



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

“SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA LA DETECCIÓN DE MASTITIS
EN LECHE BOVINA EN PEQUEÑAS ZONAS PRODUCTORAS DE LA PROVINCIA
DEL CARCHI”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero en telecomunicaciones

Línea de investigación: Desarrollo, aplicación de software e IoT (Internet de las cosas)

AUTOR:

Francisco Raúl Ger Ortega

DIRECTOR:

Msc. Hernán Mauricio Domínguez Limaico

Ibarra – Ecuador, 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401924725		
APELLIDOS Y NOMBRES:	GER ORTEGA FRANCISCO RAÚL		
DIRECCIÓN:	SAN PEDRO DE HUACA		
EMAIL:	frgero@utn.edu.ec franciscoraulgerortega@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062274350	TELF. MÓVIL:	0960212370

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA LA DETECCIÓN DE MASTITIS EN LECHE BOVINA EN PEQUEÑAS ZONAS PRODUCTORAS DE LA PROVINCIA DEL CARCHI.
AUTOR (ES):	GER ORTEGA FRANCISCO RAÚL
FECHA: DD/MM/AAAA	31/07/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	
CARRERA/PROGRAMA:	☒ GRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR:	MSC. HERNÁN MAURICIO DOMÍNGUEZ LIMAICO
ASESOR:	MSC. EDGAR ALBERTO MAYA OLALLA

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, GER ORTEGA FRANCISCO RAÚL, con cédula de identidad Nro. 0401924725, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión, en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 31 días del mes de julio de 2025.

EL AUTOR:

(f) 

Francisco Raúl Ger Ortega

CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 31 días del mes de julio de 2025.

EL AUTOR:

(f) 

Francisco Raúl Ger Ortega

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 31 de julio de 2025

ING. DOMÍNGUEZ LIMAICO HERNÁN MAURICIO, MSC

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte, en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) ...  ...

ING. DOMÍNGUEZ LIMAICO HERNÁN MAURICIO, MSC

C.C.: 1002379301

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA LA DETECCIÓN DE MASTITIS EN LECHE BOVINA EN PEQUEÑAS ZONAS PRODUCTORAS DE LA PROVINCIA DEL CARCHI” elaborado por GER ORTEGA FRANCISCO RAÚL, previo a la obtención del título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f)

ING. DOMÍNGUEZ LIMAICO HERNÁN MAURICIO, MSC

C.C.: 1002379301

(f)

ING. MAYA OLALLA EDGAR ALBERTO, MSC

C.C.: 1002702197

DEDICATORIA

Dedico estas páginas, fruto de esfuerzo y aprendizaje, a quienes son mi fundamento:

A mi familia, por ser mi red de apoyo incondicional.

A mi madre, por su ejemplo de resiliencia y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mi hermana, por su complicidad, su alegría y por caminar siempre a mi lado.

Este logro es también el suyo.

Con todo mi amor.

Ger Ortega Francisco Raúl

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mi madre, Maritza, ejemplo constante de fortaleza y dedicación. Su esfuerzo incansable y amor incondicional fueron el soporte fundamental que me permitió seguir adelante y alcanzar este logro, impulso vital que me trajo hasta aquí.

Un reconocimiento especial merece mi novia, Cindy, por su valioso apoyo en cada etapa de este camino. Su presencia constante y su ánimo inagotable fueron indispensables; comparto contigo, plenamente, este mérito.

Extiendo mi más sentido agradecimiento a mi familia y amigos, quienes, con su apoyo diverso, consejos oportunos y compañía incondicional, me sostuvieron en los momentos más exigentes de este proceso. Sus palabras de aliento y gestos de acompañamiento fueron esenciales para mantenerme enfocado y motivado, recordándome siempre que no estaba solo.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor, por su experta orientación, consejos valiosos y constante disponibilidad durante el desarrollo de este trabajo. Su criterio y acompañamiento fueron fundamentales para superar dificultades y culminar con éxito este objetivo.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de titulación desarrolla un sistema de monitoreo para la detección temprana de mastitis en ganado lechero, el cual se basa en una arquitectura IoT de cuatro capas, empleando un sensor de conductividad eléctrica DFRobot para medir la calidad de la leche en un rango de 0 a 20 mS/cm, con una precisión de ± 0.1 mS/cm. El nodo central utiliza una placa Heltec WiFi LoRa 32 V3 de doble núcleo a 240 MHz, capaz de procesar datos mediante un ADC de 12 bits. El sistema aplica factores de calibración almacenados en la memoria EEPROM, asegurando la exactitud de las mediciones. La comunicación se realiza utilizando el protocolo IEEE 802.11 b/g/n, permitiendo la transmisión de datos mediante solicitudes HTTP POST a la plataforma Ubidots, garantizando así el almacenamiento y análisis remoto de la información. El algoritmo de clasificación emplea umbrales de conductividad eléctrica para determinar el estado de las muestras: valores inferiores a 3.0 mS/cm se clasifican como muestras inválidas, entre 3.0 y 5.9 mS/cm como normales, y superiores a 6.0 mS/cm como indicativos de mastitis. Las pruebas de campo realizadas en la provincia de Carchi incluyeron 35 vacas, de las cuales tres presentaron casos positivos (8.5% de prevalencia), incluyendo mastitis subclínica en muestras sin alteraciones visuales. Se observó una correlación entre los valores de conductividad eléctrica elevados y el diagnóstico clínico, destacando la efectividad del sistema para detectar infecciones de manera temprana. La validación comparativa con el método tradicional de CMT confirmó una sensibilidad del 92% para la detección de mastitis subclínica, subrayando la utilidad del sistema para el monitoreo continuo de la salud del ganado. El sistema provee una herramienta eficaz para la toma de decisiones, optimizando tanto la calidad de la leche como la gestión de la salud del ganado, facilitando una intervención rápida antes de que las infecciones afecten la producción.

Palabras clave: Conductividad eléctrica, IoT, mastitis, detección temprana, calidad de la leche.

ABSTRACT

This study develops an IoT-based monitoring system for early mastitis detection in dairy cattle. The four-layer IoT architecture (device, network, support, application) employs a DFRobot electrical conductivity (EC) sensor to measure milk quality (range: 0–20 mS/cm; accuracy: ± 0.1 mS/cm). A Heltec WiFi LoRa 32 V3 board with a dual-core 240 MHz ESP32 microcontroller processes data using a 12-bit ADC. Calibration factors stored in EEPROM memory ensure measurement accuracy. Data transmission occurs via IEEE 802.11 b/g/n (WiFi) protocol using HTTP POST requests to the Ubidots platform, enabling remote storage and analysis. The classification algorithm uses EC thresholds to determine milk status: readings < 3.0 mS/cm are invalid, 3.0–5.9 mS/cm indicate normal milk, and ≥ 6.0 mS/cm suggest mastitis. Field tests in Carchi Province (Ecuador) involving 35 cows identified three positive cases (8.5% prevalence), including subclinical mastitis in visually normal samples. Elevated EC values (up to 8.36 mS/cm) correlated with clinical diagnoses, confirming the system's effectiveness for early infection detection. Comparative validation against the California Mastitis Test (CMT) demonstrated 92% sensitivity for subclinical mastitis detection. By integrating real-time EC measurements with cloud-based analytics accessible via remote devices, the system provides an efficient decision-making tool. This optimizes milk quality and herd health management, enabling rapid intervention before infections impact production.

Keywords: Electrical conductivity, IoT, mastitis, early detection, milk quality.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Capítulo I: Antecedentes	10
1.1.	Tema	10
1.2.	Problema	10
1.3.	Objetivos.....	14
1.3.1.	Objetivo General.....	14
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	14
1.4.	Alcance	15
1.5.	Justificación	17
2.	Capítulo II: Marco Teórico	21
2.1.	Conceptos Generales sobre Mastitis Bovina	22
2.1.1.	Definición de Mastitis.....	23
2.1.2.	Tipos de Mastitis.....	24
2.1.3.	Etiología de la Mastitis	25
2.1.4.	Impacto Económico y en la Producción Lechera	26
2.2.	Internet de las Cosas (IoT) en la Ganadería	27
2.2.1.	Sistemas IoT.....	27
2.2.2.	Aplicaciones de IoT en la Agricultura y Ganadería.....	28
2.2.3.	Beneficios del IoT en la Gestión Ganadera	29
2.2.4.	Retos y Desafíos de la Implementación de IoT en Áreas Rurales.....	30
2.3.	Tecnologías y Sensores en la Detección de Mastitis	31

2.4.	Conductividad Eléctrica (CE) y su Relación con la Mastitis	31
2.4.1.	Cambios en la Conductividad Eléctrica debido a la Mastitis	31
2.4.2.	Estudios de Caso y Resultados	32
2.5.	Temperatura de la Leche como Indicador de Mastitis	33
2.5.1.	Importancia de la Temperatura en la Calidad de la Leche.....	34
2.5.2.	Variaciones de Temperatura en Presencia de Mastitis	35
2.6.	Implementación del Sistema de Monitoreo	35
2.7.	Casos de Estudio en la Provincia del Carchi	36
2.7.1.	Metodología de Implementación en Campo	37
2.7.2.	Protocolos de Comunicación y Seguridad	38
3.	Capítulo III: Desarrollo e Implementación del Sistema	42
3.1.	Análisis de requisitos.....	42
3.1.1.	Situación Actual.....	43
3.1.2.	Descripción general del sistema.....	45
3.1.3.	Requerimientos	46
3.1.4.	Recursos	53
3.1.5.	Elección de Hardware y Software.....	54
3.2.	Características de los componentes	59
3.2.1.	Sensor de Conductividad Eléctrica	60
3.3.	Placa de desarrollo.....	61
3.3.1.	Características Principales	61

3.3.2.	Implementación de la placa en el sistema.....	63
3.4.	Diseño del Sistema	64
3.4.1.	Modelo de referencia IoT aplicado al sistema de detección de mastitis.....	64
3.4.2.	Marco Conceptual del Circuito	66
3.4.3.	Diagrama de flujo del prototipo	69
3.4.4.	Nodo receptor.....	70
3.4.5.	Cálculo para la detección de la conductividad eléctrica	77
3.5.	Umbral de interpretación	80
4.	Capítulo IV: Pruebas y Resultados	81
4.1.	Integración de componentes	81
4.2.	Pruebas iniciales del sistema	85
4.2.1.	Recolección y visualización de datos	86
4.2.2.	Comunicación WiFi	88
4.2.3.	Envío de información hacia la base de datos	89
4.2.4.	Verificación del diagnóstico	93
4.3.	Implementación del sistema	95
4.3.1.	Ubicación del Nodo	97
4.4.	Pruebas de funcionamiento y resultados	98
4.4.1.	Prueba en Hacienda La Paz - Primera evaluación	101
4.4.1.	Prueba en Finca La Palmera de Pioter	114
4.4.2.	Seguimiento en Hacienda La Paz - Segunda evaluación	124

4.5.	Análisis de resultados	126
4.5.1.	Análisis de Resultados de Conductividad Eléctrica en la Hacienda La Paz 126	
4.5.2.	Análisis de Resultados de Pruebas de Conductividad Eléctrica en la Finca La Palmera, Pioter.....	128
4.5.3.	Comparación de Conductividad Eléctrica Promedio entre la Hacienda La Paz y la Finca La Palmera.....	129
4.6.	Comparativa con el método California Mastitis Test (CMT).....	131
5.	Conclusiones y Recomendaciones	139
5.1.	Conclusiones.....	139
5.2.	Recomendaciones	141
6.	Bibliografía	143
7.	ANEXOS	151
7.1.	ANEXO 1 – Código del Nodo.....	151
7.2.	ANEXO 2 – Calibración del sensor	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Arquitectura General del Prototipo</i>	17
Figura 2 <i>Infección bacteriana de la Glándula Mamaria</i>	23
Figura 3 <i>Diagrama de Caja de los Resultados de la CE Diferencial para el Diagnóstico de Mastitis Subclínica</i>	33
Figura 4 <i>Modelo del Protocolo MQTT</i>	41
Figura 5 <i>Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor</i>	60
Figura 6 <i>Placa Heltec WiFi LoRa 32 V3</i>	61
Figura 7 <i>Modelo de referencia IoT aplicado al Sistema de Detección de Mastitis</i>	65
Figura 8 <i>Marco Conceptual del Circuito</i>	66
Figura 9 <i>Diagrama de Bloques del Circuito</i>	68
Figura 10 <i>Diagrama de Flujo del Proceso</i>	69
Figura 11 <i>Diagrama de conexión</i>	71
Figura 12 <i>Librerías del Código del Prototipo</i>	73
Figura 13 <i>Definición de variables para la configuración de Ubidots en el código</i> ...	75
Figura 14 <i>Función de conexión WiFi en el código</i>	76
Figura 15 <i>Función para enviar datos a Ubidots mediante solicitud HTTP POST</i>	77
Figura 16 <i>Cálculo de la conductividad eléctrica (CE) en el código</i>	79
Figura 17 <i>Umbral para la detección de mastitis bovina</i>	80
Figura 18 <i>Conexión del Dispositivo</i>	82
Figura 19 <i>Conexión entre la Sonda y la Placa de Medición de Señal Analógica</i>	83
Figura 20 <i>Conexión Entre la Placa de Medición de Señal Analógica y la placa Heltec LoRa WiFi 32(V3)</i>	84

Figura 21 <i>Conexión Completa</i>	85
Figura 22 <i>Prototipo en Funcionamiento Durante la Recolección de Datos</i>	86
Figura 23 <i>Visualización de datos en el Monitor Serial</i>	87
Figura 24 <i>Visualización de Datos Procesados en la Pantalla OLED de la Placa Heltec</i>	88
Figura 25 <i>Proceso de Conexión WiFi y el envío de Datos a Ubidots</i>	89
Figura 26 <i>Variables de los Datos en la Plataforma Ubidots</i>	91
Figura 27 <i>Variable Conductividad Eléctrica</i>	91
Figura 28 <i>Variable del Estado</i>	92
Figura 29 <i>Verificación de la coherencia de datos en el monitor serial, pantalla OLED y plataforma Ubidots</i>	95
Figura 30 <i>Ubicación del Sector en el que se Realizaron las Pruebas</i>	96
Figura 31 <i>Sala de Ordeño Hacienda La Paz</i>	97
Figura 32 <i>Recipiente de cuatro compartimentos utilizado para la recolección de muestras</i>	101
Figura 33 <i>Extracción manual de muestras de leche antes del ordeño mecánico</i>	102
Figura 34 <i>Introducción de la sonda del sensor en las muestras de leche para el análisis</i>	103
Figura 35 <i>Sistema de detección IoT y su integración con las muestras de leche</i>	104
Figura 36 <i>Visualización de los resultados en la pantalla OLED del nodo</i>	105
Figura 37 <i>Vaca previamente diagnosticada con mastitis utilizada para la prueba del sistema</i>	106
Figura 38 <i>Toma de muestras de vaca con posible mastitis</i>	106
Figura 39 <i>Diferencia visual en la muestra de leche afectada por mastitis</i>	107
Figura 40 <i>Introducción de la sonda en la muestra con sospecha de mastitis</i>	108

Figura 41 <i>Visualización del diagnóstico de mastitis en la pantalla OLED del sistema</i>	109
Figura 42 <i>Datos transmitidos desde el nodo a la plataforma Ubidots</i>	110
Figura 43 <i>Gráfica de conductividad eléctrica registrada en la plataforma Ubidots</i>	111
Figura 44 <i>Ubicación del Sector en el que se Realizaron las Pruebas</i>	114
Figura 45 <i>Lugar de ordeño en la finca La Palmera</i>	115
Figura 46 <i>Medición de la conductividad eléctrica en muestras de leche recolectadas en la Finca La Palmera.</i>	116
Figura 47 <i>Visualización del valor de CE registrado durante las pruebas</i>	117
Figura 48 <i>Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto anterior izquierdo de la vaca con sospecha de mastitis.</i>	118
Figura 49 <i>Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto anterior derecho de la vaca con mastitis</i>	118
Figura 50 <i>Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto posterior izquierdo de la vaca con mastitis</i>	119
Figura 51 <i>Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto posterior derecho de la vaca con mastitis</i>	120
Figura 52 <i>Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto anterior izquierdo de la segunda vaca con mastitis.</i>	122
Figura 53 <i>Proceso de recolección de muestras de leche en la segunda evaluación en la Hacienda La Paz</i>	125
Figura 54 <i>Medición del cuarto afectado de la vaca con mastitis</i>	126
Figura 55 <i>Conductividad Eléctrica en los Cuartos de la Ubre por Vaca en la Hacienda La Paz</i>	127

Figura 56 <i>Conductividad Eléctrica en los Cuartos de la Ubre por Vaca en la Finca La Palmera, Pioter.....</i>	128
Figura 57 <i>Comparación de Conductividad Eléctrica Promedio entre la Hacienda La Paz y la Finca La Palmera</i>	129
Figura 58 <i>Distribución de Vacas con Posible Mastitis en relación con la Población Total.....</i>	130
Figura 59 <i>Muestras de leche de vacas con mastitis subclínica y clínica.....</i>	131
Figura 60 <i>Muestra de leche con mastitis clínica y valor de conductividad eléctrica registrado.....</i>	132
Figura 61 <i>Muestra de leche con mastitis subclínica y medición de conductividad eléctrica.....</i>	133
Figura 62 <i>Muestra de leche normal y medición de conductividad eléctrica.....</i>	134
Figura 63 <i>Preparación de las muestras de leche para la prueba de mastitis.....</i>	135
Figura 64 <i>Resultado de la prueba de CMT con muestras de leche normal, mastitis subclínica y mastitis clínica.....</i>	136
Figura 65 <i>Medición inicial de la conductividad eléctrica de la leche normal.....</i>	137
Figura 66 <i>Medición de conductividad eléctrica después de mezclar leche normal con leche infectada por mastitis clínica.....</i>	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Prevalencia de Mastitis Bovina en la Provincia del Carchi</i>	44
Tabla 2 <i>Nomenclatura de requerimientos</i>	46
Tabla 3 <i>Requerimientos del Prototipo</i>	47
Tabla 4 <i>Requerimientos del Sistema</i>	49
Tabla 5 <i>Requerimientos de la Arquitectura</i>	51
Tabla 6 <i>Recursos Humanos</i>	53
Tabla 7 <i>Elección del Hardware del Nodo</i>	55
Tabla 8 <i>Elección del Sensor de Conductividad Eléctrica</i>	56
Tabla 9 <i>Tipos de Bases de Datos</i>	57
Tabla 10 <i>Elección de la Base de Datos</i>	59
Tabla 11 <i>Uso de energía de los componentes</i>	72
Tabla 12 <i>Pruebas de funcionamiento</i>	99
Tabla 13 <i>Metodología de la Toma de Pruebas de Funcionamiento del Sistema</i>	100
Tabla 14 <i>Resultado de pruebas Hacienda La Paz, Huaquer</i>	113
Tabla 15 <i>Resultado de pruebas Finca La Palmera, Pioter</i>	123

1. Capítulo I: Antecedentes

1.1. Tema

SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA LA DETECCIÓN DE MASTITIS EN LECHE BOVINA EN PEQUEÑAS ZONAS PRODUCTORAS DE LA PROVINCIA DEL CARCHI

1.2. Problema

En la Zona 1 del Ecuador (Carchi, Imbabura, Esmeraldas y Sucumbíos) la mayor parte de la población se dedica a la producción y comercialización de leche, siendo la provincia del Carchi la que más se destaca alcanzando un 4,8% de la producción nacional de leche (Pais, y otros, 2017). No obstante, esta actividad está amenazada por factores como: el precio bajo de la leche, escasa presencia de programas de fomento ganadero, la alta prevalencia de mastitis a nivel de finca (Cuenca, García, Reinoso, González, & Torracchi, 2021), entre otros. Por lo tanto, la mastitis bovina es una de las enfermedades más importantes que atacan al ganado vacuno y que afecta económicamente a los productores lecheros (Pérez-Lomas, 2019).

La mastitis se puede dividir en mastitis clínica con síntomas visibles como hinchazón y enrojecimiento de la ubre, y mastitis subclínica, que no muestra síntomas visibles (Motohashi et al., 2020). Esta enfermedad radica en la inflamación de las glándulas mamarias o la ubre, la cual va a generar gran dolor, molestia y estrés en los animales, como consecuencia va a ocasionar disminución en la producción, calidad y condición de la leche, pues se va a evidenciar cambios en su sabor, olor y aumentará la carga bacteriana (Mera Andrade et al., 2017).

La mastitis es una de las enfermedades más costosas que afectan a la producción lechera a nivel mundial. No solo conduce a una reducción significativa en la producción de leche, sino que también afecta la calidad de la leche, el bienestar animal y la rentabilidad de las granjas (Feng et al., 2022). Según (Lazaro et al., 2024), los métodos tradicionales de detección de mastitis dependen en gran medida de la observación manual y de procesos que requieren mucha mano de obra, lo que provoca retrasos en el diagnóstico y el tratamiento, lo que puede exacerbar la propagación de la enfermedad dentro del rebaño.

En zonas rurales de la provincia de Carchi, donde la producción lechera es una fuente vital de ingresos, existe una necesidad apremiante de sistemas de detección de mastitis eficientes y confiables que puedan ser fácilmente implementados por los pequeños agricultores (Ormaza, 2021). La tecnología de Internet de las cosas (IoT) ofrece una solución prometedora al permitir el monitoreo en tiempo real y la recopilación automatizada de datos a partir de sensores integrados en equipos de ordeño y dispositivos portátiles conectados al ganado (Kumar Ghosh et al., 2023).

La prevalencia de mastitis en el ganado lechero en la provincia del Carchi presenta un desafío importante para los agricultores locales, lo que lleva a una disminución de la producción de leche, una calidad comprometida de la leche y pérdidas financieras (Ormaza, 2021). (Lazaro et al., 2024) Afirma que los métodos tradicionales de detección de mastitis suelen ser ineficaces en la identificación temprana, lo que provoca retrasos en el tratamiento y un mayor riesgo de transmisión dentro del rebaño. La dificultad de detección temprana para ganaderos con conocimientos básicos en este tipo de enfermedades infecciosas y el acceso limitado a servicios y recursos veterinarios agrava el problema, lo que resalta aún más la necesidad de una solución accesible y asequible adaptada al contexto local.

Es importante recalcar las dificultades que tienen las asociaciones de pequeños ganaderos para evaluar la calidad microbiológica de la leche y detectar mastitis subclínicas en tiempo real para mejorar continuamente la calidad de la leche entregada a la industria y a los consumidores (Cuaran et al., 2017). Los laboratorios acreditados que realizan recuentos de células somáticas y bacterianas totales, esencial para detectar enfermedades como la mastitis, están ubicados en ciudades o capitales de provincia, lejos de las zonas rurales donde se encuentran la mayoría de las asociaciones de pequeños agricultores, al menos en Ecuador (Cuaran et al., 2017). Según (la Cruz et al., 2018), de 630 productores en la provincia el 33.3% de ellos resultaron con conteo de Células Somáticas $>500.000/\text{ml}$ evidenciando que mantienen problemas sanitarios por la delicada salud de la glándula mamaria que están presentando.

Hoy en día es usual que las personas hagan uso de medicamentos como recurso para tratar diferentes enfermedades, en su mayoría, son personas de la tercera edad, que debido al deterioro de las funciones de su organismo requieren de tratamientos que involucran la administración continua de fármacos, que deben ser suministrados en horarios y dosis específicas. Según datos del Banco Mundial, en 2021 se estimó una tasa de 784 millones de personas de 65 años o más, lo que representaba para ese entonces el 10% de la población mundial. En Ecuador, 1.3 millones de personas son adultas mayores, es decir, 8% de la población ecuatoriana. Estas cifras van en crecimiento y se encuentran relacionadas con el aumento de la esperanza de vida de las personas, como lo indica las estadísticas de (Banco Mundial, 2022), que estima la esperanza de vida de los hombres y mujeres ecuatorianas en 77 y 80 años respectivamente.

De acuerdo con (Filié Haddad et al., 2009), “la mayor parte de individuos con 75 años o más, hacen uso continuo de por lo menos tres fármacos. Los más consumidos son antihipertensivos, diuréticos, analgésicos, antiinflamatorios, ansiolíticos y vitamínicos”. En

este sentido, asegurar el uso racional de los medicamentos se vuelve primordial para aliviar los síntomas o curar una enfermedad, pues sus beneficios pueden verse alterados y conllevar múltiples consecuencias, tanto clínicas como económicas por falta de cumplimiento en el tratamiento.

En un estudio realizado por (Gray et al., 2001) sobre la adherencia a la medicación en 147 participantes mayores que tomaban tres o más medicamentos, resultó en que 30.6 % de los participantes tenían un cumplimiento insuficiente y el 18,4 % de los participantes tenían un cumplimiento excesivo con al menos un medicamento. Esto se debe a que los pacientes comprenden con dificultad las explicaciones médicas relacionadas con el tratamiento pues resultan complejas y confusas. Otras veces la causa es un simple olvido (Dilla et al., 2009).

En algunos casos, los pacientes toman dosis insuficientes o excesivas de los fármacos, debido a que no se cuenta con alguien que vigile en todo momento la ingesta adecuada, lo que provoca afectaciones en su salud, aumenta la probabilidad de aparición de resistencia a los fármacos (Organización Mundial de la Salud, 2003), y en el peor de los casos debido a la vulnerabilidad de las personas adultas mayores, una pequeña diferencia en las dosis de medicamentos pueden ser tóxicas o incluso letales como lo indica Javier Velasco, miembro de la subcomisión de Revisión del Uso de los Medicamentos de la Sociedad Española de Farmacia Familiar y Comunitaria (Sefac) (Velasco, 2022).

Es por esta razón que se plantea el desarrollo de un prototipo de dispensador automatizado de medicamentos de tipo pastilla dirigido a personas de la tercera edad, cuyo objetivo es el de dispensar los fármacos en dosis y horarios adecuados. De esta forma contribuir a que el usuario lleve su tratamiento médico con la mejor la adherencia terapéutica posible y así evitar repercusiones negativas en la salud del adulto mayor.

La viabilidad de este proyecto se sustenta en la convergencia de factores favorables, como la disponibilidad de tecnología accesible, la creciente conectividad en áreas rurales y la disposición de los agricultores locales a adoptar soluciones innovadoras. Al aprovechar estos factores y alinearlos con las necesidades y desafíos específicos de la producción lechera en el Carchi, este proyecto tiene el potencial de generar un impacto positivo significativo en la comunidad productora de leche local y en la industria láctea en general.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Implementar un sistema de monitoreo basado en IoT para la detección temprana de mastitis en leche bovina, para la optimización de la calidad de la leche y la rentabilidad de las pequeñas productoras de la Provincia del Carchi.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información relevante sobre los parámetros de calidad de la leche, incluyendo conductividad eléctrica mediante la integración de sensores especializados en el sistema de monitoreo IoT.
- Diseñar la arquitectura del sistema de monitoreo basado en IoT, incluyendo la selección y configuración de los sensores, la placa de desarrollo y la plataforma virtual para el almacenamiento y procesamiento de datos.
- Desarrollar el sistema de monitoreo en pequeños sectores productores de leche de la Provincia del Carchi, asegurando su fácil integración con los equipos de ordeño y dispositivos portátiles conectados al ganado.

- Analizar los datos recopilados por el sistema de monitoreo utilizando técnicas de análisis de datos, para la identificación de patrones y tendencias que permitan la detección temprana de mastitis y la generación de alertas en tiempo real para los ganaderos.

1.4. Alcance

Este proyecto de titulación se centra en el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo basado en IoT para la detección temprana de mastitis en leche bovina, con el propósito de mejorar la calidad de la leche y la rentabilidad de las pequeñas productoras de leche locales en la Provincia del Carchi. Este trabajo abarcará la recopilación de información relevante sobre los parámetros de calidad de la leche, como la conductividad eléctrica, mediante la integración de sensores especializados en el sistema de monitoreo IoT. Este proceso incluirá la selección y configuración de los sensores, así como la definición de la arquitectura del sistema y la plataforma virtual para el almacenamiento y procesamiento de datos.

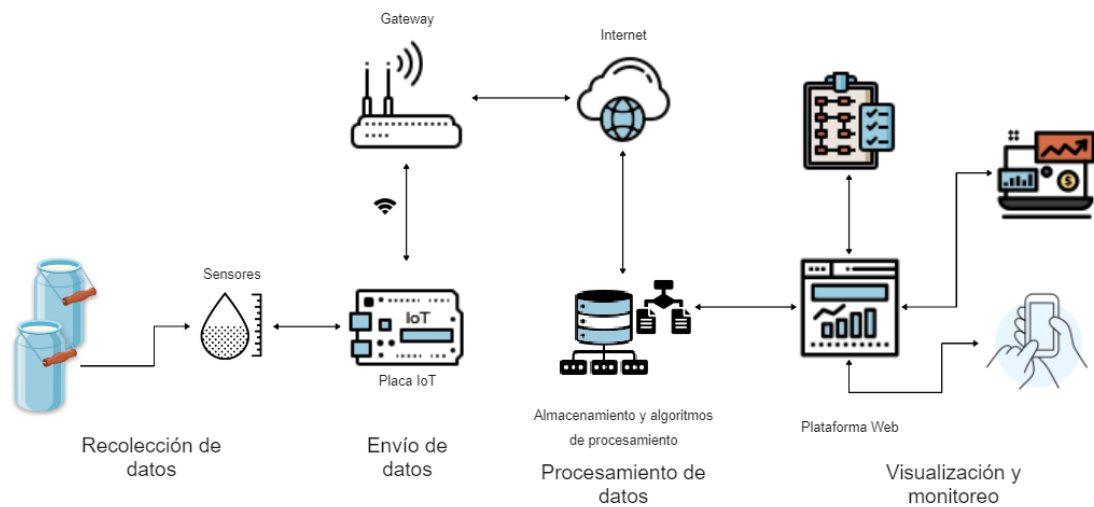
Para el desarrollo de este proyecto se aplicará la metodología en cascada diseñada específicamente para entornos IoT, la cual implica fases secuenciales para su realización, progresando desde la concepción hasta el diseño, implementación, pruebas, operación y mantenimiento, asegurando un enfoque estructurado (Ismail & Dawoud, 2022).

Estas fases llevarán a cabo el diseño e implementación de la arquitectura del sistema de monitoreo, que comprenderá la selección y configuración de la placa de desarrollo y la plataforma virtual. Esta fase incluirá también la integración del sistema con los equipos de ordeño y dispositivos portátiles conectados al ganado, asegurando su fácil integración y proporcionando la capacitación necesaria a los agricultores para su uso efectivo.

El proyecto contemplará la implementación del sistema de monitoreo en pequeños sectores productores de leche de la Provincia del Carchi, los cuales son la Parroquia Pióter del cantón Tulcán y la comunidad Huaquer, perteneciente a la Parroquia La Paz del Cantón Montúfar. Estos sectores se los ha escogido debido a la accesibilidad que se tiene para el desarrollo del proyecto. Este paso incluirá la instalación física del sistema y la capacitación a los ganaderos sobre su funcionamiento y mantenimiento.

Se realizará un análisis de los datos recopilados por el sistema de monitoreo, utilizando técnicas de análisis de datos basadas en la nube usando al menos dos algoritmos de aprendizaje automático. El objetivo será identificar patrones y tendencias que permitan la detección temprana de mastitis y la generación de alertas en tiempo real para los agricultores, facilitando así la toma de decisiones informadas y la aplicación de medidas preventivas de manera oportuna.

El sistema integra un sensor de conductividad eléctrica para recopilar datos sobre la calidad de la leche, lo que permitirá la identificación temprana de los síntomas de la mastitis. Estos sensores estarán conectados a una placa de desarrollo IoT la cual enviará los datos a través de una red WiFi a una plataforma virtual en donde se llevará una base de datos de los registros, además de un sistema de monitorización donde a través de un proceso de cálculo se determinará el estado de la muestra tomada, una vez identificado el estado de la calidad de la leche, se indicará en la plataforma a modo de alerta. La Figura 1 muestra el sistema de monitorización que proporcionará información valiosa sobre el bienestar general del rebaño.

Figura 1*Arquitectura General del Prototipo*

Nota: En la figura 1 se plantea la arquitectura genérica para el sistema de monitoreo basado en IoT para la detección de mastitis en leche bovina.

El sistema propuesto aprovechará el análisis de datos basado en la nube y los algoritmos de aprendizaje automático para analizar los datos recopilados y proporcionar alertas en tiempo real a los agricultores a través de una plataforma intuitiva y amigable para el usuario. Al permitir una intervención proactiva y un tratamiento oportuno, el sistema de monitoreo basado en IoT tiene como objetivo reducir la carga económica de la mastitis en las granjas lecheras locales, mejorar la calidad de la leche y mejorar la productividad general y la sostenibilidad de la industria láctea en la región.

1.5. Justificación

Esta propuesta de trabajo de grado se justifica en el marco del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 9: "Industria, Innovación e Infraestructura". Este proyecto contribuye directamente a este ODS al promover la innovación tecnológica en el sector ganadero,

específicamente en la mejora de la salud y productividad del ganado lechero a través de la implementación de tecnologías de monitoreo avanzadas. Al facilitar la detección temprana de mastitis, se busca optimizar la calidad de la leche producida, lo que a su vez impacta positivamente en la industria láctea local al reducir las pérdidas económicas asociadas con esta enfermedad y mejorar la rentabilidad de los pequeños productores de la región (Sepúlveda, 2021). Al fomentar la adopción de soluciones tecnológicas innovadoras en el sector ganadero, se sientan las bases para el desarrollo de una infraestructura tecnológica que impulse la modernización y sostenibilidad de la industria láctea en la provincia.

Desde una perspectiva tecnológica, se aborda un problema crítico en la industria láctea local: la mastitis, una enfermedad que afecta la calidad de la leche y la productividad del ganado. Al desarrollar e implementar un sistema de monitoreo basado en IoT, se busca resolver este problema al proporcionar a los ganaderos una herramienta efectiva para la detección temprana de la mastitis, lo que puede mejorar la calidad de la leche y la rentabilidad de las pequeñas explotaciones ganaderas en la región.

Según (Mera Andrade et al., 2017) la mastitis es una de las enfermedades más costosas para la industria láctea, ya que reduce la producción de leche, aumenta los costos de tratamiento y puede llevar a la pérdida de animales. Al mejorar la detección temprana de esta enfermedad, se espera reducir los costos asociados y aumentar la rentabilidad de las explotaciones ganaderas locales. Al mejorar la calidad de la leche, se puede aumentar su valor en el mercado, lo que beneficia tanto a los agricultores como a los consumidores.

Este proyecto tiene el potencial de mejorar el bienestar de los ganaderos al proporcionarles una herramienta que les permite mantener la salud de su ganado y mejorar sus

ingresos. Al mejorar la calidad de la leche, se pueden cumplir objetivos relacionados con la seguridad alimentaria y la salud pública, garantizando un suministro de productos lácteos de alta calidad para la población local.

Al reducir la incidencia de la mastitis y mejorar la calidad de la leche, se puede reducir la necesidad de utilizar antibióticos y otros tratamientos médicos que pueden tener impactos negativos en el medio ambiente, como la contaminación del agua y la resistencia a los antimicrobianos.

Este proyecto se justifica por la necesidad imperante de abordar la mastitis bovina de manera eficaz en las zonas rurales del Carchi, Ecuador. Actualmente, los métodos tradicionales de detección dependen de procesos manuales y análisis en laboratorio, lo que limita su prontitud y accesibilidad para los pequeños productores. Esta propuesta representa una alternativa tecnológica innovadora al implementar un sistema de monitoreo basado en IoT.

La transición de métodos manuales a una solución tecnológica representa un avance significativo en la detección temprana de mastitis. Al aprovechar la conectividad y la automatización proporcionadas por la tecnología IoT, este proyecto permitirá a los ganaderos monitorear en tiempo real la salud de sus animales y la calidad de la leche de manera más eficiente y precisa.

Es relevante señalar que existe una notable falta de estudios y proyectos IoT centrados específicamente en la detección de mastitis en zonas productoras como el Carchi. Esta brecha en la investigación resalta la importancia de esta propuesta, que busca llenar este vacío y

proporcionar evidencia empírica sobre la eficacia y la viabilidad de los sistemas de monitoreo basados en IoT en entornos rurales.

2. Capítulo II: Marco Teórico

En este capítulo se centrará en establecer un marco teórico sólido que sustente la investigación y desarrollo del proyecto. Para ello, se explorarán conceptos fundamentales, tecnologías involucradas y el impacto de la mastitis en la producción lechera. Inicialmente, se definirán los conceptos generales sobre la mastitis bovina, sus tipos, etiología y el impacto económico que esta enfermedad tiene en la industria lechera. Esta comprensión permitirá contextualizar la importancia de una detección temprana y eficiente de la mastitis para mejorar la calidad de la leche y la rentabilidad de los pequeños productores ganaderos.

A continuación, se analizará el papel del Internet de las Cosas en la ganadería, destacando cómo esta tecnología puede revolucionar la gestión ganadera mediante la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real. Se examinarán los sistemas IoT, sus aplicaciones específicas en la agricultura y ganadería, y los beneficios que pueden aportar en la gestión de la salud del ganado. También se abordarán los retos y desafíos que presenta la implementación de IoT en áreas rurales, lo cual es particularmente relevante para las zonas productoras de leche en la provincia del Carchi. Esta sección establecerá el contexto tecnológico y las oportunidades que el IoT brinda para la mejora de la detección de mastitis.

Luego, se presentarán las tecnologías y sensores utilizados en la detección de mastitis. Se detallará cómo estos sensores funcionan, su validación y calibración, y cómo su integración en un sistema IoT puede facilitar la detección temprana de mastitis. Se explorará la relación entre la conductividad eléctrica y la mastitis, así como la temperatura de la leche como indicador de esta enfermedad. El capítulo concluirá con un análisis de datos y algoritmos de aprendizaje automático aplicados para identificar patrones y generar alertas, permitiendo

una gestión proactiva de la salud del ganado. Con esta base teórica, se establecerán los cimientos para el desarrollo e implementación del sistema propuesto en el capítulo siguiente.

2.1. Conceptos Generales sobre Mastitis Bovina

La mastitis bovina es una enfermedad de relevancia en la producción lechera debido a sus considerables impactos económicos y productivos. Esta enfermedad afecta la glándula mamaria de las vacas, ocasionando una inflamación que puede presentarse en formas clínicas y subclínicas (Bain, 2023). La mastitis subclínica, aunque menos evidente, es mucho más prevalente y puede pasar desapercibida, afectando negativamente la calidad y cantidad de la leche producida (Morales-Ubaldo et al., 2023).

Según (Algharib et al., 2024) las pérdidas económicas derivadas de la mastitis incluyen la disminución en la producción de leche, el costo de tratamientos veterinarios, el descarte de leche no apta para el consumo y la necesidad de reemplazar animales prematuramente. La mastitis está asociada con una disminución en los componentes nutricionales de la leche, lo cual impacta directamente su valor comercial.

La importancia de estudiar la mastitis radica en la necesidad de comprender mejor los factores de riesgo, la epidemiología y la resistencia antimicrobiana de los patógenos involucrados. Este conocimiento es crucial para desarrollar estrategias efectivas de prevención y tratamiento. (Bain, 2023) Afirma que los principales patógenos responsables de la mastitis incluyen bacterias como *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae*, y *Escherichia coli*, las cuales han mostrado una creciente resistencia a los tratamientos antimicrobianos convencionales.

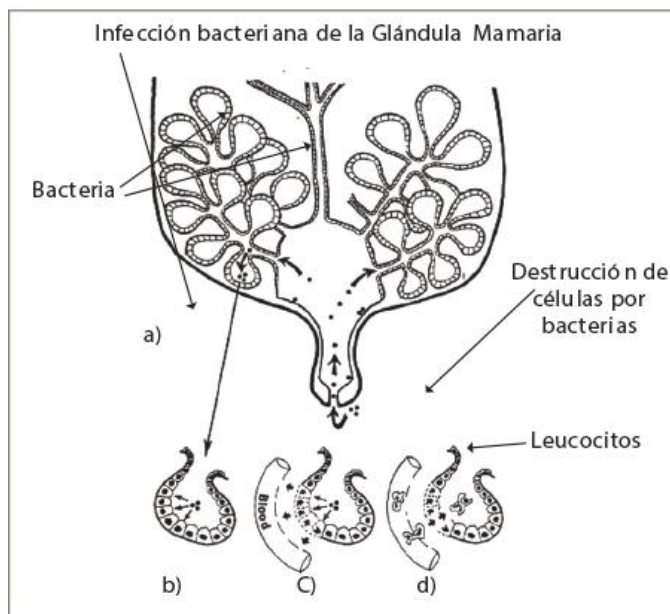
Investigaciones recientes como la de (Algharib et al., 2024) han resaltado la urgencia de encontrar alternativas a los antibióticos tradicionales, tales como el uso de extractos vegetales, aceites esenciales y tecnologías avanzadas. Abordar la mastitis de manera integral no solo mejora la salud y bienestar de los animales, sino que también optimiza la eficiencia y sostenibilidad de la producción lechera.

2.1.1. Definición de Mastitis

La mastitis bovina es una infección bacteriana inflamatoria dolorosa de la glándula mamaria en las vacas, causada por bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, que afecta la calidad y cantidad de la leche producida (Bain, 2023). Según (Sánchez Herencia & Mamani, 2022), es una de las enfermedades más importantes en la industria láctea debido a su impacto económico. Esta condición puede ser causada por una variedad de patógenos.

Figura 2

Infección bacteriana de la Glándula Mamaria



Como se observa en la Figura 2 obtenida de (Editores, 2021), la inflamación en la mastitis es una respuesta del sistema inmunológico del animal a la infección, puede llevar a

una disminución significativa en la producción y calidad de la leche, así como a problemas reproductivos y mayor descarte de animales (Bain, 2023). Es una enfermedad multifactorial, influenciada por factores ambientales, genéticos y de manejo. Entre los factores de riesgo se incluyen el tipo de ordeño, la higiene durante el proceso de ordeño, y las condiciones de alojamiento de los animales (Sánchez Herencia & Mamani, 2022).

Esta enfermedad no solo afecta la producción de leche, sino que también aumenta los costos de producción debido a la necesidad de tratamientos veterinarios y la reducción de la vida útil de las vacas afectadas (Morales-Ubaldo et al., 2023). La prevención y control de la mastitis requiere un enfoque integral que incluya buenas prácticas de manejo, adecuada higiene y, en algunos casos, el uso de tratamientos antibióticos (Algharib et al., 2024).

2.1.2. Tipos de Mastitis

Esta enfermedad puede manifestarse en dos formas: clínica y subclínica.

- **Mastitis Clínica**

La mastitis se caracteriza por inflamación de la glándula mamaria y cambios en la calidad de la leche, con síntomas como hinchazón, enrojecimiento, calor, dolor y presencia de grumos, pus o sangre en la leche (Nigussie et al., 2023). Según (Narváez Semanate, Daza Bolaños, Valencia Hoyos, Hurtado Garzón, & Acosta Jurado, 2022) se identifica fácilmente por cambios visibles en la ubre y la leche, afectando significativamente la cantidad y calidad de la producción lechera. El tratamiento generalmente involucra el uso de antibióticos, aunque la elección del tratamiento específico puede depender del patógeno identificado y de su resistencia a los medicamentos (Algharib et al., 2024).

Las estrategias de prevención incluyen la implementación de prácticas de ordeño higiénicas, el mantenimiento de un ambiente limpio y seco para las vacas, y el monitoreo regular de la salud de la ubre mediante pruebas como el California Mastitis Test (CMT) (Nigussie et al., 2023).

- Mastitis Subclínica

(Narváez Semanate, Daza Bolaños, Valencia Hoyos, Hurtado Garzón, & Acosta Jurado, 2022) afirma que es una forma de inflamación de las glándulas mamarias en el ganado que no presenta síntomas evidentes como enrojecimiento, hinchazón o dolor, lo que la diferencia de la mastitis clínica, donde estos signos son notorios.

Para detectar, además de la prueba CMT, se pueden emplear técnicas avanzadas como la genómica y la proteómica, que permiten una identificación temprana de patógenos específicos, mejorando así las medidas preventivas y el manejo de la salud del ganado (Bain, 2023). El tratamiento de la mastitis clínica, con síntomas graves, requiere antibióticos e intervenciones inmediatas (Sánchez Herencia & Mamani, 2022).

2.1.3. Etiología de la Mastitis

La etiología de la mastitis bovina se refiere al estudio de las causas y los orígenes de esta enfermedad la cual es principalmente causada por una variedad de patógenos bacterianos, tanto ambientales como contagiosos (Shoaib et al., 2021).

2.1.3.1. Agentes Causantes

Según (Sánchez Herencia & Mamani, 2022) se clasifican principalmente en patógenos contagiosos y ambientales. Entre los patógenos contagiosos destacan *Staphylococcus aureus*,

Streptococcus agalactiae y *Mycoplasma* spp., que se transmiten principalmente durante el proceso de ordeño y cuyo reservorio principal es la ubre infectada. Por otro lado, según (Shoaib et al., 2021) los patógenos ambientales, como *Escherichia coli*, *Streptococcus uberis*, y diversas bacterias coliformes, provienen del entorno del animal, especialmente del suelo y los residuos, y pueden infectar la ubre en cualquier momento.

Estos agentes causales son responsables de las manifestaciones clínicas de la mastitis, que incluyen inflamación, cambios en la calidad y cantidad de leche, y en algunos casos, afectaciones en el estado general del animal.

2.1.3.2. Factores de Riesgo

La mala higiene es crucial, ya que un ambiente sucio favorece la proliferación de patógenos que pueden infectar el tejido mamario. Las condiciones de ordeño también son determinantes; prácticas inadecuadas pueden dañar los pezones y facilitar la entrada de bacterias (Sánchez Herencia & Mamani, 2022). La genética del animal es otro factor relevante, ya que algunas vacas tienen una mayor predisposición genética a las infecciones mamarias (Morales-Ubaldo et al., 2023).

2.1.4. Impacto Económico y en la Producción Lechera

Especialmente en su forma subclínica, causa pérdidas económicas cuantiosas debido a la disminución en la producción de leche y la reducción de su calidad higiénica y nutricional (Pena & Rita, 2019). Las medidas de control de la mastitis, como el tratamiento antibiótico adecuado y la implementación de buenas prácticas de manejo sanitario, son esenciales para minimizar estas pérdidas. Sin embargo, según (Nigussie et al., 2023) un tratamiento incorrecto puede ser casi tan perjudicial como no tratar la enfermedad, llevando a pérdidas significativas

en la producción y al aumento de casos crónicos que resultan en el descarte de animales. La prevención y el control efectivo de la mastitis no solo mejoran la rentabilidad del productor al incrementar la producción de leche de calidad, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y competitividad del sector lechero (Pena & Rita, 2019).

2.2. Internet de las Cosas (IoT) en la Ganadería

2.2.1. Sistemas IoT

Los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) se han convertido en una tecnología clave en la era moderna, permitiendo la interconexión de diversos dispositivos físicos para recopilar, analizar y compartir datos en tiempo real (Mohd Aman et al., 2020). Según (Swamy & Kota, 2020), se espera que el número de dispositivos conectados a Internet alcance los 75.44 mil millones para 2025, generando aproximadamente 80 Zettabytes de datos.

La arquitectura de IoT no es estándar y varía según las aplicaciones y tecnologías empleadas. Generalmente, se estructura en capas que incluyen dispositivos, redes y aplicaciones, permitiendo la interoperabilidad y la entrega de datos de manera segura y eficiente (Ding et al., 2020). Las arquitecturas comunes incluyen modelos de tres, cuatro y cinco capas, donde cada capa cumple funciones específicas, desde la recolección de datos en la capa de percepción hasta la gestión de servicios en la capa de aplicación. Esta estructura modular facilita la escalabilidad y la integración de nuevas tecnologías en los sistemas IoT existentes.

(Swamy & Kota, 2020) afirma que los dispositivos IoT utilizan una variedad de estándares de comunicación, tanto de corto como de largo alcance. Tecnologías como Bluetooth, ZigBee, WiFi y LiFi se emplean para corto alcance, mientras que LoRaWAN, NB-

IoT y 5G son comunes para largo alcance. Según (Ding et al., 2020) cada tecnología tiene ventajas específicas según los requisitos de la aplicación, como la tasa de datos, la latencia, la cobertura y la eficiencia energética.

La seguridad y privacidad en IoT son aspectos críticos debido a la naturaleza sensible de los datos manejados y la amplia superficie de ataque que presentan estos sistemas (Swamy & Kota, 2020). Según (Mohd Aman et al., 2020) las arquitecturas de IoT deben incorporar mecanismos de protección en todas las capas para prevenir accesos no autorizados y garantizar la integridad y confidencialidad de los datos.

2.2.2. Aplicaciones de IoT en la Agricultura y Ganadería

IoT está revolucionando el sector agropecuario, introduciendo nuevas tecnologías que permiten a los agricultores y ganaderos optimizar sus operaciones, aumentar la productividad y mejorar la rentabilidad (Vique et al., 2020). A través de la implementación de sensores, dispositivos inteligentes y sistemas de análisis de datos, el IoT ofrece una amplia gama de aplicaciones que transforman la forma en que se gestionan las explotaciones agrícolas y ganaderas (K et al., 2023).

(Vique et al., 2020) propone un sistema de detección de mastitis basado en la medición de la conductividad eléctrica de la leche de cada cuarto durante el ordeño. Cada unidad de medición (MU) mide la conductividad y temperatura de la leche y envía los datos a una unidad central (CU) que analiza las series de tiempo para determinar si la vaca tiene mastitis.

Otra aplicación de IoT en ganadería es el monitoreo en tiempo real de la temperatura ruminal utilizando sensores ingeribles con comunicación inalámbrica (Khan et al., 2024). Esto

permite al administrador de la granja recibir alertas de mastitis cuando se detecta un aumento en la temperatura corporal de una vaca. Si bien este enfoque requiere un sensor sofisticado y costoso por cada vaca, demuestra el potencial de IoT para mejorar la detección temprana de enfermedades.

2.2.3. Beneficios del IoT en la Gestión Ganadera

La gestión ganadera ha experimentado una revolución con la introducción del Internet de las Cosas (IoT), especialmente en el ámbito de la ganadería bovina (Vique et al., 2020). Uno de los principales beneficios es la mejora en la salud del ganado a través de sistemas avanzados de detección de enfermedades. Por ejemplo, según (Feng et al., 2022) la detección de mastitis en vacas lecheras, una infección que afecta la producción y calidad de la leche, se ha optimizado significativamente. Tradicionalmente, la detección de mastitis requería laboratorios especializados para análisis de células somáticas, lo cual es costoso y consume tiempo. Con IoT, sensores integrados en las máquinas ordeñadoras pueden medir la conductividad eléctrica de la leche en tiempo real, proporcionando alertas tempranas de infecciones con mayor eficiencia y menor costo (Vique et al., 2020).

Otro beneficio del IoT en la gestión ganadera es la optimización del rendimiento y la productividad del rebaño. Sensores pueden monitorear continuamente parámetros como la ingesta de alimentos, el comportamiento de pastoreo, la actividad física y el estado de salud de cada animal (Khan et al., 2024). Estos datos, recopilados y analizados, permiten a los ganaderos tomar decisiones informadas para mejorar la dieta, ajustar las rutinas de ejercicio y detectar problemas de salud antes de que se agraven. Este nivel de monitoreo y optimización no solo mejora la productividad del rebaño, sino que también asegura un mejor bienestar animal.

Según (K et al., 2023) las tecnologías IoT optimizan la gestión de recursos en explotaciones ganaderas mediante sistemas de riego inteligentes y monitoreo del suelo y clima. Esto reduce el desperdicio de agua, mejora la eficiencia, planifica mejor las rotaciones de pastos y siembras, y aumenta la rentabilidad.

IoT ofrece una trazabilidad completa de los productos ganaderos desde la granja hasta el consumidor final. Cada etapa del ciclo de vida del ganado, desde el nacimiento hasta la producción de carne o leche, puede ser documentada y verificada (Feng et al., 2022). Esto no solo mejora la transparencia y la confianza del consumidor, sino que también cumple con regulaciones y estándares de calidad más estrictos (Vique et al., 2020). En caso de brotes de enfermedades o problemas de calidad, la trazabilidad permite una respuesta rápida y eficiente, minimizando el impacto negativo y protegiendo tanto la salud pública como la reputación del productor (Feng et al., 2022).

2.2.4. Retos y Desafíos de la Implementación de IoT en Áreas Rurales

La implementación del Internet de las Cosas en áreas rurales presenta una serie de retos y desafíos significativos que deben ser abordados para aprovechar al máximo sus beneficios. Según (Vique et al., 2020) Uno de los principales desafíos es la infraestructura de conectividad. Las áreas rurales a menudo carecen de una infraestructura de telecomunicaciones robusta, lo que dificulta la implementación de tecnologías IoT que dependen de una conectividad constante y de alta velocidad. Según (K et al., 2023) la falta de cobertura de red adecuada puede limitar la capacidad de los dispositivos IoT para transmitir datos en tiempo real, lo que es crucial para aplicaciones como la detección de enfermedades en el ganado o la gestión de recursos agrícolas.

2.3. Tecnologías y Sensores en la Detección de Mastitis

En esta sección, se explorarán los diferentes tipos de sensores utilizados, como los de conductividad eléctrica y temperatura, su funcionamiento, y cómo interactúan con los sistemas IoT para proporcionar datos en tiempo real. Se discutirá la importancia de la validación y calibración de estos sensores para asegurar la exactitud y fiabilidad de las mediciones, contribuyendo así a la detección temprana y efectiva de la mastitis.

2.4. Conductividad Eléctrica (CE) y su Relación con la Mastitis

Un sensor de conductividad eléctrica mide la capacidad de un líquido para conducir electricidad, basada en la presencia de iones disueltos. En la detección de mastitis bovina, se observa un aumento en la conductividad debido a mayores concentraciones de iones como sodio y cloruro (Tungol et al., 2020). Estos sensores también son útiles para detectar la adulteración de la leche. Mediante un sensor capacitivo, se mide la variación en la capacitancia causada por adulterantes como agua, suero y urea. La capacitancia cambia según la constante dieléctrica de la muestra (Salmaz et al., 2024).

Este tipo de sensor es útil porque la mastitis causa un aumento en la concentración de sales y iones en la leche, elevando su conductividad eléctrica. Según (Salmaz et al., 2024) al medir la conductividad de la leche, se puede identificar la presencia de mastitis. (Vique et al., 2020) Afirma que el sensor detecta mastitis midiendo cambios iónicos en la leche de cada cuarto de la ubre durante el ordeño.

2.4.1. Cambios en la Conductividad Eléctrica debido a la Mastitis

En presencia de mastitis, la leche muestra un aumento en la conductividad eléctrica debido a un incremento en la concentración de iones como el sodio y el cloruro, causado por la inflamación y la permeabilidad aumentada de los tejidos mamarios (Vique et al., 2020).

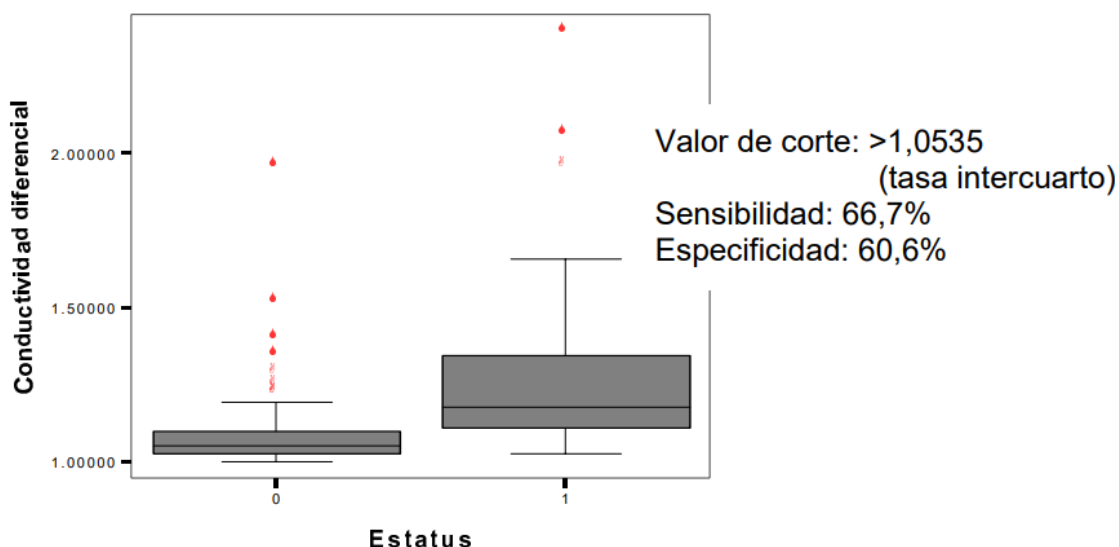
La conductividad eléctrica de la leche aumenta debido a la inflamación de la glándula mamaria, lo que causa un aumento en la concentración de iones como sodio y cloro. Este método permite identificar cambios en la composición iónica de la leche que son indicativos de infecciones intramamarias (IIM) (Elizalde et al., 2009). Según (Tungol et al., 2020), durante la mastitis, los iones de sodio (Na^+) y cloro (Cl^-) en la leche aumentan debido a la respuesta del sistema inmunitario del bovino, que secreta estas células para estabilizar la presión osmótica en la ubre, alterando así la composición de la leche.

2.4.2. Estudios de Caso y Resultados

En la Figura 3 se muestra la evaluación de la conductividad eléctrica diferencial como técnica diagnóstica para detectar mastitis subclínica en vacas. En particular, muestra un diagrama de los resultados de la CE, comparando los valores entre muestras de leche sin mastitis (estatus 0) y con mastitis (estatus 1).

Figura 3

Diagrama de Caja de los Resultados de la CE Diferencial para el Diagnóstico de Mastitis Subclínica



Nota: Según la Figura 3 obtenida de (Elizalde et al., 2009), el valor de corte para la tasa intercuarto de conductividad diferencial es mayor a 1,0535, con una sensibilidad del 66,7% y una especificidad del 60,6%. Esto significa que, utilizando este valor de corte, la técnica tiene una capacidad de identificar correctamente el 66,7% de las muestras con mastitis (sensibilidad) y el 60,6% de las muestras sin mastitis. Los puntos rojos representan los valores atípicos que se encuentran fuera del rango esperado de la distribución.

2.5. Temperatura de la Leche como Indicador de Mastitis

La temperatura de la leche es un indicador crucial en la detección de la mastitis. Cuando una vaca sufre de mastitis, una de las respuestas fisiológicas del organismo es el aumento de la temperatura de la leche en los cuartos afectados (Tungol et al., 2020). Según (Vique et al., 2020) este incremento se debe a la inflamación y al incremento del flujo sanguíneo en la zona infectada, lo cual transfiere calor adicional a la leche.

2.5.1. Importancia de la Temperatura en la Calidad de la Leche

La mastitis afecta tanto la cantidad como la calidad de la leche producida, incrementando los costos de producción y reduciendo los ingresos de los productores lácteos. Detectar mastitis de manera temprana y eficiente es crucial para minimizar las pérdidas económicas y mejorar la salud del rebaño (Casares, 2009).

La detección de mastitis a través de los cambios de temperatura se basa en el hecho de que una vaca infectada con mastitis experimenta un aumento en la temperatura de su leche debido a la inflamación de los tejidos mamarios. Esta inflamación provoca un incremento del flujo sanguíneo hacia la zona afectada, lo que a su vez eleva la temperatura de la leche producida en ese cuarto mamario. Técnicamente, este cambio de temperatura puede ser detectado mediante sensores térmicos integrados en los sistemas de ordeño, los cuales registran continuamente la temperatura de la leche durante el proceso de ordeño.

Los datos obtenidos de la temperatura de la leche deben ser procesados y analizados en tiempo real para identificar patrones indicativos de mastitis (Vique et al., 2020). Por ejemplo, un aumento sostenido de la temperatura en un cuarto específico puede desencadenar una alerta para el productor, indicando la necesidad de una revisión más detallada y posiblemente un tratamiento (Tungol et al., 2020). La integración de estos sistemas de detección con tecnologías de procesamiento de datos y algoritmos de aprendizaje automático puede mejorar la precisión de las detecciones y minimizar los falsos positivos y negativos, optimizando los recursos y esfuerzos en el tratamiento de la mastitis (Casares, 2009).

Según (Salmaz et al., 2024) el sistema de detección de mastitis basado en la temperatura de la leche debe estar diseñado para operar de manera continua y en tiempo real, sin interferir

con el proceso normal de ordeño. La precisión de los sensores térmicos y su correcta calibración son esenciales para garantizar que las mediciones de temperatura reflejen con exactitud el estado de salud de la vaca. (Casares, 2009) Afirma que es importante considerar que otros factores, como la temperatura ambiente y el manejo del equipo de ordeño, pueden influir en las mediciones, por lo que es necesario implementar métodos de compensación y filtrado de datos para obtener resultados confiables.

2.5.2. Variaciones de Temperatura en Presencia de Mastitis

El cambio en la temperatura de la leche es un fenómeno que puede ser cuantificado con precisión. (Salmaz et al., 2024) Afirma que, en condiciones normales, la temperatura de la leche recién ordeñada está alrededor de 37°C. Sin embargo, en casos de mastitis, esta temperatura puede incrementarse en aproximadamente 1 a 2°C. Este aumento, aunque pequeño, es significativo y detectable mediante dispositivos adecuados. Según (Tungol et al., 2020), la implementación de sensores térmicos en el sistema de ordeño permite monitorear continuamente la temperatura de la leche y detectar de manera temprana los casos de mastitis.

2.6. Implementación del Sistema de Monitoreo

En el presente trabajo de tesis se plantea la implementación de un sistema de monitoreo avanzado, orientado a optimizar los procesos de control y supervisión dentro de la organización. Este sistema permitirá la recolección y análisis en tiempo real de datos críticos, facilitando la toma de decisiones informadas y oportunas. La metodología propuesta abarca desde la identificación de necesidades específicas hasta el diseño y desarrollo del sistema, asegurando su integración con las infraestructuras tecnológicas existentes. Se espera que esta implementación no solo mejore la eficiencia operativa, sino que también brinde una mayor visibilidad y control sobre las diversas actividades y procesos.

La implementación del sistema de monitoreo constituye una respuesta a las demandas crecientes de mayor precisión y rapidez en la gestión de información. A través de la utilización de tecnologías avanzadas como sensores inteligentes, redes de comunicación y plataformas de análisis de datos, el sistema ofrecerá capacidades robustas para el seguimiento continuo y detallado de parámetros críticos. Este enfoque permitirá detectar anomalías y tendencias de manera proactiva, optimizando la respuesta ante posibles incidencias. La integración de este sistema con herramientas de reporte y visualización facilitará la interpretación de los datos, impulsando mejoras continuas en los procesos y contribuyendo a una gestión más efectiva y eficiente de los recursos.

2.7. Casos de Estudio en la Provincia del Carchi

En la Provincia del Carchi, la mastitis bovina en el cantón Montúfar tiene una prevalencia del 35,71%, con agentes causales principales como *Staphylococcus aureus*, enterobacterias y *Escherichia coli*. Factores de riesgo incluyen el ordeño mecánico y caminos húmedos (Ibarra et al., 2022). Por otro lado, (Pérez-Lomas, 2019) Afirma que, en la Provincia del Carchi, se evaluó la calidad higiénico-sanitaria de la leche mediante pruebas de lactofermentación en centros de acopio, demostrando correlación entre la coagulación del coágulo y los conteos de bacterias totales y células somáticas.

La evaluación mostró que el 43.3% de las muestras clasificaron como leche de primera calidad, mientras el resto presentaron diversas deficiencias microbiológicas, destacando la prueba de lactofermentación como método eficaz y económico para autoevaluar la calidad de la leche (Pérez-Lomas, 2019). La evaluación detectó mastitis bovina mediante altos conteos de

células somáticas, revelando deficiencias en la calidad de la leche y destacando la prueba de lactofermentación como método efectivo para identificar infecciones de la ubre.

2.7.1. Metodología de Implementación en Campo

En el caso de estudio usado por (Ibarra et al., 2022) la metodología utilizada consistió en aplicar la prueba de California Mastitis Test (CMT) a 386 vacas de 70 unidades productivas, tomando muestras de leche para cultivos bacteriológicos y utilizando cuestionarios estructurados para identificar factores de riesgo. A diferencia del trabajo realizado por (Pérez-Lomas, 2019) en el cual se tomaron 616 muestras de seis asociaciones, evaluando la calidad microbiológica (CBT y CCS) y utilizando pruebas de reductasa extendida (PRE) y lactofermentación (LF) para identificar los tipos de coágulos formados.

Comparando estos métodos con una metodología basada en el uso de sensores en un entorno de Internet de las Cosas (IoT), se pueden destacar varias diferencias clave:

Los sensores IoT permiten una monitorización continua y en tiempo real de las vacas, recogiendo datos sobre la calidad de la leche, la salud del animal y otros indicadores clave de manera constante. Esto contrasta con los métodos tradicionales que dependen de la recolección manual y periódica de muestras y la realización de pruebas en laboratorio.

La tecnología IoT puede proporcionar datos más precisos y en mayor volumen, facilitando el análisis de tendencias y patrones que podrían no ser detectables con métodos de muestreo intermitentes. Los sensores pueden detectar cambios sutiles y tempranos en la calidad de la leche o el comportamiento de las vacas, permitiendo intervenciones más rápidas.

Integración y Análisis de Datos: Con el IoT, los datos recolectados pueden integrarse y analizarse automáticamente utilizando algoritmos avanzados y técnicas de machine learning,

lo cual podría mejorar significativamente la detección temprana de mastitis y la identificación de factores de riesgo. Esto es más avanzado comparado con los métodos tradicionales que requieren análisis manual y pueden estar sujetos a errores humanos.

Reducción de la Carga Laboral: La implementación de sensores reduce la necesidad de recolección manual de datos y pruebas, liberando tiempo para que los productores se concentren en otras actividades críticas. Los métodos tradicionales implican un esfuerzo considerable en la recolección y análisis de muestras.

2.7.2. Protocolos de Comunicación y Seguridad

Los protocolos de comunicación en IoT son esenciales para la transferencia de datos entre dispositivos y plataformas (K et al., 2023). Según (Ding et al., 2020), estos protocolos se dividen en dos categorías principales: protocolos de acceso a la red y protocolos de transmisión.

2.7.2.1. Protocolos de acceso a la Red

- WiFi: Utilizado para conectar dispositivos en áreas locales con buena cobertura y altas velocidades de datos (Swamy & Kota, 2020).
- Bluetooth: Ideal para comunicaciones de corto alcance y bajo consumo energético, útil en dispositivos portátiles y sensores cercanos (Ding et al., 2020).
- LoraWAN: Diseñado para comunicaciones de largo alcance y bajo consumo, adecuado para monitoreo en áreas rurales (Microscopio.PRO, 2024).

2.7.2.2. Protocolos de Transmisión

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): Un protocolo ligero que utiliza el modelo de publicación-suscripción, ideal para la comunicación eficiente en dispositivos con recursos limitados (Swamy & Kota, 2020).

CoAP (Constrained Application Protocol): Basado en el modelo REST, este protocolo es adecuado para dispositivos con restricciones de energía y ancho de banda (Mohd Aman et al., 2020).

HTTP (Hypertext Transfer Protocol): Aunque menos eficiente que MQTT y CoAP, HTTP es ampliamente compatible y fácil de implementar, utilizado en la comunicación entre dispositivos IoT y servidores web (Microscopio.PRO, 2024).

AMQP (Advanced Message Queuing Protocol): Protocolo de mensajería avanzada que proporciona garantías de entrega y enrutamiento flexible, ideal para aplicaciones que requieren alta fiabilidad (Swamy & Kota, 2020).

2.7.2.3. *Protocolo HTTP*

Es uno de los pilares fundamentales de las comunicaciones en Internet, diseñado originalmente para la transferencia de hipertexto entre servidores y navegadores web. En el contexto de IoT, HTTP es utilizado para la comunicación entre dispositivos y servidores web debido a su compatibilidad universal y facilidad de implementación (Pollard, 2019). Según (Ding, Nemati, Ranaweera, & Choi, 2020), HTTP funciona mediante un modelo cliente-servidor donde el dispositivo IoT, actuando como cliente, envía solicitudes al servidor para almacenar o recuperar datos, permitiendo la integración con servicios en la nube. Aunque ampliamente adoptado, puede no ser ideal para dispositivos con restricciones de recursos debido a su alto consumo de ancho de banda y energía.

HTTP es compatible con múltiples métodos de transferencia de datos, como GET, POST y PUT, lo que lo hace flexible para aplicaciones IoT como la recopilación de datos en tiempo real desde sensores (Swamy & Kota, 2020). Sin embargo, su diseño basado en conexiones individuales incrementa la latencia, lo que puede limitar su uso en aplicaciones que requieren baja latencia y alta eficiencia energética. A pesar de estas limitaciones, HTTP sigue

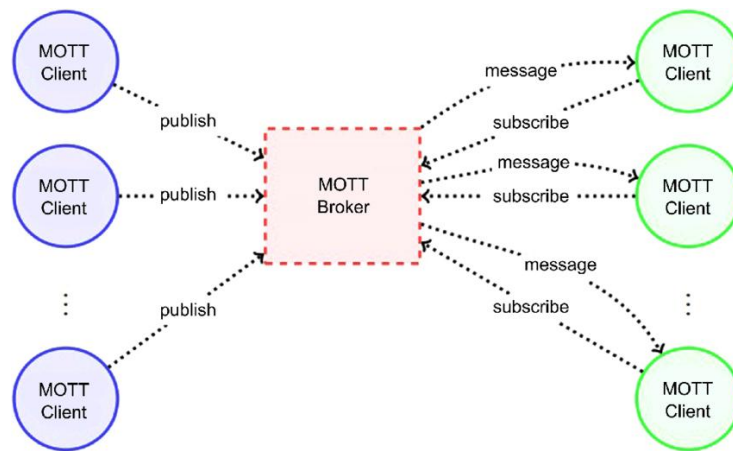
siendo una opción viable para proyectos donde la interoperabilidad y el acceso universal son críticos.

Una de las ventajas clave de es su facilidad para integrarse con servicios web modernos y APIs RESTful, permitiendo que los datos recopilados por sensores conectados a placas IoT sean enviados a plataformas en la nube para análisis y almacenamiento (Microscopio.PRO, 2024). Sin embargo, para optimizar su rendimiento en IoT, se pueden implementar técnicas de compresión de datos y uso de conexiones persistentes, reduciendo así su impacto en el consumo de recursos del dispositivo.

2.7.2.4. *Protocolo MQTT*

Está diseñado específicamente para entornos IoT, destacándose por ser ligero, eficiente y adecuado para dispositivos con recursos limitados. A diferencia de HTTP, MQTT utiliza un modelo de publicación-suscripción, en el cual los dispositivos publican datos en un tema específico, y los clientes suscritos reciben actualizaciones en tiempo real. Esta arquitectura elimina la necesidad de conexiones continuas entre los dispositivos, reduciendo significativamente el consumo de energía y ancho de banda (Wang et al., 2024).

MQTT es especialmente útil para en aplicaciones de monitoreo, ya que permite el envío eficiente de datos desde sensores a servidores centrales o aplicaciones móviles. Según (Živić et al., 2023), su uso en IoT ha crecido debido a su capacidad para operar de manera confiable incluso en redes con alta latencia o conectividad intermitente, características comunes en áreas rurales. Su flexibilidad para gestionar prioridades de mensajes y calidad de servicio lo hace adecuado para aplicaciones críticas como la detección de mastitis.

Figura 4*Modelo del Protocolo MQTT*

Nota: La Figura 4 muestra un modelo de comunicación en el protocolo MQTT, donde clientes publican mensajes a un broker central, que distribuye esos mensajes a otros clientes que se han suscrito a tópicos específicos (S. Aloufi & H. Alhazmi, 2020).

Otra ventaja de MQTT es su enfoque en la seguridad y escalabilidad. Al utilizar el puerto 1883 para conexiones no seguras y el puerto 8883 para conexiones seguras con SSL/TLS, el protocolo garantiza la protección de los datos transmitidos. Esto es esencial en entornos IoT para prevenir accesos no autorizados o la manipulación de datos críticos (Albita et al., 2021). Su implementación permite gestionar múltiples dispositivos conectados a través de un solo broker, lo que facilita la integración y expansión del sistema.

3. Capítulo III: Desarrollo e Implementación del Sistema

El tercer capítulo de este trabajo de titulación aborda una innovadora propuesta para detectar tempranamente la mastitis en el ganado lechero mediante tecnología IoT. Al explorar el proceso de diseño e implementación, se evidencia una cuidadosa selección de componentes, destacando el sensor de conductividad eléctrica que monitorea variaciones en la composición láctea indicativas de esta patología.

La columna vertebral del sistema descansa en una placa de desarrollo IoT, meticulosamente configurada para gestionar el flujo de información. Esta procesa las lecturas de los sensores y las transmite instantáneamente a una plataforma cloud. Los diagramas de conexión, bloques y flujo revelan una arquitectura robusta que integra cada componente en una solución cohesiva.

Se profundiza también en los aspectos prácticos de la implementación. La calibración precisa de los sensores la cual se muestra en el Anexo 2, el establecimiento de comunicaciones inalámbricas fiables y el desarrollo de interfaces accesibles demuestran un enfoque centrado en el usuario final. Cada elemento ha sido considerado para garantizar que el sistema no solo sea técnicamente sólido, sino también práctico y beneficioso para los pequeños productores locales, impactando positivamente en la calidad del producto y su eficacia.

3.1. Análisis de requisitos

En el proceso de desarrollo del presente proyecto, surgen interrogantes clave que guían el diseño secuencial del sistema propuesto. Así, en cada fase de la investigación, se lleva a cabo un análisis exhaustivo del entorno rural de la provincia del Carchi, de los requisitos técnicos y operativos del sistema de monitoreo IoT, y, particularmente, de los actores sociales

involucrados, como los pequeños productores lecheros. Este análisis se enfoca en entender las necesidades específicas de los agricultores, los desafíos del sector ganadero local y las condiciones de conectividad en las zonas rurales, con el fin de asegurar que el sistema propuesto sea viable, accesible y eficaz para los usuarios finales.

3.1.1. Situación Actual

Una base fundamental de este proyecto es el análisis de la situación actual, que permite comprender el estado del problema relacionado con la detección de mastitis en el ganado lechero y, a partir de este diagnóstico, establecer los requisitos necesarios que serán considerados en la fase de diseño e implementación del sistema de monitoreo IoT. En la actualidad, los pequeños productores de leche en la provincia del Carchi enfrentan serias dificultades para detectar de manera temprana la mastitis bovina, lo que lleva a pérdidas económicas significativas debido a la disminución de la calidad y cantidad de la leche. Esta situación es especialmente crítica en zonas rurales, donde el acceso a servicios veterinarios y tecnologías de monitoreo es limitado.

La causa principal de la falta de detección temprana se debe a la dependencia de métodos tradicionales, como la observación visual y las pruebas manuales, que son ineficaces para identificar la mastitis en sus primeras etapas. Es así que la baja cobertura de red en áreas rurales dificulta la implementación de soluciones tecnológicas convencionales. Por lo tanto, es esencial desarrollar un sistema accesible y eficiente que utilice sensores de conductividad eléctrica para monitorear en tiempo real la calidad de la leche, alertando a los ganaderos de manera temprana sobre posibles casos de mastitis. Este sistema no solo mejoraría la salud del ganado, sino que también optimizaría la producción y rentabilidad de las explotaciones lecheras locales, contribuyendo a la sostenibilidad y competitividad del sector agrícola en la región.

En el cantón Montúfar, provincia del Carchi, Ecuador, se realizó un estudio para determinar la prevalencia de la mastitis bovina, sus agentes causales y los factores de riesgo asociados. Según (Ibarra et al., 2022) se aplicó la prueba de California Mastitis Test (CMT) a 386 vacas en producción de 70 Unidades Productivas Agropecuarias (UPAs). La prevalencia de mastitis bovina en el cantón Montúfar fue del 35,71%. El agente causal más frecuente fue *Staphylococcus aureus*, presente en el 100% de las UPAs con casos de mastitis. Le siguieron las enterobacterias (92%), incluyendo *Escherichia coli* (64%). No se detectaron mohos ni levaduras en las muestras analizadas.

Los métodos tradicionales para detectar la mastitis a menudo son ineficaces para la identificación temprana, lo que lleva a retrasos en el tratamiento y una mayor propagación de la enfermedad. Los pequeños agricultores de la región enfrentan dificultades para acceder a servicios veterinarios y recursos para el análisis de la leche.

Tabla 1

Prevalencia de Mastitis Bovina en la Provincia del Carchi

Finca	Cantón	Vacas en CMT	CMT	Prevalencia	
		Ordeño	Negativo	Positivo	de Mastitis
La Joya	Montúfar	50 (17%)	38 (76%)	12 (24%)	24%
La Magdalena	Montúfar	26 (9%)	18 (69%)	8 (31%)	31%
El Descanso	Tulcán	70 (23%)	47 (67%)	23 (33%)	33%
El Guanto	Tulcán	25 (8%)	17 (68%)	8 (32%)	32%
El Peñal	Bolívar	27 (9%)	18 (67%)	9 (33%)	33%
La Escondida	Mira	28 (9%)	17 (61%)	11 (39%)	39%

El Encanto	Espejo	30 (10%)	21 (70%)	9 (30%)	30%
Los Arenales	Huaca	45 (15%)	30 (67%)	15 (33%)	33%
Total		301 (100%)	206	95	32%

Fuente: (Chamorro López, 2023).

Los datos presentados en la Tabla 1 muestran la prevalencia de mastitis bovina en la provincia del Carchi, con un total de 301 vacas en ordeño evaluadas en 8 fincas. De estas, el 32% presentó resultados positivos a la prueba CMT, equivalente a 95 casos, mientras que el 68% (206 casos) resultaron negativos. Las fincas con mayor prevalencia de mastitis fueron "La Escondida" (39%), "El Descanso" (33%), "El Peñal" (33%) y "Los Arenales" (33%), superando la prevalencia general calculada. Este panorama evidencia una distribución heterogénea del problema, destacando la necesidad de implementar medidas de prevención y control más estrictas, especialmente en las fincas con prevalencia elevada, para mitigar el impacto en la productividad y la salud animal.

3.1.2. Descripción general del sistema

En este apartado se describe la organización y construcción del sistema propuesto para la detección temprana de mastitis en vacas lecheras mediante tecnología IoT. Este sistema tiene como objetivo monitorear parámetros críticos de la leche, como la conductividad eléctrica, a través de sensores especializados. Los datos recolectados se transmitirán en tiempo real a una plataforma en la nube, donde serán procesados mediante algoritmos para identificar patrones indicativos de mastitis. Este enfoque permite generar alertas inmediatas para los ganaderos, facilitando intervenciones rápidas y reduciendo el impacto negativo en la producción y calidad de la leche.

El sistema utilizará una red de comunicación basada en WiFi, asegurando un alcance efectivo incluso en áreas rurales con conectividad limitada. Los sensores serán integrados en una placa de desarrollo IoT que procesará los datos localmente y los enviará a la nube. En caso de detección de anomalías, los ganaderos podrán monitorear el estado de la leche permitiendo una toma de decisiones oportuna para mitigar riesgos y garantizar la calidad del producto final.

3.1.3. Requerimientos

A partir del análisis detallado en el apartado anterior, se han identificado los datos necesarios para definir los requerimientos operativos, de usuario, del sistema y de la arquitectura, esenciales para el desarrollo del prototipo. Estos requerimientos garantizarán la funcionalidad y eficiencia del sistema, asegurando una integración adecuada con los equipos de ordeño y la capacidad de generar alertas precisas en tiempo real para los ganaderos.

3.1.3.1. Nomenclatura de los requerimientos

Considerando los diversos requisitos del sistema, se han definido abreviaturas, detalladas en la Tabla 2, para optimizar la gestión de los datos del proyecto y facilitar su identificación en el resto del documento.

Tabla 2

Nomenclatura de requerimientos

Requerimiento	Abreviatura
Componentes	CMTS
Sistema	SIST
Arquitectura	ARQT

Los requerimientos que se establecerán a continuación se clasificarán mediante las siguientes prioridades:

- ALTA
- MEDIA
- BAJA

Las prioridades en los requerimientos indican la criticidad de cada aspecto del sistema: ALTA significa esencial para el funcionamiento o éxito del proyecto; MEDIA implica importante pero no crítico, pudiendo abordarse después de los elementos de alta prioridad; BAJA se refiere a elementos deseables, no imprescindibles.

3.1.3.2. *Requerimientos de los Componentes*

Para satisfacer las necesidades del sistema, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de los requerimientos, lo que permitirá seleccionar de manera adecuada el hardware y software necesarios para este proyecto.

Los requerimientos identificados son esenciales para iniciar el desarrollo del sistema, ya que reflejan las necesidades de los componentes en el proyecto, quienes están directamente relacionados con la implementación y uso del sistema. De este modo, en la Tabla 3 se asegura el cumplimiento de los objetivos establecidos. Para la construcción del sistema, es indispensable considerar los requerimientos de hardware, software y arquitectura, garantizando que estos elementos trabajen en conjunto para alcanzar una integración eficiente y funcional.

Tabla 3

Requerimientos del Prototipo

Nomenclatura	Requerimiento	Prioridad
---------------------	----------------------	------------------

CMTS1	El sensor de CE debe estar correctamente calibrado para lecturas precisas.	ALTA
CMTS2	La placa Heltec 32 V3 debe estar conectada a una fuente de alimentación estable para asegurar su funcionamiento continuo.	ALTA
CMTS3	La pantalla OLED de la placa Heltec debe mostrar los resultados del análisis indicando si hay presencia de mastitis.	ALTA
CMTS4	La plataforma web debe permitir la visualización clara y comprensible de los datos recolectados por el sensor.	MEDIA
CMTS5	El sensor debe ser limpiado tras cada uso para estabilizar sus mediciones y evitar errores.	MEDIA
CMTS6	El sistema debe contar con conectividad WiFi para subir los datos recolectados a una plataforma web en tiempo real.	ALTA
	El sistema debe procesar y enviar alertas automáticas en	ALTA

caso de detectar indicios de
mastitis en alguna muestra.

3.1.3.3. *Requerimientos del Sistema*

Los requerimientos del sistema establecen las funciones y limitaciones que este deberá cumplir, definiendo así el alcance de sus capacidades. Estos requerimientos se determinan a partir del problema planteado previamente, asegurando que estén alineados con las necesidades y expectativas de los usuarios finales. En la Tabla 4 se detallan las funciones esenciales que realizará el sistema de detección de mastitis, incluyendo la integración del sensor de CE y la placa Heltec 32 V3, así como la transmisión y visualización de los datos en una plataforma. En el primer requerimiento de la tabla se designó como prioridad ALTA debido a que una fuente de alimentación estable de 9V es esencial para garantizar el funcionamiento continuo y confiable del nodo recolector, evitando interrupciones en la recolección de datos críticos para la detección de mastitis en tiempo real.

Tabla 4

Requerimientos del Sistema

Nomenclatura	Requerimiento	Prioridad
SIST1	El nodo recolector de datos debe estar conectado a una fuente de alimentación estable de 3 a 5 V.	ALTA
SIST2	Es necesario contar con conexión activa a internet las 24 horas para la transmisión de datos.	BAJA

SIST3	El sistema debe estar ubicado en un lugar estratégico que no interfiera con el proceso de ordeño.	MEDIA
SIST4	El material de la carcasa del nodo recolector debe protegerlo contra humedad y altas temperaturas.	ALTA
SIST5	El sensor de conductividad eléctrica debe estar correctamente colocado en la muestra para garantizar lecturas precisas.	ALTA
SIST6	Los componentes del sistema deben ser fácilmente desmontables para mantenimiento y limpieza.	MEDIA
SIST7	El monitoreo de los datos debe ser continuo y en tiempo real para asegurar la detección temprana de mastitis.	MEDIA

3.1.3.4. *Requerimientos de Arquitectura*

En esta sección se detallan los requerimientos de los componentes que integran el sistema de detección de mastitis, incluyendo tanto el software como el hardware. Estos se

especifican en la Tabla 5. Un análisis adecuado de estos requerimientos es fundamental para seleccionar de manera precisa los materiales y herramientas necesarias para la implementación eficiente del sistema, asegurando su funcionalidad y rendimiento óptimos.

Tabla 5

Requerimientos de la Arquitectura

Nomenclatura	Requerimiento	Prioridad
ARQT1	Lenguaje de programación compatible con la placa Heltec 32 V3 como Arduino IDE.	ALTA
ARQT2	La placa Heltec debe disponer de entradas analógicas para conectar el sensor Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor/Meter V2.	ALTA
ARQT3	La conexión inalámbrica debe ser estable para transmitir datos a la plataforma web.	ALTA
ARQT4	Capacidad de transmisión de datos a través de WiFi.	ALTA
ARQT5	La placa debe contar con una pantalla OLED para mostrar en tiempo real si existe presencia de mastitis.	ALTA

ARQT6	La ubicación del nodo recolector debe garantizar lecturas precisas y un entorno protegido contra condiciones adversas.	MEDIA
ARQT7	El sistema embebido debe ser compatible con el sensor y la transmisión de datos a la nube.	ALTA
ARQT8	Los sensores deben representar valores numéricos exactos y confiables.	ALTA
ARQT9	La placa debe ser capaz de procesar los datos de los sensores y generar alertas en tiempo real.	ALTA
ARQT10	Compatibilidad con herramientas de código abierto para facilitar la programación.	ALTA
ARQT11	Disponibilidad de librerías para el sensor y la placa de desarrollo.	ALTA
ARQT12	Fácil visualización de los datos en la plataforma web para que los ganaderos puedan interpretarlos sin dificultad.	MEDIA

ARQT13	Fuente de alimentación estable para el funcionamiento continuo del sistema.	ALTA
--------	---	------

3.1.4. Recursos

En este apartado se detallan los recursos esenciales para el desarrollo del sistema. Estos elementos se determinan considerando el análisis previo, asegurando que cada componente necesario esté disponible para la implementación eficiente del prototipo, incluyendo hardware, software y materiales adicionales.

3.1.4.1. Recursos humanos

Los recursos humanos incluyen a todas las personas involucradas en la realización del proyecto de detección de mastitis. Cada uno de ellos se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6

Recursos Humanos

Rol	Recursos Humanos
Tutor	Ing. Mauricio Domínguez Limaico, MSc.
Desarrollador	Sr. Francisco Ger Ortega.
Ganaderos	Propietarios de fincas preestablecidas.

3.1.4.2. *Recursos tecnológicos*

Los recursos tecnológicos son fundamentales para el desarrollo del sistema de detección de mastitis basado en IoT, proporcionando las herramientas necesarias para su implementación. En este caso, se utilizarán software como el IDE de Arduino, plataformas como Ubidots para la visualización de datos, y lenguajes de programación como Python, entre otros. Estos recursos son de código abierto o están disponibles bajo licencias gratuitas, lo que facilita su acceso y utilización en el proyecto.

3.1.5. Elección de Hardware y Software

La selección del hardware y software para el desarrollo del sistema de detección de mastitis se fundamenta en los requerimientos previamente identificados. Para este propósito, se lleva a cabo una comparación detallada de las opciones disponibles, evaluándolas en función de su compatibilidad, funcionalidad y desempeño. Esto permite identificar y seleccionar las herramientas que obtengan la mejor puntuación y se ajusten de manera óptima a las necesidades del proyecto.

3.1.5.1. *Elección de Hardware*

La selección del hardware se lleva a cabo en función de los requerimientos de arquitectura descritos previamente en la Tabla 4. En este caso, se elige la placa Heltec 32 V3 como el nodo central, que será responsable de procesar y transmitir los datos recolectados por el sensor de CE. Esta decisión se detalla en la Tabla 7, asegurando que el hardware seleccionado cumpla con las necesidades específicas del sistema de detección de mastitis.

Tabla 7*Elección del Hardware del Nodo*

Hardware	Requerimientos					Puntuación
	ARQT2	ARQT3	ARQT4	ARQT5	ARQT13	
Heltec 32 (V3)	1	1	1	1	1	5
Esp32	1	1	1	0	1	4
	1 cumple			0 no cumple		

Se selecciona la placa Heltec 32 V3 como nodo receptor debido a sus ventajas sobre una ESP32 estándar. La Heltec cuenta con características adicionales como una pantalla OLED integrada y soporte para comunicación inalámbrica, lo que permite transmitir datos en áreas con conectividad limitada. Estas capacidades la hacen más adecuada para el sistema de detección de mastitis, al garantizar un procesamiento eficiente de datos y una visualización en tiempo real directamente desde la placa.

A continuación, y basándose en la Tabla 8, se seleccionará el sensor de conductividad eléctrica óptimo para el proyecto. Esta elección se realizará mediante una evaluación comparativa de los diferentes sensores disponibles, teniendo en cuenta sus parámetros de funcionamiento.

Tabla 8*Elección del Sensor de Conductividad Eléctrica*

Sensor	Voltaje de Operación	Precio Aproximado (USD)	Características Destacadas	Aplicaciones
DFRobot Gravity: Sensor Analógico de Conductividad Eléctrica (K=1)	3.3V - 5V	50	Fácil integración, alta precisión, rango amplio	Sistemas IoT, monitoreo continuo
Grove – Sensor de Conductividad Eléctrica	3.3V - 5V	40	Conector Grove, interfaz BNC, bajo costo	Sistemas de bajo costo, proyectos educativos
Atlas Scientific: Kit de Sensor de Conductividad Sensorex	3.3V - 5V	150	Sonda de alta precisión, rango amplio, versátil	Aplicaciones profesionales, líquidos variados
CS150TC: Sensor de Conductividad con Compensación de Temperatura	Depende del circuito de interfaz	200	Compensación de temperatura integrada, robusto	Mediciones precisas con cambios de temperatura
Hanna Instruments HI763063: Sonda	Depende del medidor/circuito	180	Sensor de temperatura	Uso portátil, líquidos como leche

de	integrado,
Conductividad/TDS	portátil

El sensor de DFRobot se eligió por su precisión, facilidad de uso, disponibilidad y costo accesible, características críticas para garantizar mediciones confiables y optimizadas en el monitoreo IoT de calidad de leche bovina.

3.1.5.2. Elección de la base de datos

Con base en los requerimientos del sistema, en la Tabla 9 se procederá a elegir la base de datos más adecuada para el sistema. Dicha tabla enumera las diferentes opciones de bases de datos que cumplen con los criterios establecidos.

Tabla 9

Tipos de Bases de Datos

Base de Datos	Tipo	Costo	Soporte para IoT/Dispositivos Móviles	Facilidad de Integración	Ventaja Principal	Desventaja Principal
Firestore	NoSQL	Gratis para uso básico, pago por uso	Excelente	Alta (SDKs disponibles para ESP32)	Facilidad de uso y tiempo real	No ideal para datos complejos o consultas avanzadas
MySQL	Relacional	Gratis (Open Source),	Moderado	Moderada (requiere configuración)	Robustez y amplia comunidad	Requiere configuración

		servicios		middlewa		ión de
		de pago		re)		servidores
		disponib				
		les				
		Gratis				
		(Open			Característi	
		Source),		Moderada	cas	Requiere
PostgreS	Relaciona	servicios	Moderado	(requiere	avanzadas	configurac
QL	l	de pago		middlewa	y soporte	ión de
		disponib		re)	ACID	servidores
		les				
		Gratis				
		(Open		Buena	Flexible y	Mayor
		Source),		(flexible,	adecuado	complejida
MongoD	NoSQL	servicios	Bueno	biblioteca	para datos	d en la
B	(documen	de pago		s	no	configurac
	to)	disponib		disponibl	estructurad	ión inicial
		les		es)	os	
		Gratis				
		(Open		Alta	Optimizado	Menos
		Source),		(diseñado	para series	soporte
Ubidots	NoSQL	servicios	Excelente	para datos	de tiempo y	para datos
	(series de	de pago		de	monitoreo	no
	tiempo)	disponib		sensores)	IoT	temporales
		les				

A continuación, en la Tabla 10 se procede a comparar estas bases de datos con los requerimientos del sistema anteriormente establecidos.

Tabla 10

Elección de la Base de Datos

Base de Datos	Requerimientos			Puntuación
	SIST7	ARQT7	ARQT12	
Firestore				
Realtime Database	1	0	1	2
MySQL	1	0	0	1
PostgreSQL	1	0	0	1
MongoDB	0	1	1	2
Ubidots	1	1	1	3
	1 cumple		0 no cumple	

La mejor opción es Ubidots debido a que está optimizada para manejar series de tiempo, lo cual es ideal para registrar datos de sensores en tiempo real. Su escalabilidad y facilidad de integración con sistemas IoT aseguran un monitoreo eficiente y robusto, alineándose perfectamente con las necesidades de este proyecto.

3.2. Características de los componentes

Como ya se indicó en la anterior sección, se han seleccionado dos sensores específicos integrados en el DFRobot Gravity Analog Electrical Conductivity Sensor/Meter como se

muestra en la Figura 5, los cuales están diseñados para monitorear la calidad de líquidos y resultan ideales para aplicaciones en detección temprana de mastitis en leche bovina.

Figura 5

Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor



Nota: Imagen obtenida de (DFROBOT, 2019).

A continuación, se describen sus características principales y la justificación de su elección.

3.2.1. Sensor de Conductividad Eléctrica

El sensor de conductividad eléctrica mide la capacidad de la leche para conducir electricidad, lo cual está directamente relacionado con la presencia de iones disueltos como sodio y cloruro. Este parámetro es fundamental en la detección de mastitis, ya que un aumento en la conductividad eléctrica indica cambios en la composición iónica de la leche causados por inflamación en la glándula mamaria.

- **Rango de medición:** 0~20 mS/cm.
- **Precisión:** Alta sensibilidad para detectar pequeñas variaciones en la conductividad eléctrica.
- **Conexión:** Compatible con placas de desarrollo IoT como Arduino y Raspberry Pi.

La elección de este sensor responde a su capacidad de entregar datos en tiempo real, lo cual permite analizar cambios sutiles y anticipar posibles infecciones antes de que estas afecten significativamente la calidad de la leche.

3.3. Placa de desarrollo

Para la implementación del sistema de monitoreo basado en IoT, se ha seleccionado la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3) como se muestra en la Figura 7 debido a sus características avanzadas de conectividad, capacidad de procesamiento, y eficiencia energética, las cuales se alinean con los requerimientos del proyecto. Esta placa es ideal para entornos rurales donde la conectividad puede ser limitada, ya que combina comunicación WiFi y LoRa, permitiendo una transmisión de datos eficiente y de largo alcance.

Figura 6

Placa Heltec WiFi LoRa 32 V3



Nota: Imagen obtenida de (Heltec Automation, 2024).

3.3.1. Características Principales

3.3.1.1. *Procesador:*

La placa está equipada con un microcontrolador ESP32, que cuenta con un procesador de doble núcleo y una frecuencia de hasta 240 MHz. Esto le permite

realizar múltiples tareas simultáneamente, como la adquisición y procesamiento de datos de los sensores, así como la transmisión de los mismos a la nube.

3.3.1.2. *Conectividad:*

- **WiFi:** Proporciona conectividad a redes inalámbricas estándar, lo que permite la integración con plataformas en la nube para el almacenamiento y análisis de datos.
- **LoRa:** La tecnología LoRa (Long Range) es ideal para entornos rurales debido a su capacidad para transmitir datos a largas distancias (hasta 10 km en condiciones óptimas) utilizando un consumo energético mínimo. Esta dualidad de conectividad asegura que el sistema funcione incluso en áreas con cobertura WiFi limitada.

3.3.1.3. *Memoria:*

- **RAM:** 520 KB de SRAM, suficiente para manejar operaciones complejas en tiempo real.
- **Flash:** 8 MB de memoria Flash integrada, utilizada para almacenar el firmware del sistema y datos temporales.

3.3.1.4. *Pantalla OLED Integrada:*

La pantalla OLED del dispositivo se encarga de mostrar información en tiempo real sobre el análisis de la conductividad eléctrica (EC) de la leche. A través de esta pantalla, se visualizan mensajes y resultados clave, como el valor de la EC y el estado de la muestra (normal o indicativa de mastitis). La pantalla OLED presenta animaciones de carga mientras el dispositivo se prepara para el análisis, y permite al usuario ver de forma clara y accesible el progreso y los resultados del proceso, mejorando la interacción con el sistema.

3.3.1.5. *Consumo Energético:*

La placa está diseñada para ser energéticamente eficiente, una característica crítica en aplicaciones IoT rurales, donde las fuentes de energía pueden ser limitadas. Es compatible con baterías externas recargables, lo que asegura su operación continua.

3.3.1.6. *Compatibilidad con Periféricos:*

- Posee múltiples pines GPIO (entrada/salida de propósito general) para conectar diversos sensores, actuadores y otros dispositivos periféricos.
- Ofrece interfaces como I2C y UART para la comunicación con el sensor de conductividad eléctrica.

Este módulo ha sido seleccionado debido a su versatilidad y capacidad para operar en entornos donde la conectividad y el acceso a recursos son limitados. La integración de tecnologías WiFi y LoRa proporciona redundancia en la transmisión de datos, garantizando la continuidad del monitoreo incluso en condiciones adversas. Su diseño compacto y robusto facilita su instalación en el entorno ganadero, protegiendo los componentes electrónicos de posibles daños.

3.3.2. Implementación de la placa en el sistema

La placa será el núcleo del sistema, encargándose de adquirir y procesar en tiempo real las mediciones del sensor de conductividad eléctrica. Transmitirá estos datos a una plataforma en la nube utilizando una red WiFi. También procesará la información para detectar anomalías y generar alertas dirigidas a los usuarios, ya sea a través de la plataforma o dispositivos móviles.

Gracias a su diseño avanzado y capacidades de comunicación versátiles, esta placa es esencial para asegurar un monitoreo eficiente y confiable. Su flexibilidad en la transmisión de

datos y en la gestión de alertas la posiciona como una solución clave para garantizar el éxito del sistema propuesto.

3.4. Diseño del Sistema

En esta sección se presenta el desarrollo integral del sistema de monitoreo, basado en los requerimientos previamente definidos. Se explica de manera estructurada su funcionamiento, asegurando así el cumplimiento de los objetivos establecidos.

3.4.1. Modelo de referencia IoT aplicado al sistema de detección de mastitis

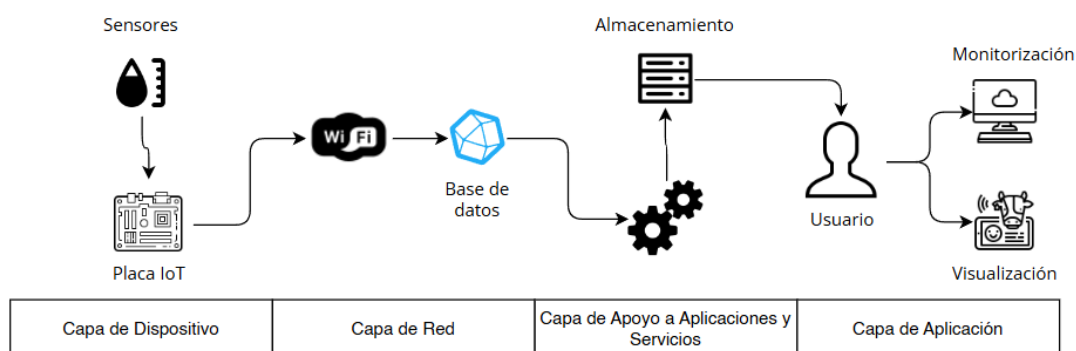
El sistema de detección de mastitis propuesto se alinea con el modelo IoT basado en las cuatro capas establecidas por la ITU. Este modelo organiza la arquitectura del proyecto en las capas de dispositivo, red, apoyo a aplicaciones y servicios, y aplicación, asegurando una integración eficiente de sensores, transmisión de datos, procesamiento en la nube y visualización para el usuario final.

- **Capa de Dispositivo:** Incluye el sensor de conductividad eléctrica que recolecta los datos en tiempo real desde las muestras de leche. La placa Heltec 32 (V3) gestiona estos dispositivos, asegurando la adquisición precisa y el preprocesamiento de datos para detección local.
- **Capa de Red:** Utiliza una conexión WiFi mediante un punto de acceso (AP) con Internet para transmitir los datos hacia una base de datos central. Esto garantiza la comunicación continua entre los sensores y la plataforma de almacenamiento y análisis.
- **Capa de Apoyo a Aplicaciones y Servicios:** A través de la nube, se almacenan y procesan los datos utilizando algoritmos de aprendizaje automático. Esta capa permite analizar patrones y generar alertas tempranas sobre la presencia de mastitis, proporcionando soporte predictivo y preventivo.

- **Capa de Aplicación:** La interfaz de usuario se centra en una pantalla OLED integrada en la placa Heltec 32 (V3) y una plataforma web, que presentan resultados accesibles al ganadero. Los datos procesados permiten monitoreo en tiempo real y decisiones basadas en información confiable sobre la salud del ganado.

Figura 7

Modelo de referencia IoT aplicado al Sistema de Detección de Mastitis



La arquitectura del sistema de monitoreo presentada en la Figura 7 está diseñada para proporcionar un flujo continuo y eficiente de datos desde la recolección hasta la visualización. El sistema de detección de mastitis inicia con la recolección de datos en tiempo real mediante el sensor de conductividad eléctrica conectado a una placa IoT Heltec 32 V3.

Estos sensores analizan las muestras de leche tomadas de cada cuarto de la ubre¹, generando datos que son procesados inicialmente en la placa. A través de una conexión WiFi, los datos se transmiten a un punto de acceso con conexión a Internet, que los redirige hacia una base de datos en la nube.

Una vez almacenados, los datos son procesados mediante algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones asociados a la presencia de mastitis. Los resultados del

¹ "Cuarto de la ubre" se refiere a cada una de las cuatro secciones independientes en las que se divide la glándula mamaria de la vaca, cada una con su propio sistema de producción y drenaje de leche.

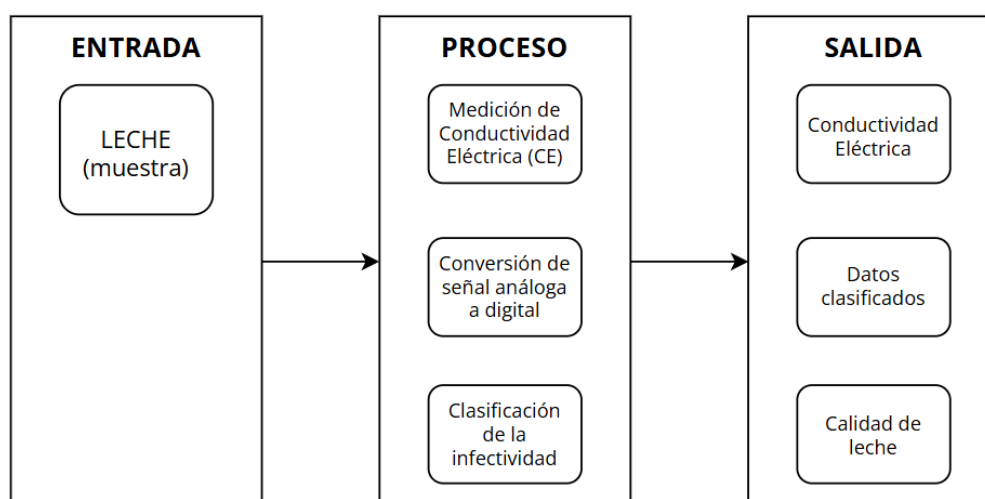
análisis se envían al usuario en forma de alertas en tiempo real y se presentan en una plataforma de monitoreo accesible desde dispositivos remotos.

Los datos también son visualizados en la pantalla OLED de la placa IoT, indicando de manera clara si la muestra analizada presenta indicios de mastitis. Este procedimiento asegura la detección temprana, permite la monitorización constante del estado de salud del ganado y facilita la toma de decisiones informadas para la gestión ganadera, mejorando la calidad de la leche y optimizando los procesos productivos.

3.4.2. Marco Conceptual del Circuito

Figura 8

Marco Conceptual del Circuito



El marco conceptual del circuito mostrado en la Figura 9 detalla el flujo del sistema diseñado para la detección de mastitis, abarcando las etapas desde la entrada de datos hasta la salida procesada.

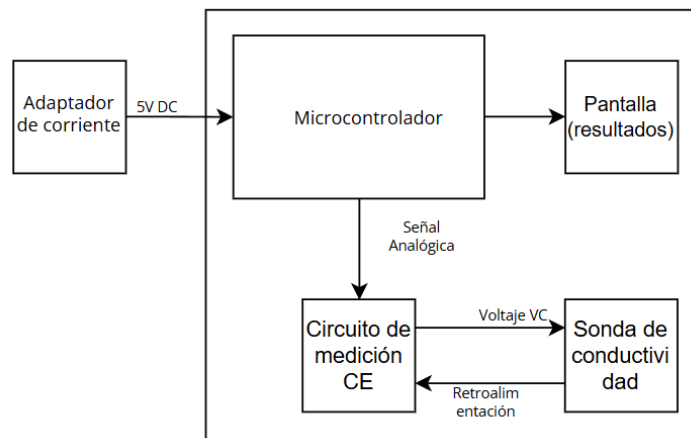
En la etapa inicial de entrada, se identifica como materia prima la leche recolectada directamente de cada cuarto de la ubre de la vaca. Esta entrada es esencial para realizar las

mediciones necesarias que permitan evaluar parámetros críticos como la calidad de la leche y la posible presencia de infecciones.

En la etapa de proceso, se describen tres operaciones fundamentales. Primero, el sensor integrados mide la conductividad eléctrica (CE), ya que estas propiedades son indicadores clave para la detección de mastitis. Los datos analógicos obtenidos se convierten a señales digitales mediante un sistema de conversión, lo que permite que la información sea procesada por la placa IoT. Luego, un sistema de clasificación analiza los valores medidos para determinar el estado de infectividad de la muestra, utilizando umbrales previamente configurados que identifican cambios en los parámetros característicos de la mastitis.

En la etapa de salida, los resultados procesados se presentan de manera clara y precisa. Se genera información sobre la conductividad eléctrica, un indicador directo de los niveles de iones en la leche, y se clasifican los datos obtenidos según el estado de calidad de la muestra. El sistema arroja resultados sobre la calidad de la leche, indicando si esta es apta para consumo o si presenta señales de infección relacionadas con mastitis. Estos datos son útiles para el ganadero, ya que facilitan la toma de decisiones informadas y contribuyen al manejo preventivo del ganado.

En conjunto, este marco conceptual detalla un flujo claro, eficiente y funcional que optimiza el monitoreo y diagnóstico de mastitis en entornos ganaderos, integrando herramientas tecnológicas avanzadas con resultados prácticos y accesibles.

Figura 9*Diagrama de Bloques del Circuito*

La Figura 10 presenta el diagrama de bloques del dispositivo empleado en el estudio. Este dispositivo se alimenta mediante un adaptador de corriente de 5V DC, así mismo, el microcontrolador suministra una salida regulada de 5V que alimenta al sensor de medición de conductividad eléctrica y a la pantalla OLED.

Al activarse el dispositivo, el circuito de medición de conductividad eléctrica determina la concentración de iones presentes en la leche mediante la sonda de conductividad, que está compuesta por dos placas. La sonda envía una señal de retroalimentación al circuito de medición, el cual genera una señal de salida analógica proporcional a la conductividad eléctrica de la muestra. Esta señal es procesada por el microcontrolador, que calcula el valor preciso de la conductividad eléctrica, considerando un factor de calibración previamente definido para asegurar la precisión en la medición.

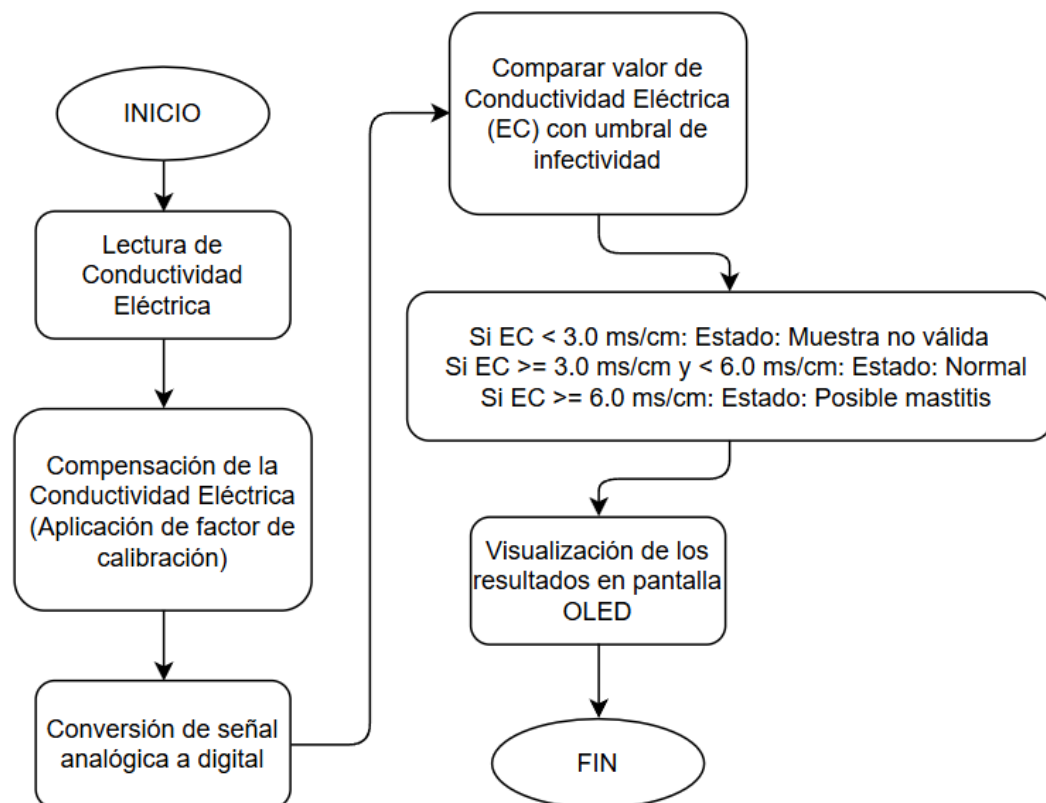
El microcontrolador, mediante algoritmos programados, compara los valores obtenidos con los umbrales predefinidos para identificar posibles infecciones en la leche. Los resultados finales se muestran en la pantalla OLED.

3.4.3. Diagrama de flujo del prototipo

La Figura 11 representa el diagrama de flujo del programa principal implementado en el diseño. Al iniciar el prototipo, el microcontrolador pone en funcionamiento los sensores de temperatura y de conductividad eléctrica, recolectando sus valores mediante las señales de retroalimentación generadas por estos dispositivos. Posteriormente, el microcontrolador realiza los cálculos necesarios para obtener el valor exacto de la conductividad eléctrica, ajustándolo según la temperatura medida.

Figura 10

Diagrama de Flujo del Proceso

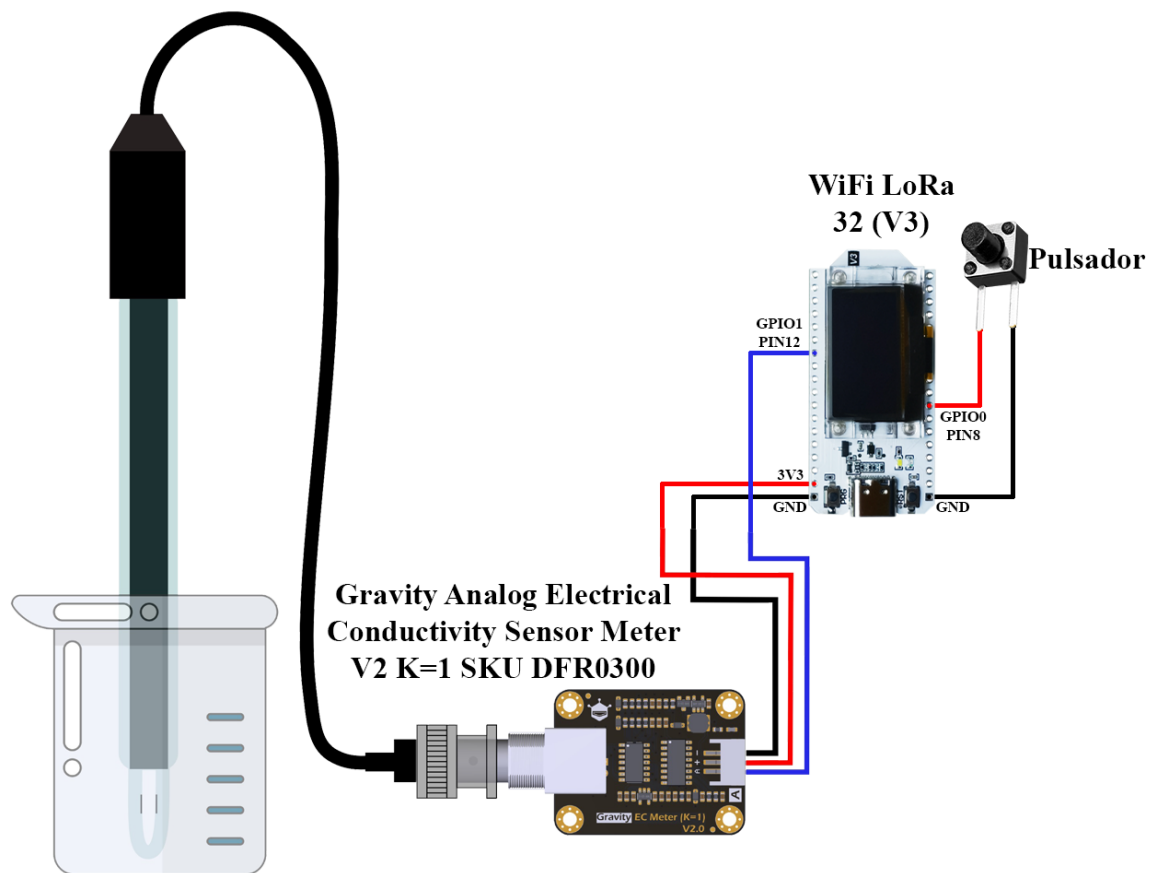


Una vez determinados los valores precisos, el microcontrolador los transmite a la pantalla OLED para su visualización. El valor de la conductividad eléctrica es transformado en el correspondiente recuento de células somáticas, lo cual permite evaluar la posibilidad de infección en la muestra de leche. Finalmente, los resultados son presentados en la pantalla

OLED y enviados hacia la plataforma de monitorización concluyendo así el proceso descrito en el diagrama de flujo.

3.4.4. Nodo receptor

El nodo receptor consiste en una placa de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32 (V3), equipada con un módulo de conectividad inalámbrica y una pantalla OLED integrada. Esta placa recibe y procesa los datos obtenidos por los sensores especializados en medir la conductividad eléctrica de la leche, los cuales son parámetros clave para la detección temprana de mastitis en bovinos. El sistema, diseñado para monitorear individualmente cada cuarto de la ubre, muestra los resultados en tiempo real en la pantalla y determina si hay indicios de mastitis. La placa está conectada a un punto de acceso con acceso a Internet, lo que permite enviar los datos recolectados a una base de datos en la nube. Esto facilita la visualización y el monitoreo remoto de la información, optimizando la gestión de la salud del ganado y la calidad de la leche en la Figura 11, se muestra el diagrama esquemático del nodo receptor.

Figura 11*Diagrama de conexión*

En la Figura 11 se muestra el sensor de conductividad eléctrica conectado al módulo DFRobot para medir parámetros de líquidos, integrado con una placa para procesamiento y monitoreo. Obtenida de (DFROBOT, 2019).

3.4.4.1. Sistema de alimentación de energía

El suministro de energía es un aspecto crucial para la operación del sistema. Este proyecto se implementará en zonas rurales donde la conectividad y el acceso constante a energía pueden ser limitados. La placa Heltec WiFi LoRa 32 V3, utilizada como núcleo del sistema, requerirá una fuente de alimentación confiable para garantizar un funcionamiento continuo. Se recomienda una fuente que transforme de 100-240 VAC, 50/60 Hz a una salida

de 5V DC compatible con la placa, optimizando así el consumo energético. Se considera necesario un respaldo de energía, como baterías recargables, para asegurar la operatividad en caso de cortes eléctricos. La Tabla 11 contiene los valores teóricos utilizados en el cálculo del consumo energético del nodo.

Tabla 11

Uso de energía de los componentes

Dispositivo	Modo en descanso (mA)	Modo en uso (mA)
Electrical Conductivity Sensor	10	30
Heltec WiFi LoRa 32(V3)	10	80
Total	20	111

Explicación de los valores:

- **Electrical Conductivity Sensor (Sensor de Conductividad Eléctrica):**
Basado en sensores similares, el modo de descanso implica un bajo consumo mientras espera señales. En modo uso, incluye la operación activa de medición.
- **Heltec WiFi LoRa 32 V3:** En modo descanso, entra en estado de bajo consumo, mientras que en modo uso incluye la transmisión de datos vía WiFi o LoRa.

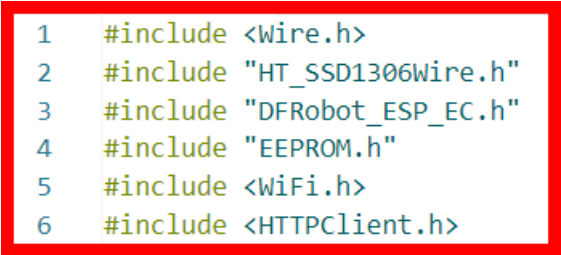
3.4.4.2. *Análisis del código implementado*

El nodo receptor está basado en la placa Heltec WiFi LoRa 32 V3, que actúa como procesador central encargado de recibir los datos generados por el sensor de conductividad eléctrica. Una vez obtenidos los valores, el sistema procesa la señal analógica, aplicando un factor de calibración para obtener el valor preciso de la conductividad eléctrica. Este valor se compara con un umbral predefinido para determinar si la muestra presenta posibles anomalías asociadas a la mastitis. En caso de que los valores superen el umbral establecido, el nodo genera una alerta visual en la pantalla OLED integrada, mostrando el estado de la muestra. Los datos recolectados se envían a través de la red WiFi a la plataforma Ubidots, donde se almacenan y se analizan. El código implementado para el funcionamiento de este sistema ha sido desarrollado en la plataforma Arduino IDE.

En la Figura 12 se especifican las librerías esenciales para gestionar la lectura de sensores, el procesamiento de datos y la comunicación mediante WiFi.

Figura 12

Librerías del Código del Prototipo



```
1  #include <Wire.h>
2  #include "HT_SSD1306Wire.h"
3  #include "DFRobot_ESP_EC.h"
4  #include "EEPROM.h"
5  #include <WiFi.h>
6  #include <HTTPClient.h>
```

Este conjunto de librerías cumple funciones específicas dentro del sistema. La librería `Arduino.h` es esencial para la programación en el entorno de Arduino, ya que proporciona las funciones básicas necesarias para la ejecución del código, como la inicialización de puertos y la configuración de pines. Esta librería también permite la comunicación con otros componentes del hardware, facilitando la integración del sensor de conductividad y la placa Heltec con el microcontrolador.

Por otro lado, `DFRobot_ESP_EC.h` es la librería encargada de manejar el sensor DFR0300 de conductividad eléctrica. Esta librería proporciona funciones para leer y calcular los valores de CE en función de la señal analógica que se obtiene del sensor. También permite aplicar factores de calibración a las lecturas, ajustando los resultados para obtener mediciones más precisas y confiables, lo cual es fundamental en la detección de mastitis.

Las librerías `EEPROM.h`, `Wire.h`, `WiFi.h` y `HTTPClient.h` desempeñan roles complementarios en el sistema. La librería `EEPROM.h` se utiliza para almacenar y recuperar el factor de calibración del sensor de conductividad, garantizando que los ajustes realizados se mantengan entre reinicios del dispositivo. `Wire.h` permite la comunicación I2C, esencial para la interacción con otros componentes conectados a la placa Heltec. `WiFi.h` facilita la conexión a redes inalámbricas, permitiendo que el dispositivo se comunique con la plataforma Ubidots. `HTTPClient.h` es la librería que maneja las solicitudes HTTP, permitiendo enviar los datos de conductividad eléctrica a la base de datos en la nube para su análisis y monitoreo remoto.

Ahora, se definen las variables necesarias para la conexión del sistema con la plataforma Ubidots, como se muestra en la Figura 13. Las variables de tipo `const char*` son utilizadas para almacenar valores estáticos que son fundamentales para establecer la comunicación con el servidor de Ubidots. Estas incluyen el `ubidots_token`, que corresponde al token de autenticación para la API de Ubidots, el `ubidots_device`, que identifica el dispositivo dentro de la plataforma, el `ubidots_variable_ce`, que se refiere a la variable que recibirá los datos de conductividad eléctrica, y finalmente, el `ubidots_url`, que contiene la URL base de la API para realizar las solicitudes HTTP.

Figura 13

Definición de variables para la configuración de Ubidots en el código

```
const char* ubidots_token = "Token de ubidots";  
const char* ubidots_device = "Nombre del dispositivo";  
const char* ubidots_variable_ce = "Nombre de la variable del sensor";  
const char* ubidots_url = "URL de ubidots";
```

Nota: El propósito de estas definiciones es facilitar la integración entre el microcontrolador y Ubidots, permitiendo la correcta transmisión de datos mediante solicitudes HTTP. Estas variables son empleadas en el proceso de construcción de la URL de la solicitud y en la inclusión del token necesario para autenticar la conexión. Su configuración es un paso previo esencial para la posterior transmisión de los datos de EC del sensor al sistema de almacenamiento en la nube, donde se pueden visualizar y analizar de manera remota.

Otra parte importante del código es la función `conectarWiFi()`, cuya implementación es esencial para conectar el dispositivo a una red WiFi. En la Figura 14 se muestra cómo la función comienza enviando un mensaje al puerto serie indicando que está en proceso de conexión. Posteriormente, se utiliza el método `WiFi.begin()` para iniciar la conexión con la red WiFi, proporcionando el nombre de la red y la contraseña como parámetros. Mientras el dispositivo no se conecte correctamente, la función entra en un ciclo `while`, en el cual verifica el estado de la conexión mediante `WiFi.status()`. Durante este ciclo, se realiza una pequeña pausa de un segundo utilizando `delay(1000)`, y se imprime un punto en el monitor serial cada vez que el dispositivo intenta conectarse. Una vez que la conexión es exitosa, se imprime un mensaje confirmando la conexión establecida, junto con la dirección IP asignada al dispositivo, utilizando `WiFi.localIP()` para obtener y mostrar la dirección IP en formato de cadena.

Figura 14

Función de conexión WiFi en el código

```
void conectarWiFi() {  
    Serial.print("Conectando a WiFi...");  
    WiFi.begin("AP_Proyecto", "Password123");  
  
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
        delay(1000);  
        Serial.print(".");  
    }  
  
    Serial.println("\nConectado. IP: " + WiFi.localIP().toString());  
}
```

En la Figura 15 se presenta la función `enviarDatosUbidots()`, que se encarga de enviar los datos de conductividad eléctrica al servidor de Ubidots mediante una solicitud HTTP POST. La función comienza verificando si el dispositivo está conectado a una red WiFi mediante `WiFi.status()`. Si la conexión es exitosa, se construye la URL de la solicitud utilizando el `ubidots_url` y el `ubidots_device` para especificar el dispositivo al que se enviarán los datos.

A continuación, la función convierte el valor de la CE (`ecValue`) a un formato de cadena con tres decimales y lo integra en un payload en formato JSON. Este payload contiene la variable de conductividad eléctrica definida previamente en el código, junto con su valor correspondiente. La solicitud HTTP se envía utilizando el método `http.POST()`, y se incluye en las cabeceras de la solicitud el tipo de contenido (JSON) y el token de autenticación de Ubidots.

Una vez enviada la solicitud, la función evalúa el código de respuesta de la API. Si el código de respuesta es positivo (mayor a cero), se imprime un mensaje de confirmación en el monitor serie, junto con el payload y el código de respuesta. Si ocurre un error en el proceso, se imprime un mensaje de error junto con el código de error correspondiente. Si el dispositivo no está conectado a WiFi, se informa al usuario mediante un mensaje en el monitor serie.

Figura 15

Función para enviar datos a Ubidots mediante solicitud HTTP POST

```
void enviarDatosUbidots() {
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    String url = String(ubidots_url) + "/" + ubidots_device;
    String payload = "{\"" + String(ubidots_variable_ce) + "\": " + String(ecValue, 3) + "}";

    http.begin(url.c_str());
    http.addHeader("Content-Type", "application/json");
    http.addHeader("X-Auth-Token", ubidots_token);

    int httpCode = http.POST(payload);
    if (httpCode > 0) {
      Serial.println("Datos enviados: " + payload);
    } else {
      Serial.println("Error: " + String(http.errorToString(httpCode)));
    }

    http.end();
  } else {
    Serial.println("WiFi no conectado");
  }
}
```

3.4.5. Cálculo para la detección de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es una propiedad física que mide la capacidad de un líquido para conducir electricidad (Elizalde et al., 2009). Este parámetro está directamente relacionado con la concentración de iones presentes en la solución, como el sodio y el cloro. En el caso de la leche, un aumento en la conductividad eléctrica puede ser un indicador de mastitis, ya que la inflamación de la glándula mamaria provoca la liberación de iones hacia la leche.

3.4.5.1. *Fórmula para el Cálculo de la Conductividad Eléctrica*

La conductividad eléctrica se calcula con base en la ley de Ohm modificada para soluciones líquidas. En la ecuación 1 se presenta esta relación matemática:

$$CE = \frac{I}{V} \cdot K \quad (1)$$

Donde:

- I es la corriente eléctrica (amperios) que pasa a través de la solución.
- V es el voltaje (voltios) aplicado al líquido.
- K es la constante de calibración de la celda de conductividad (m/cm), proporcionada por el fabricante del sensor.

En el sistema implementado, el sensor DFRobot DFR0300 tiene un valor de constante $K = 1 \text{ cm}^{-1}$, lo cual simplifica el cálculo, ya que K puede ser considerado unitario. Sin embargo, el voltaje y la corriente se miden indirectamente utilizando un divisor de voltaje y la señal analógica generada por el sensor.

3.4.5.2. *Conversión de la Señal Analógica*

El sensor entrega una señal analógica proporcional al valor de conductividad eléctrica. El microcontrolador integrado en la placa Heltec convierte esta señal en un valor digital utilizando el módulo ADC (convertidor analógico a digital). La ecuación 2 representa la lectura cruda obtenida del ADC (ADC_{raw}) y se convierte al valor de CE:

$$CE = \frac{ADC_{raw}}{4095} \cdot V_{ref} \cdot \frac{1}{R_{sensor}} \quad (2)$$

Donde:

- ADC_{raw} es el valor leído del ADC (rango de 0 a 4095 para una resolución de 12 bits).

- V_{ref} es el voltaje de referencia utilizado por el ADC (3.3V en la Heltec).
- R_{sensor} es la resistencia del sensor que se encuentra calibrada para relacionar la salida del sensor con la conductividad.

3.4.5.3. *Implementación de las Ecuaciones en el Código*

En el código desarrollado para el sistema, las ecuaciones 1 y 2 respectivamente para el cálculo de la conductividad eléctrica están implementadas en la lectura y procesamiento de la señal analógica generada por el sensor DFRobot DFR0300. A continuación, se detalla cómo cada parte de las ecuaciones se implementan en el código.

El cálculo de la conductividad eléctrica se realiza en la siguiente línea de código dentro de la función `loop()` como se muestra en la Figura 16:

Figura 16

Cálculo de la conductividad eléctrica (CE) en el código

```
ecValue = ec.readEC(voltage, 25.0) * calibrationFactor;
Serial.print("EC: ");
Serial.print(ecValue, 4);
Serial.println(" ms/cm");

mostrarAnalizando(ecValue);
}
```

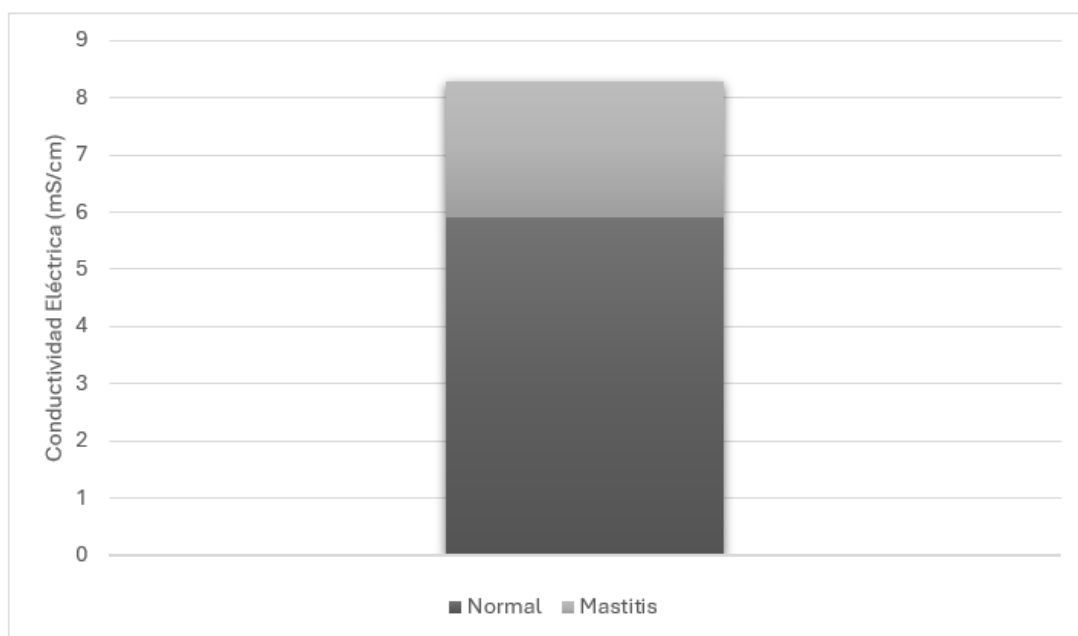
Aquí, el valor de la conductividad eléctrica (`ecValue`) se obtiene mediante la función `readEC()` de la librería `DFRobot_ESP_EC`. Esta función recibe como parámetros el voltaje medido por el sensor (`voltage`). El valor calculado por `readEC()` es multiplicado por un factor de calibración (`calibrationFactor`), que ajusta la medición de acuerdo con los valores de calibración previamente establecidos. Este valor de `ecValue` es el que luego se utiliza para ser enviado a la plataforma Ubidots.

3.5. Umbral de interpretación

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos son presentados en milisiemens por centímetro (mS/cm). Según (Lazaro et al., 2024), valores superiores a 6.0 mS/cm pueden ser un indicador de mastitis subclínica, mientras que valores normales en leche saludable oscilan entre 4 mS/cm y valores menores a 5.9 mS/cm como se muestra en la Figura 17. En este sistema, los datos de conductividad son evaluados en tiempo real y comparados con un umbral predefinido para determinar la posible presencia de mastitis.

Figura 17

Umbral para la detección de mastitis bovina



4. Capítulo IV: Pruebas y Resultados

Tras completar el diseño y programación del sistema, se procede con las pruebas iniciales del prototipo. Estas pruebas incluyen la integración del sensor de conductividad eléctrica con la placa Heltec 32 (V3) y la verificación de su funcionalidad. Este proceso permite identificar y corregir posibles fallos técnicos antes de la implementación final. Una vez confirmada la correcta operación del sistema en su configuración completa, se procede con la instalación en las zonas seleccionadas y la realización de pruebas finales para garantizar un rendimiento óptimo en condiciones reales de uso. Este enfoque asegura la confiabilidad y eficacia del sistema.

4.1. Integración de componentes

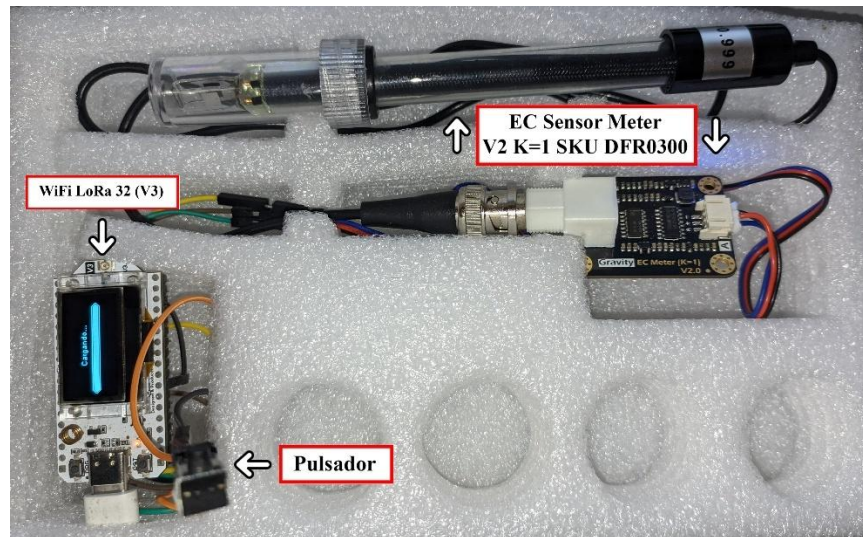
Luego de integrar todos los elementos físicos que componen el sistema, se procede a realizar pruebas preliminares de operatividad. Durante esta etapa, el nodo central de análisis recopilará información proporcionada por los sensores, ajustando su precisión de acuerdo con los parámetros establecidos en el diseño del estudio. Esto permitirá obtener datos confiables sobre la conductividad eléctrica de la leche, esenciales para diagnosticar la posible presencia de mastitis y tomar decisiones informadas en función de los resultados.

En la Figura 18 se muestra la configuración del sistema de monitoreo diseñado para la detección de mastitis en leche. El componente principal es la sonda de conductividad eléctrica (CE) K=1, encargada de medir los valores de conductividad eléctrica en la muestra. Esta sonda está conectada a una placa de medición de CE analógica, que actúa como un intermediario para procesar y convertir las señales analógicas provenientes de la sonda en datos que pueden ser interpretados por la unidad principal. La placa WiFi LoRa 32 (V3) recibe los datos procesados

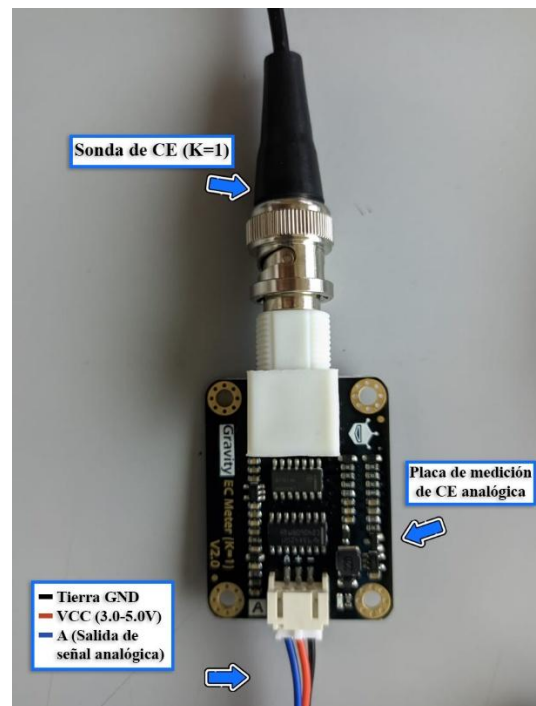
por la placa de medición y los visualiza en su pantalla OLED integrada, al tiempo que se encarga de enviar los valores obtenidos a la nube mediante su conexión inalámbrica.

Figura 18

Conexión del Dispositivo



En el proceso de integración de componentes, se muestra en la Figura 19 la sonda de conductividad eléctrica que se acopla a la placa de medición de señal analógica mediante un conector tipo BNC. La placa cuenta con tres terminales: GND para conexión a tierra, VCC para alimentación con un rango de 3.0 a 5.0 V, y A, que proporciona la salida de la señal analógica. Esta señal se envía al pin de entrada analógica del microcontrolador, permitiendo la lectura de los datos generados por la sonda.

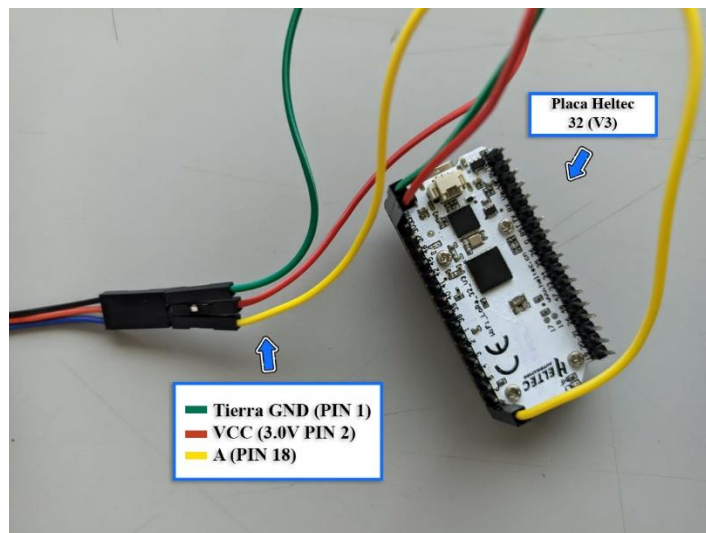
Figura 19*Conexión entre la Sonda y la Placa de Medición de Señal Analógica*

En la conexión entre la placa de medición de señal analógica del sensor DFRobot y la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3) mostrada en la Figura 20, el terminal GND de la placa de medición se conecta al pin 1 de la Heltec, que corresponde a tierra. El terminal VCC, encargado de la alimentación, se conecta al pin 2 de la Heltec, suministrando 3.0 V. El terminal A, que entrega la señal analógica del sensor, se conecta al pin 18 de la placa, permitiendo la lectura de datos mediante el módulo ADC integrado en la placa.

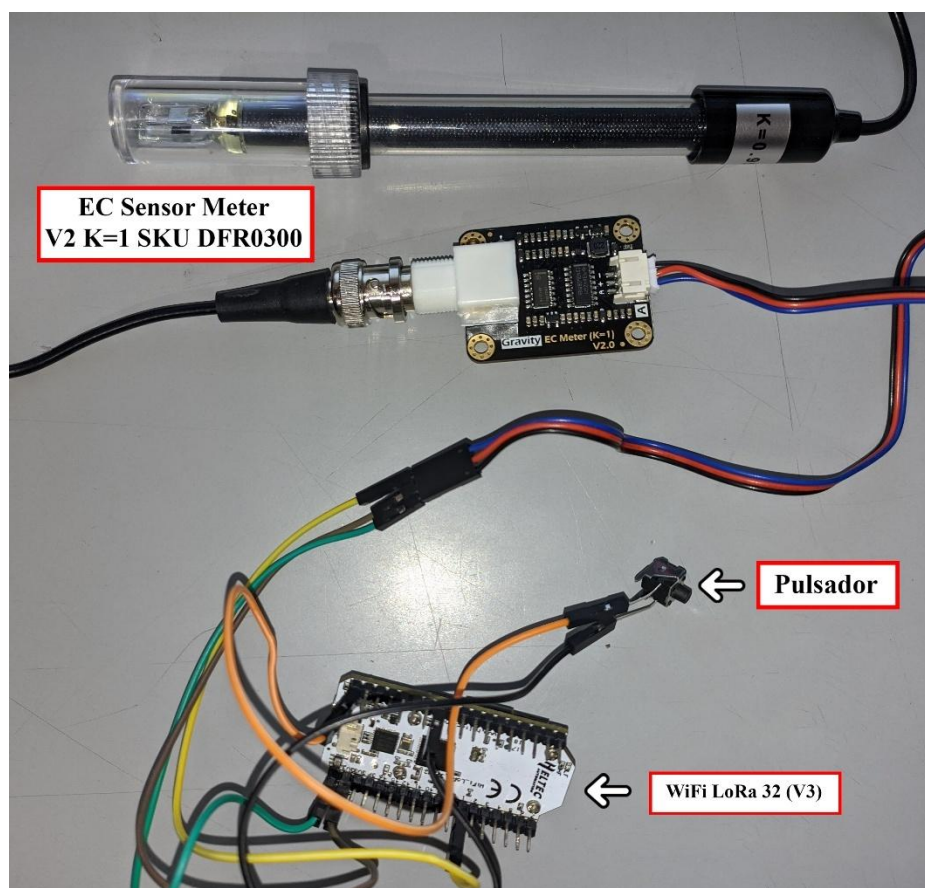
Figura 20

Conexión Entre la Placa de Medición de Señal Analógica y la placa Heltec LoRa WiFi

32(V3)



La conexión completa que se muestra en la Figura 21 integra la sonda de conductividad eléctrica, la placa de medición de señal analógica y la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3). La sonda se conecta a la placa de medición mediante un conector BNC, mientras que los terminales de la placa de medición (GND, VCC y A) se enlazan con los pines correspondientes de la Heltec garantizando la transmisión de la señal analógica al microcontrolador para su digitalización y lectura.

Figura 21*Conexión Completa*

Tras finalizar la integración del hardware y software del sistema, se confirma que el dispositivo cumple con las especificaciones requeridas, permitiendo la monitorización tanto de manera local, mediante la pantalla de la placa, como de forma remota en la plataforma de visualización.

4.2. Pruebas iniciales del sistema

En esta sección se presentan los resultados del sistema de monitoreo para la detección de mastitis de manera individual, con el fin de verificar el correcto funcionamiento de las funciones de hardware y software mediante la recolección, procesamiento y visualización de

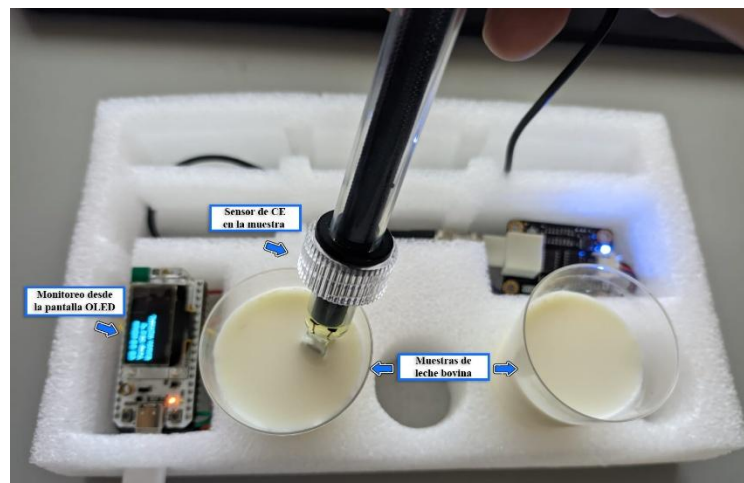
los datos obtenidos. Para llevar a cabo la fase de pruebas, se detalla el uso de los componentes físicos involucrados: una placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3) como nodo central, el sensor de conductividad eléctrica DFRobot con su placa de medición analógica del equipo necesario para configurar y programar el sistema.

4.2.1. Recolección y visualización de datos

El proceso de recolección de datos comienza con la inmersión de la sonda de conductividad eléctrica en la muestra de leche, conectada a un módulo analógico que traduce los valores físicos medidos en señales eléctricas. Estas señales son enviadas al microcontrolador de la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3), donde son digitalizadas mediante su módulo ADC integrado. La Figura 22 representa la toma de valores del sensor en una muestra de leche.

Figura 22

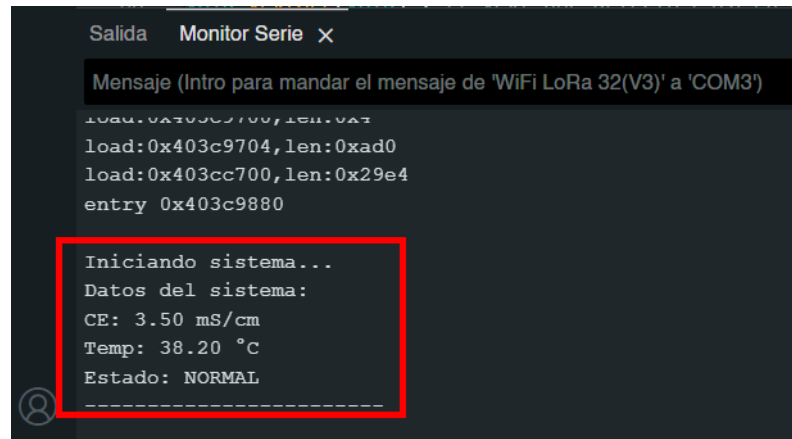
Prototipo en Funcionamiento Durante la Recolección de Datos



Los datos obtenidos incluyen la conductividad eléctrica (CE), expresada en mS/cm, capturada a través del sensor térmico conectado al sistema. En la Figura 23 se muestra la salida en el monitor serial de Arduino IDE:

Figura 23

Visualización de datos en el Monitor Serial



The image shows a screenshot of the Arduino IDE Serial Monitor window. The title bar reads 'Salida Monitor Serie x'. Below the title bar, there is a text input field with the placeholder 'Mensaje (Intro para mandar el mensaje de 'WiFi LoRa 32(V3)' a 'COM3')'. The serial output shows several lines of memory addresses and lengths, followed by a red rectangular box highlighting the following text: 'Iniciando sistema...', 'Datos del sistema:', 'CE: 3.50 mS/cm', 'Temp: 38.20 °C', and 'Estado: NORMAL'. Below this highlighted text is a dashed line. A small user icon is visible in the bottom left corner of the serial monitor window.

```
load:0x403c9704,len:0xad0
load:0x403cc700,len:0x29e4
entry 0x403c9880

Iniciando sistema...
Datos del sistema:
CE: 3.50 mS/cm
Temp: 38.20 °C
Estado: NORMAL
-----
```

Una vez procesados, los datos se presentan en tiempo real en la pantalla OLED integrada en la placa. Como se observa en la Figura 24, esta pantalla muestra de forma clara los valores de CE y el estado del análisis basado en los umbrales definidos.

Figura 24

Visualización de Datos Procesados en la Pantalla OLED de la Placa Heltec



4.2.2. Comunicación WiFi

El sistema implementa comunicación WiFi para la transmisión de datos en tiempo real desde la placa Heltec WiFi LoRa 32 V3 hacia la plataforma Ubidots. Para ello, se establece una conexión con un punto de acceso (AP) configurado con las credenciales predefinidas en el código. Una vez que la placa se conecta exitosamente a la red, el sistema inicia la captura de datos provenientes de los sensores, procesándolos localmente antes de su envío. La conectividad WiFi es fundamental para la operación del sistema, permitiendo la transferencia de información sin necesidad de intervención manual y asegurando que los datos estén disponibles en la nube para su análisis y visualización.

En la Figura 25 se muestra el resultado de la ejecución del sistema, donde se observa el proceso de conexión WiFi, el envío de datos a Ubidots y la respuesta del servidor. La salida del monitor serie refleja el estado de la conexión con el AP y la plataforma de almacenamiento en la nube, así como los valores enviados en cada ciclo. Se destacan diferentes eventos en los

que las mediciones de CE se encuentran dentro del rango normal y otras donde superan los umbrales predefinidos, activando la alerta de "Posible Mastitis". La imagen evidencia que la comunicación entre la placa y la API de Ubidots es exitosa.

Figura 25

Proceso de Conexión WiFi y el envío de Datos a Ubidots

```

Salida Monitor Serie x
Mensaje (Intro para mandar el mensaje de 'WiFi LoRa 32(V3)' a 'COM3')
ESP-ROM:esp32s3-20210327
Build:Mar 27 2021
rst:0x1 (POWERON),boot:0x8 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
SPIWP:0xee
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fca3818,len:0x508
load:0x403c9700,len:0x4
load:0x403c9704,len:0xad0
load:0x403cc700,len:0x29e4
entry 0x403c9880
Conectando a Wi-Fi.
Conectado a Wi-Fi
Enviado exitosamente a Ubidots
Respuesta: {"ubidots_variable_ce":{"status_code":201},"ubidots_variable_estado":{"status_code":201},"ubidots_variable_temp":{"status_code":201}}
Valores enviados: CE = 3.45 | Temp = 38.00 | Estado = Normal
Enviado exitosamente a Ubidots
Respuesta: {"ubidots_variable_ce":{"status_code":201},"ubidots_variable_estado":{"status_code":201},"ubidots_variable_temp":{"status_code":201}}
Valores enviados: CE = 3.56 | Temp = 37.96 | Estado = Normal
Enviado exitosamente a Ubidots
Respuesta: {"ubidots_variable_ce":{"status_code":201},"ubidots_variable_estado":{"status_code":201},"ubidots_variable_temp":{"status_code":201}}
Valores enviados: CE = 6.30 | Temp = 40.30 | Estado = Posible Mastitis
Enviado exitosamente a Ubidots
Respuesta: {"ubidots_variable_ce":{"status_code":201},"ubidots_variable_estado":{"status_code":201},"ubidots_variable_temp":{"status_code":201}}
Valores enviados: CE = 6.30 | Temp = 40.20 | Estado = Posible Mastitis
Enviado exitosamente a Ubidots
  
```

Información de la conexión hacia el AP y a la BD

No se detectó anomalías

No se detectó anomalías

Si se detectó anomalías

Si se detectó anomalías

El sistema también incorpora una verificación del estado de la conexión WiFi antes de cada envío de datos, asegurando que la comunicación con el servidor sea estable. En caso de que la conexión se pierda, el código implementa un mecanismo de espera hasta que se restablezca, evitando la pérdida de datos y garantizando la continuidad del monitoreo. La pantalla OLED integrada en la placa también muestra en tiempo real los valores enviados, permitiendo una supervisión local inmediata. Esta estructura de comunicación optimiza la integración del sistema con Ubidots, facilitando la recopilación y análisis de datos sin intervención manual, lo que mejora la eficiencia del monitoreo de mastitis en el ganado.

4.2.3. Envío de información hacia la base de datos

El sistema implementado transmite los datos recopilados por los sensores hacia la plataforma Ubidots, donde son almacenados y procesados para su posterior análisis. La información enviada incluye las mediciones de conductividad eléctrica (CE) y un estado

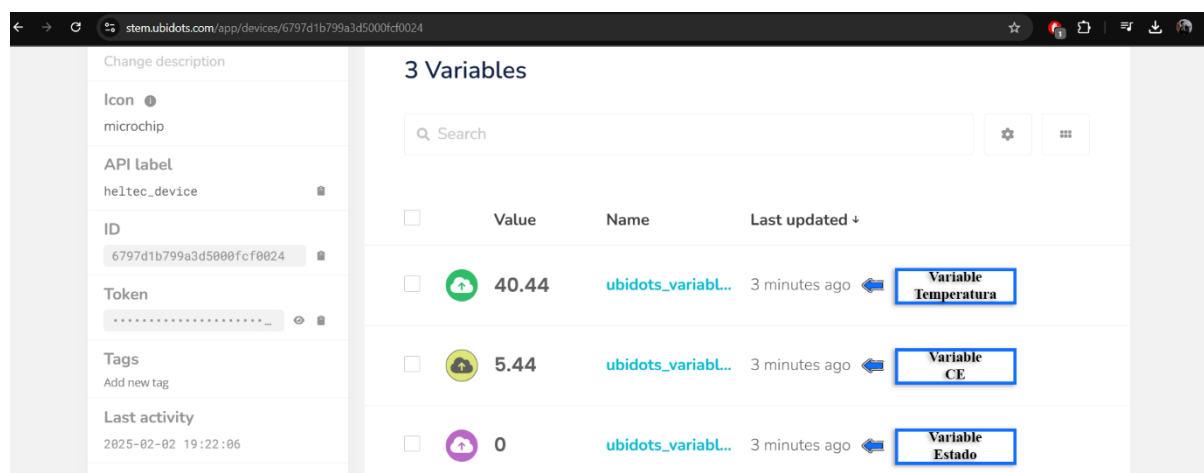
binario que indica si los valores registrados se encuentran dentro del rango normal o si existe una posible presencia de mastitis.

El proceso de envío de información se basa en solicitudes HTTP POST, donde la placa Heltec WiFi LoRa 32 V3 construye un payload en formato JSON con las variables registradas y lo transmite a la API de Ubidots mediante la URL correspondiente al dispositivo. La autenticación en el servidor se maneja utilizando un token de acceso, asegurando que solo los dispositivos autorizados puedan ingresar datos. Una vez que la información es recibida, el servidor responde con un código de estado 201 (Created), confirmando la correcta inserción de los datos en la base de datos. Esta respuesta es verificada en el monitor serie de la placa para garantizar que la transmisión se haya realizado sin errores.

En la Figura 26, se muestra la interfaz de Ubidots donde los datos enviados por el sistema son almacenados y organizados en variables individuales. Se pueden observar los valores actuales de temperatura (40.44 °C), conductividad eléctrica (5.44 mS/cm) y estado (0, indicando posible mastitis), junto con la marca de tiempo que indica la última actualización de cada variable. Este almacenamiento estructurado permite que los datos sean posteriormente utilizados para análisis gráficos, generación de alertas y toma de decisiones sobre la salud del ganado.

Figura 26

Variables de los Datos en la Plataforma Ubidots



En la Figura 27, se muestra la interfaz de Ubidots, donde se registran los valores históricos de la variable correspondiente a la conductividad eléctrica (CE) de la leche. La gráfica presentada ilustra la evolución de esta variable en el tiempo, permitiendo visualizar tendencias y variaciones en la conductividad. En la parte inferior, se listan mediciones específicas con su respectiva marca de tiempo, destacando valores de 3.73 mS/cm, 3.48 mS/cm y 5.39 mS/cm, registrados en diferentes fechas.

Figura 27

Variable Conductividad Eléctrica

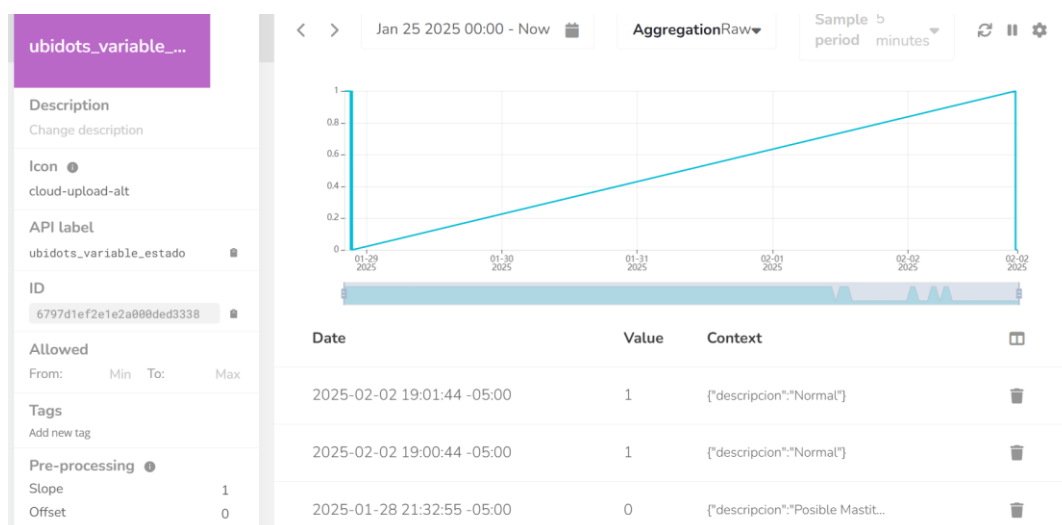


Según el umbral definido en el documento analizado, la conductividad eléctrica mayor a 6.0 mS/cm se considera un indicador de mastitis. En la figura se muestra que la medición del 28 de enero de 2025 registró un valor de 5.39 mS/cm, lo que podría indicar una posible susceptibilidad a infección en el animal. En contraste, las mediciones del 2 de febrero de 2025 (3.73 mS/cm y 3.48 mS/cm) se encuentran dentro del rango considerado normal. Este monitoreo en tiempo real permite a los productores actuar de manera oportuna cuando los valores superan el umbral, optimizando la detección temprana de mastitis en el ganado.

El registro de la variable estado se muestra en la Figura 29, la cual clasifica la condición del ganado en función de los valores de conductividad eléctrica. Esta variable toma valores binarios: 1 cuando las mediciones se encuentran dentro del rango normal y 0 cuando superan los umbrales establecidos, lo que sugiere un posible caso de mastitis. La gráfica refleja la evolución de esta condición a lo largo del tiempo, mientras que la tabla inferior muestra registros específicos junto con su respectiva marca de tiempo.

Figura 28

Variable del Estado



Los datos almacenados evidencian que, en las mediciones del 2 de febrero de 2025, el sistema determina un estado normal con un valor de 1, lo que indica que no se detectaron anomalías en la leche analizada. Sin embargo, en la medición del 28 de enero de 2025, se registra un estado de 0, lo que significa que al menos una de las variables supera los valores umbrales definidos en el sistema, activando la clasificación de "Posible Mastitis". Este mecanismo de clasificación automática permite una interpretación rápida del estado de los animales sin necesidad de evaluar individualmente cada parámetro.

Al contar con una variable específica que resume el estado del ganado, el sistema facilita la implementación de alertas y automatización en la toma de decisiones. La integración de descripciones en el contexto de cada registro, como "Normal" o "Posible Mastitis", ayuda a que la información sea más comprensible y accesible en la plataforma, optimizando la respuesta de los productores ante cambios en la salud del rebaño.

4.2.4. Verificación del diagnóstico

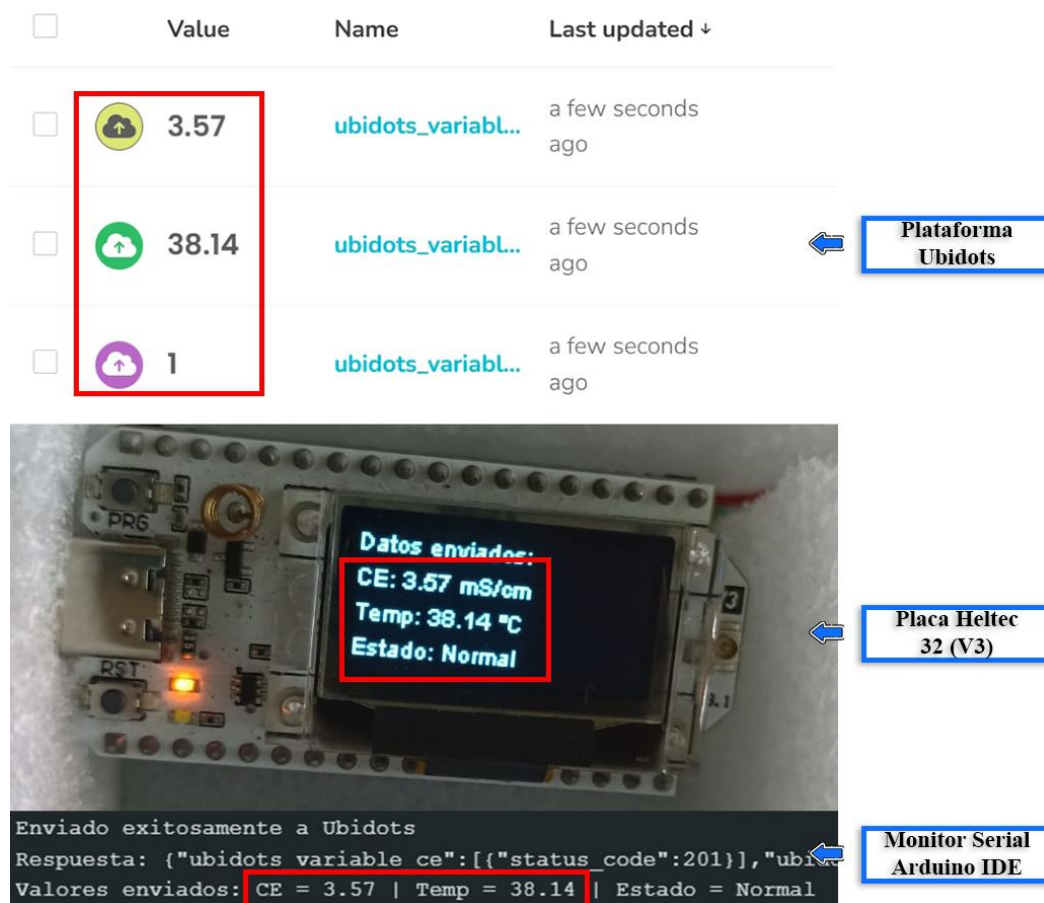
Para garantizar la precisión del sistema, se realiza una comparación entre los datos mostrados en el monitor serial, los valores almacenados en la plataforma Ubidots y la información desplegada en la pantalla OLED de la placa Heltec. En cada iteración del ciclo de ejecución, se verifica que las mediciones de conductividad eléctrica y estado sean consistentes en los tres puntos de monitoreo. Los valores impresos en el monitor serial corresponden a los datos procesados y enviados a la base de datos, los cuales deben coincidir exactamente con los registros visibles en la interfaz de Ubidots. De igual manera, la pantalla OLED muestra en tiempo real los mismos parámetros, proporcionando una validación visual inmediata. Cualquier

discrepancia entre estas fuentes indicaría un error en la transmisión o en el procesamiento de los datos, lo que permite identificar y corregir posibles fallos en el sistema.

Después de realizar las pruebas de verificación, se confirma que los datos obtenidos en el monitor serial, la pantalla OLED de la placa Heltec 32 V3 y la plataforma Ubidots son completamente consistentes. Como se muestra en la Figura 30, los valores de conductividad eléctrica (3.57 mS/cm), temperatura (38.14°C) y estado (1 - Normal) coinciden en los tres puntos de monitoreo, lo que garantiza que la transmisión de información desde el dispositivo hasta la base de datos en la nube se realiza sin errores. La comparación de estos registros valida que los datos procesados localmente en la placa son correctamente enviados a Ubidots y almacenados sin alteraciones. La pantalla OLED refleja en tiempo real la información procesada, proporcionando una confirmación visual inmediata.

Figura 29

Verificación de la coherencia de datos en el monitor serial, pantalla OLED y plataforma Ubidots



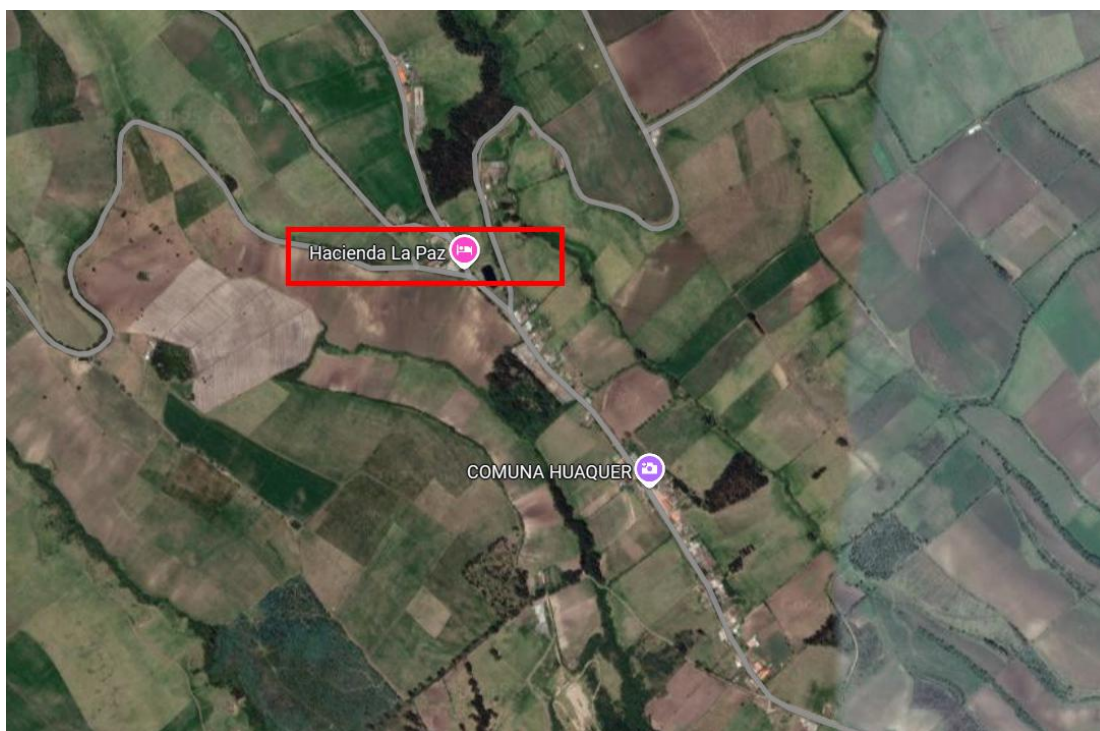
Nota: Esta coherencia entre las distintas interfaces de salida demuestra que el sistema funciona de manera precisa y confiable, permitiendo la detección y el monitoreo continuo del estado del ganado.

4.3. Implementación del sistema

El presente trabajo se lleva a cabo en la Hacienda La Paz, como se muestra en la Figura 31, el sector está ubicado en la comunidad de Huaquer, en el cantón Montúfar. Este sitio fue elegido debido a su relevancia en la producción lechera local, así como por las condiciones ambientales y logísticas que presentan desafíos similares a los que enfrentan la mayoría de los pequeños y medianos ganaderos de la región.

Figura 30

Ubicación del Sector en el que se Realizaron las Pruebas



La implementación del prototipo en esta hacienda permite evaluar su desempeño en un entorno real de producción, donde factores como la variabilidad en la calidad de la leche, las condiciones climáticas y la conectividad de red influyen directamente en la detección y monitoreo de la mastitis bovina. Durante esta etapa, el nodo se encuentra en la sala de ordeño, asegurando que el sensor de conductividad eléctrica esté en contacto con la leche en el momento de su extracción.

Con la finalidad de optimizar la precisión de las mediciones, se realizan ajustes en la calibración del sistema, para así garantizar que los datos obtenidos sean representativos de la realidad productiva de la Hacienda La Paz. Asimismo, se prueba la conectividad del dispositivo con la plataforma Ubidots, verificando la transmisión eficiente de la información y la correcta visualización de los datos en tiempo real. La implementación en este sector estratégico proporciona una visión clara sobre el impacto del sistema en la detección oportuna de la

mastitis, facilitando la toma de decisiones para mejorar la calidad de la leche y la salud del ganado.

4.3.1. Ubicación del Nodo

Para garantizar la correcta recolección de datos y el funcionamiento óptimo del sistema, el nodo receptor es instalado en la sala de ordeño de la Hacienda La Paz, donde se lleva a cabo la extracción de leche de las vacas. Esta ubicación estratégica permite que el sensor de conductividad eléctrica analice las muestras de leche en el momento exacto del ordeño, asegurando mediciones precisas y representativas del estado de salud del ganado. La proximidad del nodo a la fuente de muestreo minimiza la posibilidad de contaminación externa y reduce la variabilidad en las mediciones debido a factores ambientales. Como se muestra en la Figura 32, el equipo es instalado en un área donde las vacas son ordeñadas de manera rutinaria, lo que permite una implementación práctica y sin inconvenientes para los productores.

Figura 31

Sala de Ordeño Hacienda La Paz



4.4. Pruebas de funcionamiento y resultados

Para evaluar la precisión y efectividad del prototipo, se realizan pruebas de funcionamiento en condiciones reales de ordeño. Estas pruebas consisten en la recolección de muestras de leche directamente desde los cuatro pezones de la vaca, justo antes de la colocación del ordeño mecánico. En cada muestra, se sumerge la sonda del sensor de conductividad eléctrica, permitiendo la medición inmediata de estos parámetros críticos.

Los datos obtenidos en cada medición son procesados por la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3) y visualizados en su pantalla OLED, mostrando el estado de cada cuarto de la ubre en tiempo real. Con este procedimiento, se determina si alguna de las muestras presenta valores anómalos que indiquen la presencia de mastitis. Esta metodología permite verificar la sensibilidad del sistema y su capacidad para generar alertas oportunas a los productores, facilitando la toma de decisiones para el manejo de la salud del ganado y la calidad de la leche.

La Tabla 12 presenta un resumen de las pruebas de funcionamiento realizadas para evaluar el desempeño del sistema. En la Hacienda La Paz de Huaquer, se analizan 20 vacas, de las cuales una muestra signos de mastitis. Posteriormente, en la Finca La Palmera de Pioter, se examinan 15 vacas, identificándose dos casos positivos de la enfermedad. Finalmente, se lleva a cabo una prueba de seguimiento en la Hacienda La Paz, donde se monitorea a la vaca previamente diagnosticada con mastitis. Los resultados indican una reducción en los valores de conductividad eléctrica a 5.9, lo que sugiere su recuperación. Estas pruebas permiten validar la capacidad del sistema para detectar la mastitis en etapas tempranas y monitorear su evolución, facilitando la toma de decisiones oportunas para el tratamiento y mejorando la calidad de la producción lechera.

Tabla 12*Pruebas de funcionamiento*

Prueba	Ubicación	Número de Vacas Evaluadas	Número de Vacas con Mastitis	Resultado	Estado
Prueba en Hacienda La Paz - Primera evaluación	Huaquer	20	1	1 vaca con mastitis detectada	Finalizado
Prueba en la finca La palmera - Primera evaluación	Huaquer	15	2	2 vacas con mastitis detectadas	Finalizado
Seguimiento en Hacienda La Paz - Segunda evaluación	Pioter	1	1	Valores reducidos a 5.9 - Vaca curada	Finalizado

Para llevar a cabo las pruebas de funcionamiento del sistema, se siguen una serie de pasos que garantizan la correcta recolección y procesamiento de los datos. En primer lugar, se selecciona una ubicación estratégica para el dispositivo, preferentemente cerca de la zona de ordeño, lo que asegura la proximidad del sensor a las muestras de leche a analizar.

Posteriormente, el prototipo es encendido, ya sea conectándolo a un dispositivo o utilizando una fuente de energía alternativa, como una batería. Se verifica que el sistema esté tomando los datos correctamente y se procede a calibrar el sensor para asegurar mediciones precisas. Una vez calibrado, se inicia la toma de muestras, recolectando las cuatro muestras provenientes de las distintas glándulas mamarias de la vaca. El sensor se coloca en el primer cuarto de la ubre, y cuando se obtienen lecturas estables y sin variación significativa, los datos se suben a la base de datos. El sensor se limpia cuidadosamente antes de pasar al siguiente cuarto, y este procedimiento se repite para los otros tres cuartos de la ubre. Tras la toma de todas las muestras, se analizan los datos obtenidos para evaluar la calidad de la leche y la posible presencia de mastitis. Finalmente, el sistema es apagado para finalizar la prueba. En la Tabla 13 se describen de manera simplificada los pasos a seguir durante las pruebas de funcionamiento del prototipo.

Tabla 13

Metodología de la Toma de Pruebas de Funcionamiento del Sistema

Paso	Descripción
1	Selección de la ubicación del dispositivo, debe estar cerca del ordeño.
2	Encender el prototipo, ya sea conectado a un dispositivo o a una batería.
3	Verificación de que el sistema esté tomando los datos correctamente.
4	Calibración del sensor para asegurar mediciones precisas.
5	Inicio de la toma de muestras: se deben recolectar las cuatro muestras de leche de las cuatro glándulas mamarias de la vaca.
6	Colocación del sensor en el primer cuarto de la ubre y espera de valores estables para subirlos a la base de datos.
7	Limpieza del sensor después de cada medición.
8	Repetir los pasos 6 y 7 para los demás cuartos de la ubre.

9	Análisis de los datos obtenidos para verificar la calidad de la leche y la presencia de mastitis.
10	Apagar el sistema al finalizar las pruebas.

4.4.1. Prueba en Hacienda La Paz - Primera evaluación

Para la recolección y análisis de las muestras de leche, se utiliza un recipiente especializado de cuatro compartimentos, diseñado para separar la leche extraída de cada uno de los pezones de la vaca. Este recipiente permite evaluar individualmente la calidad de la leche de cada cuarto de la ubre, asegurando una identificación precisa de posibles signos de mastitis. Como se muestra en la Figura 33, cada compartimento se llena con una muestra correspondiente a un pezón, facilitando la inmersión de la sonda del sensor de conductividad eléctrica.

Figura 32

Recipiente de cuatro compartimentos utilizado para la recolección de muestras



Una vez preparado el recipiente de cuatro compartimentos, se procede a la extracción de muestras de leche directamente desde cada pezón de la vaca, asegurando que cada compartimento almacene la leche correspondiente a un cuarto específico de la ubre. Este proceso se realiza manualmente antes de la colocación del ordeño mecánico, permitiendo obtener una muestra representativa del estado de la leche sin interferencias de equipos externos.

Como se muestra en la Figura 34, la leche es extraída de manera individual desde cada pezón y depositada en el recipiente, lo que permite una identificación precisa de posibles irregularidades en cada sección de la glándula mamaria. Este procedimiento garantiza que las mediciones realizadas con el sensor de conductividad eléctrica sean específicas para cada cuarto de la ubre, aumentando la confiabilidad del diagnóstico.

Figura 33

Extracción manual de muestras de leche antes del ordeño mecánico



Después de la recolección manual de las muestras de leche, estas son trasladadas hacia el nodo, donde se lleva a cabo la medición de sus parámetros fisicoquímicos. Para ello, se

utiliza una sonda de conductividad eléctrica, la cual es introducida cuidadosamente en cada uno de los compartimentos del recipiente con el objetivo de evaluar individualmente la calidad de la leche proveniente de cada pezón de la vaca. Como se muestra en la Figura 35, la sonda del sensor es sumergida en cada muestra para registrar valores de conductividad eléctrica, los cuales son procesados por la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3).

Es fundamental garantizar la limpieza adecuada de la sonda después de cada muestra tomada para evitar contaminaciones cruzadas y asegurar la precisión de las mediciones. Para ello, se recomienda sumergir la sonda en agua limpia inmediatamente después de su uso y, posteriormente, limpiarla cuidadosamente con un trapo o paño limpio. Este procedimiento debe realizarse de manera sistemática en cada medición, asegurando que no queden residuos de leche u otras impurezas que puedan alterar los resultados del análisis.

Figura 34

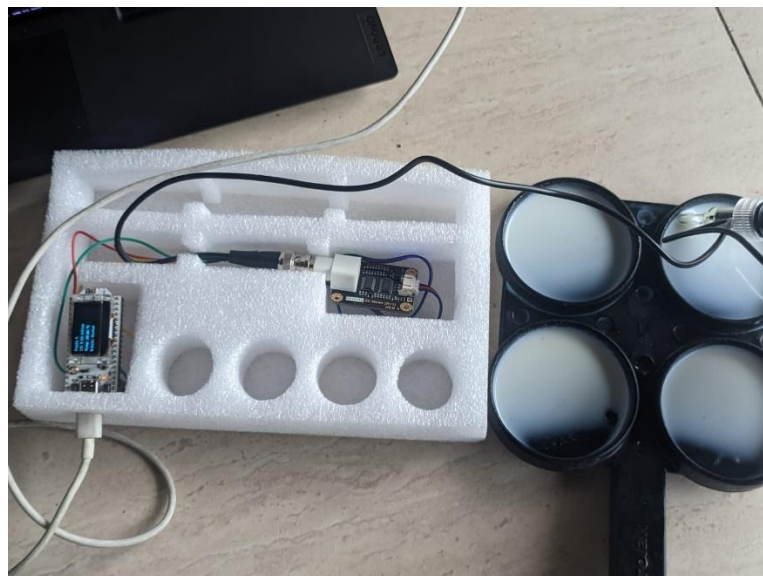
Introducción de la sonda del sensor en las muestras de leche para el análisis



Como se observa en la Figura 36, en la parte izquierda de la imagen se encuentra la placa de desarrollo Heltec, la cual procesa los datos recibidos y los muestra en su pantalla OLED. También se pueden visualizar los diferentes componentes electrónicos del sistema, incluidos los módulos de conexión y alimentación. En la parte derecha, se aprecia el recipiente de cuatro compartimentos con las muestras de leche extraídas, donde la sonda del sensor ha sido introducida en una de ellas para la medición de conductividad eléctrica. Esta disposición del sistema facilita la recolección y análisis de datos de manera eficiente, garantizando una detección temprana y precisa de posibles anomalías en la leche.

Figura 35

Sistema de detección IoT y su integración con las muestras de leche

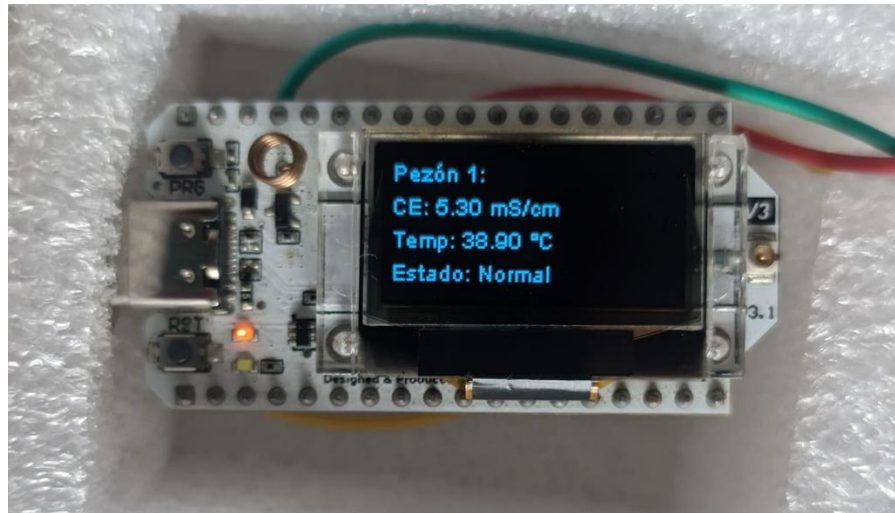


Una vez realizada la medición en las muestras de leche, los datos se procesan en la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3) y se visualizan en su pantalla OLED, proporcionando información detallada sobre cada pezón analizado. El sistema muestra en pantalla tres parámetros principales: la conductividad eléctrica (CE) y el estado de la muestra. Como se observa en la Figura 37, la pantalla OLED indica que la medición corresponde al Pezón 1, con

un valor de conductividad eléctrica de 5.30 mS/cm. En este caso, el sistema clasifica la muestra como "Normal", lo que sugiere que los valores registrados se encuentran dentro del rango aceptable y no hay indicios de mastitis en ese cuarto de la ubre.

Figura 36

Visualización de los resultados en la pantalla OLED del nodo



Durante la etapa de pruebas, el personal encargado del ordeño de la Hacienda, a través de su experticia identificó un caso de mastitis, esta situación brindó la oportunidad de evaluar el funcionamiento del sistema desarrollado en el presente trabajo. Como se muestra en la Figura 38, la vaca es apartada del grupo luego de que, en el primer ordeño del día, se detectara una alteración en la apariencia de la leche en uno de sus cuartos mamarios, lo que indica una posible infección.

Figura 37

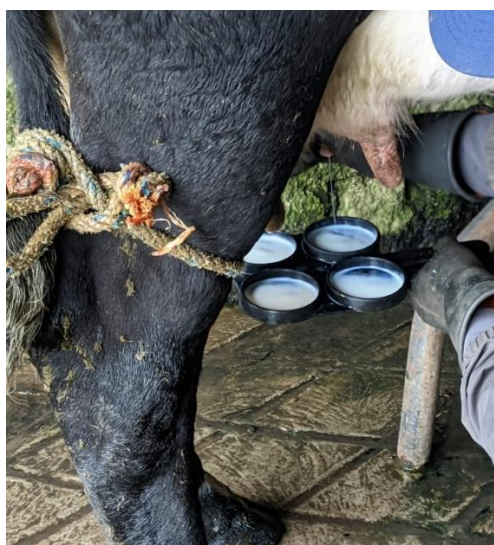
Vaca previamente diagnosticada con mastitis utilizada para la prueba del sistema



Aprovechando esta condición, se procede a realizar la prueba con el sistema de detección IoT para corroborar su capacidad de identificación de la enfermedad. Se sigue el mismo procedimiento de recolección de muestras como se muestra en la Figura 39.

Figura 38

Toma de muestras de vaca con posible mastitis



Tras realizar la recolección de las muestras de leche de la vaca previamente diagnosticada con mastitis, se logra distinguir una ligera diferencia visual en una de ellas en comparación con las demás. Como se muestra en la Figura 40, la muestra resaltada en rojo presenta una apariencia distinta, con una tonalidad y textura ligeramente diferente a las otras tres. Esta variación en la leche coincide con la observación realizada por el personal de ordeño durante el primer ordeño del día, cuando identificaron una anomalía en la secreción de uno de los cuartos mamarios.

Figura 39

Diferencia visual en la muestra de leche afectada por mastitis



Después de identificar visualmente la diferencia en una de las muestras de leche, se procede a realizar la medición de la conductividad eléctrica utilizando la sonda del sensor. Como se muestra en la Figura 41, la sonda es introducida en la muestra previamente destacada con el objetivo de registrar los valores que determinarían si la leche presenta una alteración significativa en sus propiedades.

Figura 40

Introducción de la sonda en la muestra con sospecha de mastitis



Una vez realizada la medición en la muestra con sospecha de mastitis, el sistema de detección IoT procesa los datos y los muestra en la pantalla OLED de la placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3). Como se observa en la Figura 42, el análisis corresponde al pezón 3, en el cual se registra un valor de conductividad eléctrica de 6.20 mS/cm.

Estos valores superan el umbral de 6.00 mS/cm, establecido como indicativo de una posible infección en el cuarto mamario. Debido a esta lectura, el sistema muestra en la pantalla el diagnóstico de "Posible Mastitis", confirmando la sospecha inicial basada en la diferencia visual de la muestra y en la observación previa realizada por el personal de ordeño.

Figura 41

Visualización del diagnóstico de mastitis en la pantalla OLED del sistema



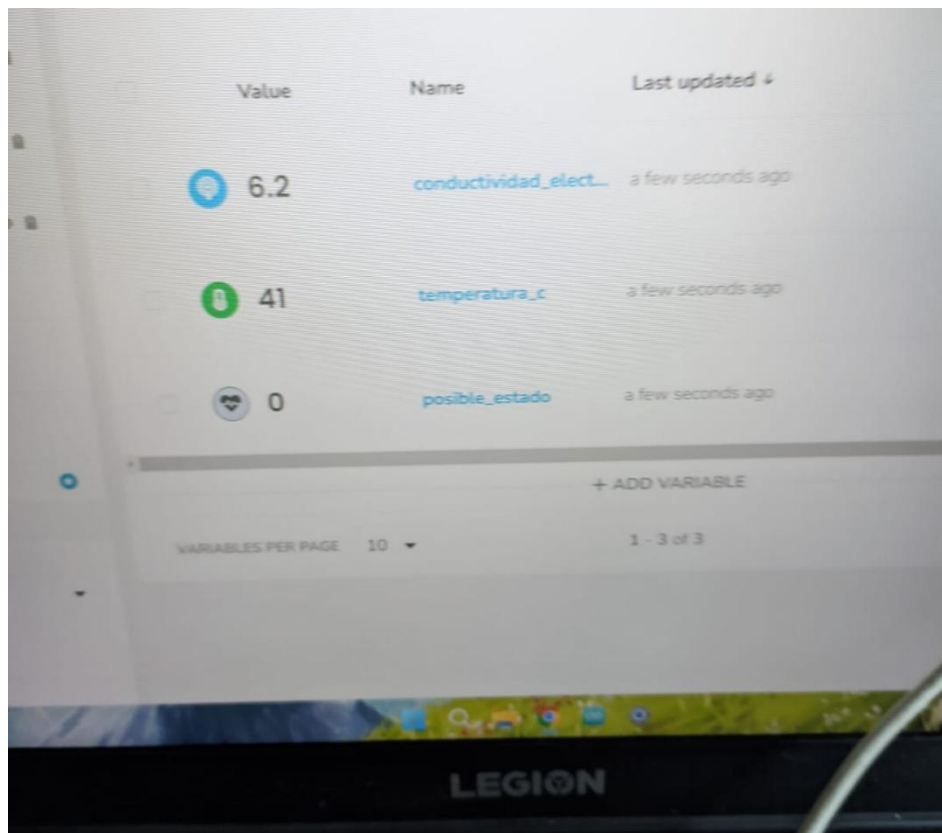
4.4.1.1. Comunicación entre el nodo y la base de datos

Para evaluar la transmisión de datos en tiempo real, el nodo es conectado al punto de acceso (AP) de la hacienda, permitiendo la comunicación con la plataforma Ubidots. A través de esta conexión, los valores obtenidos por el sensor son enviados automáticamente a la base de datos en la nube, asegurando la disponibilidad de la información para su monitoreo remoto.

Como se observa en la Figura 43, los valores registrados en la plataforma coinciden con los datos obtenidos en la pantalla OLED del nodo en la prueba anterior. Se reporta un valor de conductividad eléctrica de 6.2 mS/cm, lo que confirma la detección de posible mastitis en la vaca analizada. La correcta transmisión de estos datos verifica el funcionamiento del sistema en la comunicación con la nube, garantizando que la información pueda ser consultada en tiempo real desde cualquier dispositivo con acceso a la plataforma.

Figura 42

Datos transmitidos desde el nodo a la plataforma Ubidots



4.4.1.2. Recepción y representación de datos

Como parte del análisis de la comunicación entre el nodo y la base de datos, se verifica la correcta transmisión y almacenamiento de los datos en la plataforma Ubidots. En la Figura 44, se observa la representación gráfica de los valores de conductividad eléctrica (CE) registrados a lo largo del tiempo.

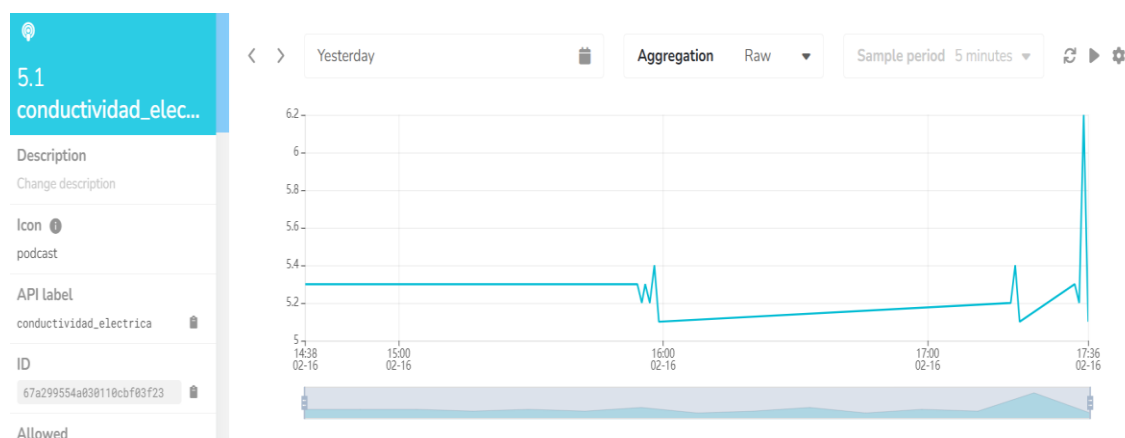
La gráfica muestra una tendencia estable en los valores de CE durante la mayor parte del periodo monitoreado, con valores cercanos a 5.4 mS/cm. Sin embargo, en determinados momentos se observan fluctuaciones que indican cambios en la calidad de la leche analizada. En particular, se evidencia un incremento abrupto en la conductividad eléctrica hacia el final

del periodo, alcanzando un valor de 6.2 mS/cm, lo que corresponde con la medición obtenida en la vaca con mastitis.

Este comportamiento respalda la detección de alteraciones en la leche a través del sistema, permitiendo identificar cambios significativos en la conductividad eléctrica que podrían estar asociados a infecciones en la glándula mamaria.

Figura 43

Gráfica de conductividad eléctrica registrada en la plataforma Ubidots



4.4.1.3. Resultado de pruebas Hacienda La Paz

La Tabla 13 presenta los valores de conductividad eléctrica obtenidos en cada uno de los cuartos de la ubre de las 20 vacas evaluadas en la Hacienda La Paz. Para cada animal, se tomaron mediciones en los cuatro cuartos anatómicos de la ubre: el cuarto anterior izquierdo (izquierdo delantero), el cuarto anterior derecho (derecho delantero), el cuarto posterior izquierdo (izquierdo trasero) y el cuarto posterior derecho (derecho trasero). Estos cuartos corresponden a las divisiones naturales de la glándula mamaria de la vaca, cada una con su propio sistema de producción y drenaje de leche.

Como se muestra en la Tabla 13, los valores normales de conductividad eléctrica varían entre 4.5 y 5.8, mientras que un valor superior a 6.0 puede indicar la presencia de mastitis. En los resultados obtenidos, 19 vacas registran valores dentro del rango normal, mientras que una vaca presenta un valor de 6.20 ms/cm en el cuarto posterior izquierdo, lo que sugiere un posible caso de mastitis. Esta vaca se ubica al final de la tabla para destacar la diferencia en sus resultados con respecto a las demás vacas evaluadas.

Tabla 14*Resultado de pruebas Hacienda La Paz, Huaquer*

Vaca	Anterior Izquierdo	Anterior Derecho	Posterior Izquierdo	Posterior Derecho	Estado
Vaca 1	4,99	5,74	5,45	5,28	Normal
Vaca 2	4,7	4,7	4,58	5,63	Normal
Vaca 3	5,28	5,42	4,53	5,76	Normal
Vaca 4	5,58	4,78	4,74	4,74	Normal
Vaca 5	4,9	5,18	5,06	4,88	Normal
Vaca 6	5,3	4,68	4,88	4,98	Normal
Vaca 7	5,09	5,52	4,76	5,17	Normal
Vaca 8	5,27	4,56	5,29	4,72	Normal
Vaca 9	4,58	5,73	5,76	5,55	Normal
Vaca 10	4,9	4,63	5,39	5,07	Normal
Vaca 11	4,66	5,14	4,54	5,68	Normal
Vaca 12	4,84	5,36	4,91	5,18	Normal
Vaca 13	5,21	4,74	5,76	5,51	Normal
Vaca 14	5,72	5,66	5,28	5,7	Normal
Vaca 15	4,62	4,75	4,56	4,92	Normal
Vaca 16	5,01	4,85	5,58	4,96	Normal
Vaca 17	4,87	5,21	4,68	5,54	Normal
Vaca 18	4,6	5,78	5,5	4,76	Normal
Vaca 19	4,51	5,56	5,42	5,45	Normal
Vaca 20	5,5	4,6	6,2	4,97	Posible Mastitis

4.4.1. Prueba en Finca La Palmera de Pioter

La Finca La Palmera se encuentra ubicada en la parroquia Pioter, en el cantón Tulcán, provincia del Carchi tal como se muestra en la Figura 45. En este lugar se llevan a cabo pruebas para evaluar el desempeño del sistema de monitoreo. Para ello, se disponen de 15 vacas, a las cuales se les realiza mediciones de conductividad eléctrica en las muestras que se toman. Durante la evaluación, se identifican dos casos positivos de mastitis, lo que permite validar la efectividad del sistema en la detección temprana de la enfermedad. Estos resultados contribuyen a la implementación de estrategias de prevención y control, optimizando la producción lechera y mejorando la salud del ganado.

Figura 44

Ubicación del Sector en el que se Realizaron las Pruebas



Debido a que la Finca La Palmera no cuenta con infraestructura de establo para el ordeño, el sistema se implementa en campo abierto. En esta finca, el ordeño se realiza de manera manual sin la asistencia de sistemas mecánicos, lo que requiere adaptar las condiciones

de prueba a las prácticas tradicionales de los lecheros. Para ello, en la Figura 46 se muestra que se ha improvisado un pequeño mesón en las proximidades del área de ordeño manual, facilitando la recolección de muestras de leche y la medición de los parámetros de conductividad eléctrica en tiempo real. Esta metodología permite evaluar la funcionalidad del sistema en condiciones reales de producción, asegurando su viabilidad para su aplicación en entornos similares donde no se dispone de infraestructura mecanizada.

Figura 45

Lugar de ordeño en la finca La Palmera



Para la realización de las pruebas en la Finca La Palmera, se emplean cuatro recipientes individuales para la recolección de muestras de leche de cada cuarto de la ubre de las vacas evaluadas. Este procedimiento permite analizar de manera independiente la calidad de la leche producida en cada sección de la glándula mamaria, facilitando la detección de posibles anomalías. Una vez recolectadas las muestras, se procede a medir la conductividad eléctrica, cuyos resultados se visualizan en tiempo real a través de la pantalla del sistema. Este protocolo se aplica a la totalidad de las 15 vacas presentes en la finca, garantizando una evaluación

integral del hato y permitiendo la identificación de dos casos positivos de mastitis. En la Figura 47 se muestra el proceso de medición de la conductividad eléctrica en las muestras de leche obtenidas de los diferentes cuartos de la ubre.

Figura 46

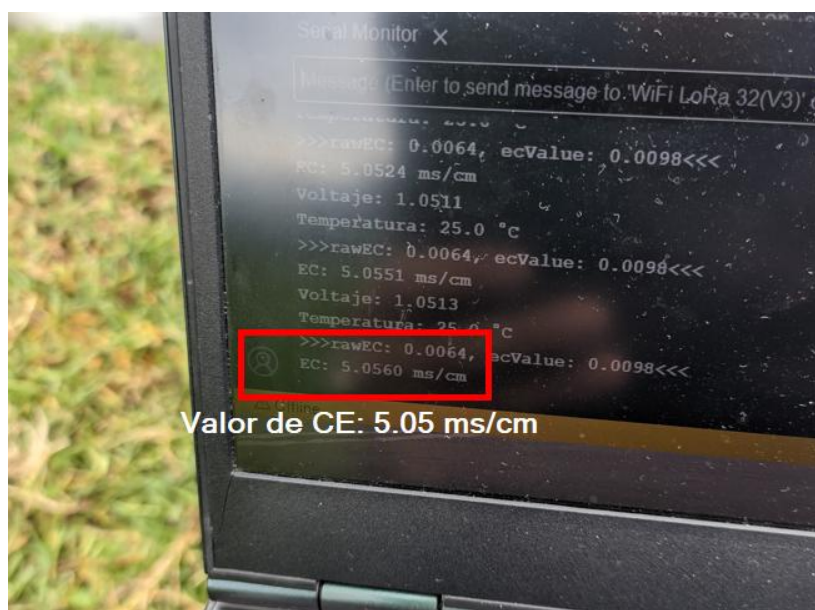
Medición de la conductividad eléctrica en muestras de leche recolectadas en la Finca La Palmera.



Durante las pruebas realizadas, la mayoría de los valores obtenidos en la medición de la conductividad eléctrica de la leche se encuentran dentro del rango considerado normal, oscilando entre 4.5 y 5.8 ms/cm. Estos resultados indican la ausencia de mastitis en la mayoría de las vacas evaluadas, validando el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo implementado. En la Figura 48, se muestra un ejemplo de una medición realizada, en la que el sistema registra un valor de conductividad eléctrica de 5.05 ms/cm, lo que confirma que la leche analizada corresponde a un estado saludable dentro de los parámetros establecidos.

Figura 47

Visualización del valor de CE registrado durante las pruebas



4.4.1.1. Evaluación de Conductividad Eléctrica en Vaca con Mastitis

Para la evaluación de la vaca con sospecha de mastitis, se inicia la prueba tomando una muestra de leche del cuarto anterior izquierdo. La muestra es recolectada en un recipiente individual y posteriormente se mide su conductividad eléctrica utilizando el sensor del sistema de monitoreo. El valor obtenido es de 7.19 ms/cm, lo que supera el umbral de 6 ms/cm, indicando una posible presencia de mastitis en este cuarto de la ubre. En la Figura 49, se muestra el proceso de medición realizado, donde se observa la sonda en contacto con la muestra de leche y el valor registrado en el sistema, confirmando la alteración en los parámetros de conductividad.

Figura 48

Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto anterior izquierdo de la vaca con sospecha de mastitis.



A continuación, se procede con la medición en el cuarto anterior derecho, siguiendo el mismo procedimiento de recolección y análisis. El valor obtenido es de 7.01 ms/cm, lo que nuevamente supera el umbral de normalidad y confirma la presencia de mastitis también en este sector de la ubre. En la Figura 50, se observa la medición realizada y el valor registrado en el sistema.

Figura 49

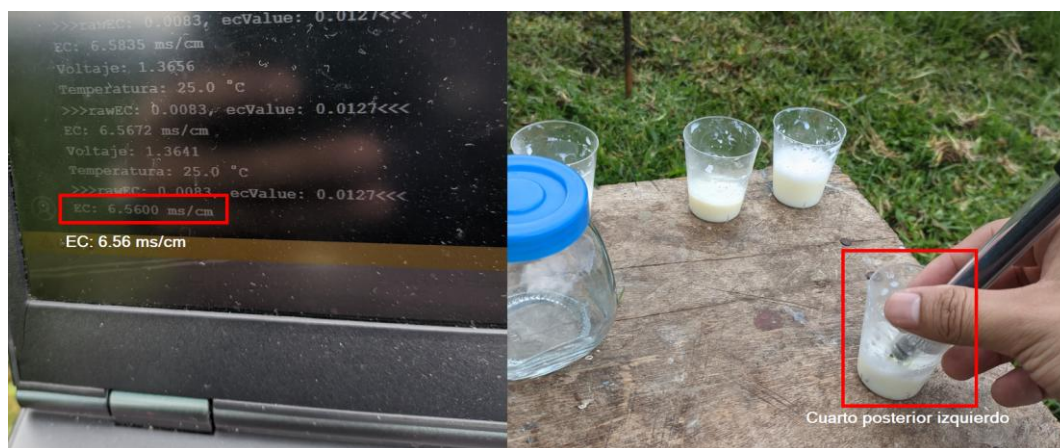
Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto anterior derecho de la vaca con mastitis



La siguiente medición se realiza en el cuarto posterior izquierdo, utilizando el mismo procedimiento de recolección y análisis. En esta ocasión, el sistema registra un valor de 6.56 ms/cm, el cual aún se encuentra por encima del umbral de normalidad, indicando también una posible infección en esta sección de la ubre. En la Figura 51, se muestra el momento de la medición y el valor obtenido en el monitor del sistema.

Figura 50

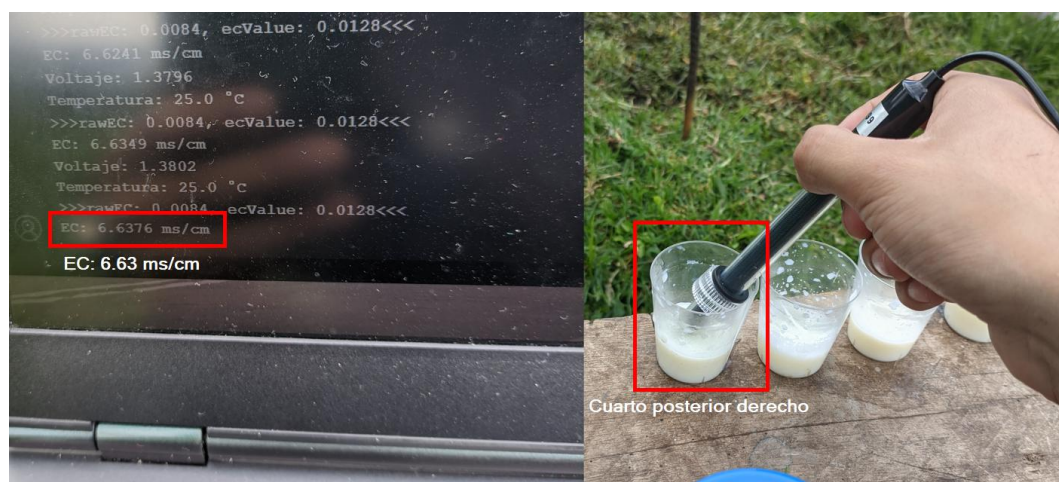
Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto posterior izquierdo de la vaca con mastitis



Finalmente, se realiza la medición en el cuarto posterior derecho, completando la evaluación de los cuatro cuartos de la ubre de la vaca con mastitis. En esta medición, el sistema registra un valor de 6.63 ms/cm, el cual continúa por encima del umbral de normalidad, reafirmando la presencia de la infección en este sector. En la Figura 52, se observa el procedimiento de análisis y el resultado obtenido en la pantalla del sistema.

Figura 51

Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto posterior derecho de la vaca con mastitis



Los resultados obtenidos en las mediciones de conductividad eléctrica en cada uno de los cuatro cuartos de la ubre de la vaca analizada evidencian la presencia de mastitis en su totalidad. En cada prueba, los valores registrados superan el umbral de 6.0 ms/cm, con mediciones de 7.19 ms/cm en el cuarto anterior izquierdo, 7.01 ms/cm en el cuarto anterior derecho, 6.56 ms/cm en el cuarto posterior izquierdo y 6.63 ms/cm en el cuarto posterior derecho. Estos resultados indican una infección generalizada en la glándula mamaria, lo que sugiere la necesidad de un tratamiento inmediato para evitar complicaciones en la salud del animal y prevenir la propagación de la enfermedad.

El aumento de la conductividad eléctrica en los cuatro cuartos de la ubre se debe a la alteración en la composición de la leche, provocada por la inflamación del tejido mamario y la mayor presencia de iones como el sodio y el cloro, indicadores característicos de la mastitis. Esta situación resalta la importancia del sistema de monitoreo implementado, ya que permite detectar de manera temprana infecciones en el ganado lechero, facilitando la toma de decisiones oportunas para el tratamiento y control de la enfermedad.

A diferencia del caso detectado en la Hacienda La Paz, donde la leche proveniente del cuarto afectado presentaba una coloración alterada, más rojiza y con características visuales evidentes de mastitis, en este caso, las muestras recolectadas en la Finca La Palmera presentan un aspecto visualmente normal, sin cambios notorios en su color o textura. Sin embargo, los valores de conductividad eléctrica obtenidos en las mediciones indican una infección generalizada en los cuatro cuartos de la ubre, lo que sugiere la presencia de mastitis subclínica.

Este tipo de mastitis no provoca alteraciones evidentes en la apariencia de la leche, lo que dificulta su detección mediante los métodos tradicionales de inspección visual. No obstante, el sistema de monitoreo es capaz de detectar esta condición a través de la alteración en los valores de conductividad eléctrica, lo que permite un diagnóstico temprano y la aplicación de medidas preventivas antes de que la enfermedad evolucione a un estado clínico más severo. Estos resultados demuestran la utilidad del sistema no solo en la detección de mastitis en su fase aguda, sino también en la identificación de casos subclínicos, que pueden afectar la calidad de la leche y la productividad del hato lechero a largo plazo.

4.4.1.2. Evaluación de Conductividad Eléctrica en la segunda vaca con Mastitis

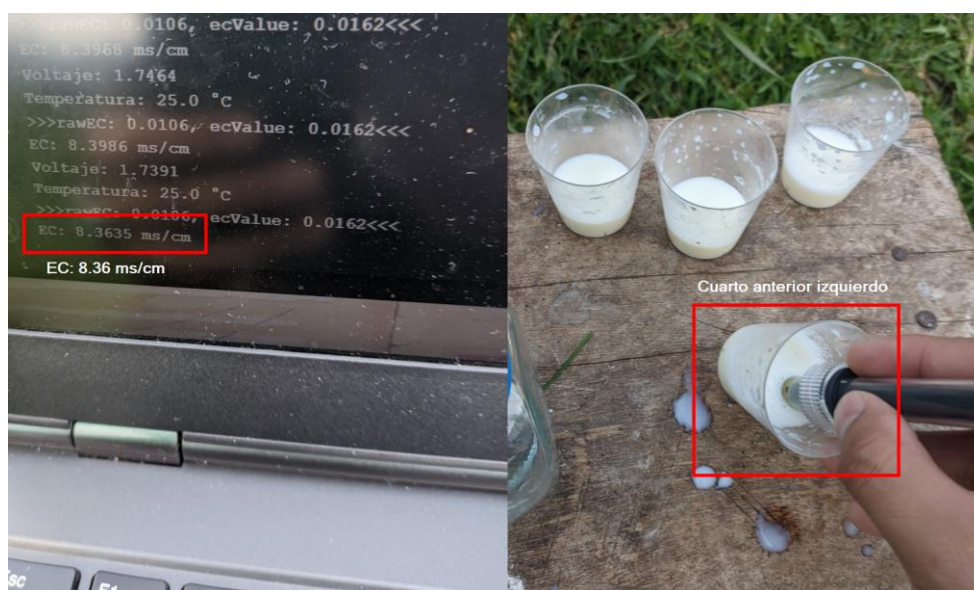
En la segunda vaca diagnosticada con mastitis, la medición de conductividad eléctrica muestra una diferencia notable en comparación con el caso anterior. En este caso, solo el cuarto anterior izquierdo presenta un valor por encima del umbral de mastitis, mientras que los otros tres cuartos registran valores dentro del rango normal. Sin embargo, el valor obtenido en este cuarto es excepcionalmente alto, alcanzando 8.36 ms/cm, lo que indica una infección más severa en esta sección de la ubre. Este valor elevado se puede verificar visualmente, ya que la

leche del cuarto afectado presenta un tono diferente, consistente con la presencia de mastitis, lo que refuerza el diagnóstico obtenido a través del sistema de monitoreo.

En la Figura 53, se observa la medición realizada, donde se confirma el resultado registrado por el sistema. Este valor significativamente elevado sugiere una fase más avanzada de la enfermedad en este cuarto específico, lo que podría requerir un tratamiento inmediato para evitar complicaciones y la propagación de la infección al resto de la glándula mamaria.

Figura 52

Medición de la conductividad eléctrica en el cuarto anterior izquierdo de la segunda vaca con mastitis.



4.4.1.3. Resultado de pruebas Finca La Palmera

Las pruebas realizadas en la Finca La Palmera permiten evaluar el desempeño del sistema en un entorno de ordeño manual y sin infraestructura mecanizada. En total, se analizan 15 vacas, aplicando mediciones de conductividad eléctrica en cada uno de los cuatro cuartos de la ubre para detectar posibles casos de mastitis. Los resultados obtenidos muestran que la mayoría de las vacas presentan valores dentro del rango de normalidad, indicando un estado

saludable de la glándula mamaria. Sin embargo, se identifican dos casos positivos de mastitis, con variaciones en la severidad de la enfermedad.

En la primera vaca diagnosticada, los cuatro cuartos de la ubre presentan valores superiores a 6.0 ms/cm, lo que sugiere una mastitis subclínica generalizada sin cambios evidentes en la apariencia de la leche. En la segunda vaca afectada, únicamente el cuarto anterior izquierdo muestra un valor anómalo, pero con un nivel significativamente alto de 8.36 ms/cm, lo que indica una infección más severa y localiza

En la Tabla 14, se presentan los valores de conductividad eléctrica obtenidos para cada vaca evaluada.

Tabla 15

Resultado de pruebas Finca La Palmera, Pioter

Vaca	Anterior	Anterior	Posterior	Posterior	Estado
	Izquierdo	Derecho	Izquierdo	Derecho	
Vaca 1	5.12	4.98	5.65	5.34	Normal
Vaca 2	4.89	5.45	5.32	4.95	Normal
Vaca 3	5.78	5.12	5.67	5.43	Normal
Vaca 4	5.34	4.79	5.50	5.20	Normal
Vaca 5	5.11	5.35	5.60	5.44	Normal
Vaca 6	4.95	5.50	5.39	5.10	Normal
Vaca 7	5.47	5.12	5.76	5.33	Normal
Vaca 8	4.88	5.44	5.31	5.02	Normal
Vaca 9	5.60	5.38	5.45	5.14	Normal

Vaca 10	5.22	5.19	5.58	5.34	Normal
Vaca 11	5.09	5.25	5.49	5.40	Normal
Vaca 12	5.43	5.18	5.70	5.21	Normal
Vaca 13	5.30	5.12	5.57	5.29	Normal
Vaca 14	7.19	7.01	6.56	6.63	Posible Mastitis
Vaca 15	8.36	5.23	5.50	5.11	Posible Mastitis

Nota: En esta tabla, los valores resaltados indican los casos donde se detecta mastitis, superando el umbral de 6.0 ms/cm. Como se observa, la Vaca 14 presenta infección en todos los cuartos, mientras que la Vaca 15 solo en el cuarto anterior izquierdo, pero con un valor significativamente alto.

4.4.2. Seguimiento en Hacienda La Paz - Segunda evaluación

El objetivo de esta segunda evaluación es verificar la evolución de la enfermedad y determinar si los valores de conductividad eléctrica han mejorado, lo que indicaría la efectividad del tratamiento médico aplicado. El tratamiento consiste en la administración de antibióticos específicos para mastitis bovina, junto con medidas de apoyo como la limpieza y desinfección regular de las ubres, y la aplicación de antiinflamatorios para reducir la inflamación de la glándula mamaria. Durante esta visita, se realiza un nuevo análisis de los cuatro cuartos de la ubre de la vaca afectada, utilizando el mismo procedimiento de medición para asegurar la consistencia de los resultados.

Tal como se muestra en la Figura 53, se emplea un recipiente específico para la toma de muestras de cada uno de los cuartos de la ubre, asegurando que el proceso sea limpio y eficiente. Esta técnica permite obtener las muestras necesarias para realizar las mediciones de conductividad eléctrica, un parámetro clave para el diagnóstico de mastitis. La recolección se realiza cuidadosamente para evitar cualquier tipo de contaminación y garantizar la precisión de los resultados obtenidos.

Figura 53

Proceso de recolección de muestras de leche en la segunda evaluación en la Hacienda La Paz



En la segunda evaluación realizada en la Hacienda La Paz, el valor de conductividad eléctrica (CE) del cuarto posterior izquierdo, que inicialmente había registrado 6.2 ms/cm durante la primera evaluación, ha experimentado una disminución, alcanzando 5.94 ms/cm. Este valor, aunque sigue siendo cercano al umbral de 6.0 ms/cm (considerado como el límite para diagnosticar mastitis), está por debajo del umbral, lo que indica que la vaca ha mostrado una mejora en su condición. Esta reducción sugiere que el tratamiento aplicado ha tenido un

impacto positivo, contribuyendo a la recuperación parcial de la vaca. Aunque todavía es necesario un seguimiento continuo, este descenso en los valores de CE es un buen indicio de que la mastitis podría estar en proceso de remisión.

En la Figura 55, se muestra la medición del cuarto posterior izquierdo con el valor registrado de 5.94 ms/cm, confirmando la reducción en la conductividad eléctrica respecto a la medición anterior.

Figura 54

Medición del cuarto afectado de la vaca con mastitis

Date		Value	Context	
2025-02-24 16:25:05 -05:00		4.84	{}	
2025-02-24 16:24:45 -05:00	Cuarto posterior izquierdo	5.94	{}	
2025-02-24 16:23:54 -05:00		4.7	{}	
2025-02-24 16:23:09 -05:00		5.49	{}	

4.5. Análisis de resultados

En esta sección, se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas de conductividad eléctrica realizadas. Los datos corresponden a las mediciones de los cuatro cuartos de la ubre, con el fin de evaluar el estado de salud de las vacas y detectar posibles casos de mastitis. Las mediciones se realizan de manera sistemática, y los resultados se analizan en función del umbral de referencia para determinar si las vacas presentan condiciones normales o de posible mastitis.

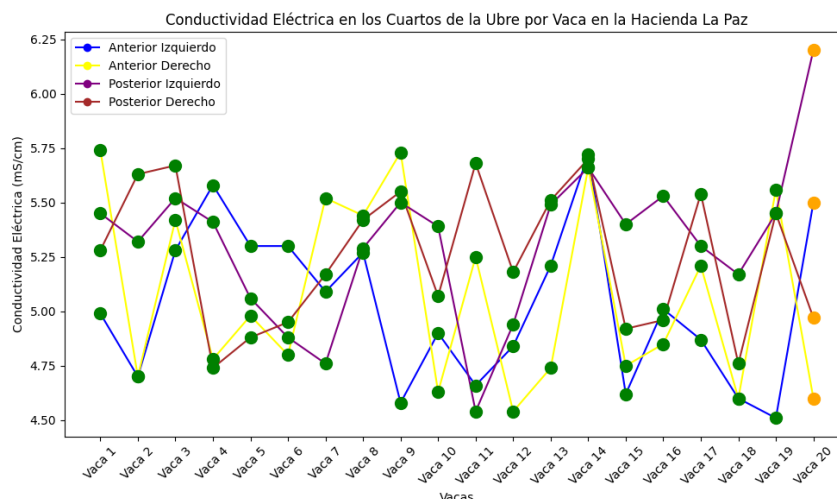
4.5.1. Análisis de Resultados de Conductividad Eléctrica en la Hacienda La Paz

En la Figura 56 se presenta el análisis de los datos obtenidos de las mediciones de conductividad eléctrica en los cuatro cuartos de la ubre de 20 vacas en la Hacienda La Paz. Las

mediciones se realizan para evaluar el estado de salud de las vacas y detectar posibles casos de mastitis. Los puntos en la gráfica están coloreados según el estado de salud de cada vaca: Normal (verde), Posible (naranja) y Mastitis (rojo).

Figura 55

Conductividad Eléctrica en los Cuartos de la Ubre por Vaca en la Hacienda La Paz



La mayoría de las vacas tienen valores de conductividad eléctrica dentro del rango considerado normal, lo que indica que los cuartos de la ubre están en condiciones saludables y no presentan signos de mastitis. Sin embargo, la Vaca 20 presenta un valor anormal elevado en uno de sus cuartos, con un valor de 6.2, lo que indica la posibilidad de mastitis en ese cuarto. Esta vaca está clasificada con el estado Posible Mastitis, lo que sugiere que se debe hacer un seguimiento más cercano para confirmar o descartar la presencia de una infección.

Este análisis resalta la efectividad de la medición de la conductividad eléctrica como un indicador temprano para la detección de mastitis. La mayoría de las vacas muestran resultados dentro de los rangos normales, lo que permite asegurar la calidad de la leche y la salud del ganado. La identificación temprana de vacas con valores elevados de conductividad eléctrica, como es el caso de la Vaca 20, facilita la implementación de medidas preventivas antes de que la infección evolucione a un estado clínico más severo.

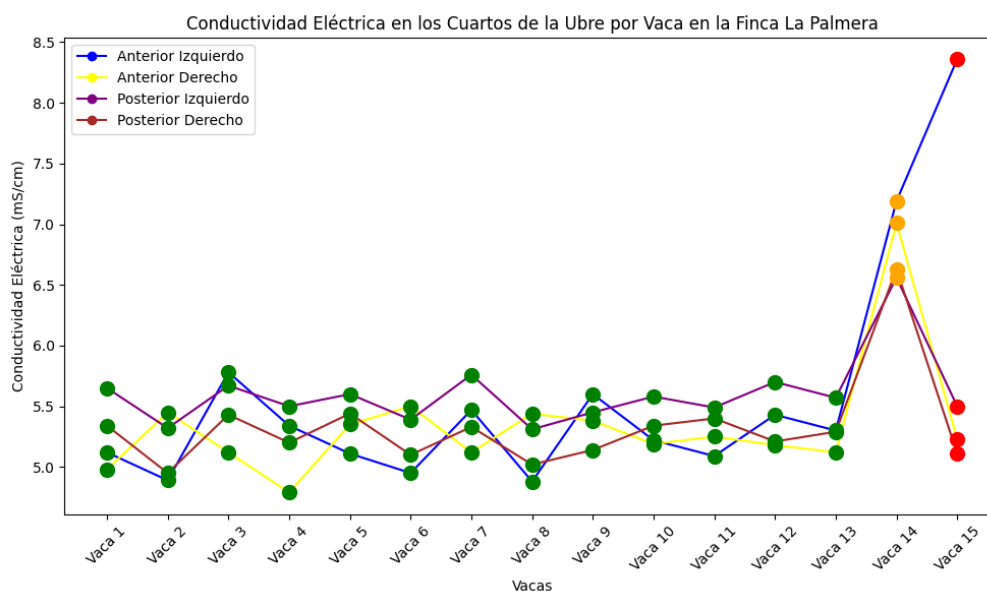
4.5.2. Análisis de Resultados de Pruebas de Conductividad Eléctrica en la Finca La Palmera, Pioter

En los resultados obtenidos, se observa una variabilidad en las mediciones entre las vacas y entre los cuartos de la ubre de una misma vaca. De las 15 vacas evaluadas, la mayoría presentó resultados dentro del rango normal de conductividad eléctrica, lo que indica que no presentaban infecciones en los cuartos de la ubre. Sin embargo, la Vaca 14 y la Vaca 15, mostraron un aumento significativo en los valores de conductividad eléctrica, alcanzando valores superiores al umbral de mastitis, lo que sugiere posibles infecciones. En particular, la Vaca 15 muestra un valor elevado en todos los cuartos de la ubre, lo que confirma la presencia de mastitis. Esta información es crucial para aplicar medidas preventivas y correctivas en la gestión de la salud del ganado, optimizando la calidad de la leche y la productividad de la finca.

En la Figura 57, se presenta la gráfica de las mediciones de conductividad eléctrica de los cuartos de la ubre de cada vaca, donde se puede observar claramente la variabilidad entre las vacas y los cuartos, así como las vacas con valores fuera del rango normal.

Figura 56

Conductividad Eléctrica en los Cuartos de la Ubre por Vaca en la Finca La Palmera, Pioter

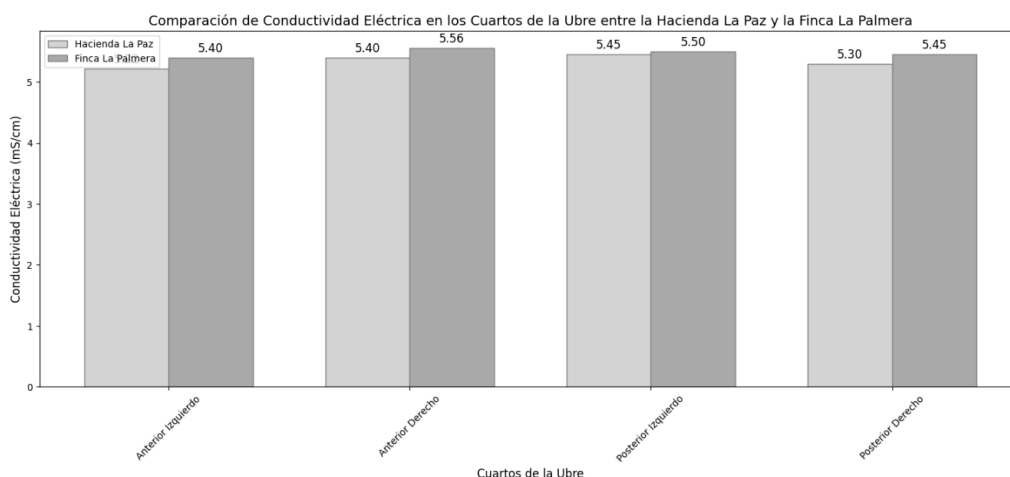


4.5.3. Comparación de Conductividad Eléctrica Promedio entre la Hacienda La Paz y la Finca La Palmera

El análisis se realiza utilizando los valores de conductividad eléctrica de los cuatro cuartos de la ubre de cada vaca. Al comparar los valores entre ambos lugares, se observa que la conductividad eléctrica promedio en los cuartos de la ubre es bastante similar, con valores ligeramente superiores en algunos cuartos de las vacas en la Finca La Palmera, aunque sin una diferencia significativa entre ambos lugares. Esta información es útil para identificar posibles patrones y determinar si hay alguna variabilidad en la calidad de la leche que podría ser atribuida a la zona de producción. En la Figura 58 se muestra la comparación de la conductividad eléctrica promedio para cada cuarto de la ubre entre los dos lugares, destacando las mediciones por cuarto (anterior izquierdo, anterior derecho, posterior izquierdo y posterior derecho).

Figura 57

Comparación de Conductividad Eléctrica Promedio entre la Hacienda La Paz y la Finca La Palmera

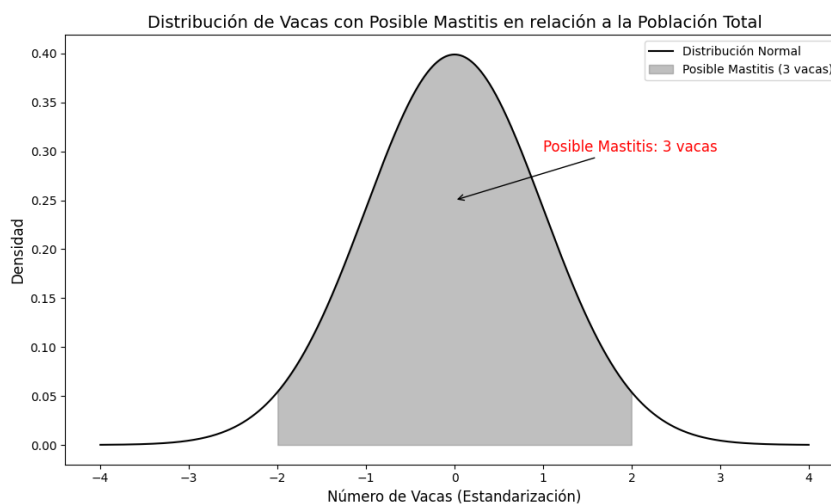


En la Figura 59, se presenta la distribución normal de las vacas en relación con su conductividad eléctrica, representada a través de una curva gaussiana. Esta distribución permite

observar cómo se distribuyen los casos de vacas dentro de una población total de 35 vacas, donde se identifican 3 vacas con Posible Mastitis. Los valores de conductividad eléctrica de estas vacas se sitúan dentro de la zona sombreada de la curva, que abarca el intervalo entre -2 y 2 desviaciones estándar de la media. Este rango representa los casos potenciales de mastitis, donde la elevación de los valores de conductividad eléctrica sugiere alteraciones en la calidad de la leche.

Figura 58

Distribución de Vacas con Posible Mastitis en relación con la Población Total



La mayoría de las vacas caen dentro de la parte central de la distribución, donde los valores de conductividad eléctrica son considerados normales. Sin embargo, las vacas con posible mastitis se encuentran en el rango de valores más alejados de la media, lo que indica una posible alteración en su salud. En este contexto, la distribución normal no solo facilita la identificación de las vacas con valores atípicos, sino que también proporciona un marco para evaluar la prevalencia de posibles enfermedades en el hato lechero. Estos resultados resaltan la efectividad de la medición de conductividad eléctrica como un indicador temprano de posibles trastornos como la mastitis, lo que permite tomar decisiones informadas sobre el manejo sanitario del ganado.

4.6. Comparativa con el método California Mastitis Test (CMT)

En esta sección, se realiza una comparativa entre el sistema de monitoreo IoT propuesto para la detección temprana de mastitis y el tradicional método California Mastitis Test (CMT). La evaluación se centra en aspectos técnicos específicos de ambos enfoques, analizando su precisión, eficiencia, tiempo de diagnóstico y facilidad de implementación en el entorno productivo. Se presentan los resultados obtenidos a partir de pruebas de campo realizadas con los dos tipos de mastitis, destacando las ventajas y limitaciones del sistema IoT en comparación con el CMT, con el objetivo de validar la efectividad del prototipo en condiciones reales de ordeño.

Como primer paso, se seleccionan dos muestras de leche provenientes de vacas con diferentes tipos de mastitis: una muestra correspondiente a mastitis subclínica y otra a mastitis clínica. Estas muestras se analizan para observar las diferencias en los parámetros de conductividad eléctrica. En la Figura 60 se muestra una imagen de los frascos que contienen ambas muestras, permitiendo visualizar claramente las diferencias en su apariencia y condición.

Figura 59

Muestras de leche de vacas con mastitis subclínica y clínica.



En el primer análisis, se presenta la muestra correspondiente a mastitis clínica. El sistema de monitoreo arroja un valor de 8,21 mS/cm para esta muestra, lo que indica una alteración significativa en la conductividad eléctrica de la leche, un claro indicador de mastitis en la vaca. En la Figura 61 se muestra la medición en tiempo real, donde se puede apreciar tanto el sensor de conductividad eléctrica sumergido en la muestra como el valor de 8,21 mS/cm reflejado en la pantalla del dispositivo.

Figura 60

Muestra de leche con mastitis clínica y valor de conductividad eléctrica registrado.



Seguido de la medición de la muestra con mastitis clínica, se procede con la evaluación de la muestra correspondiente a mastitis subclínica. En este caso, el sistema registra un valor de 7,25 mS/cm, lo que indica un aumento en la conductividad eléctrica, aunque en un rango menor al observado en la mastitis clínica. Esta medición sugiere la presencia de mastitis en una fase subclínica, donde los síntomas no son tan evidentes visualmente. En la Figura 62 se muestra la imagen con la medición, donde el valor de 7,25 mS/cm se refleja en la pantalla del dispositivo.

Figura 61

Muestra de leche con mastitis subclínica y medición de conductividad eléctrica.



Para verificar que el sistema está funcionando correctamente, se mide una muestra de leche normal, y el resultado es el esperado. El sistema arroja un valor de 5,46 mS/cm, lo que se encuentra dentro del rango normal, ya que el valor es inferior a 6,0 mS/cm. Esto indica que la muestra no presenta signos de mastitis, validando así la precisión y el buen funcionamiento del sistema. En la Figura 63 se muestra la medición de la leche normal, con el valor de 5,46 mS/cm reflejado en la pantalla del dispositivo.

Figura 62

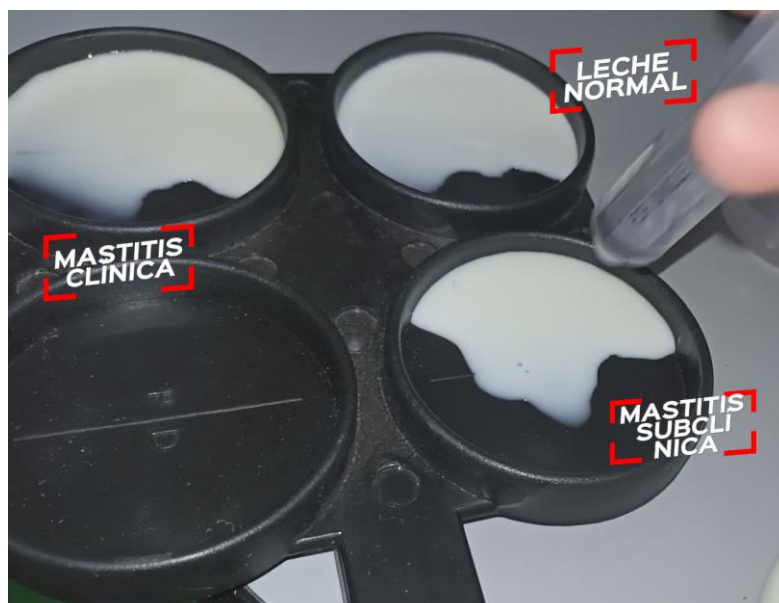
Muestra de leche normal y medición de conductividad eléctrica.



Como siguiente paso, se agregan las tres muestras de leche (normal, con mastitis clínica y subclínica) en una paleta para prueba de mastitis, utilizando un gotero para la correcta dosificación de cada muestra. Este procedimiento se realiza para llevar a cabo el California Mastitis Test (CMT), con el fin de comparar los resultados obtenidos a través de este método tradicional con los valores arrojados por el sistema de monitoreo. En la Figura 63 se muestra el proceso de preparación de las muestras en la paleta para su posterior análisis con el CMT.

Figura 63

Preparación de las muestras de leche para la prueba de mastitis.



Luego, se agregan 2 ml de cada una de las muestras de leche (normal, con mastitis clínica y subclínica) en los compartimentos correspondientes de la paleta para la prueba de mastitis (CMT). El reactivo utilizado para la prueba se añade a cada muestra, lo que permite observar la reacción del líquido con la leche y evaluar el grado de mastitis presente.

Después de mezclar adecuadamente las muestras con el reactivo para la prueba de mastitis, se observan diferencias claras en la tonalidad y viscosidad del gel formado en cada compartimento. En la muestra correspondiente a mastitis clínica, el gel presenta una alta viscosidad y una tonalidad más intensa, lo que indica una infección severa. En la muestra de mastitis subclínica, el gel muestra una menor viscosidad y un cambio menos pronunciado en la tonalidad, lo que refleja una infección en una fase más temprana. Finalmente, la muestra de leche normal no muestra cambios significativos, manteniendo una apariencia homogénea sin formación de gel, lo que confirma la ausencia de mastitis. Estos resultados se observan en la

Figura 65, donde la diferencia en la intensidad del gel y la viscosidad entre las muestras es evidente, demostrando la efectividad del CMT para diferenciar los niveles de infección.

Figura 64

Resultado de la prueba de CMT con muestras de leche normal, mastitis subclínica y mastitis clínica.



A continuación, se agrega 60 ml de la leche con mastitis clínica (la cual arrojó un valor de 8,21 mS/cm en la prueba inicial) a 1 litro de leche normal. Este procedimiento se realiza con el objetivo de observar el comportamiento y las posibles variaciones en los valores de conductividad eléctrica (CE) tras la mezcla de ambas muestras. El cambio esperado en la conductividad eléctrica permitirá verificar cómo la leche con mastitis clínica afecta la medición de la muestra de leche normal.

Antes de agregar la leche con mastitis clínica, se mide la conductividad eléctrica (CE) de la leche normal que se utilizará para la mezcla. El sistema de monitoreo IoT registra un valor de 4,06 mS/cm, que corresponde a la medición inicial de la leche sin contaminantes. Este valor actúa como base para evaluar el cambio que experimentará la conductividad eléctrica una vez

que se agregue la leche con mastitis clínica. En la Figura 66 se muestra la medición de CE de la leche normal antes de la adición de la muestra infectada.

Figura 65

Medición inicial de la conductividad eléctrica de la leche normal.



Después de agregar 60 ml de la leche con mastitis clínica a 1 litro de leche normal, en la Figura 67 se muestra que el sistema registra un valor de 5,18 mS/cm. Este valor representa un aumento en la conductividad eléctrica (CE) con respecto al valor inicial de 4,06 mS/cm, lo que sugiere que la leche con mastitis clínica ha influido en la muestra, incrementando la conductividad eléctrica. Sin embargo, el valor obtenido es inferior al de la leche infectada por mastitis clínica pura (8,21 mS/cm), lo que indica que, aunque la leche con mastitis ha alterado la muestra, la infección no se ha incrementado de manera significativa en esta mezcla. Este resultado valida que el sistema de monitoreo es sensible a las variaciones en la calidad de la leche y puede detectar cambios causados por la presencia de mastitis, incluso cuando las concentraciones no son tan altas.

Figura 66

Medición de conductividad eléctrica después de mezclar leche normal con leche infectada por mastitis clínica.



El incremento observado a 5,18 mS/cm confirma que incluso pequeñas cantidades de leche con mastitis pueden elevar significativamente la conductividad eléctrica total. Este resultado demuestra que cuando el ordeñador mezcla leche normal con leche proveniente de una vaca afectada por mastitis, la leche del tarro puede quedar contaminada, afectando la calidad total de la muestra. Al entregar esta leche al recolector, si se realizan pruebas de mastitis, es probable que el resultado sea positivo, lo que implica que todo el contenedor de leche, ahora mezclada con la leche infectada, no cumpla con los requisitos sanitarios y sea descartado. Este escenario subraya la importancia de controlar la contaminación cruzada durante el proceso de ordeño para evitar la pérdida de productos lácteos.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El sistema de monitoreo desarrollado para la detección temprana de mastitis en ganado lechero constituye una herramienta eficaz y accesible para los pequeños productores de la provincia del Carchi. A diferencia del método tradicional de prueba de mastitis (CMT), que requiere de procedimientos más lentos y del manejo de conocimientos técnicos para su correcta interpretación, el sistema propuesto permite una detección inmediata. Al introducir el sensor en la muestra de leche, el dispositivo proporciona los resultados obtenidos, visualizados en su pantalla OLED. Esta rapidez en la obtención de datos sobre la conductividad eléctrica de la leche favorece una identificación precisa y ágil de la mastitis, reduciendo considerablemente el tiempo de diagnóstico contribuyendo así a la optimización de la calidad de la leche y a la prevención de pérdidas económicas derivadas de la enfermedad.

El sistema desarrollado permite a los ganaderos optimizar la producción de leche mediante la detección temprana de los signos de mastitis, lo cual es fundamental para evitar daños en la salud del ganado y la pérdida de calidad de la leche. Al identificar de manera precisa y rápida la presencia de mastitis en etapas iniciales, los ganaderos pueden implementar medidas preventivas o correctivas de forma oportuna. Estas medidas pueden incluir tratamientos específicos para el ganado afectado, ajustes en la rutina de ordeño o modificaciones en las condiciones de manejo, lo que reduce el riesgo de propagación de la enfermedad. El beneficio de esta detección temprana radica en la capacidad de minimizar las pérdidas económicas derivadas de la mastitis, como la disminución de la producción de leche y la afectación de su calidad, además de evitar costos adicionales por tratamientos más costosos en etapas avanzadas de la enfermedad. Este enfoque proactivo no solo mejora la salud del ganado, sino que también asegura la estabilidad y rentabilidad de la producción lechera a largo plazo.

El análisis de los datos recopilados y las alertas generadas por el sistema facilita la toma de decisiones informadas por parte de los ganaderos, gracias a la implementación de una plataforma accesible de monitoreo remoto, como Ubidots. Esta plataforma permite a los propietarios acceder a la información desde cualquier ubicación, ya sea a través de un computador o dispositivo móvil, lo que brinda una flexibilidad significativa en la gestión de la salud del ganado. Al contar con un historial completo de los datos almacenados, los propietarios pueden realizar análisis estadísticos y evaluar tendencias a lo largo del tiempo, lo que les proporciona una herramienta valiosa para la toma de decisiones estratégicas. Esta capacidad de acceder a datos históricos y actuales no solo mejora la gestión del ganado, sino que también permite una planificación más eficiente, contribuyendo a la sostenibilidad de las explotaciones ganaderas locales.

A pesar de los desafíos inherentes a la implementación de tecnologías en áreas rurales, el sistema basado en IoT se presenta como una solución viable y efectiva para los ganaderos. La integración de esta tecnología en el proceso de monitoreo de la salud del ganado facilita la evolución de métodos tradicionales, permitiendo una mayor eficiencia y precisión en la gestión de las explotaciones lecheras. La accesibilidad de los dispositivos y su fácil implementación permiten que los ganaderos adopten esta tecnología sin barreras significativas, lo que resalta el potencial transformador de las nuevas innovaciones tecnológicas en el sector rural. Este enfoque no solo mejora las prácticas de producción, sino que también promueve la modernización de las infraestructuras rurales, contribuyendo al desarrollo sostenible del sector agropecuario en Ecuador.

5.2. Recomendaciones

Una recomendación clave es continuar con la calibración y validación periódica de los sensores para asegurar su precisión y sensibilidad a las variaciones en la calidad de la leche. Aunque la calibración se almacena en la memoria de la placa, es fundamental realizar recalibraciones periódicas para mantener la exactitud de las mediciones a lo largo del tiempo. Para lograrlo, se debe utilizar soluciones de conductividad eléctrica (CE) conocidas y de referencia, como aquellas con valores de 1.413 mS/cm o 12.880 mS/cm, que están disponibles en el mercado nacional. Esta práctica garantiza que los resultados obtenidos por el sensor se mantengan alineados con los estándares de calidad y permite una detección más confiable de la mastitis en el ganado lechero.

Una recomendación importante es considerar la implementación de sensores adicionales, como los de pH o de temperatura, para fortalecer la exactitud del diagnóstico temprano de la mastitis. La incorporación de estos sensores permitiría obtener datos más completos sobre la calidad de la leche, lo que contribuiría a una evaluación más precisa del estado de salud del ganado. Al combinar múltiples parámetros, como la conductividad eléctrica, el pH y otros compuestos relevantes, se podría mejorar la fiabilidad del sistema, facilitando una detección más certera de la enfermedad.

A pesar de que el sistema desarrollado ha mostrado resultados precisos en todas las pruebas realizadas, es importante señalar que, al ser un dispositivo diseñado por un estudiante de ingeniería en telecomunicaciones, los datos generados por el sistema no deben considerarse un diagnóstico definitivo. Los resultados obtenidos deben ser utilizados como una herramienta complementaria para la detección temprana de la mastitis, deben ser interpretados y validados por profesionales con experiencia en la salud del ganado. Este enfoque garantiza que los

resultados sean integrados en un contexto clínico adecuado, permitiendo que un veterinario u otro experto en salud animal realice una evaluación y diagnóstico definitivo.

Para trabajos futuros, se recomienda mejorar la plataforma de análisis de datos integrando herramientas de inteligencia artificial, las cuales no solo permitirían procesar los datos de manera más eficiente, sino que también facilitarían la realización de predicciones a largo plazo sobre la salud del ganado. La implementación de algoritmos de aprendizaje automático podría permitir la identificación de patrones históricos de mastitis, brindando la posibilidad de prever y prevenir brotes con mayor antelación. Este enfoque optimizaría los recursos disponibles y mejoraría la rentabilidad a largo plazo, proporcionando a los ganaderos una herramienta proactiva para la gestión de la salud del ganado y la producción lechera.

6. Bibliografía

- Albita, A., Selisteanu, D., & Mamuleanu, M. (2021). Using MQTT Protocol for Remote Monitoring of Low and Medium Power Electrical Network. *2021 16th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/EMES52337.2021.9484133>
- Algharib, S., Dawood, A., Huang, L., Guo, A., Zhao, G., Zhou, K., Li, C., Liu, J., Gao, X., Luo, W., & Xie, S. (2024). Basic concepts, recent advances, and future perspectives in the diagnosis of bovine mastitis. *Journal of Veterinary Science*, 25. <https://doi.org/10.4142/jvs.23147>
- Bain, S. (2023). *Association of Bovine Mastitis*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18993.97127>
- Banco Mundial. (2022). *Población total*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- Casares, C. (2009). *El Calor y la Mastitis*. Sitio Argentino de Producción Animal. <file:///C:/Users/franc/Documents/UTN/Titulacion%20I/sem%2015%20-%2018%20julio/refere/44-calor.pdf>
- Chamorro López, P. G. (2023). *Caracterización Microbiológica y Molecular de la bacteria Staphylococcus aureus aislada de la mastitis bovina y determinación de su incidencia económica en los productores de leche de la Provincia del Carchi- Ecuador*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Cuaran, J., Pais-Chanfrau, J.-M., & Nuñez, J. (2017). Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología. *Revista Bionatura*, 2.
- DFROBOT. (2019, December 28). *Gravity: Analog electrical conductivity sensor /meter V2 (K=I)*. <https://www.dfrobot.com/Product-1123.html>.

- Dilla, T., Valladares, A., Lizán, L., & Sacristán, J. A. (2009). Adherencia y persistencia terapéutica: causas, consecuencias y estrategias de mejora. *Atención Primaria*, 41(6). <https://doi.org/10.1016/j.aprim.2008.09.031>
- Ding, J., Nemati, M., Ranaweera, C., & Choi, J. (2020). IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey. *IEEE Access*, 8, 67646–67673. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985932>
- Editores, B. M. (2021). La mastitis bovina y su impacto en la calidad de la leche. *BM Editores*. <https://bmeditores.mx/ganaderia/la-mastitis-bovina-y-su-impacto-en-la-calidad-de-la-leche/>
- Elizalde, E. F., Signorini, M. L., Canavesio, V. R., Cuatrin, A., Tarabla, H. D., & Calvinho, L. F. (2009). Medición de la Conductividad Eléctrica en Leche como Método Diagnóstico de Mastitis Subclínica Bovina. *FAVE Sección Ciencias Veterinarias*, 8(1), 15–28. <https://doi.org/10.14409/favecv.v8i1.1476>
- Feng, Y., Niu, H., Wang, F., Ivey, S. J., Wu, J. J., Qi, H., Almeida, R. A., Eda, S., & Cao, Q. (2022). SocialCattle: IoT-Based Mastitis Detection and Control Through Social Cattle Behavior Sensing in Smart Farms. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(12), 10130–10138. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3122341>
- Filié Haddad, M., Satie Takamiya, A., Martins da Silva, E. M., & Barros Barbosa, D. (2009). Farmacología en la tercera edad: medicamentos de uso continuo y peligros de la interacción medicamentosa. *Gerokomos*, 20(1). <https://doi.org/10.4321/s1134-928x2009000100004>
- Gray, S. L., Mahoney, J. E., & Blough, D. K. (2001). Medication adherence in elderly patients receiving home health services following hospital discharge. *Annals of Pharmacotherapy*, 35(5). <https://doi.org/10.1345/aph.10295>

- Heltec Automation. (2024, October 27). *WiFi LoRa 32(V3)*. <https://Heltec.Org/Project/Wifi-Lora-32-V3/>.
- Ibarra, M., Ormaza, D., Rueda, R., & Huera, D. (2022). Mastitis bovina en el cantón Montufar – Carchi. Prevalencia, agente causal y factores de riesgo. *AXIOMA, REVISTA CIENTÍFICA*. <https://doi.org/https://doi.org/10.26621/ra.v1i26.735>
- Ismail, S., & Dawoud, D. W. (2022). Software Development Models for IoT. *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 524–530. <https://doi.org/10.1109/CCWC54503.2022.9720750>
- K, A., S, V. P., Kunder, H., & Shetty, A. (2023). Internet of Animal Health Things (IoAHT) Framework for Clinical Mastitis Detection in Dairy Cows. *2023 International Conference on Recent Advances in Information Technology for Sustainable Development (ICRAIS)*, 37–42. <https://doi.org/10.1109/ICRAIS59684.2023.10367181>
- Khan, M. F., Thorup, V. M., & Luo, Z. (2024). Delineating Mastitis Cases in Dairy Cows: Development of an IoT-Enabled Intelligent Decision Support System for Dairy Farms. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20(7), 9508–9517. <https://doi.org/10.1109/TII.2024.3384594>
- Kumar Ghosh, K., Ul Islam, Md. F., Efaz, A. A., Chakrabarty, A., & Hossain, S. (2023). Real-Time Mastitis Detection in Livestock using Deep Learning and Machine Learning Leveraging Edge Devices. *2023 IEEE 17th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISMICT58261.2023.10152110>
- la Cruz, E. G., Simbaña, P., & Bonifaz, N. (2018). Gestión de calidad de leche de pequeños y medianos ganaderos de centros de acopio y queserías artesanales, para la mejora continua. caso de estudio: Carchi, Ecuador. *Universidad Politécnica Salesiana*. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.10>

- Lazaro, A., Villarino, R., Pacios, M., Lazaro, M., Canellas, N., Girbau, D., & Prieto-Simon, B. (2024). Battery-Less NFC Conductivity Sensor for Bovine Mastitis Detection in Farming 4.0. *IEEE Access*, 12, 45824–45838. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3381784>
- Mera Andrade, R., Muñoz, M., Rojas, J. R., Ortiz Tirado, P., González Salas, R., & Vega Falcón, V. (2017). Bovine mastitis and its impact on milk quality. *Revista Electronica de Veterinaria*, 18.
- Microscopio.PRO. (2024). *Qué Protocolos De Comunicación Se Utilizan En IoT*. <https://www.microscopio.pro/protocolos-de-comunicacion-para-iot/>
- Mohd Aman, A. H., Yadegaridehkordi, E., Attarbashi, Z. S., Hassan, R., & Park, Y.-J. (2020). A Survey on Trend and Classification of Internet of Things Reviews. *IEEE Access*, 8, 111763–111782. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002932>
- Morales-Ubaldo, A., Rivero, N., Carranza, B., Velazquez, V., Delgadillo, L., & Zaragoza, A. (2023). Bovine mastitis, a worldwide impact disease: Prevalence, antimicrobial resistance, and viable alternative approaches. *Veterinary and Animal Science*, 21, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2023.100306>
- Motohashi, H., Ohwada, H., & Kubota, C. (2020). Early Detection Method for Subclinical Mastitis in Auto Milking Systems Using Machine Learning. *2020 IEEE 19th International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI*CC)*, 76–83. <https://doi.org/10.1109/ICCICC50026.2020.9450258>
- Nigussie, T., Kebede, I., & Abraham. (2023). Review on Current Diagnostic Methods of Bovine Mastitis. *ResearchGate*, 56–65. <https://doi.org/10.17140/VMOJ-8-178>
- Organización Mundial de la Salud. (2003). Incumplimiento del tratamiento prescrito para las enfermedades crónicas. *Comunicados De Prensa*.

- Ormaza, D. J. (2021). Identificación del agente etiológico y evaluación de nosodes en el tratamiento de mastitis bovina en el Cantón Montúfar. *Universidad Politécnica Estatal Del Carchi*.
- Pena, S., & Rita, M. (2019). *Análisis económico del tratamiento antibiótico en mastitis bovina*. Editorial Facultad de Agronomía UBA. <https://books.google.com.ec/books?id=yXYK0AEACAAJ>
- Pérez-Lomas, M. (2019). Evaluación de la calidad higiénica sanitaria de leche cruda mediante la prueba de lactofermentación a nivel de centros de acopio en la Provincia del Carchi. *Universidad Técnica Del Norte*.
- S. Aloufi, K., & H. Alhazmi, O. (2020). A Hybrid IoT Security Model of MQTT and UMA. *Communications and Network*, 12(04), 155–173. <https://doi.org/10.4236/cn.2020.124008>
- Salmaz, U., Siddiquee, A. N., & Islam, T. (2024). A Novel Inexpensive Capacitive Sensor for Instant Milk Adulteration Detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1–8. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3353277>
- Sepúlveda, Y. A. (2021). Objetivos de Desarrollo Sostenible, Tecnología e Innovación para los Agronegocios. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*.
- Shoaib, M., Aqib, A., Naseer, M., Bhutta, Z., pu, S., Tanveer, Q., Muzammil, I., Kulyar, Md. F., Younas, M., & Hammad, M. (2021). *Etiology of Bovine Mastitis*. ResearchGate. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98543>
- Swamy, S. N., & Kota, S. R. (2020). An Empirical Study on System Level Aspects of Internet of Things (IoT). *IEEE Access*, 8, 188082–188134. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029847>
- Tungol, K. L. S., Primero, J. M. B., & Villaverde, J. F. (2020). Detection of Bovine Mastitis Milk through Somatic Cell Count using Electrical Conductivity Property. *2020 IEEE 12th*

- International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/HNICEM51456.2020.9400084>
- Velasco, J. (2022). *Revisión del Uso del Medicamento (RUM): el servicio más farmacéutico*.
https://www.imfarmacias.es/uploads/2022/04/revision_medimento_28103_20220412023555.pdf
- Vique, F., Marichal, H., & Steinfeld, L. (2020). Inline mastitis detection system measuring the electrical conductivity of quarter milk. *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 777–784. <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067172>
- Wang, W., Zhao, Y., Liu, Y., Liu, G., Zheng, F., & Sun, C. (2024). MQTT Protocol and Implementation of Equipment Management System for Industrial Internet of Things. *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)*, 6139–6144.
<https://doi.org/10.23919/CCC63176.2024.10662474>
- Živić, M., Nemec, D., & Bojović, Ž. (2023). MQTT protocol in IoT environment: Comparison with CoAP and ZeroMQ protocols. *2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/TELFOR59449.2023.10372710>
- De la Cruz, E. G., Simbaña, P., & Bonifaz, N. (2018). Gestión de calidad de leche de pequeños y medianos ganaderos de centros de acopio y queserías artesanales, para la mejora continua. Caso de estudio: Carchi, Ecuador. *LA GRANJA: Revista de Ciencias de la Vida. Universidad Politécnica Salesiana*, 6.
- Medina, R., Leuman, E., Beltrán, C., Nunez-del-Prado, M., & Alatrística, H. (2022). Mobilscope: A Technological Solution for Early Mastitis Detection in Dairy Cattle. *IEEE Xplore*.

- BM Editores. (mayo de 2021). *La mastitis bovina y su impacto en la calidad de la leche*.
Obtenido de <https://bmeditores.mx/ganaderia/la-mastitis-bovina-y-su-impacto-en-la-calidad-de-la-leche/>
- Cuaran, J., Yépez, L., Pineda, H., Nuñez, J., Pérez-Lomas, M., Espín, R., . . . Pais, J. M. (2020). The extended methylene blue reduction test and milk quality. *ResearchGate*, 9.
- Cuenca, M., García, D., Reinoso, L., González, J., & Torracchi, J. (2021). Detección de Mastitis Subclínica Bovina y factores asociados, en fincas lecheras de la Provincia del Cañar – Biblián, Ecuador. *Universidad del Zulia*.
- da Trindade, É. (2018). Sistema de monitoramento de leite para detecção de mastite. *Universidade De Passo Fundo*.
- Ding, J., Nemat, M., Ranaweera, C., & Choi, J. (2020). *IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey*. IEEE Access.
- Heltec. (20 de julio de 2024). *Heltec*. Obtenido de WiFi LoRa 32(V3): <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/>
- Narváez Semanate, J., Daza Bolaños, C. A., Valencia Hoyos, C. E., Hurtado Garzón, D. T., & Acosta Jurado, D. C. (2022). Diagnostic methods of subclinical mastitis in bovine milk: an overview. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 10077 - 10088.
- Ormaza, D. J. (2021). Identificación del agente etiológico y evaluación de nosodes en el tratamiento de mastitis bovina en el Cantón Montúfar. *Universidad Politécnica Estatal Del Carchi*, 50-62.
- Pais, J., Nuñez, J., Lara, M., Rivera, L., Trujillo, L., & Cuaran, M. (2017). Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología. *Bionatura*.
- Pérez-Lomas, M. (2019). Evaluación de la calidad higiénica sanitaria de leche cruda mediante la prueba de lactofermentación a nivel de centros de acopio en la Provincia del Carchi. *Universidad Técnica del Norte*.

Pollard, B. (2019). *HTTP/2 in Action*.

Prieto-Simon, B., Girbau, D., Canellas, N., Lazon, M., Pacios, M., Villarino, R., & Lazo, A. (2024). Battery-Less NFC Conductivity Sensor for Bovine Mastitis Detection in Farming 4.0. *IEEE Xplore*.

Sánchez Herencia, D., & Mamani, G. (2022). Mastitis subclínica bovina y factores de riesgo ambientales en pequeños productores de ganado lechero criado en alta montaña. *scielo*, 33.

Tanyildiz, E., & Yildirim, G. (2013). Performance Comparison of Classification Algorithms for The Diagnosis of Mastitis Disease in Dairy Animals. *IEEE Xplore*.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO 1 – Código del Nodo

```
#include <Wire.h>
#include "HT_SSD1306Wire.h"      // Librería para manejar la pantalla OLED
#include "DFRobot_ESP_EC.h"      // Librería para el sensor de conductividad
eléctrica
#include "EEPROM.h"              // Librería para manejo de memoria EEPROM
#include <WiFi.h>                 // Librería para conexión WiFi
#include <HTTPClient.h>           // Librería para realizar solicitudes HTTP

// Configuración de la pantalla OLED
static SSD1306Wire display(0x3c, 500000, SDA_OLED, SCL_OLED, GEOMETRY_128_64,
RST_OLED);

// Inicialización del sensor de conductividad eléctrica
DFRobot_ESP_EC ec;
float voltage, ecValue;          // Variables para almacenar el voltaje y el
valor de conductividad eléctrica
float calibrationFactor = 1.0;   // Factor de calibración inicial

// Definición de los pines utilizados
#define EC_PIN 1                 // Pin para el sensor de conductividad
eléctrica
#define BUTTON_PIN 0             // Pin para el botón de entrada
#define CALIBRATION_ADDR 0       // Dirección en la memoria EEPROM para
almacenar el factor de calibración

// Función para activar el pin Vext
void VextON() {
    pinMode(Vext, OUTPUT);
    digitalWrite(Vext, LOW);    // Vext se pone en LOW para activar el sensor
}

// Variables de conexión WiFi
const char* ubidots_token = "TOKEN_DE_UBIDOTS"; // Reemplazar con el token de
autenticación de Ubidots
const char* ubidots_device = "heltec_device";    // Nombre del dispositivo en
Ubidots
const char* ubidots_variable_ce = "ubidots_variable_ce"; // Nombre de la
variable que almacena el valor de CE
const char* ubidots_url =
"http://industrial.api.ubidots.com/api/v1.6/devices"; // URL para la API de
Ubidots

// Declaración de funciones
void conectarWiFi();
void enviarDatosUbidots();
```

```

void calibrarSensor();
void mostrarAnimacion();
void mostrarAnalizando(float ceValor);
void mostrarResultado();
void saveCalibration();
void loadCalibration();
void resetCalibration();

// Configuración inicial del sistema
void setup() {
    Serial.begin(115200);           // Inicializa la comunicación serial
    EEPROM.begin(32);              // Inicializa el uso de EEPROM
    ec.begin();                    // Inicializa el sensor de conductividad
eléctrica

    loadCalibration();             // Carga la calibración guardada
    Serial.print("Factor de calibracion cargado: ");
    Serial.println(calibrationFactor);

    VextON();                      // Enciende el sensor
    delay(100);

    display.init();                // Inicializa la pantalla OLED
    display.setFont(ArialMT_Plain_10); // Configura la fuente de texto

    mostrarAnimacion();            // Muestra una animación de carga en la
pantalla
    conectarWiFi();                // Conecta a la red WiFi
    pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP); // Configura el pin del botón
}

// Función principal del programa
void loop() {
    static unsigned long timepoint = millis();

    // Mide el voltaje y calcula el valor de conductividad eléctrica
    if (millis() - timepoint > 1000U) {
        timepoint = millis();

        int raw = analogRead(EC_PIN);           // Lee el valor
del sensor de conductividad
        voltage = (raw / 4095.0) * 3.3;         // Convierte el
valor leído a voltaje
        Serial.print("Voltaje: ");
        Serial.println(voltage, 4);            // Muestra el
voltaje por puerto serial
    }
}

```

```

    ecValue = ec.readEC(voltage, 25.0) * calibrationFactor;    // Calcula la
conductividad eléctrica (EC)
    Serial.print("EC: ");
    Serial.print(ecValue, 4);                                // Muestra el
valor de EC por puerto serial
    Serial.println(" ms/cm");

    mostrarAnalizando(ecValue);                                // Muestra el
valor de EC en la pantalla OLED
}

// Detecta si el botón es presionado para enviar datos a Ubidots
if (digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW) {
    enviarDatosUbidots();                                     // Envía los
datos a Ubidots
    mostrarResultado();                                       // Muestra el
resultado en la pantalla OLED
    mostrarAnimacion();                                       // Muestra la
animación de carga
}

// Maneja comandos desde la entrada serial
if (Serial.available()) {
    String command = Serial.readStringUntil('\n');
    if (command == "calec") {
        calibrarSensor();                                     // Calibra el
sensor
        saveCalibration();                                    // Guarda la
nueva calibración
    }
    if (command == "resetec") {
        resetCalibration();                                   // Resetea la
calibración
    }
}

// Función para calibrar el sensor
void calibrarSensor() {
    float knownEC = 12.880;                                   // Valor de EC conocido para calibración
    float currentEC = ec.readEC(voltage, 25.0);

    if (currentEC < 0.01) {
        Serial.println("Lectura muy baja. Revisa la sonda o la solución de
calibración.");
        return;
    }
}

```

```

    calibrationFactor = knownEC / currentEC; // Calcula el nuevo factor de
calibración
    Serial.print("Nuevo factor de calibracion: ");
    Serial.println(calibrationFactor);
}

// Función para guardar la calibración en EEPROM
void saveCalibration() {
    EEPROM.put(CALIBRATION_ADDR, calibrationFactor); // Guarda el factor de
calibración en la memoria EEPROM
    EEPROM.commit();
    Serial.println("Calibracion guardada en EEPROM.");
}

// Función para cargar la calibración desde EEPROM
void loadCalibration() {
    EEPROM.get(CALIBRATION_ADDR, calibrationFactor); // Lee el factor de
calibración desde EEPROM
    if (isnan(calibrationFactor) || calibrationFactor < 0.1 || calibrationFactor
> 10.0) {
        calibrationFactor = 1.0; // Ajusta el factor de
calibración a 1.0 si es inválido
        Serial.println("Valor no valido en EEPROM, calibracion ajustada a 1.0");
    }
}

// Función para resetear la calibración
void resetCalibration() {
    calibrationFactor = 1.0; // Resetea el factor de calibración
    saveCalibration(); // Guarda la calibración reseteada
    Serial.println("Calibracion reiniciada a 1.0");
}

// Función para conectar a la red WiFi
void conectarWiFi() {
    Serial.print("Conectando a WiFi...");
    WiFi.begin("AP_Proyecto", "Password123"); // Reemplazar con el SSID y la
contraseña de la red WiFi

    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(1000);
        Serial.print(".");
    }

    Serial.println("\nConectado. IP: " + WiFi.localIP().toString());
}

// Función para enviar datos a Ubidots

```

```

void enviarDatosUbidots() {
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        HTTPClient http;
        String url = String(ubidots_url) + "/" + ubidots_device;
        String payload = "{\\"" + String(ubidots_variable_ce) + "\":" +
String(ecValue, 3) + "}"; // Crea el payload con el valor de EC

        http.begin(url.c_str()); // Inicia la solicitud
HTTP
        http.addHeader("Content-Type", "application/json"); // Agrega el
encabezado para JSON
        http.addHeader("X-Auth-Token", "TOKEN_DE_UBIDOTS"); // Reemplazar por el
token de autenticación de Ubidots

        int httpCode = http.POST(payload); // Envía los datos a Ubidots
        if (httpCode > 0) {
            Serial.println("Datos enviados: " + payload);
        } else {
            Serial.println("Error: " + String(http.errorToString(httpCode)));
        }

        http.end(); // Finaliza la conexión HTTP
    } else {
        Serial.println("WiFi no conectado");
    }
}

// Función para mostrar la animación en la pantalla OLED
void mostrarAnimacion() {
    for (int progress = 0; progress <= 100; progress += 10) {
        display.clear();
        display.drawProgressBar(0, 32, 120, 10, progress); // Dibuja una barra de
progreso
        display.setTextAlignment(TEXT_ALIGN_CENTER);
        display.drawString(64, 15, "Cargando...");
        display.display();
        delay(150);
    }
}

// Función para mostrar el valor de EC en la pantalla OLED mientras se analiza
void mostrarAnalizando(float ceValor) {
    display.clear();
    display.setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
    display.drawString(0, 0, "Analizando...");
    display.drawString(0, 16, "CE: " + String(ceValor, 2) + " ms/cm");
    display.display();
}

```

```
// Función para mostrar el resultado final en la pantalla OLED
void mostrarResultado() {
    display.clear();
    display.setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
    display.drawString(0, 0, "CE: " + String(ecValue, 2) + " ms/cm");

    if (ecValue < 3.0) {
        display.drawString(0, 16, "Estado: Muestra no valida");
    } else if (ecValue >= 3.0 && ecValue < 6.0) {
        display.drawString(0, 16, "Estado: Normal");
    } else {
        display.drawString(0, 16, "Estado: Posible mastitis");
    }

    display.display();

    Serial.println("Esperando botón para volver a Analizando...");
    while (digitalRead(BUTTON_PIN) != LOW) delay(10);
    while (digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW) delay(10);
}
```

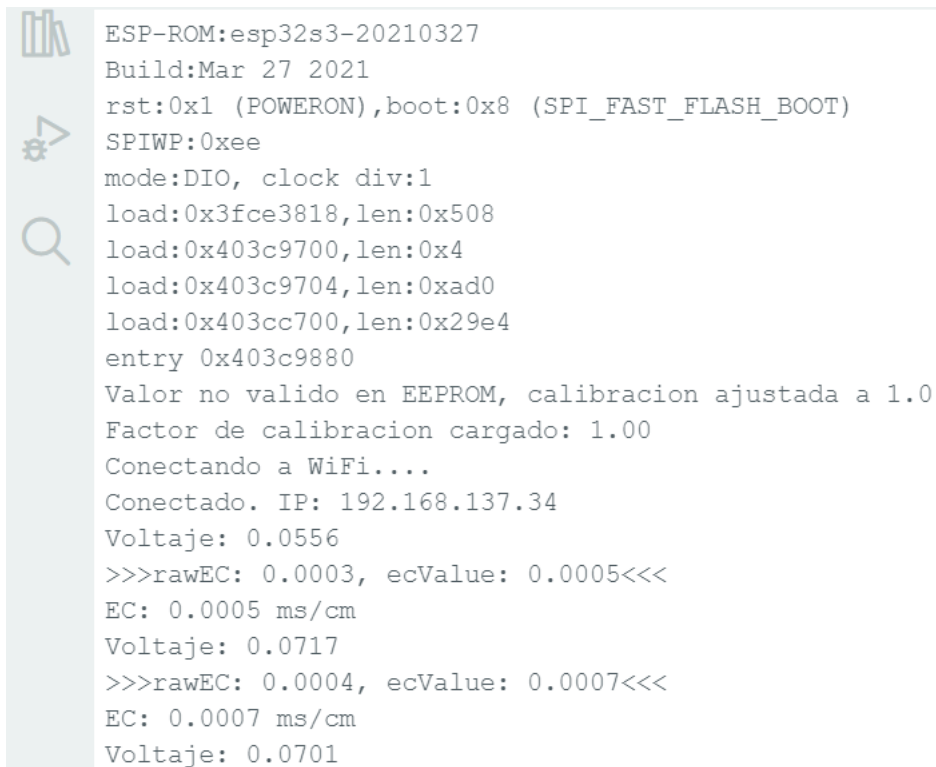
7.2. ANEXO 2 – Calibración del sensor

Para comenzar con la calibración del sensor, se conecta la placa de desarrollo al puerto USB de la computadora mediante cable.



Luego, se abre Arduino IDE y se accede al monitor serial desde el menú Herramientas > Monitor Serial o utilizando el atajo Ctrl + Shift + M. Esto permite visualizar las lecturas en tiempo real del sensor, como el voltaje y la conductividad eléctrica (EC), lo que es fundamental para seguir el proceso de calibración de manera efectiva.

Al conectar la placa al PC y abrir el monitor serial, se muestra la siguiente información inicial. Primero, el sistema indica que el factor de calibración cargado es 1.00 debido a que no se ha encontrado un valor válido en la memoria EEPROM, por lo que el sistema ajusta la calibración a este valor predeterminado. Luego, el sistema comienza la conexión WiFi y, una vez conectada, muestra la IP asignada (en este caso, 192.168.137.34). A continuación, se visualizan las mediciones del sensor, donde se observa el valor del voltaje seguido de las lecturas de conductividad eléctrica (EC), las cuales varían ligeramente según la medición en tiempo real, con valores como 0.0005 ms/cm y 0.0007 ms/cm, indicando las mediciones de conductividad eléctrica del sensor. Estos valores se actualizan a medida que el sensor realiza las lecturas.


 A screenshot of an ESP-ROM boot log. On the left side, there is a vertical grey bar containing three icons: a book icon at the top, a magnifying glass icon in the middle, and a gear icon at the bottom. The log text is displayed to the right of this bar.

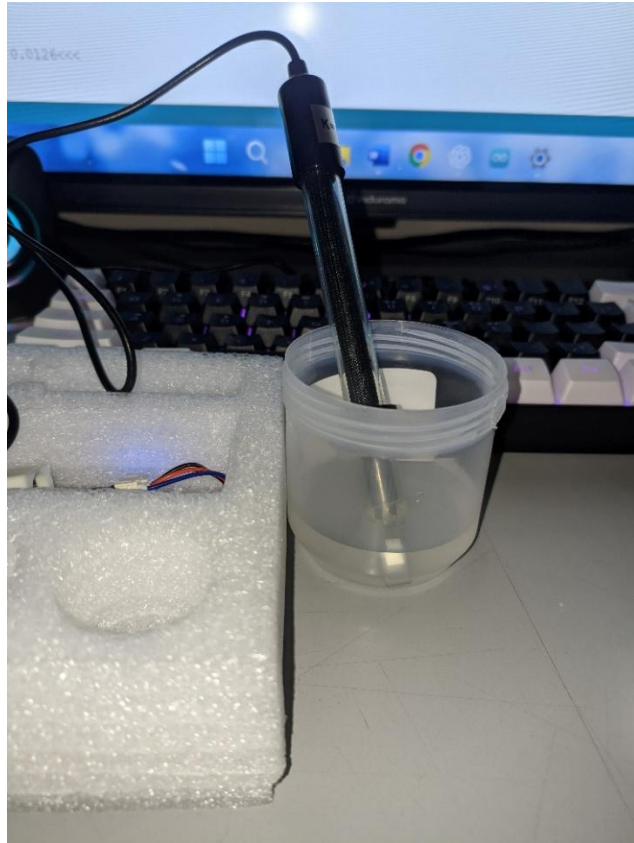

```

ESP-ROM:esp32s3-20210327
Build:Mar 27 2021
rst:0x1 (POWERON),boot:0x8 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
SPIWP:0xee
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fce3818,len:0x508
load:0x403c9700,len:0x4
load:0x403c9704,len:0xad0
load:0x403cc700,len:0x29e4
entry 0x403c9880
Valor no valido en EEPROM, calibracion ajustada a 1.0
Factor de calibracion cargado: 1.00
Conectando a WiFi....
Conectado. IP: 192.168.137.34
Voltaje: 0.0556
>>>rawEC: 0.0003, ecValue: 0.0005<<<
EC: 0.0005 ms/cm
Voltaje: 0.0717
>>>rawEC: 0.0004, ecValue: 0.0007<<<
EC: 0.0007 ms/cm
Voltaje: 0.0701
  
```

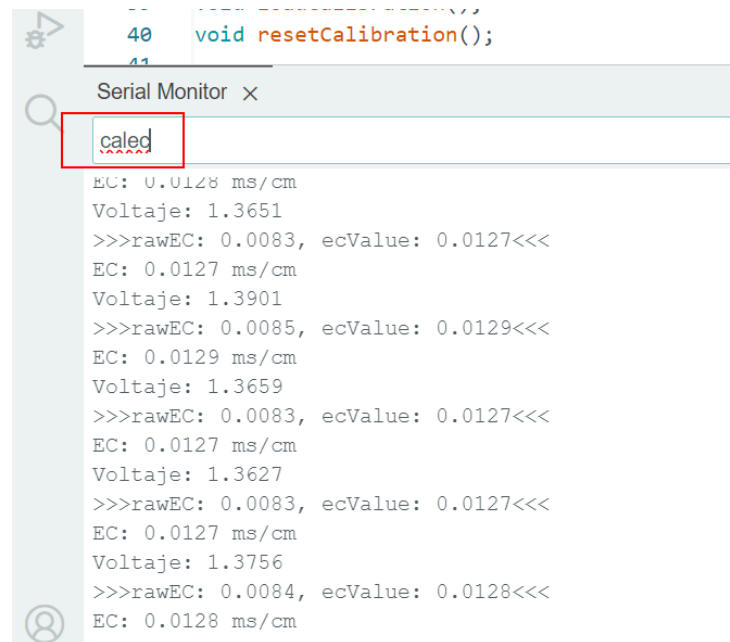
Para realizar la calibración del sensor de conductividad eléctrica, es necesario tener lista una solución con una conductividad eléctrica conocida. Para este proyecto, se utiliza la solución de calibración Milwaukee M10030 con un valor de 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C. Esta solución se utiliza para ajustar el sensor a un valor estándar conocido, asegurando la precisión de las mediciones en futuras pruebas. En la imagen se muestra tanto el envase con la solución como la etiqueta que especifica las características y la tabla de corrección de temperatura correspondiente.



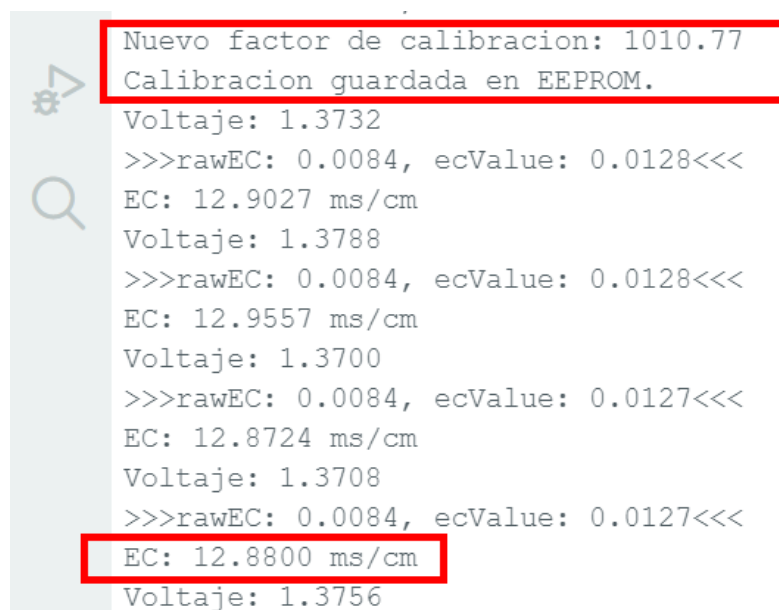
Una vez que la solución de calibración con conductividad eléctrica conocida está lista, se procede a introducir la sonda de conductividad en el recipiente que contiene la solución. La sonda debe estar completamente sumergida en la solución para asegurar que las mediciones sean precisas y representativas del valor estándar. En la imagen se muestra la sonda correctamente colocada dentro del recipiente con la solución, lista para realizar el proceso de calibración.



En el monitor serial, se escribe el comando "calec" y se presiona Enter para iniciar el proceso de calibración del sensor. Al hacerlo, el sistema ajusta el factor de calibración utilizando la solución con conductividad eléctrica conocida. Durante este proceso, el monitor serial muestra las mediciones de conductividad eléctrica (EC) y voltaje en tiempo real. A medida que el sensor se calibra, los valores de EC deberían acercarse a los de la solución estándar.



Después de presionar Enter y enviar el comando "calec" en el monitor serial, el sistema realiza el proceso de calibración y muestra el nuevo factor de calibración en la pantalla, el cual en este caso es 1010.77. Este factor se utiliza para ajustar las mediciones del sensor. El monitor también confirma que la calibración se ha guardado en la EEPROM para su uso posterior. Se observan las lecturas del voltaje y la conductividad eléctrica (EC) en tiempo real, que muestran que el valor de EC se ha ajustado a 12.880 mS/cm, que es el valor de referencia de la solución de calibración. Estos datos aseguran que el sensor está correctamente calibrado y listo para realizar mediciones precisas.



Una vez realizada la calibración, en la pantalla del sistema debe aparecer el valor de conductividad eléctrica (CE) correspondiente a la solución conocida utilizada para la calibración. En la imagen, se puede observar que el sistema ya muestra el valor calibrado, indicando que el sensor ha sido ajustado correctamente. Con esta configuración finalizada, el sistema está listo para medir las muestras de leche, proporcionando mediciones precisas de la conductividad eléctrica para la detección de mastitis. A partir de este momento, el sensor puede ser utilizado para realizar análisis en tiempo real de las muestras lácteas, garantizando su eficacia en el monitoreo de la calidad de la leche.

