386, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de septiembre del año 2024.

Atentamente,



Ing. Rafael Franco Reina, MSc.

C.I.: 0923328629

DEDICATORIA

Para mi familia, en especial a mi hijo, cuya paciencia y amor incondicional me han guiado en cada paso de este camino. A mis amigos, por su constante apoyo y por recordarme la importancia del equilibrio entre el trabajo y la vida. A mis profesores y tutor, por su sabiduría y por desafiarme a alcanzar nuevas alturas. Y, finalmente, mi abuela que desde el cielo me sigue apoyando y creyendo en mi conocimiento para transformar el mundo. Esta tesis es un reflejo de su influencia en mi vida. ¡Con cariño!

Nelson Pesantes C.

Este logro, alcanzado con esfuerzo, dedicación, amor y compromiso, lo dedico en primer lugar a Dios, mi inspiración y fortaleza en cada meta que me propongo, convirtiéndome en una persona capaz y competente. También lo dedico a mi familia, especialmente a mis padres, Karla y Juan, quienes han sido mi pilar fundamental, confiando y apoyándome siempre. A mi hermana Rafaela, que me inspira a seguir adelante como hermano mayor, y a mi hijo Matthew, esperando que este logro sea un estímulo para su vida, recordándole que las mejores batallas se ganan luchando. Finalmente, dedico esta tesis a mí mismo, por no rendirme ante las dificultades y perseverar a pesar de los obstáculos, celebrando así el resultado de años de esfuerzo

y

sacrificio compartido con quienes han formado parte de mi vida.

Camilo Rodríguez Z.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a la realización de esta tesis. A mis profesores, por su invaluable guía y enseñanzas, que han sido fundamentales en mi formación académica. A mis compañeros de estudio, por su camaradería y apoyo constante durante todo este proceso. A mi familia, por su amor, paciencia y por ser mi fuente inagotable de inspiración. Finalmente, agradezco al Ing Franco, que, de alguna manera, me brindó su apoyo en la realización de este informe y conocimiento.

Nelson Pesantes C.

Con gran gratitud, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que hicieron posible la realización de esta tesis. Agradezco profundamente a mi tutor, Ing. Rafael Franco, por su invaluable orientación y paciencia, así como a los miembros del comité evaluador por sus observaciones enriquecedoras. Mi familia ha sido un pilar fundamental con su apoyo incondicional, y mis amigos y colegas, especialmente al Ing. Eddy Huaman, han compartido tanto alegrías como retos. Finalmente, agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por los recursos proporcionados y a todos quienes, de manera directa o indirecta, contribuyeron a este logro. Este éxito es un reflejo del apoyo y la confianza de todos ustedes,

Camilo Rodríguez Z.

RESUMEN

El presente documento se realiza en base al diseño e implementación de un prototipo basado en IoT para el control y monitoreo de la cadena de frío en el transporte de medicamentos. El objetivo principal es verificar que los medicamentos mantengan condiciones óptimas durante su transporte utilizando tecnología avanzada, para ello, se desarrolló una arquitectura de sistema que incluye un sensor termocupla tipo K, módulo GPS NEO-6m y una plataforma de software Arduino Cloud IoT que permita la selección y análisis de datos en tiempo real.

El prototipo combina hardware y software, con la termocupla tipo K conectados a un microcontrolador que gestiona la transmisión de datos a una plataforma en la nube. Esta plataforma proporciona herramientas para el almacenamiento, procesamiento y visualización de datos, facilitando el monitoreo remoto y la generación de informes detallados.

Los resultados comprenden desde la elección adecuada de elementos hasta la creación de una interfaz de usuario fácil de usar y la confirmación del sistema mediante pruebas tanto simuladas como reales. El prototipo demuestra ser práctico en mantener las condiciones necesarias para la conservación de los medicamentos, cumpliendo con los estándares de calidad predefinidos.

Finalmente, el sistema fue implementado en entornos reales, donde se logró mantener la temperatura en un rango de 6 a 8 grados, o entre 25 a 15 grados. Además, la implementación adecuada del prototipo permitió la recopilación de datos en tiempo real a través del módulo GPS, mejorando la capacidad de monitoreo y control durante el transporte de los medicamentos.

Palabras Clave: GPS, cama caliente, PID, termocupla, Arduino Cloud IoT

ABSTRACT

This document is based on the design and implementation of an IoT-based prototype for the control and monitoring of the cold chain in the transportation of medications. The primary objective is to ensure that medications maintain optimal conditions during transport by utilizing advanced technology. To achieve this, a system architecture was developed, including a type K thermocouple sensor, a NEO-6m GPS module, and an Arduino Cloud IoT software platform, which enables real-time data selection and analysis.

The prototype integrates both hardware and software, with the type K thermocouple connected to a microcontroller that manages data transmission to a cloud platform. This platform provides tools for data storage, processing, and visualization, enabling remote monitoring and the generation of detailed reports.

The results range from the appropriate selection of components to the creation of a user-friendly interface and the validation of the system through both simulated and real tests. The prototype proves to be effective in maintaining the necessary conditions for the preservation of medications, meeting predefined quality standards.

Finally, the system was implemented in real environments, where it was possible to maintain the temperature in a range of 6 to 8 degrees, or between 25 to 15 degrees. In addition, the proper implementation of the prototype allowed the collection of data in real time through the GPS module, improving the monitoring and control capacity during the transport of medicines.

Keywords: GPS, heated bed, PID, thermocouple, Arduino Cloud IoT

ÍNDICE DE CONTENIDO

I	INTRODUCCIÓN.....	1
II	PROBLEMA.....	2
III	OBJETIVOS	4
3.1	Objetivo general	4
3.2	Objetivos específicos.....	4
IV	FUNDAMENTO TEÓRICO	5
4.1	Módulo ESP32	5
4.1.1	Funcionalidades de Conectividad:	6
4.1.2	Capacidades de Procesamiento:	6
4.1.3	Desarrollo de Software:	7
4.1.4	Eficiencia Energética:	7
4.1.5	Seguridad y Fiabilidad:	7
4.1.6	Pines de conexiones del módulo ESP32	7
4.2	ARDUINO	8
4.2.1	Programación y Entorno de Desarrollo (IDE)	8
4.2.2	Aplicaciones en IoT	10
4.2.3	Ventajas y Limitaciones:.....	10
4.2.4	Casos de Uso Relevantes:	11
4.3	CONTROL PID.....	11
4.3.1	Aplicación del control PID	12
4.3.2	Control Proporcional (P).....	12

4.3.3	Control Integral (I).....	12
4.3.4	Acción Derivativa (D).....	13
4.4	Celda Peltier:	13
4.4.1	Funcionamiento Básico:.....	14
4.4.2	Aplicaciones en la Industria Farmacéutica:	14
4.4.3	Integración en el Prototipo IoT:	15
4.4.4	Impacto en la Calidad del Producto:	15
4.5	Módulo L298N.....	15
4.6	Internet de las Cosas (IoT)	16
4.6.1	Componentes del IoT	17
4.6.2	Justificación del Uso de IoT en la Cadena de Frío	17
4.6.3	Trazabilidad Completa.....	18
4.7	Plataformas en la Nube	18
4.7.1	Almacenamiento y Procesamiento de Datos.....	18
4.8	Sensores y Dispositivos GPS	19
4.9	Sensor de Temperatura y Humedad:	20
4.10	Cadena de Frío, vacunas y estándares	20
4.10.1	Temperatura y Estabilidad de Medicamentos:.....	21
I NIVEL		21
4.11	VACUNAS.....	21
4.11.1	Almacenamiento de vacunas.....	22

4.11.2	Control de temperatura	22
4.11.3	Pérdida de efectividad.....	23
4.12	Buenas Prácticas de almacenamiento, distribución y transporte – MSP	23
4.12.1	Almacenamiento	23
4.12.2	Seguridad	23
4.13	Gestión de información en Tiempo Real.....	24
4.13.1	Algoritmos de Análisis	24
4.13.2	Generación de Alertas.....	24
V	MARCO METODOLÓGICO.....	25
5.1	Comparación entre un sensor termocupla tipo K y sensor LM35.....	26
5.2	Procedimiento.....	27
5.2.1	Selección de Componentes:	27
5.2.2	Desarrollo de Software:	28
5.2.3	Recolección de Datos:.....	28
5.2.4	Análisis de Datos:	28
5.3	Diseño General del prototipo	29
5.3.1	Elaboración de diagrama de conexiones en la herramienta de Proteus	29
5.3.2	Diseño de la tarjeta electrónica	30
5.3.3	Implementación de elementos electrónicos en la PCB	31
5.4	Integración de la Celda Peltier al prototipo.....	31
5.4.1	Circuito de Control y alimentación:.....	31

5.4.2	Sensores de Temperatura:	32
5.5	Integración de controlador L298N al prototipo.....	32
5.6	Integración de la termocupla K al prototipo.....	33
5.7	Configuración del Módulo GPS para el prototipo	34
5.7.1	Alimentación:.....	34
5.7.2	Transmisión de Datos (TX):	34
5.7.3	Recepción de Datos (RX):	35
5.7.4	Configuración Serial:	35
5.7.5	Monitorización y Control:.....	35
5.8	Alimentación con Baterías Portátiles del dispositivo.....	35
5.9	Funcionamiento general del prototipo.....	36
5.10	Inicialización del proyecto en Arduino Cloud.....	38
5.10.1	Crea una cuenta.....	39
5.10.2	Crea una Dashboard	39
5.10.3	Crear un panel de control.....	40
5.11	Ingreso de interfaces al sistema IoT de Arduino Cloud.	40
5.11.1	Visualización de Datos:	41
5.11.2	Monitoreo Remoto:	42
5.12	Conexión de Arduino Cloud al módulo GSM32	44
5.12.1	Configuración del Software	44
5.12.2	Ingreso de datos de librería.	44

5.12.3	Explicación del Código.....	44
5.13	Procedimiento de descarga de datos desde Arduino Cloud.....	45
5.13.1	Acceso a Arduino Cloud:.....	45
5.13.2	Selección de Variables:.....	46
5.13.3	Exportación de Datos:.....	47
5.13.4	Verificación y Análisis:	48
VI	RESULTADOS.....	51
6.1	Prueba de análisis de la interfaz de usuario y la visualización de Datos	51
6.2	Prueba de control de temperatura del sistema.....	52
6.3	Prueba de control de conectividad y transmisión del GPS.....	58
6.4	Validación y observaciones generales.....	67
VII	CRONOGRAMA.....	70
VIII	PRESUPUESTO	71
IX	CONCLUSIONES	72
X	RECOMENDACIONES	73
XI	BIBLIOGRAFÍA	74
XII	ANEXO.....	78

Índice de Figuras

Figura 1. Módulo ESP32 utilizado en el proyecto (Jose, 2022).	5
Figura 2. Pines placa de desarrollo (Jose, 2022).....	8
Figura 3. Lenguaje de programación del Arduino (Jecrespom, 2022).	9
Figura 4. Aplicación del IoT en Arduino Cloud (Damian, 2024).....	10
Figura 5. Parámetros clave: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativa (Franklin, 2022).	11
Figura 6. Celda a utilizar en el presente proyecto (Gomar, 2020).....	14
Figura 7. Módulo L298N (Naylamp, 2023).....	16
Figura 8. Proyección de conexión del Internet de las cosas (GPC, 2019).	17
Figura 9. Monitoreo de datos mediante Arduino Cloud IoT (Söderby, 2024).	19
Figura 10. Módulo GPS (Naylamp Mechatronics, 2020).....	19
Figura 11. Sensor Termocupla tipo K (Novatronic, 2020).	20
Figura 12. Estructura general del proyecto.	25
Figura 13. Termocupla tipo K.....	26
Figura 14. Sensor LM35	27
Figura 15. Diagrama de conexiones en Proteus.....	29
Figura 16. Diagrama de conexiones mediante Proteus.....	30
Figura 17. Visualización en 3D de la PCB	30
Figura 18. Elementos implementados en el prototipo.	31
Figura 19. Conexión de la Celda Peltier.	32
Figura 20. Conexión del módulo L298N.	33
Figura 21. Conexión de la termocupla tipo K.....	34
Figura 22. Diagrama de conexión de módulo GPS.....	34
Figura 23. Tipo de batería recargable a utilizar.	36
Figura 24. Implementación de las conexiones al prototipo.	36

Figura 25 Implementación de las conexiones internas al prototipo.....	37
Figura 26. Funcionamiento de la zona posterior del prototipo.	37
Figura 27. Parte frontal del prototipo.....	38
Figura 28. Página principal de acceso de Arduino Cloud.....	38
Figura 29. Crear cuenta de Arduino Cloud IoT.	39
Figura 30. Página principal de Arduino Cloud.	39
Figura 31. Panel de control del dashboard creado.	40
Figura 32. Agregar interfaces.	40
Figura 33. Selección de interfaz de temperatura.....	41
Figura 34. Interfaz de temperatura.....	41
Figura 35. Gráfica de la temperatura detectados por el sensor.	42
Figura 36. Visualización de la ubicación del proyecto.	42
Figura 37. Visualización del sistema Arduino Cloud mediante un ordenador.	43
Figura 38. Visualización del sistema Arduino Cloud mediante un smartphone.....	43
Figura 39. Ingreso de datos en el programa de Arduino.....	44
Figura 40. Inicio de sesión en Arduino Cloud.	45
Figura 41. Selección del proyecto en Arduino Cloud.....	46
Figura 42. Muestra de interfaces.....	46
Figura 43. Selección de variables.	47
Figura 44. Descarga de data histórica.	47
Figura 45. Descarga de data.....	48
Figura 46. Data en archivo comprimido.	48
Figura 47. Archivo en Excel de la temperatura y coordenadas.	49
Figura 48. Data obtenida del sensor de temperatura.....	49
Figura 49. Data obtenida del módulo GPS.	50

Figura 50. Espacio de la vacuna en el prototipo.	51
Figura 51. Visualización de interfaces.	52
Figura 52. Seguimiento de temperatura.	52
Figura 53. Seguimiento de temperatura_2.	53
Figura 54. Prueba de ubicación.	58
Figura 55. Pruebas de localización del prototipo.	59
Figura 56. Pruebas de localización del prototipo_2.	59
Figura 57. Pruebas de localización del prototipo_3.	60
Figura 58. Pruebas en tiempo real.	66
Figura 59. Seguimiento del GPS en tiempo real.	66
Figura 60. Prueba de funcionamiento_1.	68
Figura 61. Prueba de funcionamiento_2.	68
Figura 62. Prueba de funcionamiento_3.	69
Figura 63. Prueba de funcionamiento_4.	69

Índice de Tablas

Tabla 1.	21
Tabla 2	53
Tabla 3.	54
Tabla 4.	55
Tabla 5.	56
Tabla 6.	57
Tabla 7.	60
Tabla 8.	61

Tabla 9.	62
Tabla 10.	63
Tabla 11.	64
Tabla 12.	66
Tabla 13.	70
Tabla 14.	71

I INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la importancia de mantener una cadena de frío eficiente se destaca debido a las variaciones de temperatura que se pueden observar a lo largo del país, desde las cálidas regiones costeras hasta las frías zonas de la sierra. Es necesario implementar estrategias, asegurando el uso adecuado de las normas en el control de la cadena de frío en las unidades operativas del área (Gubio, 2023).

El presente Trabajo de Titulación busca diseñar e implementar un prototipo para el control y monitoreo mediante IoT, asegurando que se mantengan las condiciones óptimas durante su transportación.

En este proyecto se analiza cómo el uso de tecnología IoT para el control y monitoreo de la cadena de frío puede mejorar la eficiencia en la transportación de medicamentos. Para ello, es preciso establecer el adecuado almacenaje y distribución de vacunas, conectado con equipos de refrigeración para mantenerlas a las temperaturas recomendadas, asegura su potencia y efectividad (Salud, 2022).

Este trabajo se desarrolla considerando la implementación de un prototipo para el control y monitoreo de la cadena de frío en la transportación de medicamentos mediante tecnología IoT. Se hace uso de un software y hardware especializado para el análisis de datos en tiempo real, que permite graficar y monitorear las variables críticas de temperatura y humedad. Este sistema facilita la visualización de la arquitectura del sistema, así como la recopilación y procesamiento de datos precisos sobre las condiciones ambientales durante el transporte, asegurando que se mantengan dentro de los rangos necesarios para la conservación de los medicamentos.

II PROBLEMA

El transporte de medicamentos enfrenta un desafío crítico en el control preciso de la temperatura para mantener la eficacia y seguridad de los productos. Las fluctuaciones ambientales durante el transporte pueden comprometer la integridad de la cadena de frío, resultando en la pérdida de medicamentos de alto valor o la disminución de su calidad. Las vacunas, por ejemplo, son particularmente sensibles a las variaciones térmicas y requieren una cadena de frío constante para garantizar su eficacia y cumplir con los estándares regulatorios (ADASA, 2023).

El problema principal radica en la falta de sistemas efectivos para monitorear y controlar la temperatura de manera continua durante el traslado. Los métodos tradicionales de supervisión, a menudo manuales, son propensos a errores humanos e ineficiencias que pueden comprometer la seguridad de los medicamentos y la salud pública. La administración de vacunas que han sido expuestas a temperaturas inadecuadas no solo puede resultar ineficaz, sino que también puede poner en riesgo la salud de los pacientes y facilitar la propagación de enfermedades infecciosas (QuadMinds, 2022).

Este proyecto se fundamenta en la necesidad de implementar soluciones innovadoras que aseguren una gestión eficiente de la cadena de frío en el transporte de medicamentos. Un sistema robusto y automatizado de monitoreo de temperatura, integrado con tecnología IoT y plataformas de gestión en la nube, no solo mejoraría la precisión y confiabilidad del monitoreo, sino que también facilitaría la trazabilidad completa de los medicamentos. Esto permitiría una respuesta rápida ante desviaciones de temperatura y reduciría los riesgos de pérdida de medicamentos debido a incidentes durante el transporte (Salgado, 2021).

La implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo de temperatura, como las propuestas en este proyecto, es crucial para garantizar que los medicamentos lleguen en condiciones óptimas a los pacientes, especialmente en áreas rurales y de difícil acceso. Esto no solo protege la eficacia de los productos farmacéuticos, sino que también contribuye a mejorar los resultados de salud pública y reduce los costos asociados con la pérdida de medicamentos debido a condiciones inapropiadas de almacenamiento y transporte.

Además de mejorar la seguridad y calidad de los medicamentos, la implementación de un sistema IoT para el control y monitoreo de la cadena de frío ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia operativa y cumplimiento normativo. Al integrar sensores de temperatura y humedad en tiempo real, junto con dispositivos GPS y una plataforma centralizada en la nube, se establece una infraestructura robusta que permite una supervisión continua y proactiva del estado de los medicamentos durante todo su trayecto.

La aplicación de estas tecnologías no solo aborda directamente los desafíos actuales en la gestión de la cadena de frío, sino que también sienta las bases para futuras mejoras en la logística farmacéutica. Al optimizar el manejo de medicamentos sensibles a la temperatura, se fortalece la capacidad del sistema de salud para responder eficazmente a las necesidades de tratamiento y prevención, especialmente en situaciones de emergencia y en áreas geográficas remotas (Mendoza, 2020).

III OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo para el control y monitoreo mediante IoT de la cadena de frío en la transportación de medicamentos.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar la arquitectura del sistema de IoT, incluyendo la selección de sensores, dispositivos de comunicación y plataforma de software.
- Implementar la interfaz de usuario para controlar y visualizar el estado del sistema, permitiendo monitorear y ajustar las condiciones según sea necesario.
- Evaluar las variables del funcionamiento del prototipo en situaciones reales de transporte de medicamentos mediante pruebas de campo.

IV FUNDAMENTO TEÓRICO

El fundamento teórico se basa en la integración de tecnologías IoT, sensores, dispositivos GPS y plataformas en la nube para desarrollar un sistema efectivo de monitoreo y control de la cadena de frío en la transportación de medicamentos. Esta integración asegura que los medicamentos mantengan su calidad y seguridad durante todo el proceso logístico, desde el punto de origen hasta el destino final.

4.1 Módulo ESP32

Para integrar el módulo ESP32 en el proyecto, como se observa en la figura 1, es importante destacar sus características clave, el ESP32 ofrece una conectividad versátil con Wi-Fi y Bluetooth integrados, lo que permite establecer comunicación inalámbrica con otros dispositivos y conectarse a redes de Internet y Bluetooth. Esto es crucial para la transmisión en tiempo real de datos desde sensores de temperatura, humedad y ubicación hacia una plataforma en la nube (Rivera Morales, 2022).



Figura 1. Módulo ESP32 utilizado en el proyecto (Jose, 2022).

4.1.1 Funcionalidades de Conectividad:

El ESP32 proporciona conectividad Wi-Fi y Bluetooth integradas, lo que facilita la comunicación inalámbrica con otros dispositivos y la conexión a redes de Internet y Bluetooth. Esta capacidad es crucial para enviar datos de sensores de temperatura, humedad y ubicación en tiempo real a una plataforma en la nube.

- **WiFi:**

Compatibilidad: 802.11 b/g/n (802.11n hasta 150 Mbps).

Frecuencia: 2.4 GHz a 2.5 GHz.

Potencia de transmisión: hasta 14 dBm.

Sensibilidad: entre -69 dBm y -98 dBm.

Certificación: Wi-Fi Alliance.

- **Bluetooth:**

Compatibilidad: Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE.

Recepción: NZIF a -97 dBm.

Transmisión: Clases 1, 2 y 3 con AFH (Adaptive Frequency Hopping).

Audio: CVSD y SBC.

4.1.2 Capacidades de Procesamiento:

Equipado con un procesador dual-core y varias interfaces (UART, SPI, I2C, etc.), el ESP32 facilita el manejo de múltiples tareas y la integración con una amplia gama de sensores y actuadores necesarios para monitorear la cadena de frío de manera efectiva.

4.1.3 Desarrollo de Software:

Compatible con plataformas de desarrollo como Arduino IDE, MicroPython y ESP-IDF, el ESP32 permite programar y desarrollar aplicaciones de manera flexible y adaptativa según los requisitos del proyecto.

4.1.4 Eficiencia Energética:

Con opciones avanzadas de gestión de energía, el ESP32 es capaz de operar de manera eficiente, lo cual es crucial para aplicaciones de IoT que pueden estar alimentadas por batería y deben funcionar durante períodos prolongados sin intervención.

4.1.5 Seguridad y Fiabilidad:

Incorpora características de seguridad para proteger los datos sensibles transmitidos a través de redes inalámbricas, asegurando la integridad y confidencialidad de la información crítica relacionada con la cadena de frío de los medicamentos.

4.1.6 Pines de conexiones del módulo ESP32

En la siguiente figura 2, se logra observar los pines de conexiones del módulo ESP32 a utilizar en el proyecto.

- IDE: Entorno de desarrollo Integrado, es un software que proporciona herramientas integrales para desarrollar, depurar y administrar programas informáticos.
- Los usuarios pueden cargar programas (llamados "sketches") en la placa Arduino para controlar sus funciones y operaciones.

Como se muestra en la figura 3, la función `setup()` se encarga de la configuración inicial, mientras que la función `loop()` contiene el código que se ejecuta de manera continua (de ahí el término "loop" –bucle–). Ambas funciones son fundamentales para el correcto funcionamiento del programa.

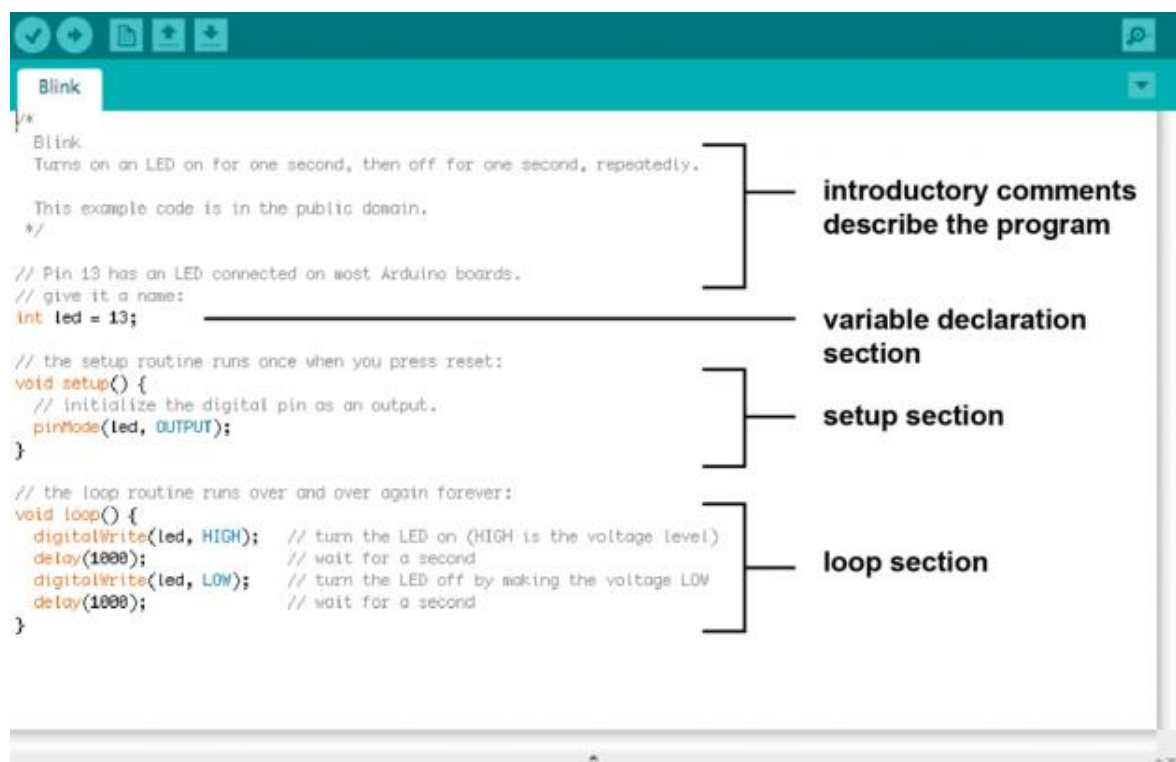


Figura 3. Lenguaje de programación del Arduino (Jecrespom, 2022).

4.2.2 Aplicaciones en IoT

En proyectos de IoT, como se observa en la figura 4, Arduino se emplea para controlar sensores y actuadores, recolectar datos ambientales y comunicarse con otros dispositivos y plataformas mediante conexiones inalámbricas como WiFi y Bluetooth, o mediante cables.

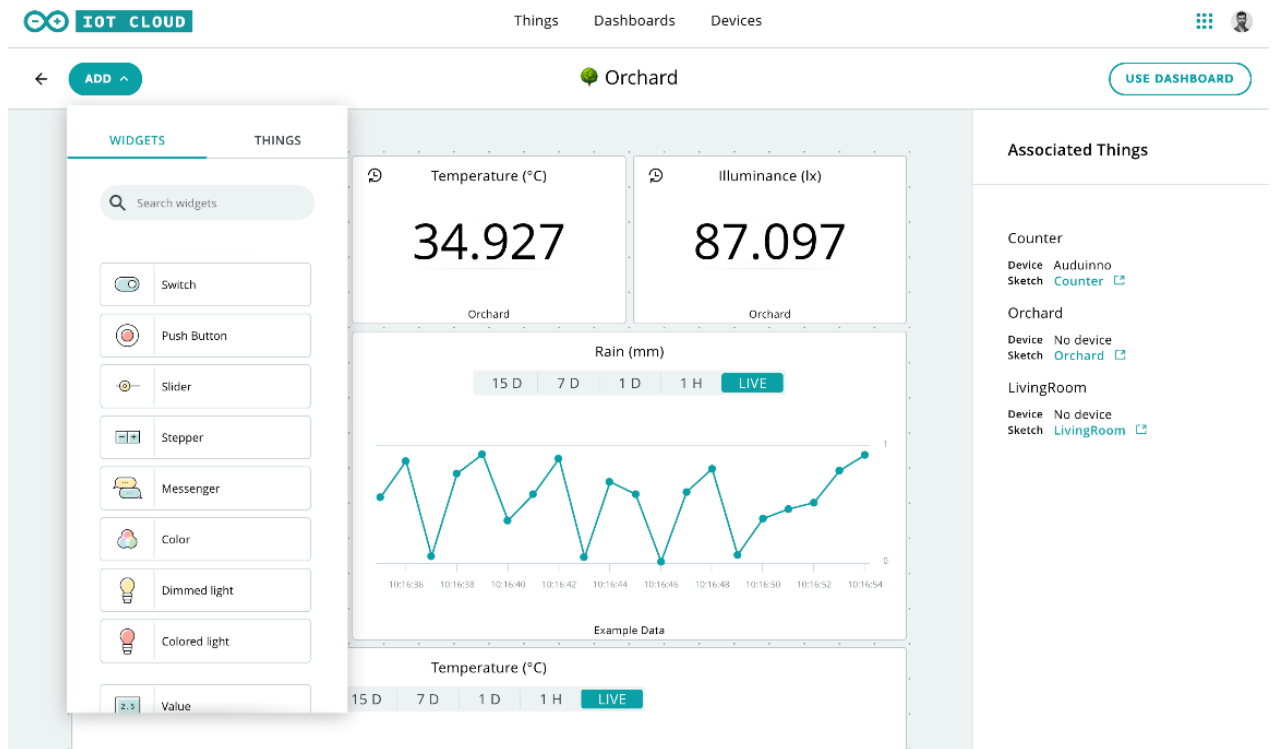


Figura 4. Aplicación del IoT en Arduino Cloud (Damian, 2024).

4.2.3 Ventajas y Limitaciones:

- **Ventajas:** Costo accesible, comunidad de usuarios activa, fácil de aprender y utilizar, amplia variedad de shields y módulos disponibles para expandir funcionalidades.
- **Limitaciones:** Recursos limitados en comparación con microcontroladores más potentes, como memoria y potencia de procesamiento.

4.2.4 Casos de Uso Relevantes:

- Ejemplos de aplicaciones de Arduino en proyectos IoT incluyen monitoreo ambiental, automatización del hogar, sistemas de riego inteligente, y por supuesto, monitoreo de condiciones de temperatura en la cadena de frío de medicamentos.

4.3 CONTROL PID

El algoritmo de control proporcional integral derivativo (PID) es uno de los más utilizados en la industria y ha sido ampliamente aceptado en el control industrial.

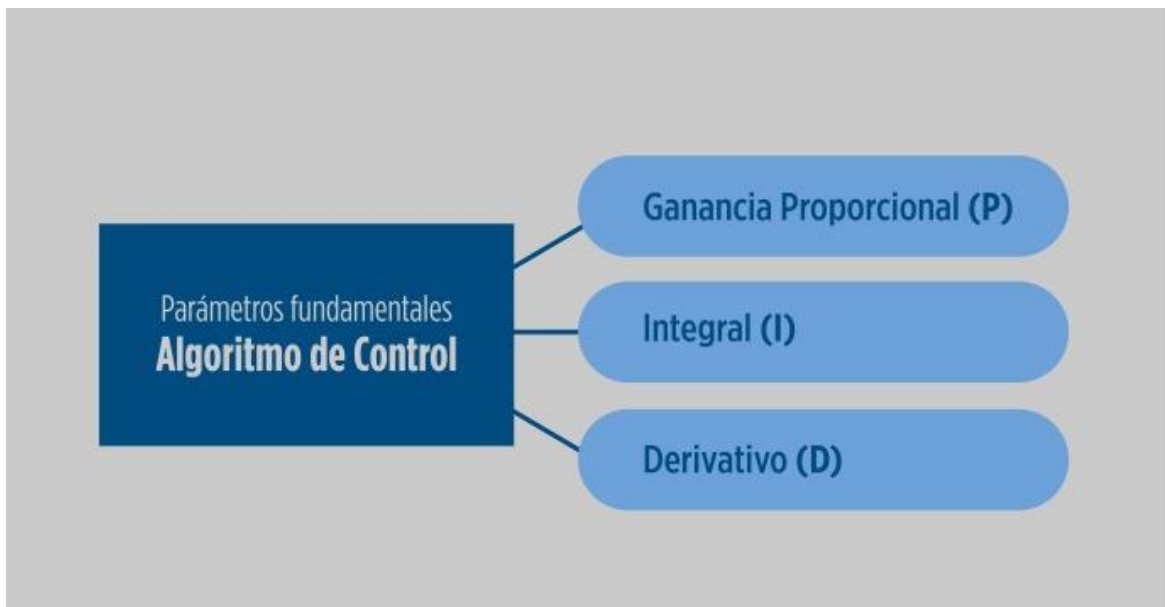


Figura 5. Parámetros clave: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativa (Franklin, 2022).

Como se muestra en la figura 5, los controladores PID son populares debido a su excelente desempeño en diversas condiciones operativas y su simplicidad, que facilita su uso por parte de los ingenieros. Un controlador PID resulta efectivo para manejar variables industriales tales como temperatura, flujo, presión y nivel. La dinámica de estas variables puede ser modelada utilizando sistemas de primer o segundo orden, de acuerdo con la aplicación particular (Leonardo, 2021).

La esencia de un controlador PID radica en leer los datos de un sensor y luego calcular la salida deseada del actuador a través de la evaluación de las respuestas proporcional, integral

y derivada. La salida se obtiene sumando estos tres componentes. Antes de ajustar los parámetros de un controlador PID, es crucial entender qué implica un sistema de ciclo cerrado y familiarizarse con las terminologías relacionadas (NI EMERSON, 2024).

4.3.1 Aplicación del control PID

En el campo de la ingeniería biomédica y en diversos dispositivos médicos, los controladores PID juegan un papel crucial al gestionar la administración de medicamentos, regular la temperatura en la cadena de frío y controlar la glucosa en sangre en bombas de insulina, incubadoras y máquinas de anestesia. Estos controladores están avanzando hacia la integración con plataformas de Internet de las Cosas (IoT) y las iniciativas de Industria 4.0. Esta evolución facilita el monitoreo remoto, el análisis de datos y el mantenimiento predictivo, lo que a su vez mejora la inteligencia del sistema, permite la optimización en tiempo real y aumenta la eficiencia operativa (Smith, 2024).

4.3.2 Control Proporcional (P)

La acción proporcional, o ganancia, es una estrategia de control que ajusta la salida en respuesta directa a los cambios en la entrada. Este tipo de control reacciona de inmediato y de forma proporcional a las variaciones actuales en la entrada, generando cambios correspondientes en la salida. La "acción proporcional" (P) actúa con precisión, asegurando que los ajustes en la salida coincidan con las señales de entrada sin ser demasiado tempranos ni demasiado tardíos (Instrumentación y control, 2020).

4.3.3 Control Integral (I)

La acción integral, también llamada reset o control flotante, es un método de control que ajusta la señal de salida en función del error acumulado con el tiempo, es decir, la diferencia entre el valor actual (PV) y el valor deseado (SP). Esta acción del controlador modifica la señal de salida para eliminar completamente el error, respondiendo a la acumulación del error a lo largo del tiempo. Mientras que la acción proporcional (P) define

cuánto debe cambiar la salida en presencia de un error, la acción integral (I) determina la velocidad a la que la salida debe ajustarse para corregir el error.

4.3.4 Acción Derivativa (D)

La acción derivativa, también conocida como rate o pre-act, ajusta la señal de salida en función de la tasa de cambio de la entrada. Responde a la velocidad con la que la entrada varía con el tiempo, modificando la señal de salida de manera proporcional a esta tasa de cambio. Mientras que la acción proporcional (P) define cuánto debe cambiar la salida en presencia de un error y la acción integral (I) se basa en el error acumulado del pasado, la acción derivativa (D) anticipa futuros cambios ajustando la salida según la velocidad de cambio de la variable de proceso. En esencia, la acción derivativa actúa de manera prudente para mitigar sobresaltos, ajustando la respuesta de salida con cuidado en función de la velocidad de variación de la entrada.

4.4 Celda Peltier:

Como se observa en la figura 6, La celda Peltier es un dispositivo termoeléctrico que emplea el efecto Peltier para crear una diferencia de temperatura corriente eléctrica a partir de una diferencia de temperatura, o transferir calor en sentido contrario. Esto es posible gracias a los semiconductores que componen la celda Peltier, los cuales permiten la transferencia de calor a través de la unión de dos materiales diferentes cuando se aplica corriente eléctrica. La estructura de la celda incluye placas cerámicas en sus caras exteriores, con pistas de cobre que conectan los semiconductores tipo P y tipo N para formar termopares y cerrar el circuito internamente. Cuando se suministra corriente eléctrica, la polarización determina si la celda absorberá o liberará calor. Además, una diferencia de temperatura entre las caras de la celda provoca un flujo de corriente eléctrica correspondiente, ampliando su aplicación en sistemas de refrigeración y calentamiento precisos y eficientes (Argüello Carrera, 2021).



Figura 6. Celda a utilizar en el presente proyecto (Gomar, 2020).

4.4.1 Funcionamiento Básico:

- **Principio de Funcionamiento:** Utiliza el movimiento de electrones en un material semiconductor para transferir calor de un lado a otro.
- **Dirección de Corriente:** Muestra cómo la dirección de la corriente eléctrica determina si la celda Peltier actúa como un enfriador o como un calentador.

4.4.2 Aplicaciones en la Industria Farmacéutica:

- **Control de Temperatura:** Las celdas Peltier se utilizan para conservar una temperatura constante y regulada en entornos sensibles, como el transporte de medicamentos, al emplear el efecto Peltier para generar una diferencia de temperatura.
- **Eficiencia Energética:** Discute la eficiencia energética de las celdas Peltier en comparación con otros métodos de refrigeración y calentamiento.

4.4.3 Integración en el Prototipo IoT:

- **Selección y Justificación:** Describe por qué se eligió una celda Peltier específica para tu prototipo IoT, considerando criterios como capacidad de enfriamiento, tamaño, consumo de energía y facilidad de integración con el sistema IoT.
- **Funcionalidades Adicionales:** Explora cómo la celda Peltier se integra con otros componentes del sistema IoT, como sensores de temperatura y dispositivos de monitoreo.

4.4.4 Impacto en la Calidad del Producto:

- **Conservación de Medicamentos:** Detalla cómo el uso de la celda Peltier en tu prototipo contribuye a garantizar la calidad y seguridad de los medicamentos durante su transportación, al mantener condiciones de temperatura adecuadas y estables.

4.5 Módulo L298N

El módulo L298N es un controlador de motores que gestiona la velocidad y dirección de dos motores de corriente continua o un motor paso a paso. Es muy popular en robótica y automatización debido a su facilidad de uso. Este módulo dispone de dos puentes H que permiten invertir la dirección de la corriente y, por ende, el sentido de giro de los motores. Opera con tensiones de 3V a 35V y soporta corrientes de hasta 2A por canal. Además, incluye un regulador de voltaje que proporciona 5V para alimentar otros dispositivos, como microcontroladores, cuando se usa una fuente de hasta 12V. Su versatilidad y bajo costo lo hacen ideal para una variedad de proyectos electrónicos (Prometec, 2023), figura 7.

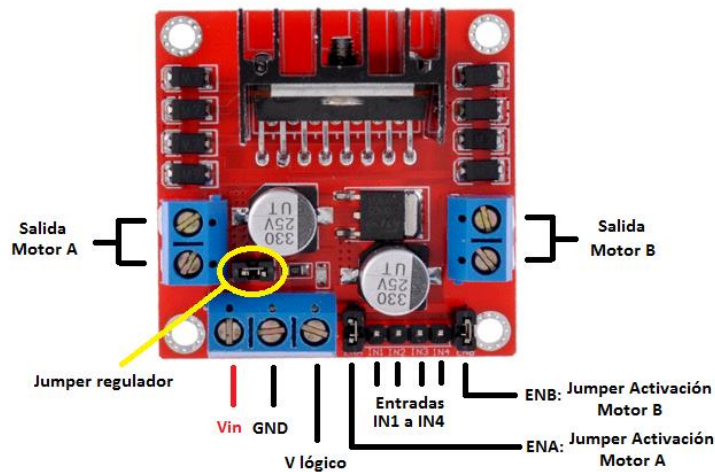


Figura 7. Módulo L298N (Naylamp, 2023).

4.6 Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) es la conexión de dispositivos físicos a través de internet como se observa en la figura 8, permitiéndoles recopilar y compartir datos. Este paradigma tecnológico abarca desde maquinaria y vehículos hasta electrodomésticos y ropa, todos equipados con sistemas embebidos que incluyen sensores, microprocesadores y actuadores. Estos dispositivos se comunican entre sí y con aplicaciones diversas, creando servicios inteligentes y autónomos. Esto impulsa nuevas tendencias como el almacenamiento y análisis masivo de datos, y la integración de sistemas ciberfísicos en comunicaciones máquina-a-máquina (Mónica, 2022).



Figura 8. Proyección de conexión del Internet de las cosas (GPC, 2019).

En el contexto de la cadena de frío, el IoT posibilita el monitoreo continuo de condiciones ambientales y la ubicación de medicamentos en tiempo real. Para gestionar eficazmente esta información, se requieren herramientas avanzadas de control y monitoreo que permitan el análisis sistemático de datos, optimizando así los procesos de salud y reduciendo incertidumbres. La implementación de sistemas embebidos de bajo costo es crucial para el tratamiento de datos obtenido.

4.6.1 Componentes del IoT

Los sistemas IoT incluyen sensores, actuadores, dispositivos de comunicación y plataformas de procesamiento de datos. Estos componentes trabajan juntos para recopilar, transmitir y analizar datos de manera eficiente.

4.6.2 Justificación del Uso de IoT en la Cadena de Frío

La implementación de tecnologías IoT en la cadena de frío ofrece numerosos beneficios, incluyendo:

- **Mejora de la Calidad de los Medicamentos:** Al asegurar que los medicamentos se mantengan en las condiciones óptimas, se conserva su eficacia y seguridad.
- **Reducción de Pérdidas:** La monitorización continua permite detectar y resolver problemas antes de que resulten en la pérdida de productos.
- **Eficiencia Operativa:** La automatización del monitoreo reduce la carga de trabajo manual y minimiza los errores humanos.

4.6.3 Trazabilidad Completa

El rastreo en tiempo real mejora la trazabilidad de los productos, facilitando la gestión de incidentes y la recuperación de productos en caso de problemas.

4.7 Plataformas en la Nube

Las plataformas en la nube son esenciales para el almacenamiento, procesamiento y visualización de los datos almacenado por los sensores y dispositivos GPS. Estas plataformas ofrecen escalabilidad, seguridad y acceso remoto a los datos.

4.7.1 Almacenamiento y Procesamiento de Datos

Las plataformas en la nube como Arduino Cloud IoT, Google Cloud IoT y Microsoft Azure IoT proporcionan herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y procesarlos en tiempo real. Esto permite la generación de alertas y la toma de decisiones informadas.

- **Visualización de Datos:** La visualización de datos admiten a los usuarios monitorear las condiciones de la cadena de frío y generar informes detallados. Esto facilita la identificación de problemas y la implementación de soluciones.
- En la figura 9 se puede observar un diagrama hacia la nube de Arduino Cloud IoT donde permitirá visualizar datos en tiempo reales.

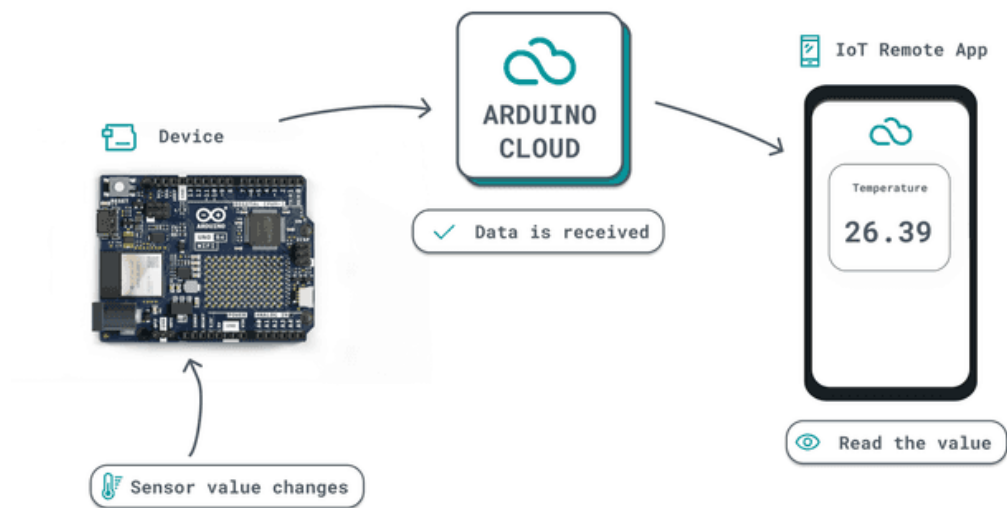


Figura 9. Monitoreo de datos mediante Arduino Cloud IoT (Söderby, 2024).

4.8 Sensores y Dispositivos GPS

Los sensores y dispositivos GPS son fundamentales para el monitoreo de la cadena de frío. Los sensores de temperatura y humedad miden las condiciones ambientales, mientras que los dispositivos GPS rastrean la ubicación de los productos en tránsito.

Los dispositivos GPS, como se ilustra en la figura 10, ofrecen datos de ubicación en tiempo real, facilitando el seguimiento de los productos a lo largo de toda la cadena de suministro. Esta capacidad es esencial para la trazabilidad y la gestión de incidentes.



Figura 10. Módulo GPS (Naylamp Mechatronics, 2020)

4.9 Sensor de Temperatura y Humedad:

El sensor utilizado en este proyecto debe ser altamente preciso y capaz de operar en condiciones adversas, por eso se usa el sensor Termocupla tipo K mostrado en la figura 11. Estos sensores recopilan datos que son esenciales para garantizar que los medicamentos se mantengan dentro de los rangos de temperatura adecuados.

Como se especificó para este proyecto, la temperatura a monitorear debe mantenerse dentro del intervalo de 2°C a 8°C, o entre 25 y 15 grados, por lo tanto, es fundamental que el sensor opere de manera efectiva y precisa dentro de este rango específico (Andrés, 2016).

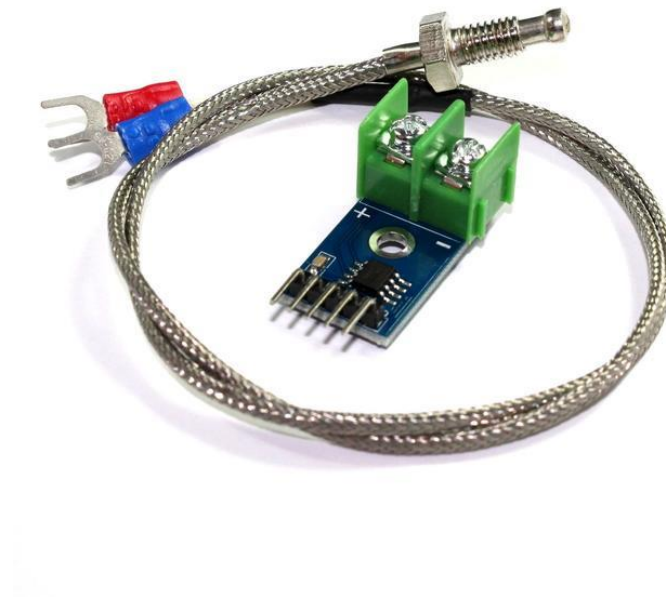


Figura 11. Sensor Termocupla tipo K (Novatronic, 2020).

4.10 Cadena de Frío, vacunas y estándares

Es el conjunto de regulaciones, actividades, procedimientos y equipos que aseguran la adecuada conservación de las vacunas bajo condiciones óptimas de luz y temperatura, protegiendo su inmunogenicidad desde que salen del laboratorio de producción hasta su administración al usuario final.

La cadena de frío es un método de logística que mantiene los productos perecederos a temperaturas específicas desde el punto de fabricación hasta el paciente. En el contexto farmacéutico, la cadena de frío es crucial para garantizar la eficacia y seguridad de medicamentos y vacunas que son sensibles a las variaciones de temperatura. Una ruptura en la cadena de frío puede resultar en la pérdida de integridad de los productos, lo que puede tener resultados graves para la salud pública.

4.10.1 Temperatura y Estabilidad de Medicamentos:

Los medicamentos, especialmente las vacunas, requieren ser almacenados y transportados a temperaturas específicas para mantener su estabilidad y eficacia. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las vacunas deben mantenerse en un rango de temperatura de 2 a 8 grados Celsius (Alonso, 2022), tabla 1.

Tabla 1.

Tabla de nivel de temperatura de la vacuna (AEMPS, 2023).

I NIVEL	CENTRAL	REGIONAL	LOCAL
VACUNAS	6 a 12 meses	3 a 6 meses	1 a 3 meses
Sarampión	De +2° C a +8° C +15° C+25° C No congelar		
Rubiola			
Parotiditis			

4.11 VACUNAS

La vacunación es un método simple, seguro y eficaz para protegerse contra enfermedades graves antes de estar en contacto con ellas. Las vacunas activan las defensas

naturales del cuerpo, enseñándole a combatir infecciones específicas y fortaleciendo el sistema inmunitario. Al recibir una vacuna, el sistema inmunitario produce anticuerpos de manera similar a lo que sucede durante una infección natural, pero las vacunas contienen microorganismos muertos o debilitados (como virus o bacterias), evitando que causen enfermedades o complicaciones (Organización Mundial de la Salud, 2024).

4.11.1 Almacenamiento de vacunas

Según la OMS, las vacunas que requieren refrigeración deben almacenarse entre 2°C y 8°C, y otras hasta un rango de 15°C. Para esto, se emplean refrigeradores especiales para vacunas que incluyen sistemas de regulación de temperatura o termostatos, junto con termómetros para monitorear y registrar las variaciones de temperatura de manera continua (Medical Impact, 2023).

Las vacunas deben mantenerse siempre lejos del calor y, preferiblemente, también de la luz para conservar su efectividad hasta que lleguen al usuario final. Por ello, los profesionales de la salud deben saber no solo cómo aplicarlas correctamente, sino también cómo almacenarlas y transportarlas adecuadamente, ya que estos fármacos salvan la vida muchas personas alrededor de todo el mundo.

4.11.2 Control de temperatura

Diariamente, es crucial tomar lecturas de temperatura al inicio y al final de la jornada laboral, así como cada vez que haya actividad en el centro sanitario, utilizando un termómetro de máximas y mínimas. Estas mediciones deben anotarse cuidadosamente en la hoja de control de temperaturas. Un aumento en la temperatura por encima del límite recomendado puede llevar a una pérdida gradual de la efectividad de las vacunas, siendo este un proceso acumulativo.

4.11.3 Pérdida de efectividad

El perjuicio de la cadena de frío afecta la seguridad de las vacunas y, en general, ocurre debido al desafío logístico de administrar cientos de miles de dosis simultáneamente. Es crucial que el sistema de salud disponga de equipos de almacenamiento adecuados, protocolos de mantenimiento y sistemas de control de temperatura eficientes (Marisol, 2021).

4.12 Buenas Prácticas de almacenamiento, distribución y transporte – MSP

4.12.1 Almacenamiento

El Artículo 39, relacionado con el almacenamiento de productos y publicado por el Ministerio de Salud Pública, estipula que los establecimientos deben garantizar que los productos se guarden de acuerdo con las condiciones de temperatura y humedad indicadas por el fabricante. Estas condiciones deben alinearse con las aprobadas durante el proceso de Registro Sanitario o Notificación Sanitaria Obligatoria. Mantener dichas condiciones es esencial para asegurar la estabilidad y calidad de los productos (Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria , 2014).

- Temperatura de refrigeración: 2 - 8°C.
- Rango superior: 15°C

4.12.2 Seguridad

Es necesario contar con sistemas para el control de temperatura, manteniéndola entre 2-8 °C, o entre 25 y 15 grados, así como tener un plan de contingencia establecido. Los equipos para supervisar la temperatura y la humedad relativa deben ser calibrados periódicamente y mantener registros adecuados según los procedimientos internos. Se recomienda realizar estudios de mapeo para identificar cualquier fluctuación de temperatura dentro del área de almacenamiento (Ministerio Salud Pública, 2022).

4.13 Gestión de información en Tiempo Real

La gestión de datos de forma real es crucial para el monitoreo efectivo de la cadena de frío. Esto implica la recopilación continua de datos, su transmisión inmediata a la nube y el análisis en tiempo real para detectar desviaciones y generar alertas.

4.13.1 Algoritmos de Análisis

Los algoritmos utilizados para analizar los datos en tiempo real deben ser capaces de detectar patrones y anomalías. Estos algoritmos son esenciales para identificar problemas antes de que afecten la calidad de los medicamentos.

4.13.2 Generación de Alertas

El sistema debe ser capaz de crear alertas automáticas en caso de que las condiciones de temperatura o humedad se desvíen de los rangos establecidos. Esto permite una respuesta rápida para corregir cualquier problema.

V MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo de este prototipo seguirá una metodología cuantitativa, utilizando métodos de análisis de datos obtenida por una termocupla tipo K y verificarlo mediante el sistema IoT Arduino Cloud. Se obtendrá un análisis general de los problemas y desafíos en el manejo de la cadena de frío en el sistema de médico a paciente, permitiendo así el diseño de un sistema IoT efectivo y adaptado a las necesidades específicas del proyecto, en la figura 12 se visualiza la estructura del proyecto.

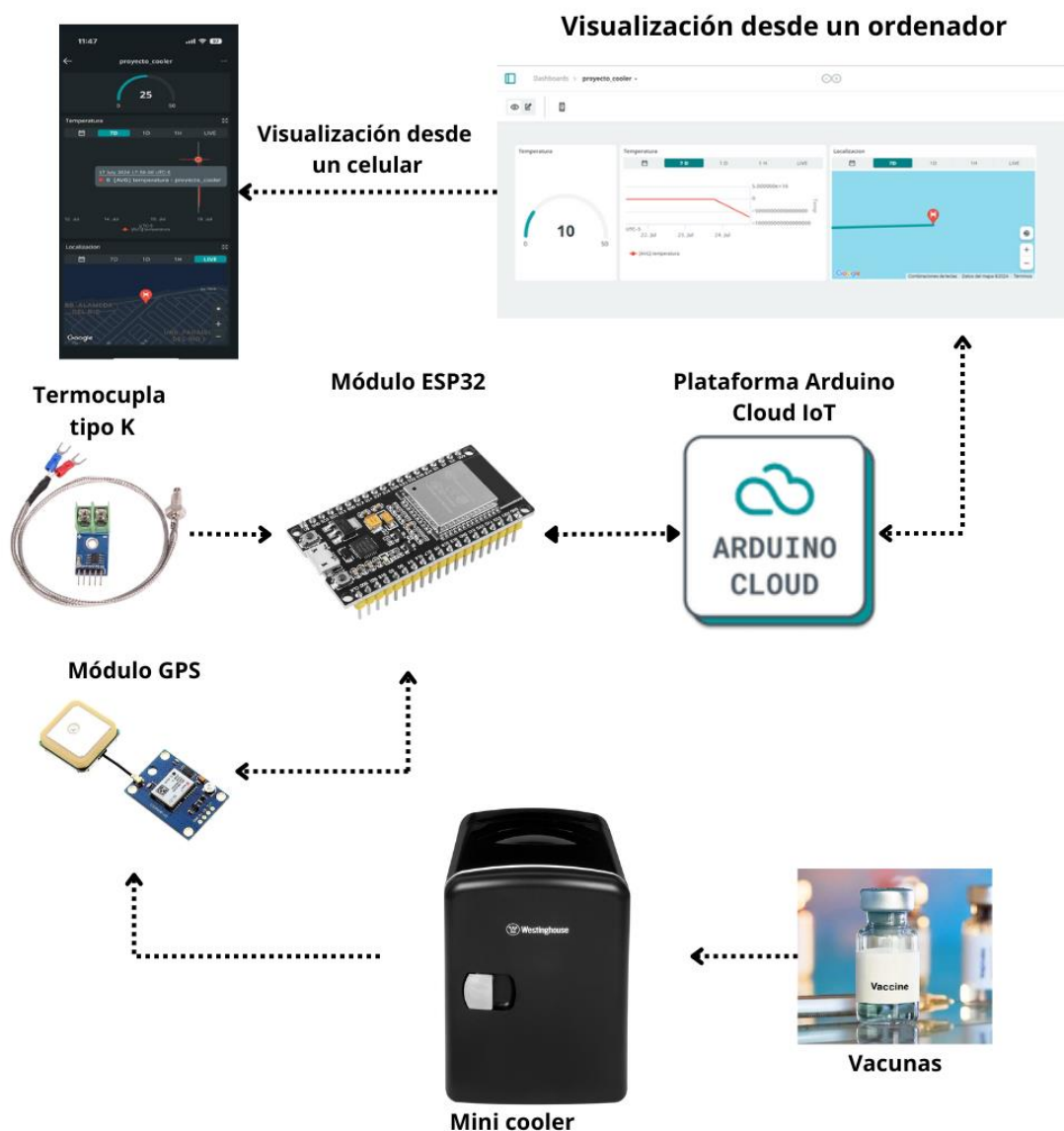


Figura 12. Estructura general del proyecto.

5.1 Comparación entre un sensor termocupla tipo K y sensor LM35

La termocupla tipo K, figura 13, y el sensor LMP35 se distinguen principalmente por su principio de funcionamiento, rango de temperatura, precisión y usos. La termocupla tipo K, que opera mediante el efecto termoeléctrico, puede medir temperaturas de -200°C a 1372°C con una precisión de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ o 0.4%, siendo robusta y adecuada para condiciones extremas, lo que la convierte en una opción ideal para aplicaciones industriales. En cambio, el LMP35 es un sensor semiconductor que emite una salida de voltaje relacionado con la temperatura, con un rango de -40°C a 125°C y una alta precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, siendo más adecuado para aplicaciones de consumo y comerciales que requieren monitoreo de temperatura en condiciones menos extremas.



Figura 13. Termocupla tipo K

El sensor LM35, como se muestra en la figura 14, es ideal para la cadena de frío debido a su capacidad para mantener los medicamentos y vacunas dentro de los rangos de temperatura necesarios para preservar su eficacia y seguridad. Su rango de operación de -40°C a 125°C cubre ampliamente las necesidades típicas de la cadena de frío. Además, su salida de voltaje proporcional a la temperatura permite un monitoreo continuo y fiable, lo

cual es esencial para asegurar la calidad de las vacunas durante el transporte y almacenamiento.

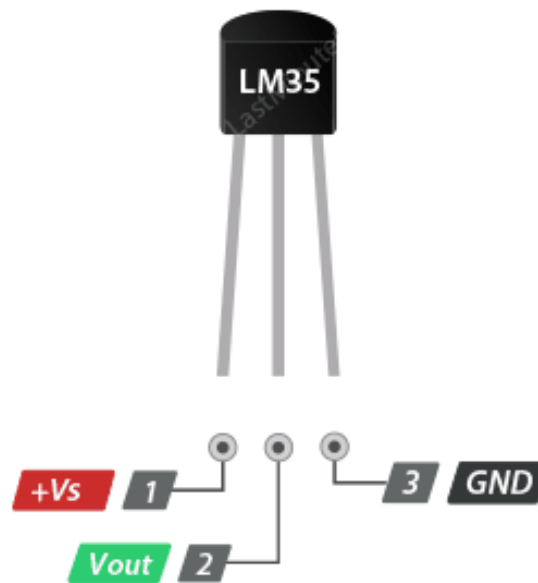


Figura 14. Sensor LM35

Se utilizó la termocupla tipo K en el prototipo debido a su amplio rango de temperatura, que abarca desde -200°C hasta 1350°C , lo que la hace adecuada para entornos de operación exigentes. No se optó por el sensor LM35 porque su rango de medición es más limitado, de -55°C a 150°C , y su precisión puede verse afectada en condiciones extremas, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones críticas en la cadena de frío.

5.2 Procedimiento

La información recolectada y analizada mediante la metodología cuantitativa permitirá desarrollar un sistema IoT ajustado a las necesidades específicas de la gestión de la cadena de frío en la industria farmacéutica. Este diseño se muestra en la figura 15 y contemplará lo siguiente:

5.2.1 Selección de Componentes:

- **Sensores:** Elección de sensores de temperatura y humedad de alta precisión.

- **Dispositivos de Comunicación:** Selección de microcontroladores y módulos de comunicación eficientes para garantizar la transmisión de datos en tiempo real.

5.2.2 Desarrollo de Software:

- **Plataforma en la Nube:** Implementación de un sistema en la nube desde Arduino Cloud IoT para la conservación, procesamiento y verificación de datos.
- **Código:** Desarrollo de código para analizar los datos en tiempo real y generar alertas en caso de desviaciones de los parámetros.

5.2.3 Recolección de Datos:

- **Sensores de Temperatura y Humedad:** Instalación de sensor LM35 en el prototipo para monitorear las condiciones ambientales en tiempo real.
- **Dispositivos GPS:** Implementación de dispositivo GPS para rastrear la ubicación exacta de los medicamentos durante su traslado.
- **Registros Históricos:** Análisis de datos históricos sobre la temperatura y ubicación de medicamentos durante transporte.

5.2.4 Análisis de Datos:

- **Estadística Descriptiva:** Uso de herramientas estadísticas para describir y resumir los datos recopilados.
- **Análisis de Patrones:** Identificación de patrones en los datos de temperatura y humedad, y cómo estos afectan la integridad de los medicamentos.

- **Modelado Predictivo:** Desarrollo de modelos para predecir posibles fluctuaciones de temperatura y su impacto en la calidad de los medicamentos.

5.3 Diseño General del prototipo

5.3.1 Elaboración de diagrama de conexiones en la herramienta de Proteus

Se elaboró un diagrama de conexiones que describe la integración de los componentes clave del sistema de monitoreo IoT, este diagrama incluye las conexiones del sensor termocupla tipo K, módulo GPS y dispositivos de control a la plataforma central, asegurando una transmisión de datos eficiente y un control preciso del entorno en la cadena de frío. Cada componente fue conectado conforme a especificaciones técnicas rigurosas para garantizar la funcionalidad y confiabilidad del prototipo durante las pruebas de campo, figura 15.

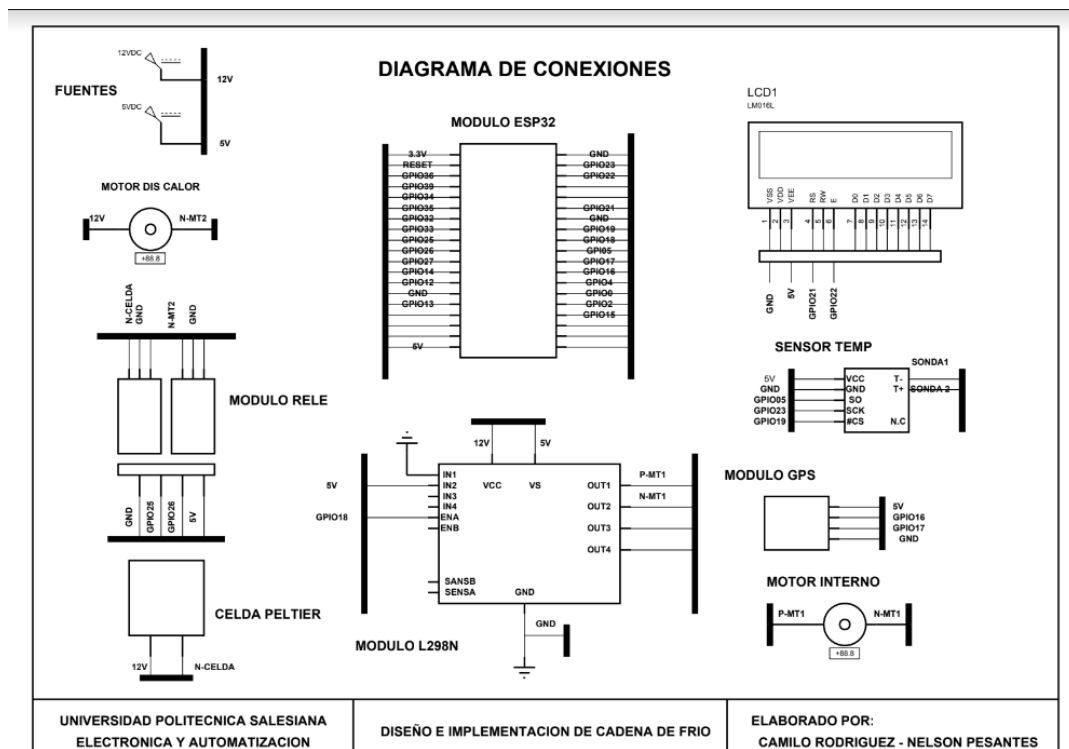


Figura 15. Diagrama de conexiones en Proteus.

5.3.2 Diseño de la tarjeta electrónica

El diseño de la tarjeta electrónica se realizó utilizando la plataforma Proteus, donde se llevó a cabo la simulación y configuración de los componentes. Posteriormente, el diseño fue transferido a la herramienta "Ares", donde se trazaron cuidadosamente las pistas del circuito, asegurando una conexión óptima y minimizando el riesgo de interferencias, todo con el fin de obtener la funcionalidad y robustez del prototipo, figura 16.

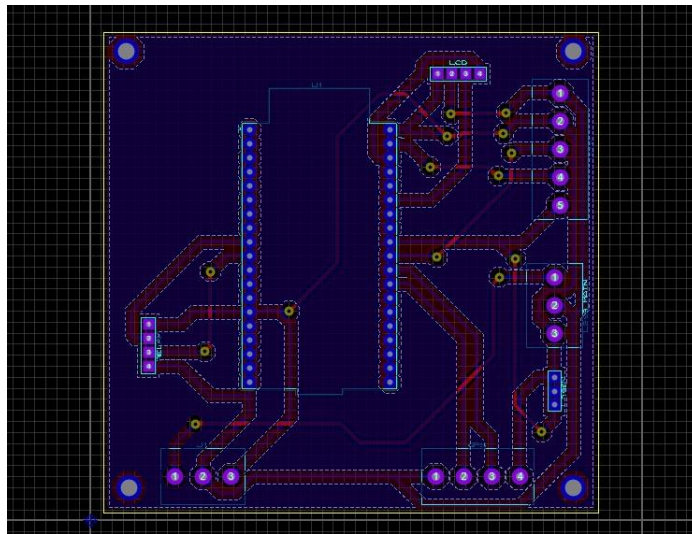


Figura 16. Diagrama de conexiones mediante Proteus.

En esta figura 17 se observa la dimensión en 3D de la placa al igual que una simulación de sus componentes, previo a la elaboración.

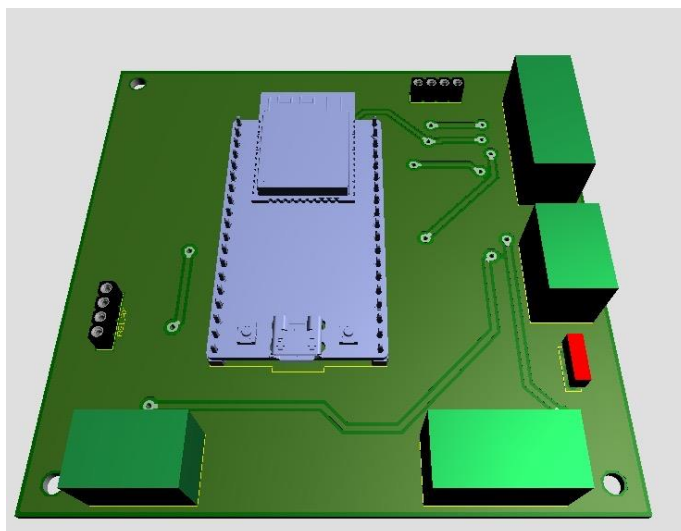


Figura 17. Visualización en 3D de la PCB

5.3.3 Implementación de elementos electrónicos en la PCB

En la figura 18 se observa la implementación del prototipo utilizando cada elemento y dispositivo electrónico junto a su placa PCB.

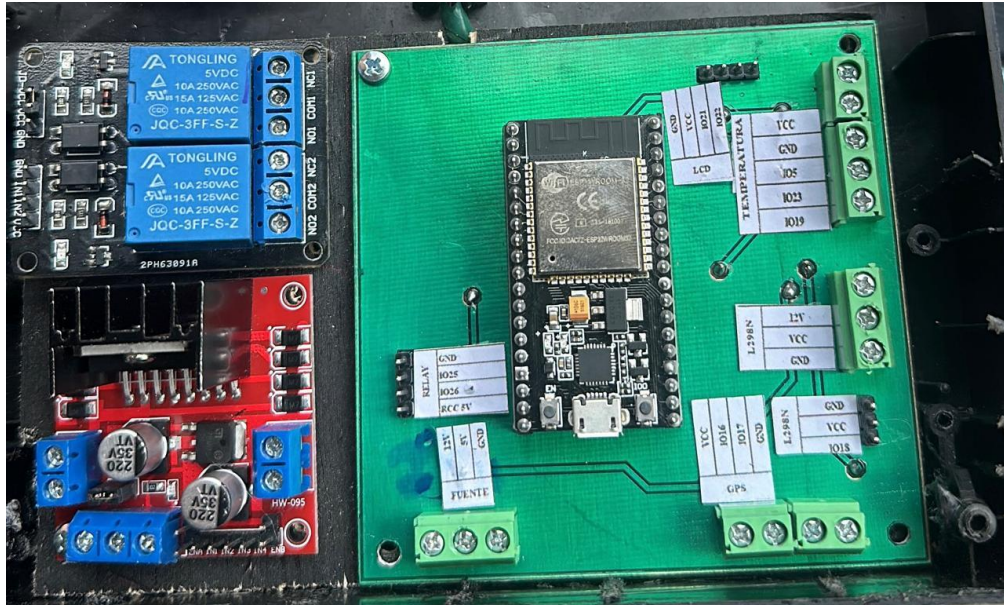


Figura 18. Elementos implementados en el prototipo.

5.4 Integración de la Celda Peltier al prototipo

5.4.1 Circuito de Control y alimentación:

La celda Peltier se integrará con el microcontrolador a través de un circuito de control que ajustará la corriente eléctrica en función de las lecturas de temperatura proporcionadas por el sensor. Para gestionar la corriente requerida y optimizar el

rendimiento del sistema, se empleará un módulo de control de potencia, como un transistor, garantizando una regulación precisa y eficiente de la energía suministrada a la celda Peltier.

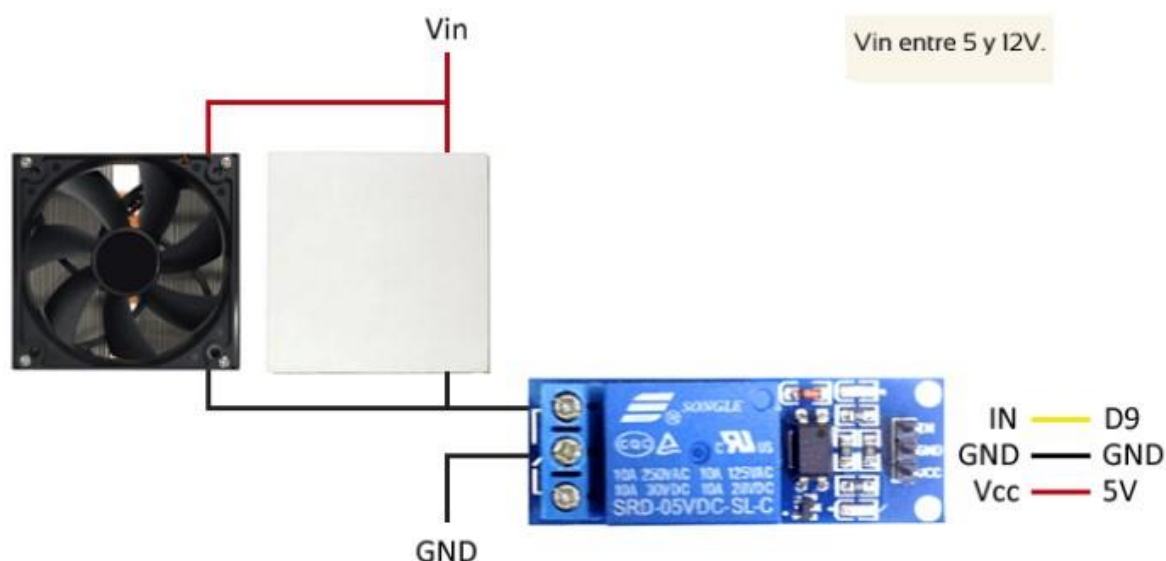


Figura 19. Conexión de la Celda Peltier.

La celda Peltier requerirá una fuente de alimentación adecuada, generalmente de corriente continua (DC), que proporcionará la potencia necesaria para su operación, es así que, el sistema estará diseñado para cambiar la polaridad de la corriente, permitiendo así que la celda enfríe o caliente el compartimiento según sea necesario, figura 19.

5.4.2 Sensores de Temperatura:

La termocupla tipo K, se ubicará en el interior del compartimiento donde la celda Peltier regula la temperatura, mientras, los datos del sensor se enviarán al microcontrolador, que ajustará la corriente aplicada a la celda Peltier para mantener la temperatura dentro del rango requerido (generalmente entre 2°C a 8°C, o entre 25°C y 15°C).

5.5 Integración de controlador L298N al prototipo

Para conectar el módulo L298N, se debe conectar una fuente de alimentación de 12V o 5V al pin Vcc y el terminal de tierra al pin GND del módulo. Luego, se conectan los pines de control del microcontrolador ESP32 a los pines IN1, IN2, IN3 y IN4 del módulo para gestionar la dirección y el estado del ventilador. Finalmente, el ventilador se conecta a los

pinos OUT1 y OUT2, permitiendo que el módulo controle la rotación y velocidad del ventilador según las señales del microcontrolador, figura 20.

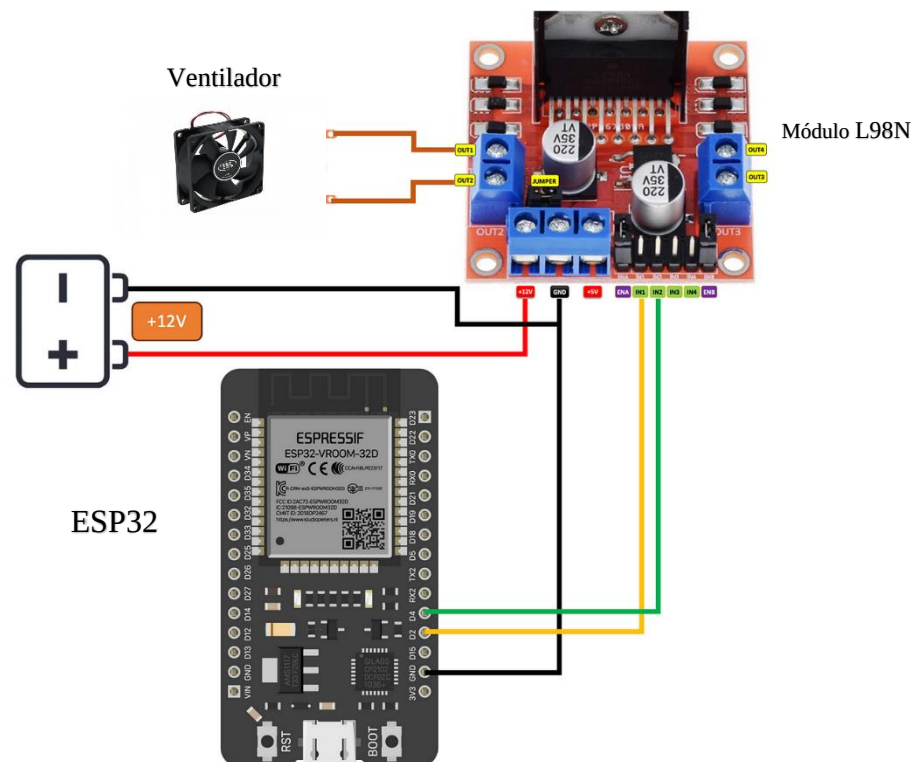


Figura 20. Conexión del módulo L298N.

5.6 Integración de la termocupla K al prototipo.

Para conectar la termocupla tipo K al módulo ESP32, primero se conecta a un módulo de acondicionamiento de señal o amplificador, que se alimenta desde el ESP32 (3.3V o 5V) y se conecta a tierra (GND). La salida de datos del amplificador se conecta a un pin GPIO del ESP32, y los pines de reloj (CLK) y selección de chip (CS) se conectan a otros pines GPIO. Es necesario configurar el ESP32 para la comunicación SPI y realizar pruebas funcionales para asegurar lecturas precisas, ajustando el software y hardware según sea necesario, figura 21.

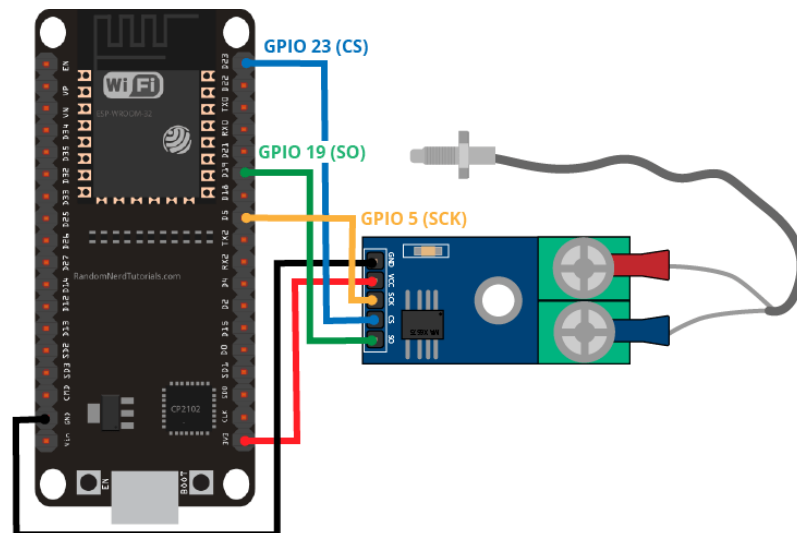


Figura 21. Conexión de la termocupla tipo K.

5.7 Configuración del Módulo GPS para el prototipo

5.7.1 Alimentación:

Se visualiza en la figura 22, se debe conectar el pin VCC del módulo GPS a una fuente de alimentación de 3.3V o 5V, de acuerdo con las especificaciones del módulo. Además, el pin GND debe conectarse a tierra para completar el circuito eléctrico.

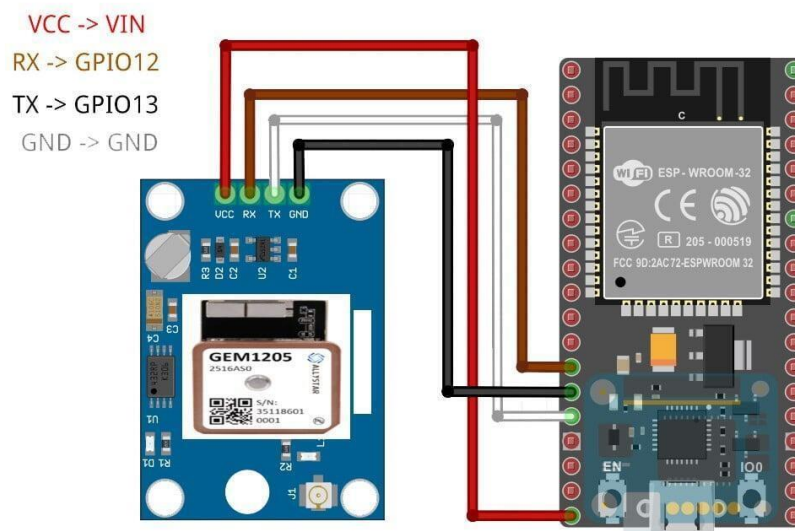


Figura 22. Diagrama de conexión de módulo GPS.

5.7.2 Transmisión de Datos (TX):

El pin TX del módulo GPS debe conectarse al pin RX del microcontrolador, lo que permitirá la transmisión de datos seriales del GPS al microcontrolador.

5.7.3 Recepción de Datos (RX):

El pin RX del módulo GPS debe conectarse al pin TX del microcontrolador, permitiendo que el GPS reciba datos de configuración enviados desde el microcontrolador.

5.7.4 Configuración Serial:

El puerto serial del microcontrolador debe configurarse para comunicarse con el módulo GPS a la velocidad de baudios indicada en la documentación del módulo, que generalmente es de 9600 bps.

5.7.5 Monitorización y Control:

La información de ubicación proporcionada por el GPS debe utilizarse para rastrear el movimiento y la posición en tiempo real. Estos datos se integrarán con otros componentes del sistema para mejorar la funcionalidad del prototipo, facilitando la geolocalización en el seguimiento de medicamentos o productos.

5.8 Alimentación con Baterías Portátiles del dispositivo

Para la integración de la batería portátil en el sistema, es fundamental asegurar que su capacidad (mAh) y voltaje (V) sean adecuados para los componentes del sistema y el consumo energético total. En la figura 23, terminal positivo (+) de la batería debe conectarse al punto de alimentación positiva del circuito, mientras que el terminal negativo (-) debe conectarse al punto de tierra o negativo del circuito, utilizando cables apropiados para evitar pérdidas de energía y asegurar una conexión estable. Es crucial verificar que las conexiones sean seguras, que el sistema reciba el voltaje correcto y que no haya cortocircuitos. Además, se debe evaluar la eficiencia energética de la batería portátil, ajustando el diseño para optimizar la duración de la batería según el consumo del prototipo.

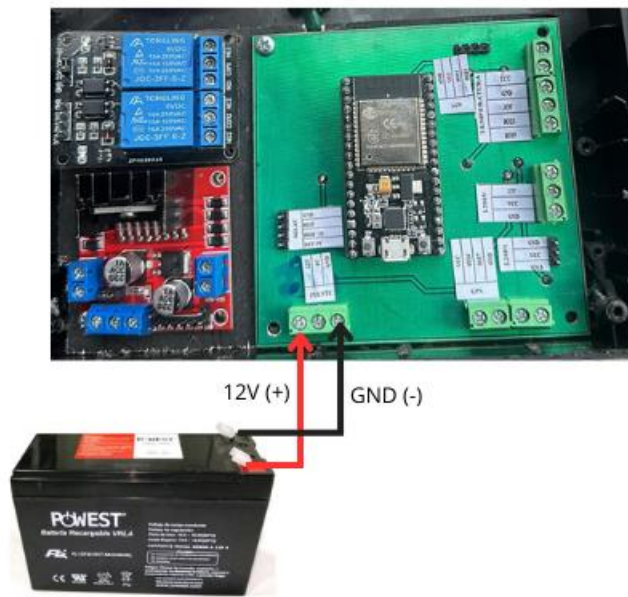


Figura 23. Tipo de batería recargable a utilizar.

5.9 Funcionamiento general del prototipo

En la figura 24, Se presentan las conexiones optimizadas del prototipo, acompañadas de su placa PCB.



Figura 24. Implementación de las conexiones al prototipo.

En la figura 25, se logra visualizar las conexiones internas del prototipo.



Figura 25 Implementación de las conexiones internas al prototipo.

En la figura 26, se muestra el prototipo completamente operativo, destacando en su pantalla LED de alta visibilidad una lectura de temperatura precisa de 11°C. Esta representación en tiempo real refleja la fiabilidad y exactitud del sistema, asegurando un monitoreo constante que se adapta a las exigencias. El diseño intuitivo y la interfaz amigable permiten una experiencia visual clara y una interpretación de datos rápida y sencilla para el usuario.



Figura 26. Funcionamiento de la zona posterior del prototipo.

En la siguiente figura 27, se logra visualizar la estructura externa del cooler, utilizado para armar el prototipo.



Figura 27. Parte frontal del prototipo.

5.10 Inicialización del proyecto en Arduino Cloud

Para poder usar la plataforma de Arduino Cloud, primero se debe seguir los siguientes pasos:

- Dar click en “Create your account” mostrado en la figura 28.

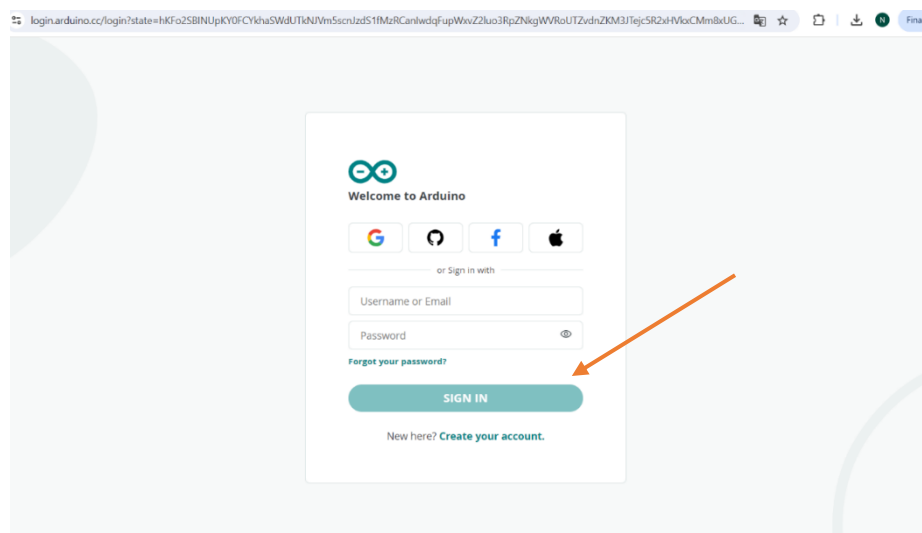


Figura 28. Página principal de acceso de Arduino Cloud.

5.10.1 Crea una cuenta

Para utilizar Arduino Cloud, necesitará una cuenta Arduino, figura 29, se puede acceder con Google, Facebook e iCloud mail.

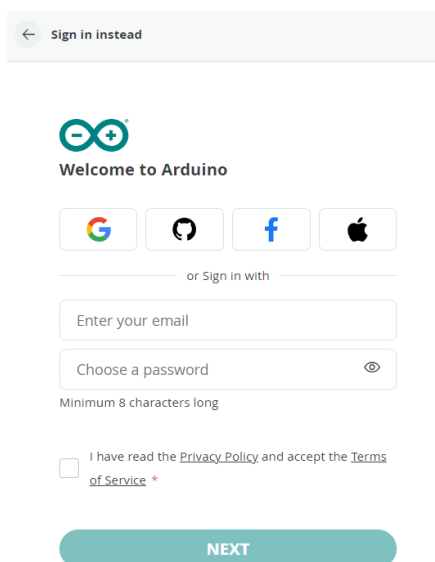


Figura 29. Crear cuenta de Arduino Cloud IoT.

5.10.2 Crea una Dashboard

Luego de crear la cuenta de Arduino Cloud, se observa la página principal donde se creará un nuevo proyecto en “create new” y se procede a dar clic en “Dashboard”, como se observa en la figura 30.

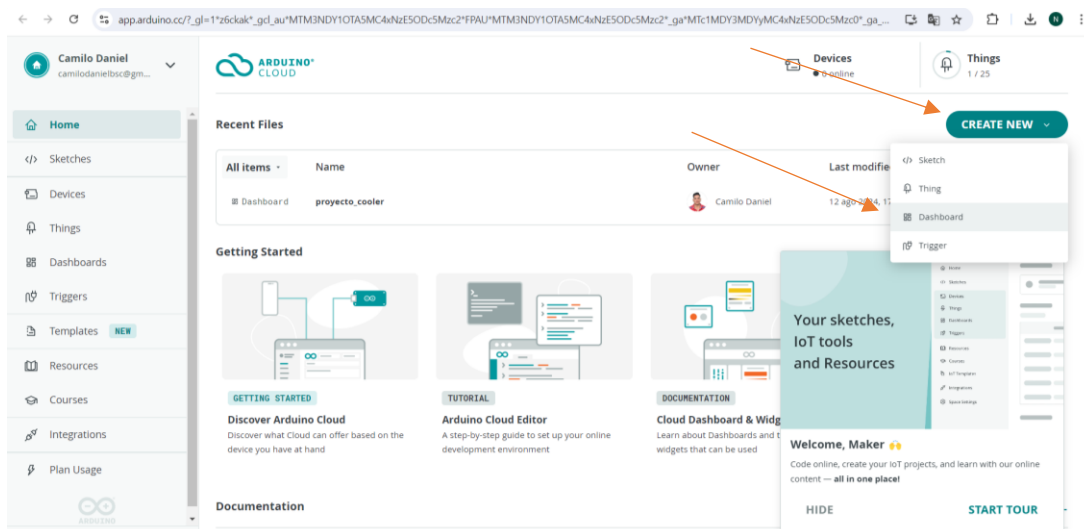


Figura 30. Página principal de Arduino Cloud.

5.10.3 Crear un panel de control

Luego de tener creado el Dashboard, se observa en la figura 31 el panel de control donde se ingresará las interfaces a utilizar.

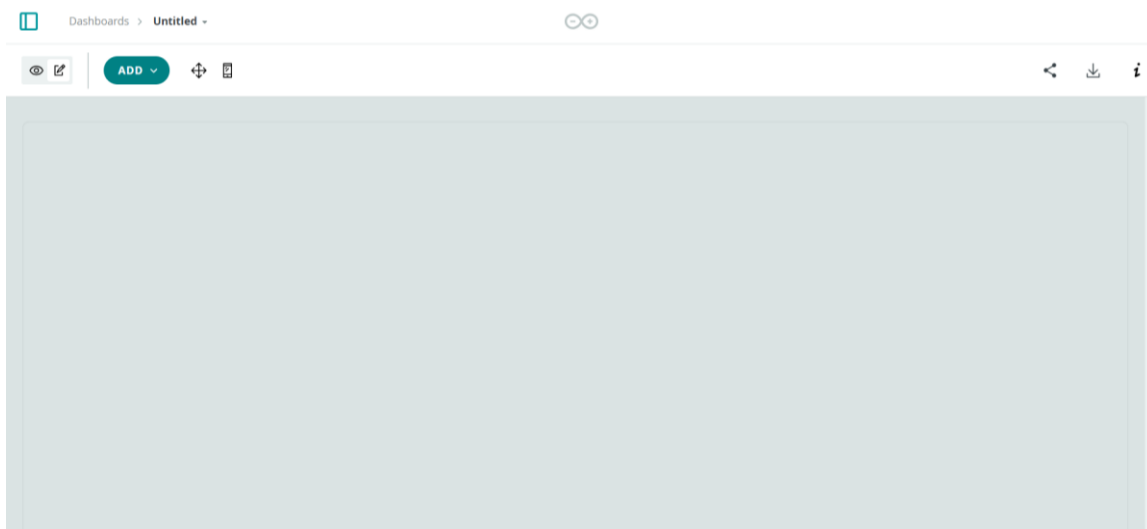


Figura 31. Panel de control del dashboard creado.

5.11 Ingreso de interfaces al sistema IoT de Arduino Cloud.

En este siguiente paso, se ingresa en “ADD” y se escoge cada interfaz a utilizar, mostrado en la figura 32.

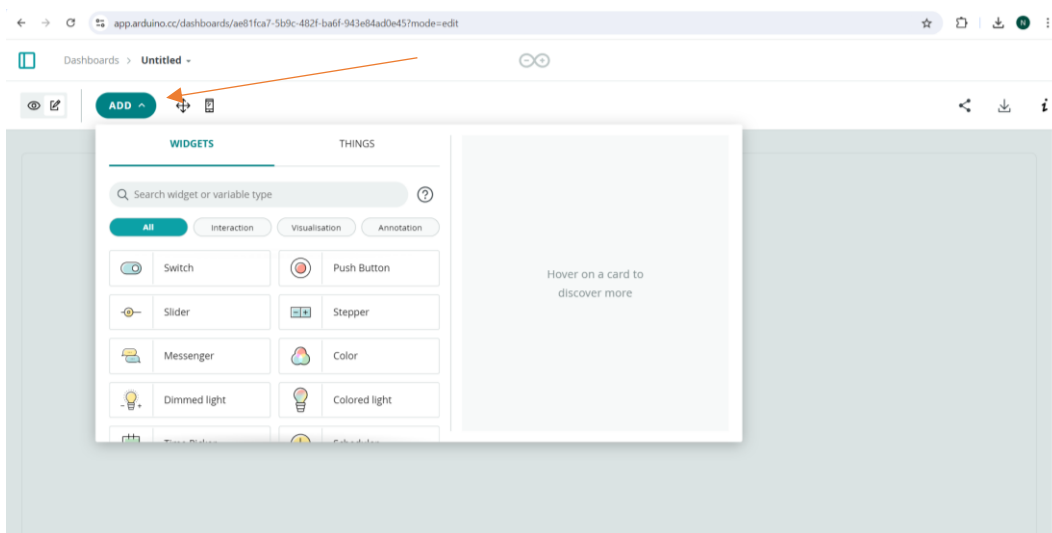


Figura 32. Agregar interfaces.

En la figura 33, se agrega la interfaz “Gauge” donde facilita una lectura de temperatura desde sensores conectados. Ofrece visualización clara a través de gráficos y medidores, facilita

la configuración de alertas y automatizaciones basadas en los valores de temperatura, es ideal para aplicaciones de monitoreo ambiental y control de sistemas basados en temperatura.

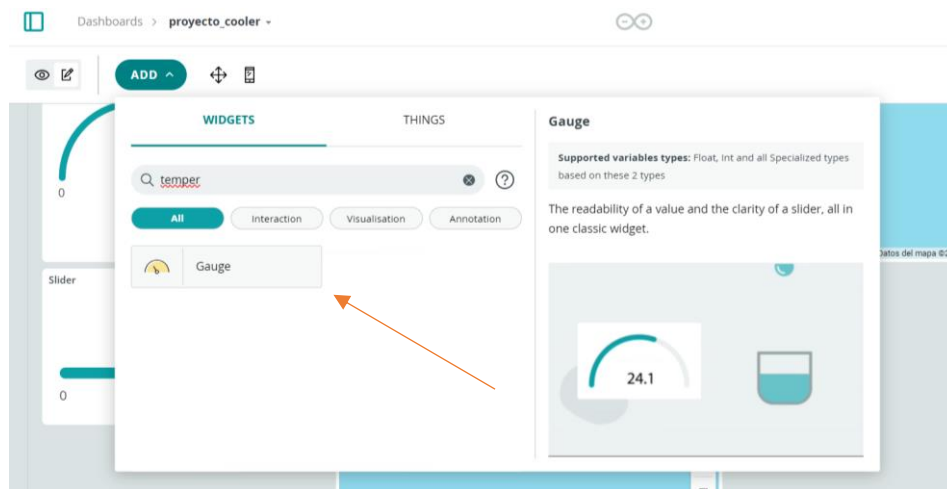


Figura 33. Selección de interfaz de temperatura.

El sistema es capaz de adquirir datos de los sensores en intervalos de segundo, proporcionando información casi en tiempo real, es así que, los datos recopilados se almacenaron en la memoria del Arduino antes de su transmisión, figura 34.

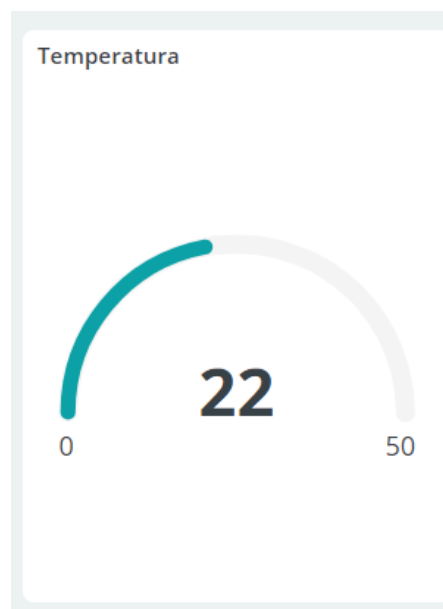


Figura 34. Interfaz de temperatura.

5.11.1 Visualización de Datos:

En la interfaz de datos de temperatura, se visualizan gráficos, medidores o displays numéricos, facilitando el análisis y seguimiento de las variaciones de temperatura, figura 35.

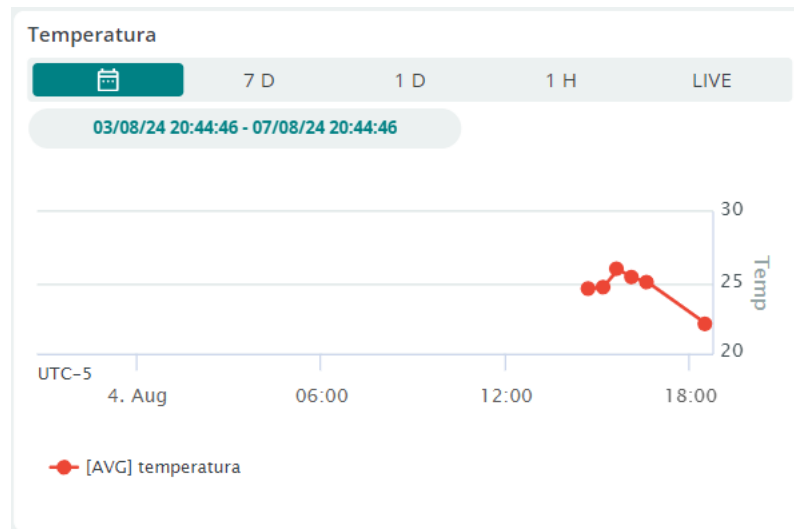


Figura 35. Gráfica de la temperatura detectados por el sensor.

5.11.2 Monitoreo Remoto:

Una vez que se ha integrado la interfaz de localización, será posible observar en tiempo real la geolocalización de un entorno o dispositivo conectado desde cualquier lugar mediante internet, figura 36.

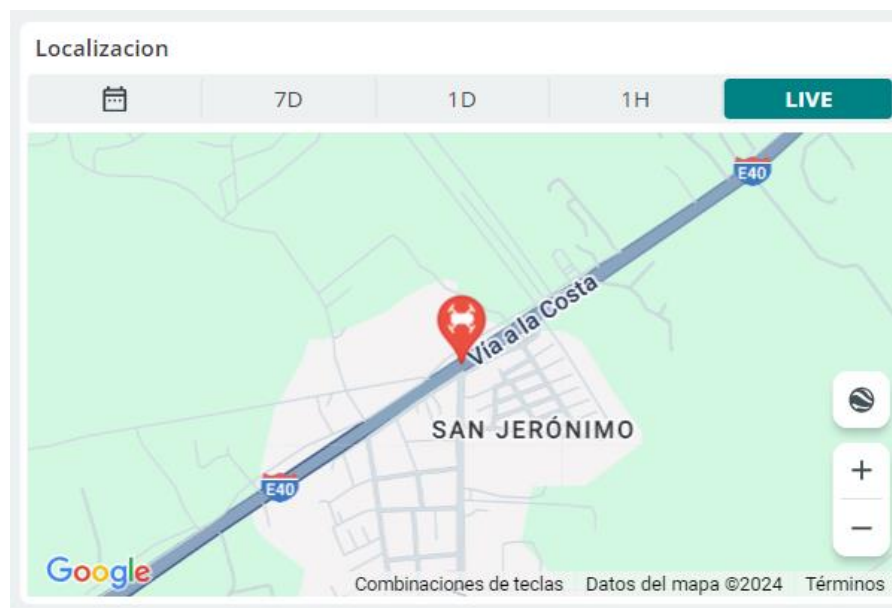


Figura 36. Visualización de la ubicación del proyecto.

5.11.2.1 Interfaz de monitoreo.

Una vez creada la Dashboard y realizado todas las configuraciones, creado un programa y un panel de control, se logra monitorear e interactuar el proyecto desde la interfaz web o la aplicación móvil, figura 37 y 38.

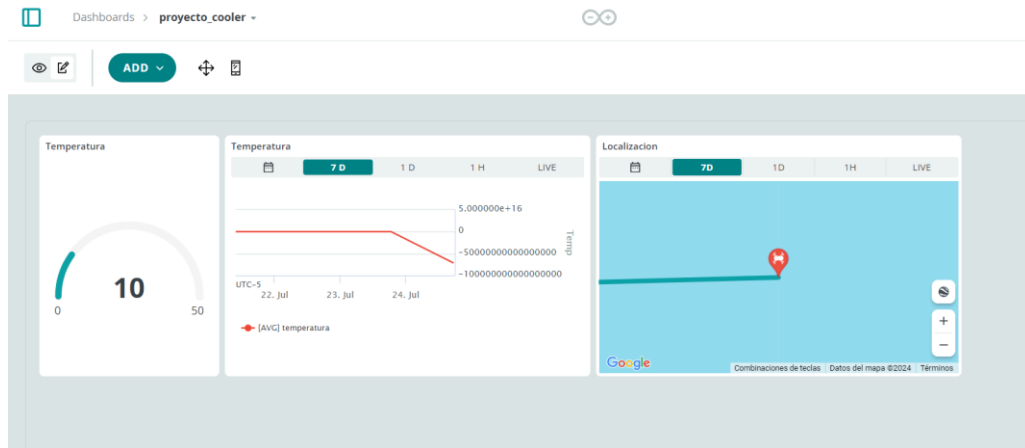


Figura 37. Visualización del sistema Arduino Cloud mediante un ordenador.

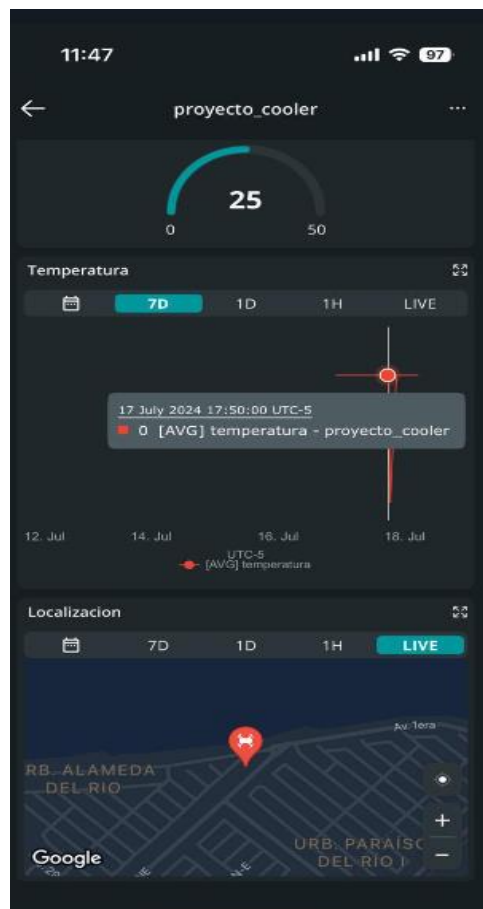


Figura 38. Visualización del sistema Arduino Cloud mediante un smartphone.

5.12 Conexión de Arduino Cloud al módulo GSM32

A continuación, se detalla el desarrollo del algoritmo necesario para conectar Arduino Cloud al módulo GSM32, incluyendo el hardware requerido, la configuración del software y el código para lograr la comunicación efectiva.

5.12.1 Configuración del Software

- Instalar la librería GSM desde el Administrador de Librerías.
- Instalar la librería Arduino Cloud desde el Administrador de Librerías.

5.12.2 Ingreso de datos de librería.

En este paso, se debe ingresar primeramente las librerías a utilizar mostrado en la figura 28.



Figura 39. Ingreso de datos en el programa de Arduino.

5.12.3 Explicación del Código

1. Librerías Importadas: GSM, Arduino Cloud, y Arduino IoT Cloud para manejar la comunicación GSM y la conexión a la nube.
2. Configuración del Módulo GSM: Definición de APN, login y password según el proveedor de servicios de la tarjeta SIM.
3. Inicialización de la Nube: Configuración de la propiedad temperature para su monitoreo en Arduino Cloud.

4. Establecimiento de Conexiones: Inicio de la comunicación GSM y la conexión GPRS, seguida de la configuración para la nube.
5. Bucle Principal: Lectura del valor del sensor de temperatura, conversión a grados Celsius y actualización de la nube con el valor obtenido.

5.13 Procedimiento de descarga de datos desde Arduino Cloud

En este siguiente punto

5.13.1 Acceso a Arduino Cloud:

Se inicia sesión en la plataforma con el usuario y clave registrado, como se muestra en la figura 40.

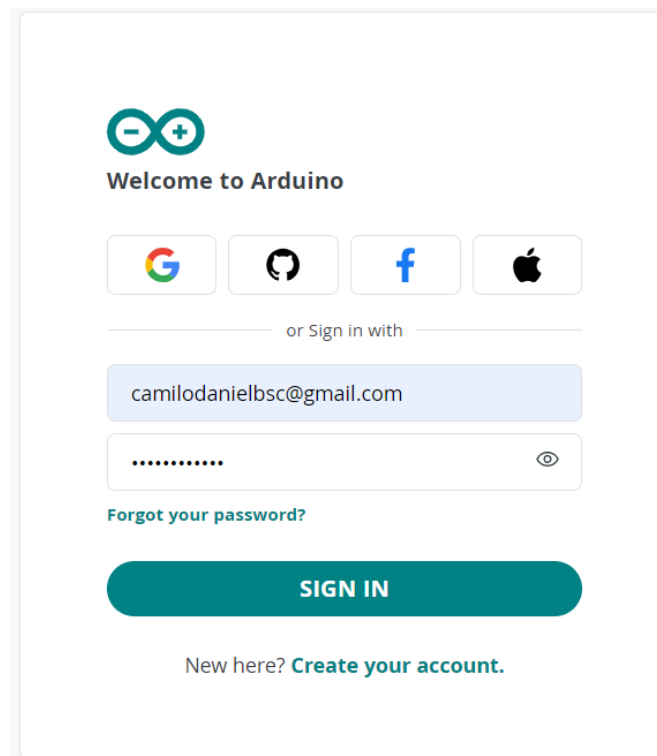


Figura 40. Inicio de sesión en Arduino Cloud.

En este siguiente paso se selecciona el proyecto correspondiente como está indicado en la figura 41.

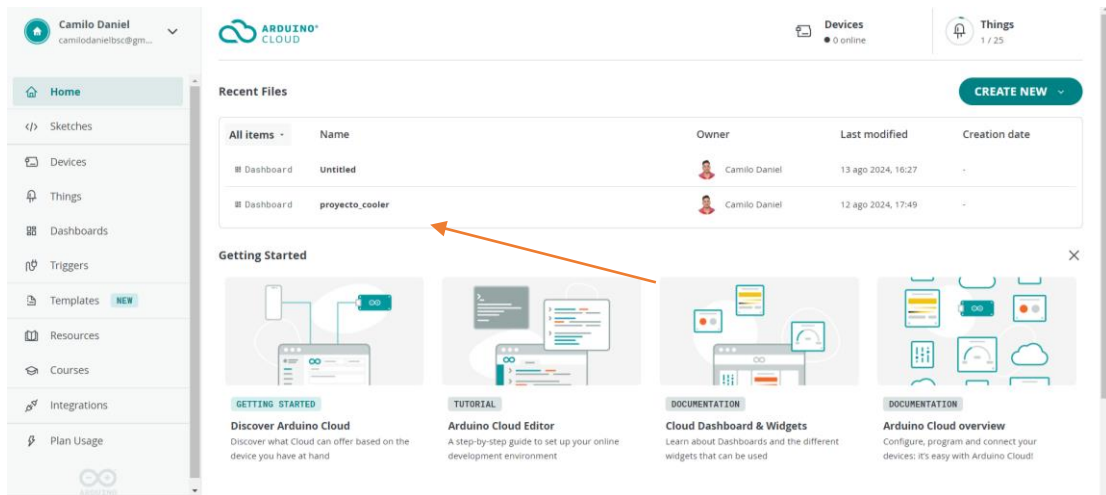


Figura 41. Selección del proyecto en Arduino Cloud.

5.13.2 Selección de Variables:

Se elige la opción de descarga como esta mostrado en la figura 42, se le da clic.

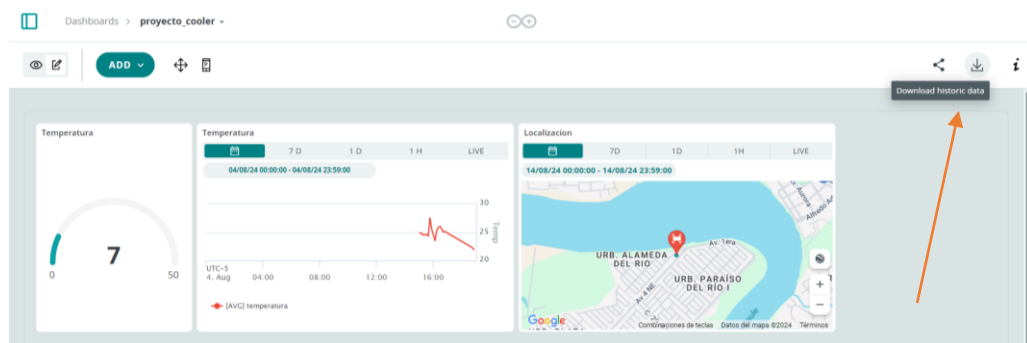


Figura 42. Muestra de interfaces.

En el próximo paso en la figura 43, se observa las variables tales como temperatura emitidas por el sensor y las coordenadas por el GPS, se selecciona la variable y el rango de fecha de interés para descargar la data histórica.

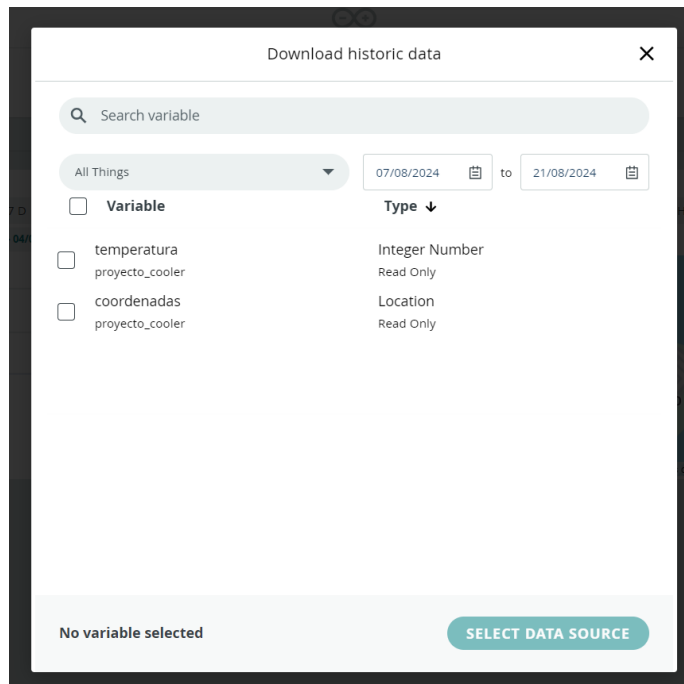


Figura 43. Selección de variables.

5.13.3 Exportación de Datos:

Luego de seleccionar las variables y el rango de fecha establecido, se da clic en “select data source” como se indica en la figura 44. La data llegará en un archivo comprimido en el correo electrónico.

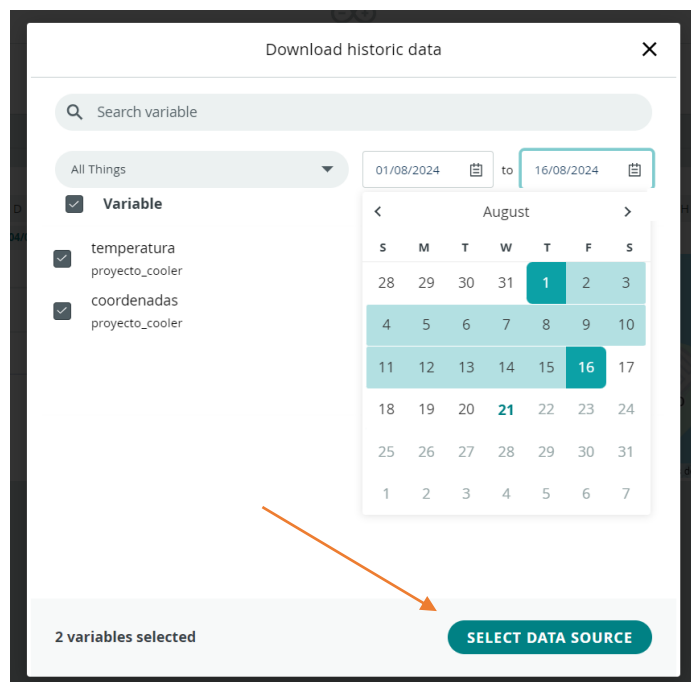


Figura 44. Descarga de data histórica.

Al momento de revisar el correo electrónico se le da clic en “download” donde se encuentra marcado en la figura 45 para empezar con la descarga del archivo, estará en archivo comprimido (.zip).

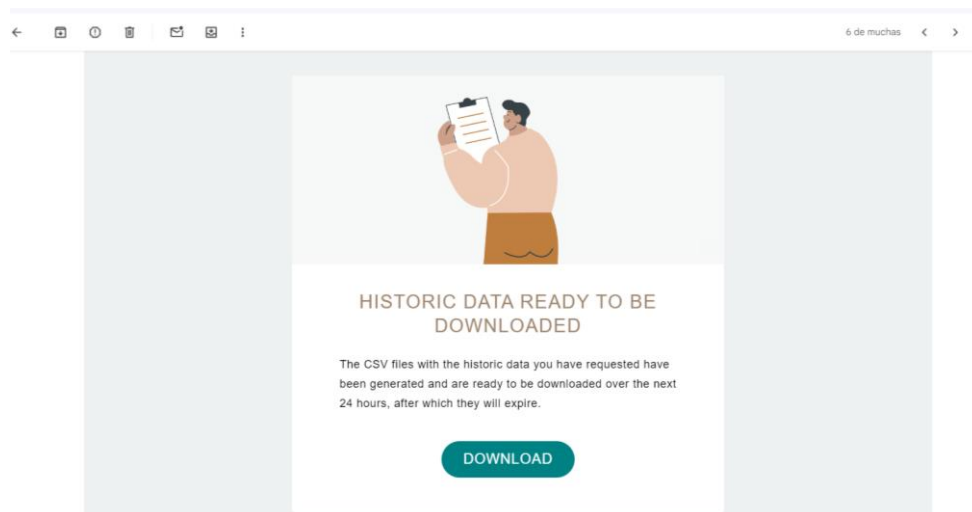


Figura 45. Descarga de data.

5.13.4 Verificación y Análisis:

Los archivos quedan descargados en archivo comprimido, se debe descomprimirlo y se visualizaran los archivos descargados, figura 46.

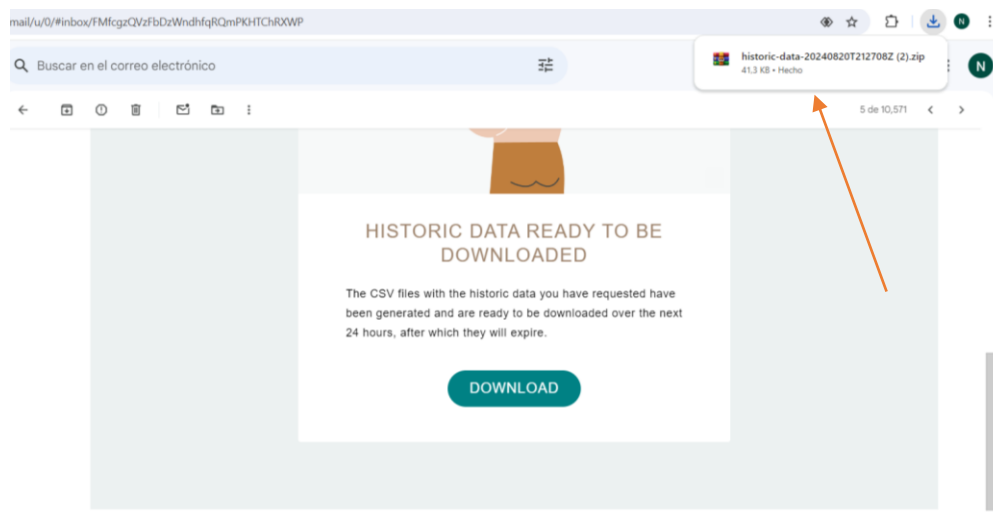


Figura 46. Data en archivo comprimido.

Luego de descomprimir el archivo descargado se abrirá una carpeta con la data en archivo de Excel, figura 47.

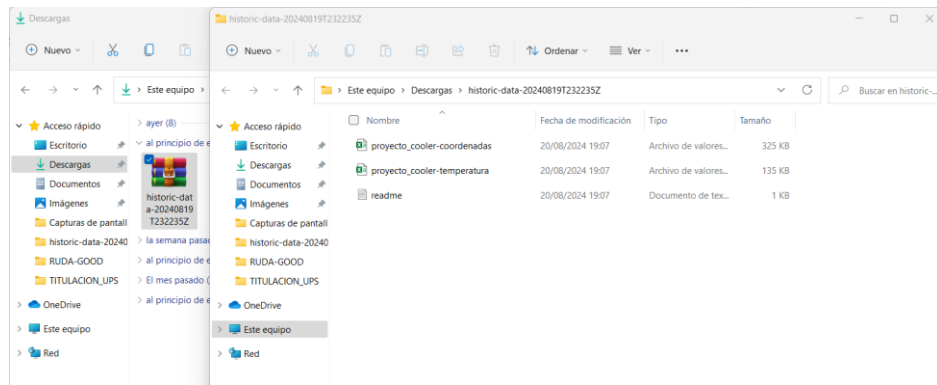


Figura 47. Archivo en Excel de la temperatura y coordenadas.

Se logra visualizar en la figura 48 los datos de la temperatura obtenidas por el sensor, donde se muestra la fecha, hora y temperatura.

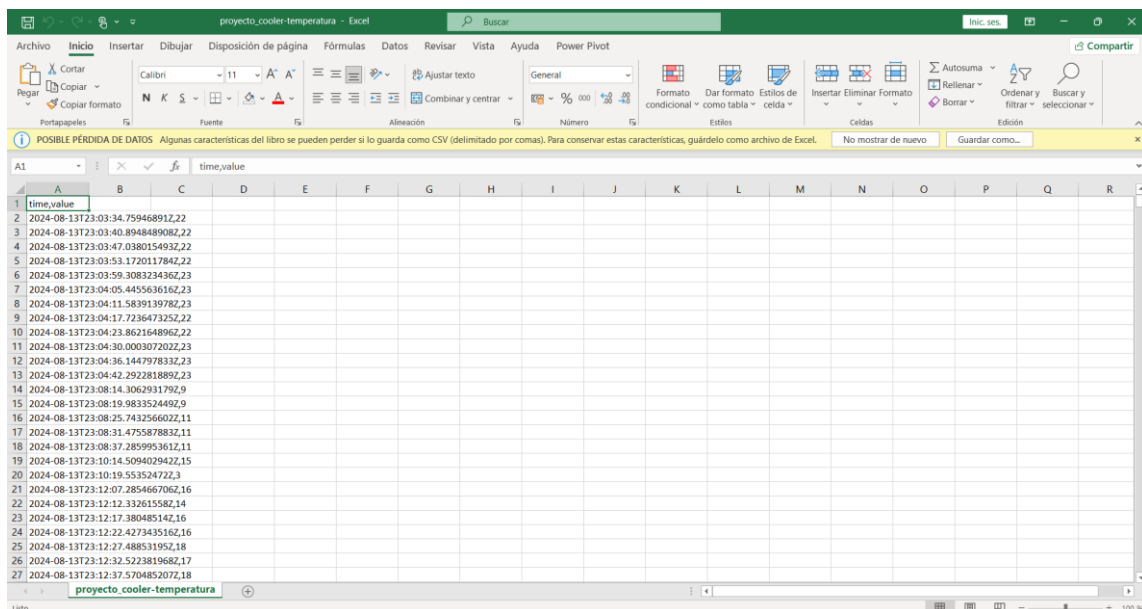


Figura 48. Data obtenida del sensor de temperatura.

La figura 49 muestra los datos de la geolocalización obtenidas por el módulo, donde se observa las coordenadas tanto por latitud y longitud, así como, la fecha y hora.

proyecto_cooler-coordenadas - Excel										Inici ses									
Archivo Inicio Insertar Dibujo Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda Power Pivot										Compartir									
Cortar Copiar Copiar formato Portapapeles										Calibri 11 A A N K X Fuente Alineación General Ajustar texto Combinar y centrar Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Eliminar Formato Autosuma Rellenar Borrar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar									
POSIBLE PÉRDIDA DE DATOS Algunas características del libro se pueden perder si lo guarda como CSV (delimitado por comas). Para conservar estas características, guárdelo como archivo de Excel. No mostrar de nuevo Guardar como...																			
time,value																			
1	time,value																		
2	2024-08-13T23:17:40.432594741Z,"lat":-2.0585849285125732,"lon":-79.88954162597656]																		
3	2024-08-13T23:17:45.480446507Z,"lat":-2.0585858821868896,"lon":-79.88954162597656]																		
4	2024-08-13T23:17:50.536701527Z,"lat":-2.0585858821868896,"lon":-79.88954162597656]																		
5	2024-08-13T23:17:55.596626578Z,"lat":-2.0585880279541016,"lon":-79.88954162597656]																		
6	2024-08-13T23:18:00.646744831Z,"lat":-2.058587074279785,"lon":-79.88954162597656]																		
7	2024-08-13T23:18:05.701718751Z,"lat":-2.0585880279541016,"lon":-79.8895492553711]																		
8	2024-08-13T23:18:10.758404782Z,"lat":-2.0585880279541016,"lon":-79.8895492553711]																		
9	2024-08-13T23:18:15.804575855Z,"lat":-2.058587074279785,"lon":-79.88955688476562]																		
10	2024-08-13T23:18:20.853015122Z,"lat":-2.058587074279785,"lon":-79.88955688476562]																		
11	2024-08-13T23:18:25.909337486Z,"lat":-2.058587074279785,"lon":-79.88955688476562]																		
12	2024-08-13T23:18:30.960361986Z,"lat":-2.058587074279785,"lon":-79.88955688476562]																		
13	2024-08-13T23:18:36.012270471Z,"lat":-2.058588981628418,"lon":-79.8895492553711]																		
14	2024-08-13T23:18:41.064300232Z,"lat":-2.058588981628418,"lon":-79.8895492553711]																		
15	2024-08-13T23:18:46.119069203Z,"lat":-2.058590888977051,"lon":-79.88954162597656]																		
16	2024-08-13T23:18:51.169070027Z,"lat":-2.0585920810699463,"lon":-79.88954162597656]																		
17	2024-08-13T23:18:56.222896827Z,"lat":-2.058595895767212,"lon":-79.88953399658203]																		
18	2024-08-13T23:19:01.277337806Z,"lat":-2.058595895767212,"lon":-79.88953399658203]																		
19	2024-08-13T23:19:06.330827058Z,"lat":-2.0585970878601074,"lon":-79.88953399658203]																		
20	2024-08-13T23:19:11.383011707Z,"lat":-2.058598041534424,"lon":-79.88953399658203]																		
21	2024-08-13T23:19:16.437885103Z,"lat":-2.058598041534424,"lon":-79.88953399658203]																		
22	2024-08-13T23:19:21.491758302Z,"lat":-2.0585989952087402,"lon":-79.88953399658203]																		
23	2024-08-13T23:19:26.549480507Z,"lat":-2.0585970878601074,"lon":-79.88953399658203]																		
24	2024-08-13T23:19:31.592458027Z,"lat":-2.0585949420928955,"lon":-79.88953399658203]																		
25	2024-08-13T23:19:36.647257059Z,"lat":-2.0585949420928955,"lon":-79.88953399658203]																		
26	2024-08-13T23:19:41.697438857Z,"lat":-2.058590888977051,"lon":-79.8895263671875]																		
27	2024-08-13T23:19:46.756425323Z,"lat":-2.058590888977051,"lon":-79.8895263671875]																		

Figura 49. Data obtenida del módulo GPS.

VI RESULTADOS

Esta sección aborda el proceso de pruebas, análisis de la temperatura y GPS, utilizando el módulo ESP32 que se implementó para el proyecto de monitoreo y control de la cadena de frío en la transportación de medicamentos. Se detalla cómo se configuraron las pruebas para validar el funcionamiento en diferentes condiciones de temperatura y almacenamiento de los medicamentos, también describe la recolección de datos durante las pruebas y el análisis para evaluar el rendimiento del sistema de control. Se incluye una comparación detallada de los logros obtenidos durante los ensayos con las expectativas teóricas y los criterios de rendimiento establecidos inicialmente en el sistema en general, basados en los resultados de los ensayos, para optimizar el rendimiento del sistema de monitoreo y control de la cadena de frío, figura 50.



Figura 50. Espacio de la vacuna en el prototipo.

6.1 Prueba de análisis de la interfaz de usuario y la visualización de Datos

La interfaz de usuario desarrollada para la visualización de datos fue evaluada por su usabilidad y efectividad en la presentación de información relevante mediante la prueba

piloto se destacó la claridad y simplicidad del panel de control, que permite monitorear en tiempo real tanto la temperatura como la ubicación del envío, figura 51.

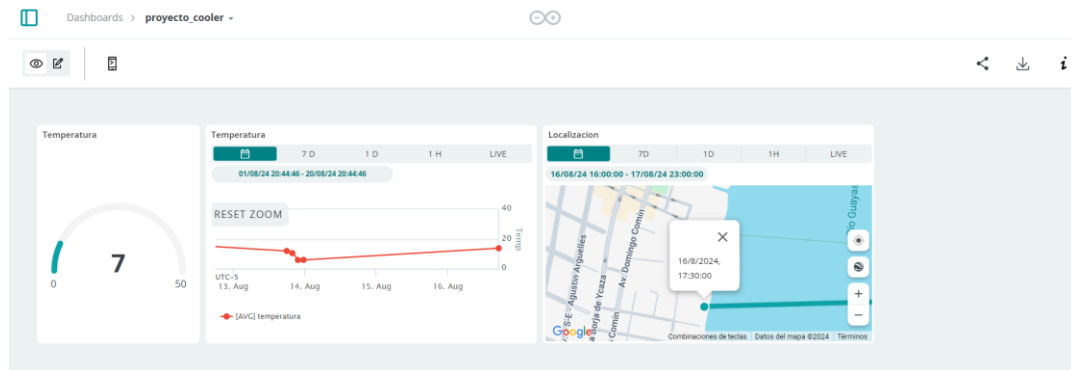


Figura 51. Visualización de interfaces.

6.2 Prueba de control de temperatura del sistema

Para comenzar, se recopiló datos de temperatura utilizando los sensores integrados en el sistema IoT. Estos datos fueron registrados y transmitidos a través de la plataforma Arduino Cloud, permitiendo monitorear las condiciones ambientales del prototipo. Los resultados muestran que el sistema fue capaz de mantener la temperatura dentro del rango crítico de 6°C a 8°C, y hasta 15°C en su rango ideal, lo cual es esencial para asegurar la estabilidad de la vacuna neumococo. Además, se observó una alta correlación entre los datos obtenidos y los valores teóricos esperados, lo que confirma la precisión de los sensores utilizados, figura 52.

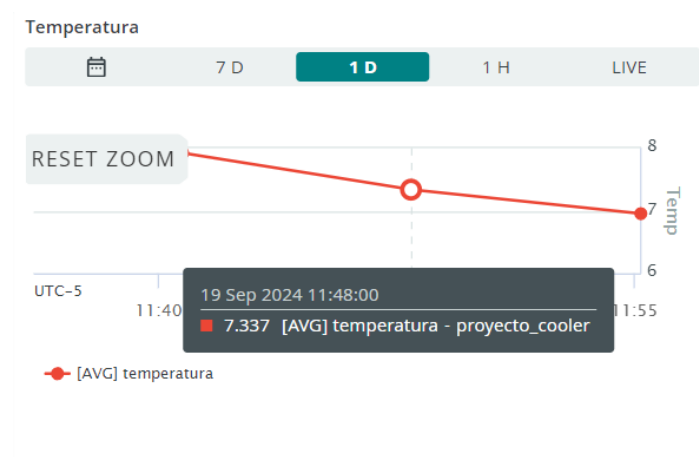


Figura 52. Seguimiento de temperatura.

La interfaz gráfica desarrollada permitió la visualización clara y concisa de los datos de temperatura en tiempo real. Los usuarios podrán observar gráficos, históricos y los datos recopilados se almacenaron en la memoria del Arduino antes de su transmisión, figura 53.

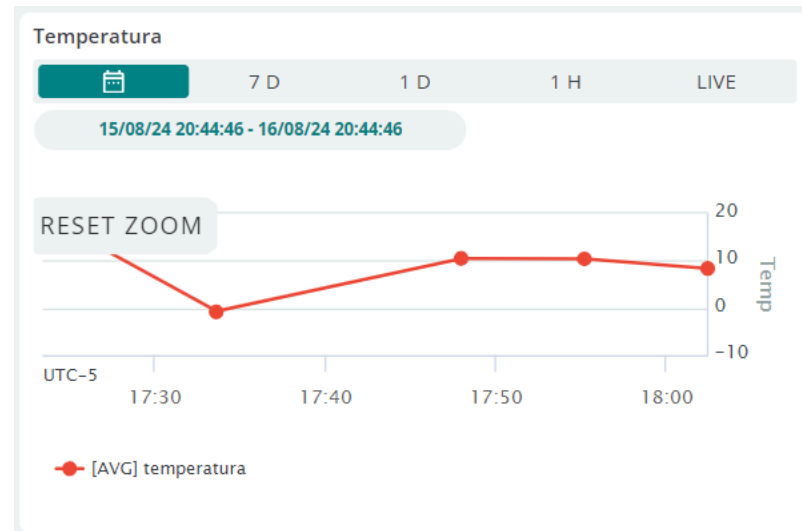


Figura 53. Seguimiento de temperatura_2.

Mediante la siguiente tabla 2, se observan los datos que proporciona el sensor de temperatura, donde la termocupla se ubicada en los alrededores del cooler, el cual arrojó una data de Excel desde el sistema Arduino Cloud con 650 datos obtenidos el 04 de agosto del 2024, en donde se observa que inicio a las 23:52:49 y terminó las 23:55:29 manteniéndose en 22 grados centígrados, donde varía cada 6 segundos.

Tabla 2

Tabla de resultados de temperatura_1.

Fecha	Hora	Temperatura
04/08/2024	23:52:49	22
04/08/2024	23:52:55	22
04/08/2024	23:53:02	22
04/08/2024	23:53:08	22
04/08/2024	23:53:14	22
04/08/2024	23:53:20	22
04/08/2024	23:53:26	22
04/08/2024	23:53:32	22
04/08/2024	23:53:38	22
04/08/2024	23:53:45	22
04/08/2024	23:53:51	22
04/08/2024	23:53:57	22

04/08/2024	23:54:03	22
04/08/2024	23:54:09	22
04/08/2024	23:54:15	22
04/08/2024	23:54:21	22
04/08/2024	23:54:28	22
04/08/2024	23:54:34	22
04/08/2024	23:54:40	22
04/08/2024	23:54:46	22
04/08/2024	23:54:52	22
04/08/2024	23:54:58	22
04/08/2024	23:55:05	22
04/08/2024	23:55:11	22
04/08/2024	23:55:17	22
04/08/2024	23:55:23	22
04/08/2024	23:55:29	22

En la siguiente tabla 3, la termocupla se ubica en el disipador permitiendo una mejor estabilidad de la temperatura, el cual se obtuvieron 588 datos donde se visualiza una variante de 5 segundos, existiendo un cambio de temperatura entre 9 y 8 grados centígrados.

Tabla 3.

Tabla de resultados de temperatura_2.

Fecha	Hora	Temperatura
13/08/2024	23:45:32	9
13/08/2024	23:45:37	9
13/08/2024	23:45:43	8
13/08/2024	23:45:48	9
13/08/2024	23:45:53	9
13/08/2024	23:45:58	8
13/08/2024	23:46:03	9
13/08/2024	23:46:08	9
13/08/2024	23:46:13	8
13/08/2024	23:46:18	9
13/08/2024	23:46:23	8
13/08/2024	23:46:28	8
13/08/2024	23:46:33	9
13/08/2024	23:46:38	9
13/08/2024	23:46:43	8
13/08/2024	23:46:48	9
13/08/2024	23:46:53	9
13/08/2024	23:46:58	9
13/08/2024	23:47:03	8
13/08/2024	23:47:08	9
13/08/2024	23:47:13	9

13/08/2024	23:47:19	9
13/08/2024	23:47:24	8
13/08/2024	23:47:29	9
13/08/2024	23:47:34	9
13/08/2024	23:47:39	9
13/08/2024	23:47:44	9
13/08/2024	23:47:49	9
13/08/2024	23:47:54	9
13/08/2024	23:47:59	9
13/08/2024	23:48:04	9
13/08/2024	23:48:09	9
13/08/2024	23:48:14	9
13/08/2024	23:48:19	9
13/08/2024	23:48:24	9
13/08/2024	23:48:29	9
13/08/2024	23:48:34	9
13/08/2024	23:48:39	8
13/08/2024	23:48:44	9
13/08/2024	23:48:49	9

En la tabla 4, se realiza nuevas pruebas el cual arrojó una data de Excel desde el sistema Arduino Cloud con 472 datos obtenidos el 16 de septiembre del 2024, en donde se observa que inicio a las 21:52:24 y terminó las 21:56:19, donde varía cada 5 segundos

Tabla 4.

Tabla de resultados de temperatura_3.

Fecha	Hora	Temperatura
16/09/2024	21:52:24	11
16/09/2024	21:52:29	12
16/09/2024	21:52:34	11
16/09/2024	21:52:39	12
16/09/2024	21:52:44	12
16/09/2024	21:52:49	12
16/09/2024	21:52:55	12
16/09/2024	21:53:00	11
16/09/2024	21:53:05	11
16/09/2024	21:53:10	11
16/09/2024	21:53:15	11
16/09/2024	21:53:20	11
16/09/2024	21:53:25	11
16/09/2024	21:53:35	11
16/09/2024	21:53:35	11
16/09/2024	21:53:40	11
16/09/2024	21:54:00	12

16/09/2024	21:54:06	12
16/09/2024	21:56:14	10
16/09/2024	21:56:19	10

En la tabla 5 se obtuvieron 588 datos donde se visualiza una variante de 5 segundos, existiendo un cambio de temperatura entre 9 y 8 grados centígrados.

Tabla 5.

Tabla de resultados de temperatura_4.

Fecha	Hora	Temperatura
17/09/2024	22:24:16	10
17/09/2024	22:24:21	10
17/09/2024	22:24:26	10
17/09/2024	22:24:33	9
17/09/2024	22:24:36	10
17/09/2024	22:24:41	9
17/09/2024	22:24:51	9
17/09/2024	22:24:51	9
17/09/2024	22:24:56	9
17/09/2024	22:25:01	9
17/09/2024	22:25:08	9
17/09/2024	22:25:11	9
17/09/2024	22:25:16	9
17/09/2024	22:25:21	9
17/09/2024	22:25:32	8
17/09/2024	22:25:32	9
17/09/2024	22:25:37	9
17/09/2024	22:25:44	9
17/09/2024	22:25:47	8
17/09/2024	22:25:51	9
17/09/2024	22:25:57	9
17/09/2024	22:26:02	9
17/09/2024	22:26:07	9
17/09/2024	22:26:12	9
17/09/2024	22:26:17	9
17/09/2024	22:26:22	8
17/09/2024	22:26:27	8
17/09/2024	22:26:32	8
17/09/2024	22:26:38	8
17/09/2024	22:26:42	8
17/09/2024	22:26:47	9
17/09/2024	22:26:54	8
17/09/2024	22:26:57	8
17/09/2024	22:27:02	9
17/09/2024	22:27:07	8

17/09/2024	22:27:15	9
17/09/2024	22:27:18	8
17/09/2024	22:27:22	8
17/09/2024	22:27:28	9
17/09/2024	22:27:32	9

En la tabla 6 se obtuvieron 197 datos donde se visualiza una variante de 5 segundos, existiendo un cambio de temperatura entre 7 y 8 grados centígrados.

Tabla 6.

Tabla de resultados de temperatura_5.

Fecha	Hora	Temperatura
19/09/2024	16:50:26	7
19/09/2024	16:50:31	8
19/09/2024	16:50:36	7
19/09/2024	16:50:42	7
19/09/2024	16:50:47	7
19/09/2024	16:50:52	8
19/09/2024	16:50:57	8
19/09/2024	16:51:02	8
19/09/2024	16:51:07	8
19/09/2024	16:51:12	8
19/09/2024	16:51:17	7
19/09/2024	16:51:22	7
19/09/2024	16:51:27	8
19/09/2024	16:51:32	7
19/09/2024	16:51:37	7
19/09/2024	16:51:42	7
19/09/2024	16:51:47	7
19/09/2024	16:51:52	7
19/09/2024	16:51:57	7
19/09/2024	16:52:02	7
19/09/2024	16:52:07	7
19/09/2024	16:52:12	7
19/09/2024	16:52:17	7
19/09/2024	16:52:22	7
19/09/2024	16:52:28	8

6.3 Prueba de control de conectividad y transmisión del GPS

La conectividad del sistema con la nube se evaluó mediante pruebas de transmisión de datos en tiempo real bajo diferentes condiciones y posiciones. El sistema mantuvo una comunicación estable, logrando transmitir la ubicación de manera continua y sin interrupciones significativas. Estos resultados indican que el sistema es robusto frente a variaciones en la calidad de la conexión a internet, un aspecto crucial para la monitorización remota, figura 54.

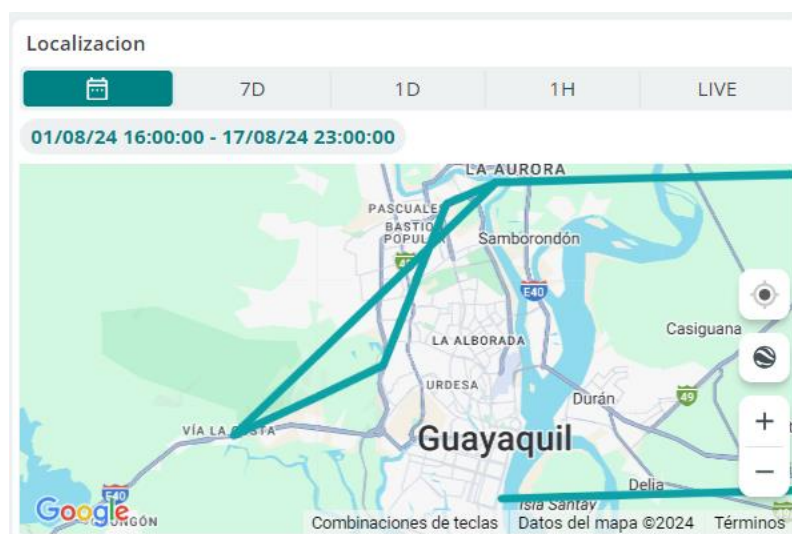


Figura 54. Prueba de ubicación.

6.3.1.1 Desempeño del Sistema de Geolocalización

La integración del módulo GPS resultó ser fundamental para el seguimiento en tiempo real de la ubicación. Los datos de geolocalización permitieron no solo rastrear el movimiento, sino también correlacionar cualquier cambio en la temperatura con la ubicación geográfica específica en donde se encuentre el prototipo como se muestra en la figura 55 y 56.

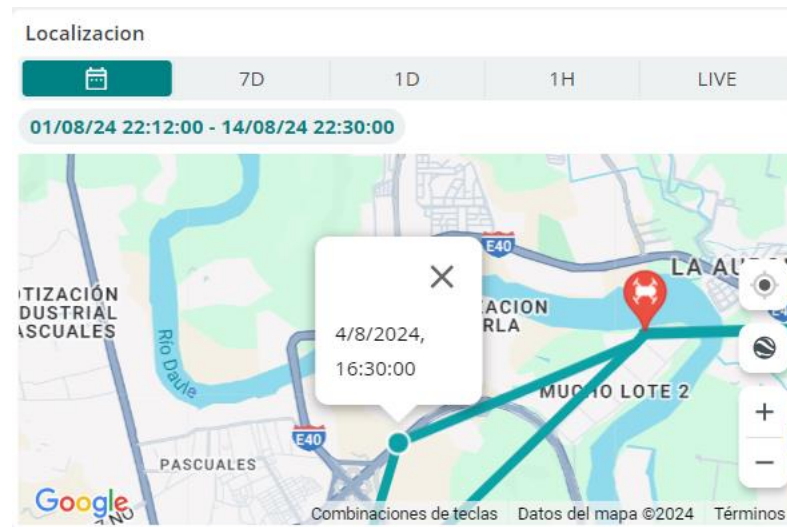


Figura 55. Pruebas de localización del prototipo.

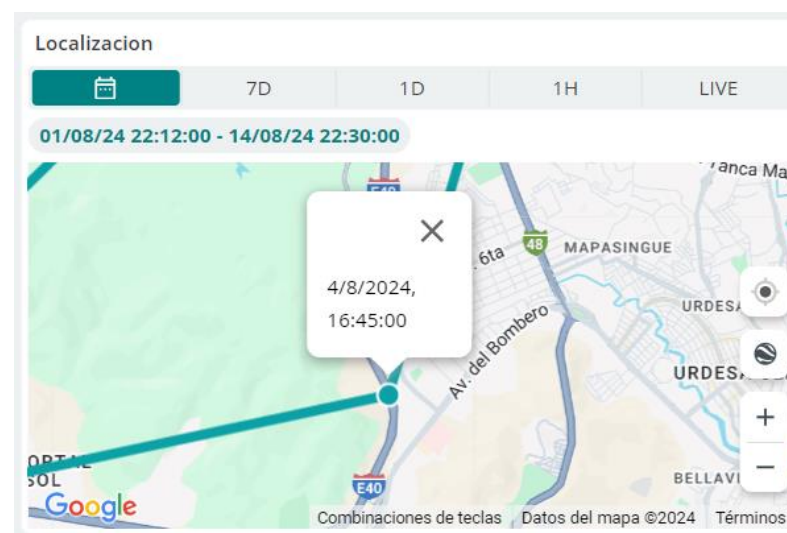


Figura 56. Pruebas de localización del prototipo_2.

Durante las pruebas, se utilizó una red WiFi desde un dispositivo móvil para establecer la comunicación entre el sistema IoT y la nube. Los resultados mostraron que el sistema es capaz de mantener una conexión estable y de transmitir datos con una latencia mínima, lo cual es esencial para la detección temprana de cualquier problema en la cadena de frío, figura 57.

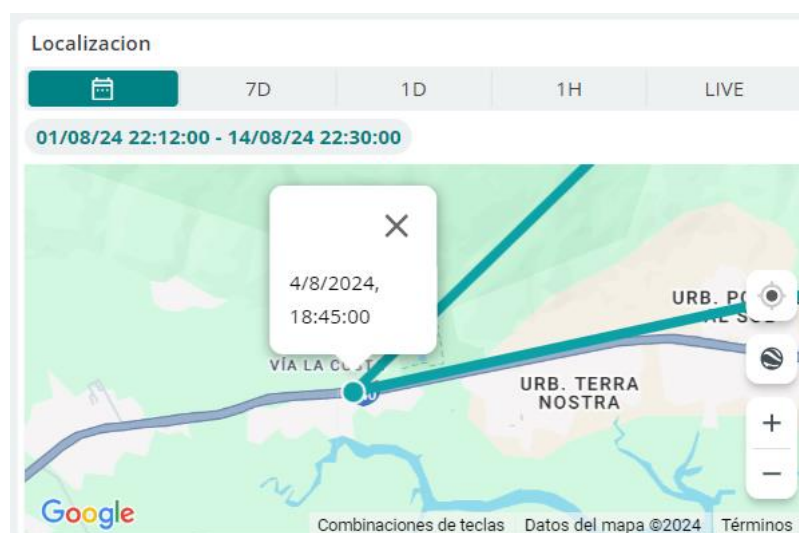


Figura 57. Pruebas de localización del prototipo_3.

Mediante la siguiente tabla 7 se logra observar los datos que proporciona la geolocalización por latitud y longitud obtenidos por la data en Excel, descargado de la base de datos de Arduino Cloud, donde varía cada 6 segundos.

Tabla 7.

Tabla de resultados_1.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
04/08/2024	23:51:23	:-2.1903278827667236	-80.03759765625}
04/08/2024	23:51:29	:-2.190402030944824	-80.03829193115234}
04/08/2024	23:51:35	:-2.190558910369873	-80.03990936279297}
04/08/2024	23:51:42	:-2.190627098083496	-80.04069519042969}
04/08/2024	23:51:48	:-2.1907410621643066	-80.0416030883789}
04/08/2024	23:51:54	:-2.1908249855041504	-80.04220581054688}
04/08/2024	23:52:00	:-2.1910109519958496	-80.04344940185547}
04/08/2024	23:52:06	:-2.191135883331299	-80.04432678222656}
04/08/2024	23:52:12	:-2.191287040710449	-80.04548645019531}
04/08/2024	23:52:18	:-2.191287040710449	-80.04548645019531}
04/08/2024	23:52:25	:-2.191287040710449	-80.04548645019531}
04/08/2024	23:52:31	:-2.1916229724884033	-80.04825592041016}
04/08/2024	23:52:37	:-2.191770076751709	-80.04927062988281}
04/08/2024	23:52:43	:-2.1921510696411133	-80.05056762695312}
04/08/2024	23:52:49	:-2.192445993423462	-80.05120086669922}
04/08/2024	23:52:55	:-2.1931979656219482	-80.05240631103516}
04/08/2024	23:53:02	:-2.1937520503997803	-80.05313110351562}
04/08/2024	23:53:08	:-2.194430112838745	-80.05398559570312}
04/08/2024	23:53:14	:-2.195327043533325	-80.05512237548828}
04/08/2024	23:53:20	:-2.196007013320923	-80.05596160888672}

04/08/2024	23:53:26	:-2.196686029434204	-80.05681610107422}
04/08/2024	23:53:32	:-2.197129964828491	-80.057373046875}
04/08/2024	23:53:38	:-2.197793960571289	-80.05819702148438}
04/08/2024	23:53:45	:-2.197793960571289	-80.05819702148438}
04/08/2024	23:53:51	:-2.199392080307007	-80.0601806640625}
04/08/2024	23:53:57	:-2.200045108795166	-80.06099700927734}
04/08/2024	23:54:03	:-2.2007079124450684	-80.06182861328125}
04/08/2024	23:54:09	:-2.2013580799102783	-80.06265258789062}
04/08/2024	23:54:15	:-2.202040910720825	-80.06350708007812}
04/08/2024	23:54:21	:-2.202594041824341	-80.064208984375}
04/08/2024	23:54:28	:-2.2032549381256104	-80.06503295898438}
04/08/2024	23:54:34	:-2.204148054122925	-80.06615447998047}
04/08/2024	23:54:40	:-2.204843044281006	-80.0670394897461}
04/08/2024	23:54:46	:-2.205310106277466	-80.0676498413086}
04/08/2024	23:54:52	:-2.2062110900878906	-80.06884765625}
04/08/2024	23:54:58	:-2.2068779468536377	-80.06964111328125}
04/08/2024	23:55:05	:-2.207427978515625	-80.0702896118164}
04/08/2024	23:55:11	:-2.2083640098571777	-80.07132720947266}

En la siguiente tabla 8 se obtuvieron 588 datos con una variante de 5 segundos.

Tabla 8.

Tabla de resultados_2.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
13/08/2024	23:17:40	-20.585.849.285.125.700	-79.88954162597656
13/08/2024	23:17:45	-20.585.858.821.868.800	-79.88954162597656
13/08/2024	23:17:50	-20.585.858.821.868.800	-79.88954162597656
13/08/2024	23:17:55	-20.585.880.279.541.000	-79.88954162597656
13/08/2024	23:18:00	-2.058.587.074.279.780	-79.88954162597656
13/08/2024	23:18:05	-20.585.880.279.541.000	-79.8895492553711
13/08/2024	23:18:10	-20.585.880.279.541.000	-79.8895492553711
13/08/2024	23:18:15	-2.058.587.074.279.780	-79.88955688476562
13/08/2024	23:18:20	-2.058.587.074.279.780	-79.88955688476562
13/08/2024	23:18:25	-2.058.587.074.279.780	-79.88955688476562
13/08/2024	23:18:30	-2.058.587.074.279.780	-79.88955688476562
13/08/2024	23:18:36	-2.058.588.981.628.410	-79.8895492553711
13/08/2024	23:18:41	-2.058.588.981.628.410	-79.8895492553711
13/08/2024	23:18:46	-2.058.590.888.977.050	-79.88954162597656
13/08/2024	23:18:51	-20.585.920.810.699.400	-79.88954162597656
13/08/2024	23:18:56	-2.058.595.895.767.210	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:01	-2.058.595.895.767.210	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:06	-20.585.970.878.601.000	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:11	-2.058.598.041.534.420	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:16	-2.058.598.041.534.420	-79.88953399658203

13/08/2024	23:19:21	-20.585.989.952.087.400	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:26	-20.585.970.878.601.000	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:31	-20.585.949.420.928.900	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:36	-20.585.949.420.928.900	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:41	-2.058.590.888.977.050	-79.8895263671875
13/08/2024	23:19:46	-2.058.590.888.977.050	-79.8895263671875
13/08/2024	23:19:51	-20.585.899.353.027.300	-79.88953399658203
13/08/2024	23:19:56	-20.585.899.353.027.300	-79.88953399658203
13/08/2024	23:20:01	-20.585.880.279.541.000	-79.88953399658203
13/08/2024	23:20:06	-20.585.858.821.868.800	-79.8895263671875
13/08/2024	23:20:12	-20.585.880.279.541.000	-79.8895263671875
13/08/2024	23:20:17	-2.058.587.074.279.780	-79.8895263671875
13/08/2024	23:20:22	-2.058.587.074.279.780	-79.8895263671875
13/08/2024	23:20:27	-2.058.583.974.838.250	-79.8895263671875
13/08/2024	23:20:32	-2.058.583.974.838.250	-79.8895263671875
13/08/2024	23:20:37	-2.058.583.974.838.250	-79.8895263671875
13/08/2024	23:20:42	-20.585.849.285.125.700	-79.88953399658203
13/08/2024	23:20:47	-20.585.849.285.125.700	-79.88953399658203
13/08/2024	23:20:52	-20.585.858.821.868.800	-79.88953399658203
13/08/2024	23:20:57	-20.585.849.285.125.700	-79.88953399658203

En la tabla 9 se obtuvieron 3069 datos con una variante de 5 segundos.

Tabla 9.

Tabla de resultados_3.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
14/08/2024	0:10:03	:-2.058590888977051	-79.88954162597656}
14/08/2024	0:10:08	:-2.058590888977051	-79.88954162597656}
14/08/2024	0:10:13	:-2.058597087860107	:-79.88954162597656}
14/08/2024	0:10:18	:-2.058597087860107	:-79.88954162597656}
14/08/2024	0:10:23	:-2.058598041534424	-79.88954162597656}
14/08/2024	0:10:28	:-2.058598041534424	-79.88953399658203}
14/08/2024	0:10:33	:-2.058598995208740	:-79.88953399658203}
14/08/2024	0:10:43	:-2.058600902557373	-79.88953399658203}
14/08/2024	0:10:53	:-2.058600902557373	-79.88953399658203}
14/08/2024	0:10:58	:-2.058600902557373	-79.88953399658203}
14/08/2024	0:11:03	:-2.058603048324585	-79.88953399658203}
14/08/2024	0:11:08	:-2.058604001998901	:-79.8895263671875}
14/08/2024	0:11:18	:-2.058604955673217	:-79.8895263671875}
14/08/2024	0:11:28	:-2.058604955673217	:-79.8895263671875}
14/08/2024	0:11:33	:-2.058604955673217	:-79.8895263671875}
14/08/2024	0:11:39	:-2.058604001998901	:-79.88951873779297}
14/08/2024	0:11:49	:-2.058603048324585	-79.88951873779297}
14/08/2024	0:11:54	:-2.058602094650268	:-79.88951873779297}
14/08/2024	0:11:59	:-2.058602094650268	:-79.88951110839844}

14/08/2024	0:12:04	:-2.058600902557373	-79.88951110839844}
14/08/2024	0:12:09	:-2.058600902557373	-79.88951110839844}
14/08/2024	0:12:19	:-2.058597087860107	:-79.88951110839844}
14/08/2024	0:12:24	:-2.058597087860107	:-79.88951110839844}
14/08/2024	0:12:34	:-2.058594942092895	:-79.8895034790039}
14/08/2024	0:12:39	:-2.058593988418579	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:12:44	:-2.058593988418579	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:12:49	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:12:54	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:12:59	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:04	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:09	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:14	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:20	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:25	:-2.058595895767212	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:30	:-2.058593988418579	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:35	:-2.058593988418579	-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:45	:-2.058593034744262	:-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:50	:-2.058592081069946	:-79.8895034790039}
14/08/2024	0:13:55	:-2.058590888977051	-79.8895034790039}

En la tabla 10, se observan datos emitidos con la implementación de la placa PCB, se obtuvieron 335 datos con una variante de 5 segundos.

Tabla 10.

Tabla de resultados en PCB_1.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
08/09/2024	16:31:46	:-2.248716115951538,"lon"	:-79.9005432128906
08/09/2024	16:31:51	:-2.2487540245056152,"lon"	:-79.900520324707
08/09/2024	16:31:56	:-2.2487430572509766,"lon"	:-79.900505065917
08/09/2024	16:32:01	:-2.248711109161377,"lon"	:-79.9004669189453
08/09/2024	16:32:06	:-2.248711109161377,"lon"	:-79.9004669189453
08/09/2024	16:32:11	:-2.248711109161377,"lon"	:-79.9004516601562
08/09/2024	16:32:16	-2.248713970184326,"lon":	-7.990.045.928.955.070
08/09/2024	16:32:21	:-2.248716115951538,"lon"	:-79.9004592895507
08/09/2024	16:32:26	:-2.248716115951538,"lon"	:-79.9004592895507
08/09/2024	16:32:31	:-2.2487270832061768,"lon"	:-79.900459289550
08/09/2024	16:32:36	-2.24872088432312,"lon":-	79.90045166015625}
08/09/2024	16:32:41	:-2.2487270832061768,"lon"	:-79.900451660156
08/09/2024	16:32:46	:-2.2487289905548096,"lon"	:-79.900451660156
08/09/2024	16:32:51	:-2.2487409114837646,"lon"	:-79.900459289550
08/09/2024	16:32:56	:-2.248749017715454,"lon"	:-79.9004592895507
08/09/2024	16:33:02	:-2.248749017715454,"lon"	:-79.9004592895507
08/09/2024	16:33:07	:-2.248728036880493,"lon"	:-79.9004516601562

08/09/2024	16:33:12	:-2.248728036880493,"lon"	:-79.9004516601562
08/09/2024	16:33:17	:-2.2487120628356934,"lon"	":-79.900444030761
08/09/2024	16:33:22	:-2.2486989498138428,"lon"	":-79.900436401367
08/09/2024	16:33:27	:-2.248699903488159,"lon"	:-79.9004364013671
08/09/2024	16:33:32	:-2.248694896697998,"lon"	:-79.9004287719726
08/09/2024	16:33:37	:-2.248684883117676,"lon"	:-79.9004211425781
08/09/2024	16:33:42	:-2.248684883117676,"lon"	:-79.9004211425781
08/09/2024	16:33:47	:-2.2486579418182373,"lon"	":-79.900405883789
08/09/2024	16:33:52	:-2.2486419677734375,"lon"	":-79.900390625}
08/09/2024	16:33:57	:-2.2486329078674316,"lon"	":-79.900390625}
08/09/2024	16:34:02	:-2.2486460208892822,"lon"	":-79.900398254394
08/09/2024	16:34:07	-2.2486460208892822,"lon"	:-79.9003982543945
08/09/2024	16:34:14	-2.248650074005127,"lon":	-79.900390625}
08/09/2024	16:34:17	:-2.248652935028076,"lon"	:-79.900390625}
08/09/2024	16:34:22	:-2.248656988143921,"lon"	:-79.9003753662109
08/09/2024	16:34:27	:-2.2486660480499268,"lon"	":-79.900390625}
08/09/2024	16:34:32	:-2.248668909072876,"lon"	:-79.900390625}
08/09/2024	16:34:37	:-2.2486751079559326,"lon"	":-79.900390625}
08/09/2024	16:34:43	:-2.2486751079559326,"lon"	":-79.900398254394
08/09/2024	16:34:48	:-2.248673915863037,"lon"	:-79.9003982543945
08/09/2024	16:34:53	:-2.2486751079559326,"lon"	":-79.900398254394
08/09/2024	16:34:58	-2.2486770153045654,"lon"	:-79.9003982543945
08/09/2024	16:35:03	:-2.2486870288848877,"lon"	":-79.900390625}
08/09/2024	16:35:08	:-2.2486910820007324,"lon"	":-79.900382995605

En la siguiente tabla 11, se obtuvieron 295 datos con una variante de 5 segundos.

Tabla 11.

Tabla de resultados en PCB_2.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
17/09/2024	20:17:45	-22.486.679.553	":-79.9004974365
17/09/2024	20:17:50	-22.486.679.553	":-79.9004974365
17/09/2024	20:17:55	-22.486.569.881	:-79.90050506591
17/09/2024	20:18:00	-22.486.569.881	:-79.90050506591
17/09/2024	20:18:05	-22.486.550.807	:-79.90051269531
17/09/2024	20:18:10	-22.486.538.887	":-79.9005126953
17/09/2024	20:18:15	-22.486.519.813	":-79.9005126953
17/09/2024	20:18:20	-22.486.519.813	":-79.9005050659
17/09/2024	20:18:25	224.865.388.870	:-79.90050506591
17/09/2024	20:18:30	224.865.198.135	:-79.90049743652
17/09/2024	20:18:35	-22.486.519.813	":-79.9004974365
17/09/2024	20:18:40	224.865.007.400	-79.900.505.065.917
17/09/2024	20:18:45	-22.486.510.276	":-79.9005050659
17/09/2024	20:18:50	-22.486.510.276	":-79.9005050659

17/09/2024	20:18:55	-22.486.519.813	":-79.9005050659
17/09/2024	20:19:00	-22.486.538.887	":-79.9004974365
17/09/2024	20:19:05	-22.486.529.350	":-79.90050506591
17/09/2024	20:19:10	-22.486.529.350	":-79.90050506591
17/09/2024	20:19:15	-22.486.519.813	":-79.9004974365
17/09/2024	20:19:21	-22.486.538.887	":-79.9004974365
17/09/2024	20:19:26	-22.486.550.807	":-79.90048980712
17/09/2024	20:19:31	224.865.889.549	":-79.90048980712
17/09/2024	20:19:36	.248656034469	-79.900.489.807.128
17/09/2024	20:19:41	-22.486.560.344	":-79.9004898071
17/09/2024	20:19:46	-22.486.569.881	":-79.90048980712
17/09/2024	20:19:51	-22.486.579.418	":-79.9004821777
17/09/2024	20:19:56	-22.486.579.418	":-79.9004821777
17/09/2024	20:20:01	-22.486.560.344	":-79.9004898071
17/09/2024	20:20:06	-22.486.560.344	":-79.9004898071
17/09/2024	20:20:11	-22.486.519.813	":-79.9004821777
17/09/2024	20:20:16	-22.486.519.813	":-79.9004821777
17/09/2024	20:20:21	-22.486.488.819	":-79.9004821777
17/09/2024	20:20:26	-22.486.469.745	":-79.9004898071
17/09/2024	20:20:31	-22.486.450.672	":-79.90048980712
17/09/2024	20:20:36	224.864.506.721	-79.900.489.807.128
17/09/2024	20:20:41	-22.486.429.214	":-79.90048980712
17/09/2024	20:20:46	-22.486.429.214	":-79.90048980712
17/09/2024	20:20:51	-22.486.429.214	":-79.90048980712
17/09/2024	20:20:56	-22.486.429.214	":-79.90048980712
17/09/2024	20:21:02	-22.486.429.214	":-79.90048980712

En la figura siguiente 58, se visualiza el traslado del prototipo completado y montado en la placa PCB, mostrando la integración de los componentes electrónicos, por lo tanto, esta etapa asegura una mayor fiabilidad en el ensamblaje del sistema, permitiendo un diseño compacto y adecuado para futuras pruebas de campo en entornos reales.



Figura 58. Pruebas en tiempo real.

En la figura siguiente 59, se visualiza el traslado del prototipo, donde se efectúan pruebas de campo en un entorno real, con el prototipo ya completado y dotado de la placa PCB, validando así su funcionalidad en condiciones operativas reales y garantizando la precisión del monitoreo de geolocalización.

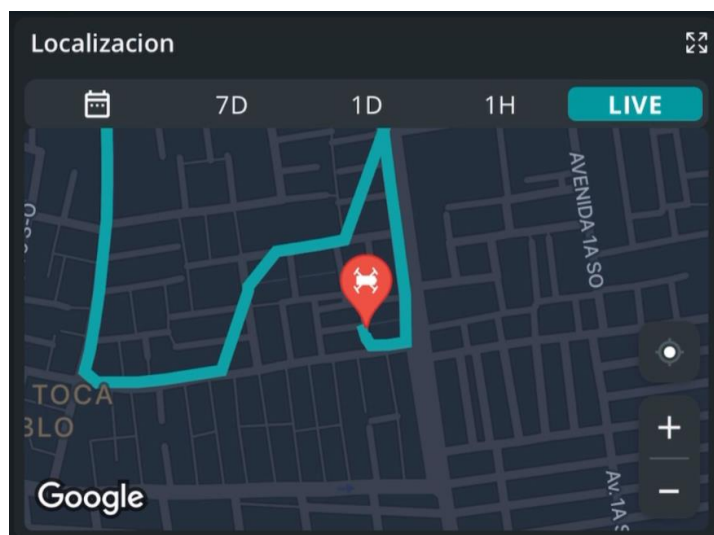


Figura 59. Seguimiento del GPS en tiempo real.

Tabla 12.

Tabla de resultados del GPS con la placa PCB.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
20/09/2024	17:17:45	-22.486.679.553	"-79.9004974365
20/09/2024	17:17:50	-22.486.679.553	"-79.9004974365

20/09/2024	17:17:55	-22.486.569.881	:-79.90050506591
20/09/2024	17:18:00	-22.486.569.881	:-79.90050506591
20/09/2024	17:18:05	-22.486.550.807	:-79.90051269531
20/09/2024	17:18:10	-22.486.538.887	":-79.9005126953
20/09/2024	17:18:15	-22.486.519.813	":-79.9005126953
20/09/2024	17:18:20	-22.486.519.813	":-79.9005050659
20/09/2024	17:18:25	224.865.388.870	:-79.90050506591
20/09/2024	17:18:30	224.865.198.135	:-79.90049743652
20/09/2024	17:18:35	-22.486.519.813	":-79.9004974365
20/09/2024	17:18:40	224.865.007.400	-79.900.505.065.917
20/09/2024	17:18:45	-22.486.510.276	":-79.9005050659
20/09/2024	17:18:50	-22.486.510.276	":-79.9005050659
20/09/2024	17:18:55	-22.486.519.813	":-79.9005050659

6.4 Validación y observaciones generales

Finalmente, Los resultados de esta sección confirman que el prototipo desarrollado cumple con los rangos establecidos para el control de la vacuna como el neumococo, donde pueden tolerar un rango ideal hasta 15°C. El sistema es capaz de mantener las condiciones necesarias para la conservación de los productos durante el transporte, ofrecer un monitoreo en tiempo real a través de la nube, y proporcionar datos precisos de geolocalización. Las áreas de mejora identificadas serán abordadas en trabajos futuros para optimizar aún más el desempeño del sistema y garantizar su aplicabilidad en situaciones reales de transporte.

En la figura 60, se muestra el prototipo en pleno funcionamiento, donde se visualiza una temperatura de 11°C en la pantalla LED integrada.



Figura 60. Prueba de funcionamiento_1.

En la figura 61, se toma la prueba con una pistola de temperatura brindando una temperatura de 11.8°C tomada desde el alrededor del disipador y ventilador, dando un margen de error de ± 0.8 grados centígrados.

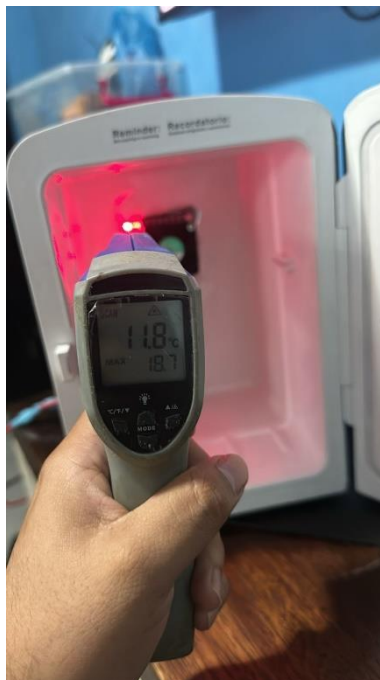


Figura 61. Prueba de funcionamiento_2.

En la figura 62 se muestra el prototipo en pleno funcionamiento, donde se visualiza una temperatura de 8°C en la pantalla LED integrada.



Figura 62. Prueba de funcionamiento_3.

En la figura 63 se toma la prueba con una pistola de temperatura, brindando una temperatura de 8.8°C tomada desde el disipador, dando un margen de error de ± 0.8 grados centígrados.



Figura 63. Prueba de funcionamiento_4.

VII CRONOGRAMA

En la Tabla 13 se muestra el cronograma propuesto para las actividades, distribuidas a lo largo de aproximadamente 19 semanas. Este periodo de trabajo abarca de mayo a septiembre, correspondiente al periodo académico 64, con la intención de finalizar con la sustentación del proyecto durante la última semana de septiembre.

Tabla 13

Cronograma de actividades para el desarrollo del Proyecto de Titulación

ACTIVIDAD	INICIO	FIN	13/05/2024	24/05/2024	27/05/2024	07/06/2024	10/06/2024	17/06/2024	18/06/2024	04/07/2024	05/07/2024	24/07/2024	25/07/2024	20/08/2024	22/08/2024	15/09/2024	16/09/2024	20/09/2024
1 Propuesta del tema y redacción del anteproyecto del trabajo de titulación	13/05/2024	24/05/2024																
2 Revisiones con el tutor y aprobación del tema de titulación	27/05/2024	07/06/2024																
3 Definición de los objetivos del proyecto relacionados con la implementación del sistema de monitoreo IoT.	10/06/2024	17/06/2024																
4 Implementación del código para el control y monitoreo de temperatura y ubicación en tiempo real.	18/06/2024	04/07/2024																
5 Pruebas y validación del funcionamiento del prototipo	05/07/2024	24/07/2024																
6 Entrega del avance del documento al tutor (revisión 1,2,3,4)	25/07/2024	20/08/2024																
7 Entrega del avance del documento al tutor (revisión 5,6,7,8,9)	22/08/2024	15/09/2024																
8 Finalización del documento de titulación	16/09/2024	20/09/2024																

VIII PRESUPUESTO

Considerando que el proyecto será desarrollado en forma de prototipo dentro del presupuesto, se han contemplado las horas de trabajo de ingeniería dedicadas al desarrollo e implementación del equipo, así como los elementos de trabajo necesarios para completar el proyecto., valores que se detallan en la Tabla 5, sumando un estimado de \$ 347,31.

Tabla 14

Presupuesto estimado para el desarrollo del Proyecto de Titulación

Cant.	Detalle	Valor unit	Valor total
80	Horas de ingeniería	2,81	\$224,80
1	Módulo ESP32	11,25	\$11,25
1	Termocupla	7,11	\$7,11
1	Módulo GPS	10,07	\$10,07
1	Módulo micro sim	7,41	\$7,41
1	Display LCD	5,81	\$5,81
1	Porta pila	1,43	\$1,43
6	Baterías recargables	2,97	\$17,80
1	Ventilador 12v	2,48	\$2,48
1	Tarjeta driver motor L298N	4,15	\$4,15
1	Mini nevera	55	\$55
Valor total			\$347,31

IX CONCLUSIONES

El trabajo de titulación llevado a cabo en la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, aborda de manera efectiva el desarrollo e implementación del prototipo para el control y monitoreo de la cadena de frío en la transportación de medicamentos, utilizando tecnología IoT, ha demostrado ser una solución adaptable y versátil. Mediante la creación de una arquitectura en Arduino Cloud IoT, se integraron sensores, dispositivos de comunicación confiables y una plataforma de software robusta, permitiendo un monitoreo en tiempo real durante el transporte.

La interfaz de usuario diseñada, permitió un control satisfactorio y una visualización clara del estado del sistema, posibilitando que los operadores ajustaran las condiciones conforme a las necesidades, garantizando así que los medicamentos conservaran su eficacia durante todo el trayecto. Las pruebas de campo validaron la funcionalidad y exactitud del prototipo, demostrando su capacidad para adaptarse a diversas situaciones y proporcionar un monitoreo fiable de las variables clave.

En conclusión, este proyecto alcanzó los rangos establecidos para mantener una temperatura ideal de 6°C a 8°C y un rango ideal de 15°C con las vacunas, tales como: vacunas contra el neumococo y contra la hepatitis B.

X RECOMENDACIONES

Es esencial que la Universidad Politécnica Salesiana continúe promoviendo la investigación en el área de IoT y tecnologías de monitoreo en tiempo real aplicadas a la cadena de frío, ya que la implementación de plataformas avanzadas y sensores precisos proporciona a los estudiantes una formación más integral y alineada con las necesidades actuales de la industria farmacéutica.

Se recomienda expandir el proyecto de control y monitoreo de la cadena de frío para incluir una mayor variedad de medicamentos y diferentes escenarios de transporte, lo que no solo enriquecerá la formación práctica de los estudiantes, sino que también permitirá una aplicación más amplia en el sector farmacéutico, contribuyendo a la seguridad y eficacia de los productos.

Es crucial proporcionar capacitación continua a estudiantes y profesores en el uso de tecnologías IoT, sensores de alta precisión y plataformas de monitoreo, asegurando que todos los involucrados puedan maximizar las capacidades del sistema implementado para el monitoreo de la cadena de frío.

Elaborar guías y manuales detallados sobre el diseño, implementación y operación de sistemas de monitoreo IoT en la cadena de frío permitirá estandarizar el conocimiento y facilitará el aprendizaje y la aplicación práctica en futuros proyectos académicos e industriales.

XI BIBLIOGRAFÍA

- Adasa. (Agosto de 2023). *Proveedor médica*. Obtenido de <https://proveedoramedicaadasa.com.mx/la-cadena-de-frio-en-productos-medicos/>
- AEMPS. (Octubre de 2023). *Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS)*. Obtenido de https://cima.aemps.es/cima/pdfs/es/ft/62314/FT_62314.html.pdf
- Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria . (Septiembre de 2014). Obtenido de <https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/09/A-4872-Reglamento-de-BPADT-para-Establecimientos-Farmac%C3%A9uticos.pdf>
- Alonso, L. (Octubre de 2022). *UNICEF*. Obtenido de <https://www.unicef.org/argentina/media/16426/file/Manual%20de%20almacenamiento%20de%20vacunas%20para%20el%20nivel%20operativo.pdf>
- Andrés, M. C. (2016). Obtenido de <https://dspace.espol.edu.ec/retrieve/96897/D-CD88460.pdf>
- Argüello Carrera, A. D. (Febrero de 2021). Obtenido de <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4785/1/T-UIDE-0229.pdf>
- Carrillo, M. V. (08 de Abril de 2021). Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/download/6625/7531/>
- Damian, J. (23 de Junio de 2024). Obtenido de <https://www.electrogeekshop.com/lleve-el-poder-de-la-conectividad-sencilla-a-la-vida-cotidiana-y-a-los-negocios-con-arduino-iot-cloud/>
- ERAZO, M. V. (2019). Obtenido de <https://repositorio.itc.edu.co/bitstream/handle/20.500.14329/378/completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Franklin. (16 de Febrero de 2022). Obtenido de

<https://franklinlinkmx.wordpress.com/2022/02/16/que-es-el-control-pid/>

Gomar, J. (16 de Octubre de 2020). Obtenido de

<https://www.profesionalreview.com/2018/10/16/que-celula-peltier/>

GPC. (03 de Abril de 2019). Obtenido de <https://gpcinc.mx/blog/que-internet-cosas/>

Gubio, C. (2023). Obtenido de

<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/1270/1/TESIS%20CADENA%20DE%20FRIO.pdf>

Instrumentación y control. (28 de Agosto de 2020). Obtenido de

<https://instrumentacionycontrol.net/resumen-p-i-d-lo-justo-y-necesario-que-debes-saber-y-que-nunca-entendiste/>

Jecrespom. (23 de Enero de 2022). Obtenido de

<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/01/23/programacion-arduino-5/>

Jose, R. M. (12 de Febrero de 2022). Obtenido de <https://pasionelectronica.com/esp32-caracteristicas-y-pines/>

Leonardo, B. (2021). Obtenido de

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052021000400622#:~:text=El%20controlador%20Proporcional%2DIntegral%2DDerivativo,en%20estado%20estacionario%20sea%20cero.

Marisol, S. (20 de Agosto de 2021). Obtenido de <https://portal.ucm.cl/noticias/vacunas-perdida-la-cadena-frio-afecta->

[eficacia#:~:text=La%20p%C3%A9rdida%20de%20la%20cadena,de%20dosis%20al%20mismo%20tiempo.](https://portal.ucm.cl/noticias/vacunas-perdida-la-cadena-frio-afecta-eficacia#:~:text=La%20p%C3%A9rdida%20de%20la%20cadena,de%20dosis%20al%20mismo%20tiempo.)

Medical Impact. (08 de Noviembre de 2023). Obtenido de <https://medical-impact.org/cadena-de-frio-y-su-importancia-en-la-eficacia-de-la->

vacunacion/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20datos%20de%20la%20OMS,C%20y%20%2D25%C2%B0C.

Mendoza, A. (13 de Octubre de 2020). Tecnología en cadenas de frío mejora el transporte. págs. <https://thelogisticsworld.com/tecnologia/tecnologia-en-cadenas-de-frio-mejora-el-transporte-de-perecederos/>.

Ministerio Salud Pública. (25 de Marzo de 2022). Obtenido de <https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2022/03/Manual-recep-almacenam-distribuc-y-transp.3er.-supl.-R.O.-29-25-03-2022.-publicacion-web.pdf>

Mónica, M. A. (01 de Diciembre de 2022). *Universidad Tecnológica de Torreón, México*. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/614/61472342004/html/#redalyc_61472342004_ref1

Naylamp. (2023). Obtenido de https://naylampmechatronics.com/blog/11_tutorial-de-uso-del-modulo-l298n.html

Naylamp Mechatronics. (2020). Obtenido de https://naylampmechatronics.com/blog/18_tutorial-modulo-gps-con-arduino.html

NI EMERSON. (08 de Julio de 2024). Obtenido de <https://www.ni.com/es/shop/labview/pid-theory-explained.html>

Novatronic. (2020). Obtenido de <https://novatronicec.com/index.php/product/termopar-k-con-modulo-max6675/>

Organización Mundial de la Salud. (23 de Abril de 2024). Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/vaccines-and-immunization-what-is-vaccination>

Prometec. (2023). Obtenido de <https://www.prometec.net/l298n/>

QuadMinds. (25 de Octubre de 2022). Obtenido de <https://www.quadminds.com/blog/romper-la-cadena-de-frio/>

Rivera Morales, J. (12 de Febrero de 2022). Obtenido de <https://pasionelectronica.com/esp32-caracteristicas-y-pines/>

Salgado, M. (20 de Agosto de 2021). *VACUNAS: PÉRDIDA DE LA CADENA DE FRÍO AFECTA SU EFICACIA*. Obtenido de <https://portal.ucm.cl/noticias/vacunas-perdida-la-cadena-frio-afecta-eficacia>

Salud. (14 de Noviembre de 2022). Obtenido de <https://www.salud.gob.ec/nuevos-equipos-llegan-al-msp-para-fortalecer-la-cadena-de-frio-de-vacunas/>

Smith, G. M. (19 de Junio de 2024). Obtenido de <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-controlador-pid>

Söderby, K. (01 de Mayo de 2024). Obtenido de <https://docs.arduino.cc/arduino-cloud/guides/overview/>

Yúbal, F. (23 de Septiembre de 2022). Obtenido de <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>

XII ANEXO

- **Anexo 1: Código utilizado en Arduino.**

```
#include <Arduino.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <math.h>
#include <PID_v1.h>

// Libreria para la conexion de IoT de Arduino
#include <ArduinoIoTCloud.h>
#include <Arduino_ConnectionHandler.h>

// desactivar bit guardian de tarjeta
#include "soc/soc.h"
#include "soc/rtc_cntl_reg.h"

// LIBRERIA DE sensor de temperatura
#include "max6675.h"

//libreria de gps
#include <TinyGPS.h>
#include <HardwareSerial.h>

//identificacion de la tarjeta en IoT
//const char DEVICE_LOGIN_NAME[] = "88362b97-c926-4089-a992-2703611e6302";
const char DEVICE_LOGIN_NAME[] = "4fc9ac9f-426d-4414-9569-59e0ce1fa5b1";

//DATOS DE RED DE WIFI A CONECTARSE////////////////////////////////////

const char SSID[] = "CAMILO"; // Network SSID (name)
//const char SSID[] = "REDWIFI"; // Network SSID (name)
const char PASS[] = "Camilo1234"; // Network password (use
for WPA, or use as key for WEP)
//const char PASS[] = "EH16168202201"; // Network password
(use for WPA, or use as key for WEP)
const char DEVICE_KEY[] = "VsuSNcq9pbf1bI2SnpPpaUSHw"; // Secret device
password
////////////////////////////////////

//definiciones de pines y variables del gps
HardwareSerial neogps(1);
#define RXD2 16
#define TXD2 17

//bucle de gps
TinyGPS gps;
```

```

//variables de definicion de pines del sensor de temperatura
int thermoDO = 19;
int thermoCS = 23;
int thermoCLK = 5;
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);

// definicion de variables
int temperatura;
//float temperatura;
CloudLocation coordenadas;
int random_data;
bool button;

//VARIABLES PARA EL GPS
float lat;
float longi;

//ASIGNACION DE LCD DISPLAY
int lcdColumns = 16;
int lcdRows = 2;

//PERIFERICO LCD DISPLAY
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, lcdColumns, lcdRows);

//bucle de envio y recepcion desde la nube de IoT
void initProperties(){
    ArduinoCloud.setBoardId(DEVICE_LOGIN_NAME);
    ArduinoCloud.setSecretDeviceKey(DEVICE_KEY);
    ArduinoCloud.addProperty(temperatura, READ, 5 * SECONDS, NULL);
    ArduinoCloud.addProperty(coordenadas, READ, 5 * SECONDS, NULL);
}

//Iniciar Conexion de wifi
WiFiConnectionHandler ArduinoIoTPreferredConnection(SSID, PASS);

//=====
// Variables PARA PID
double Setpoint, Input, Output;
double Kp=55, Ki=29, Kd=0;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, REVERSE);
//=====

//definicion de pin
//int motor1Pin1 = 25;
//int motor1Pin2 = 26;

```

```

int celda = 25;
int venti = 26;

int brillo=0;
const int pinLed=18;
//-----
//variables y constantes para el pwm del ventilador
const int frecuencia=50000;
const int canal=0;
const int resolucion=8;
//-----

//*****
// CONFIGURACION DE TEMPERATURA

double tempideal=4;
//=====

////////////////////
//iniciamos las caracteristicas del pwm
// configure LEDC PWM
ledcAttachChannel(pinLed, frecuencia, resolucion, canal);

// INICIALIZACION DE LCD
lcd.init();
// ENCENDER LUZ DE LCD
lcd.backlight();

// Defined in thingProperties.h PARA ENVIO DE DATOS AL IOT
initProperties();

// CONECCION A ARDUINO IOT
ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);

/*
TIEMPO DE ESPERA PARA ENVIO DE INFORMACION A IOT
*/
setDebugMessageLevel(2);
ArduinoCloud.printDebugInfo();

// MUESTRA DE BIENVENIDA LCD
lcd.setCursor(3, 0);
lcd.print("INICIO DE");
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print("SISTEMA");

```

```

    delay(200);
}

void loop() {
    //ACTUALIZAR DATOS Y SUBIR A IOT
    ArduinoCloud.update();

    //VARIABLES DE ALMACENAMIENTO DE LATITUD Y LONGITUD
    coordenadas={lat,longi};

    //Lectura y visualizacion del sensor de temperatura

    // temperatura=thermocouple.readCelsius();

    temperatura = 0;
    for ( int i = 0 ; i < 10 ; i++ ) {
        temperatura += (thermocouple.readCelsius()-3);
        delay(50);
    }
    temperatura /= 10;

    //CONDICIONES DE APAGADO Y ENCENDIDO DE REALY DE
    //CELDA DE PELTIER Y VENTILADOR
    if (Input>=Setpoint)
    {

        digitalWrite(venti, LOW); // ENCENDIDO DE VENTILADOR
        delay(1500);
        digitalWrite(celda, //BUCLE DE CONFIGURACION DE MICROPROCESADOR

        void setup() {
            // InICIAR COMUNICACION SERIAL DE CONTROL DE MONITOREO
            Serial.begin(115200);

            //INCIAR COMUNICACION SERIA CON EL GPS
            neogps.begin(9600, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
            // TIEMPO DE ESPERA
            delay(1500);

            //CONFIGURACION DE PIN DE SALIDAS
            // pinMode(motor1Pin1, OUTPUT);
            // pinMode(motor1Pin2, OUTPUT);
            pinMode(pinLed, OUTPUT);
            pinMode(celda, OUTPUT);

```



```

    pinMode(venti, OUTPUT);

    digitalWrite(celda, HIGH);
    digitalWrite(venti, HIGH);

    LOW);
    delay(1500);
}
else{
    digitalWrite(celda, HIGH);
    delay(1500);
    digitalWrite(venti, HIGH); //APGADO DE VENTILADOR
    delay(1500);
}

//if (Input<=(Setpoint-2))
//{

//digitalWrite(celda, LOW);
//digitalWrite(venti, LOW);

//}

//-----//
//BLOQUE DE LECTURA Y PROCESO DE PID

// VARIABLE SETPOINT DONDE ACOGE LA TEMPERATURA IDEAL A MANTENER DENTRO DEL
FRIGO
Setpoint=tempideal;
//VARIABLE DE OBTENCION DE LA TEMPERATURA MEDIDA POR EL SENSOR
Input=temperatura;
//LLAMADA DE PROCESO DE PID
myPID.SetMode(AUTOMATIC);
//INCIO DE COMPUTO DE CALCULO DE PID
myPID.Compute();
//-----//

//PINES DE DIRECCION DE VENTILADOR INTERNO//
//digitalWrite(motor1Pin1, HIGH);
//digitalWrite(motor1Pin2, LOW);

//-----//
//ENVIO DE SEÑAL DE SALIDA DE PWM AL VENTILADOR
analogWrite(pinLed, Output);

//ENVIO DE DATOS PARA MONITOREO SERIAL
    Serial.print(Setpoint,0);    //SP
    Serial.write(",");           //Char separador

```

```

    Serial.print(Input,0);          //PV
    Serial.write(",");              //Char separador
    Serial.println(Output*0.3921,2); //OP

//ENVIO DE DATOS AL LCD
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("TA:");
    lcd.print(Input,0);
    lcd.print("\337C");
    lcd.setCursor(8,0);
    lcd.print("SP:");
    lcd.print(Setpoint,0);
    lcd.print("\337C");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("OP: ");
    lcd.print(Output*0.3921,2);
    lcd.print(" %");

//-----
-----//
//BLOQUE DE OBTENCION DE COORDENADAS DEL GPS
    bool newData = false;
    unsigned long chars;
    unsigned short sentences, failed;

    for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;)
    {
        char c = neogps.read();
        if (gps.encode(c)){
            newData = true;
        }
        if (newData)
        {
            float flat, flon;
            unsigned long age;
            gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);
            gps.satellites() == TinyGPS::GPS_INVALID_SATELLITES ? 0 :
gps.satellites();
            gps.hdop() == TinyGPS::GPS_INVALID_HDOP ? 0 : gps.hdop();

//VISUALIAZACION DE COORDENADAS POR MEDIO SE MONITOREO SERIAL
            Serial.print("Lat: ");
            Serial.println(flat,6);
            Serial.print("Lng: ");
            Serial.println(flon,6);

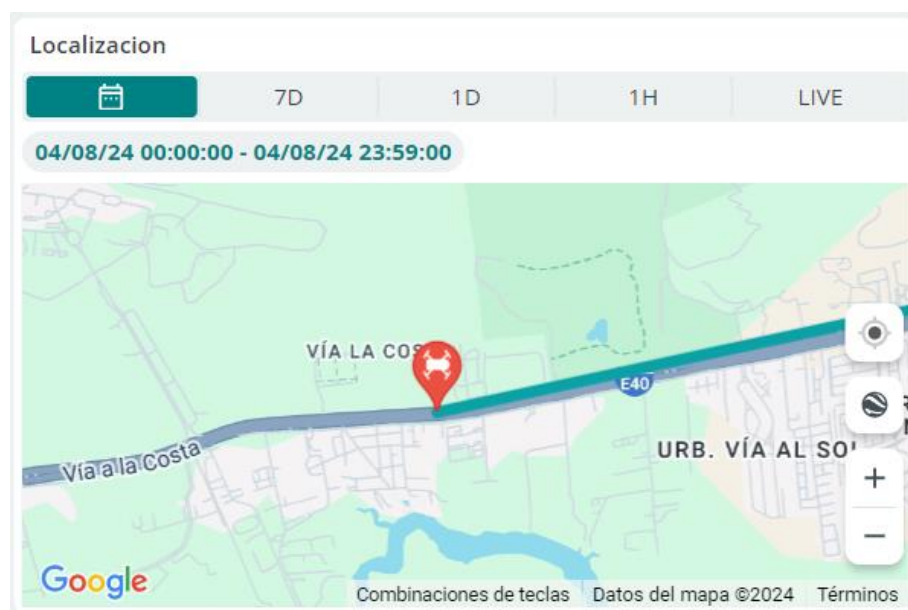
```

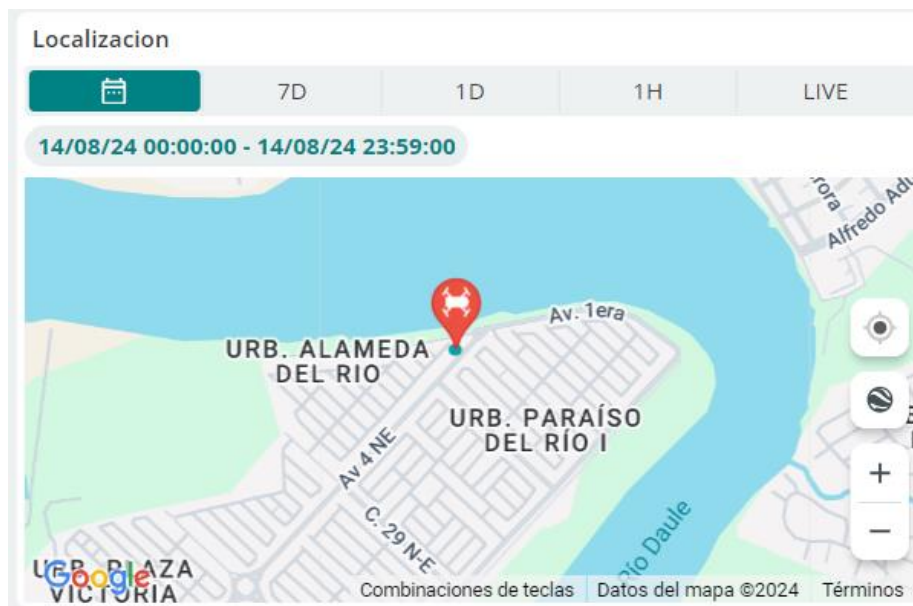
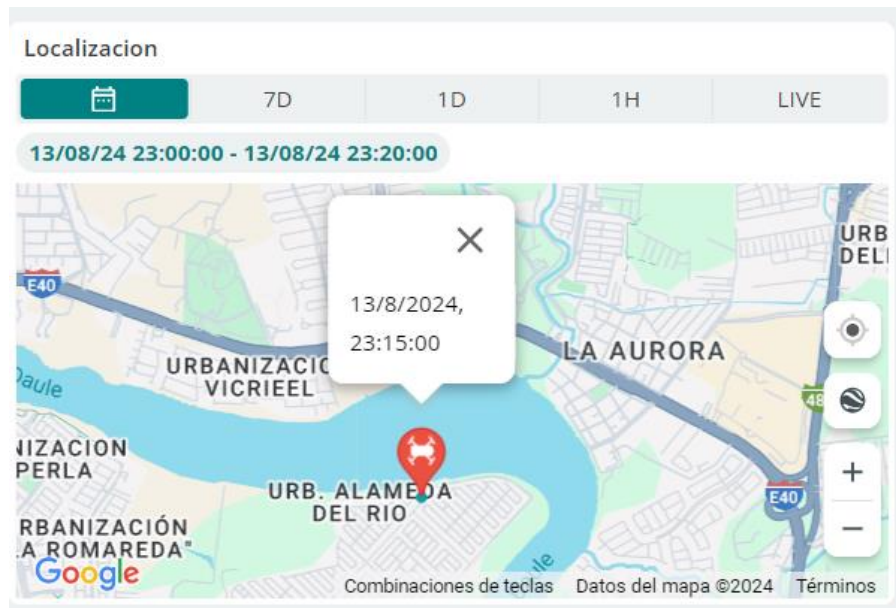
```

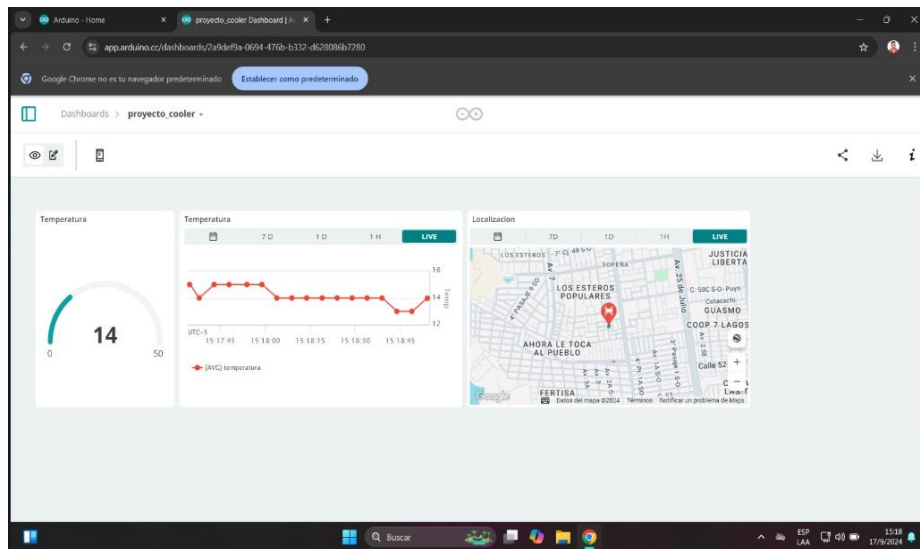
//ACTUALIZACION DE VARIALES DE COORDENADAS A ENVIAR A IOT
lat=flat;
longi=flon;
    }
}
delay(500);
}

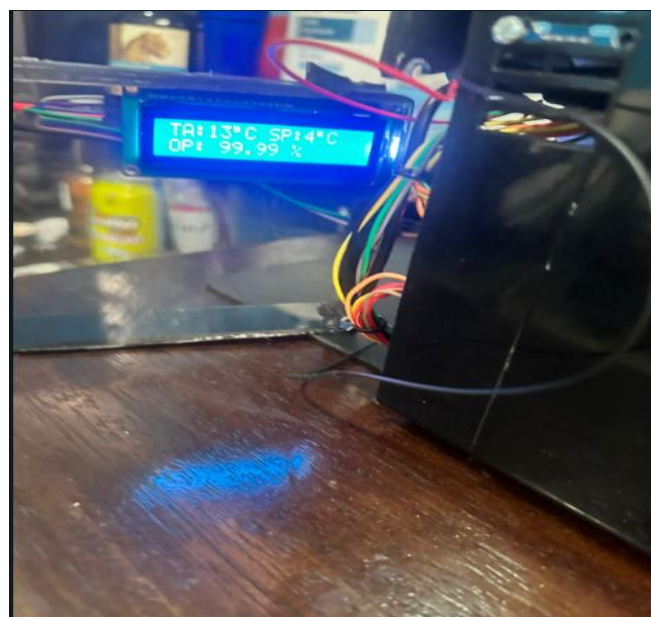
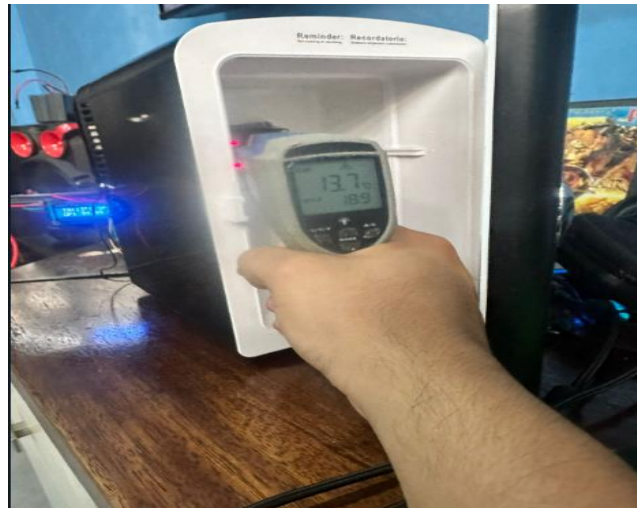
```

- **Anexo 2: Ubicaciones del prototipo**









Guayaquil, 20 de septiembre del 2024

Ing. Orlando Barcia, Msc.

Director de Carrera de Electrónica y Automatización.

De mis consideraciones:

Yo, Rafael Christian Franco Reina, portador de la cédula de ciudadanía No.

0923328629 tutor de trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL Y MONITOREO MEDIANTE IoT DE LA CADENA DE FRÍO EN LA TRANSPORTACIÓN DE MEDICAMENTOS”**,

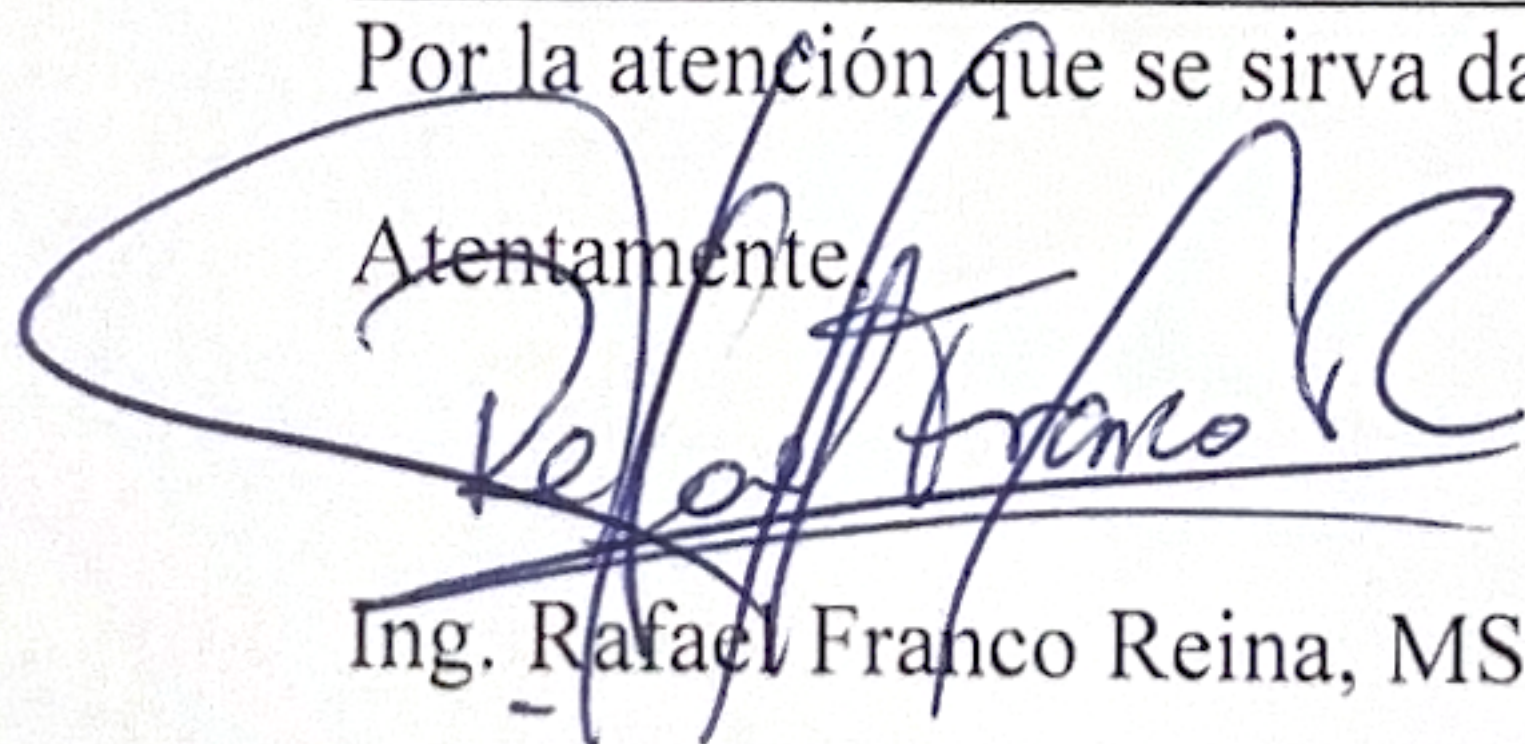
informo la calificación al Trabajo de Titulación de los estudiantes de la Malla Ajuste:

NELSON ALFREDO PESANTES CASTRO, CAMILO DANIEL RODRÍGUEZ ZUÑIGA

Criterio	Descripción del criterio	Puntaje	Observaciones
Planteamiento e identificación del problema	Se muestra la importancia del problema y la contribución que se quiere alcanzar con el Proyecto técnico.	14	
Revisión del marco teórico y fuentes de información	Este criterio establece la relación entre la revisión literaria y el problema a abordar en el Proyecto técnico, así como el adecuado nivel de exhaustividad en la revisión de las fuentes de información.	15	
Contenido Metodológico	Se establecen con claridad y de manera estructurada las distintas fases, uso de métodos, herramientas, diseños, recursos, materiales, etc, para el desarrollo del Proyecto técnico y la propuesta de solución.	19	
Funcionalidad	Permite evaluar el nivel de funcionalidad del trabajo desarrollado, tomando en cuenta los objetivos del mismo.	28	
Presentación de Resultados	Se expresan o presentan los resultados alcanzados en el desarrollo del proyecto técnico y cómo se relacionan con el cumplimiento de los objetivos, el impacto y la innovación.	12	
Conclusiones Recomendaciones	Este criterio establece la claridad con que el autor expone su posición y sus ideas respecto a las conclusiones y recomendaciones expresadas.	4	
PUNTAJE FINAL:		92	

Por la atención que se sirva dar a la presente, quedo de usted muy agradecido.

Atentamente,



Ing. Rafael Franco Reina, MSc.

Docente Tutor.