



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL
ANÁLISIS DEL ESTADO DE SALUD DEL GANADO VACUNO
APLICANDO IOT**

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

AUTORES: Allan Stuard Pincay Vera
Ninrod Alexander Vargas Ayala
TUTOR: Ing. Alberto Santiago Ramírez Farfán

Guayaquil - Ecuador
2024 - 2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Allan Stuard Pincay Vera** con documento de identificación N° 0943964718 y **Ninrod Alexander Vargas Ayala** con documento de identificación N° 0941385791; manifestamos que:

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

Guayaquil, 31 de Enero del año 2025

Atentamente,



Allan Stuard Pincay Vera
0943964718



Ninrod Alexander Vargas Ayala
0941385791

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

Nosotros, **Allan Stuard Pincay Vera** con documento de identificación N° **0943964718** y **Ninrod Alexander Vargas Ayala** con documento de identificación N° **0941385791**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO DE SALUD DEL GANADO VACUNO APLICANDO IOT**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 31 de Enero del año 2025

Atentamente,



Allan Stuard Pincay Vera
0943964718



Ninrod Alexander Vargas Ayala
0941385791

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Alberto Santiago Ramírez Farfán**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO DE SALUD DEL GANADO VACUNO APLICANDO IOT**, realizado por **Allan Stuard Pincay Vera** con documento de identificación N° **0943964718** y por **Ninrod Alexander Vargas Ayala** con documento de identificación N° **0941385791**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 31 de Enero del año 2025

Atentamente,



Ing. Alberto Santiago Ramírez Farfán, Mg.
0923348890

DEDICATORIA

En primer lugar, agradezco a Dios por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud a mi padre, Ninrod Vargas Escalante, y a mi abuelita, Sonia Escalante, quienes desde el cielo me cuidan e inspiran a seguir adelante. A mi madre, Alexandra Ayala, quien ha sido mi luz, mi adoración y un pilar fundamental en mi vida, siempre brindándome su amor incondicional y creyendo en mí incluso en los momentos más difíciles; a Gabriel Cruz, quien con su amor, dedicación y apoyo constante ha sido un ejemplo de fortaleza y guía para mí en cada paso de este camino.

A mi tía Celina, Andrea, Ivanna y mis hermanos, Lucas y Mathias, quienes siempre han sido un motivo de alegría y fortaleza, llenando mi vida de momentos felices e inolvidables. A Ginger Bravo, por su amor, paciencia y constante apoyo, siendo una parte fundamental en este camino.

Agradezco profundamente a mi tutor y maestro, Alberto Ramírez Farfán, por su guía, paciencia y apoyo durante los últimos momentos de mi carrera. A mi compañero de tesis, Allan Pincay, por su dedicación y esfuerzo compartido, y a Luis Pesantes, por sus valiosas recomendaciones y apoyo durante este proceso. A todos ellos, mi eterna gratitud.

Ninrod Alexander Vargas Ayala

Con profundo agradecimiento dedico esta tesis a mi madre Mayra Vera, mi primer maestra y mi confidente; a mi padre Joffre Pincay, mi guía y ejemplo a seguir. A mis hermanos Joffre Pincay y Jordy Pincay, cómplices de mis sueños y mis más grandes amigos. A Rosa Brito, por creer en mí y hacerme más feliz cada día. A Ninrod Vargas, por su brillante mente y su invaluable ayuda en este proyecto. A Luis Pesantes por sus valiosas recomendaciones y apoyo durante el proceso. Y con especial cariño, a Brando mi mascota, quien siempre me recibió con una alegría infinita y me llenó de amor incondicional.

A mis queridos padres y hermanos, dedico con todo mi amor este trabajo. Su apoyo incondicional y sus enseñanzas han sido mi brújula en cada etapa de mi vida, especialmente en este camino hacia la culminación de esta tesis.

Y usted nuestro lector te dedico las siguientes palabras "Nunca permitas que los obstáculos nublen tus sueños. Con perseverancia y determinación, cada meta es alcanzable".

Allan Stuard Pincay Vera

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, brindándome sabiduría y perseverancia. A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor inspiración para alcanzar mis metas. A mis amigos, por su compañía, aliento y momentos de alegría que hicieron más llevadero este proceso.

Extiendo mi gratitud a mis docentes y tutores, quienes con su conocimiento y guía contribuyeron a mi formación académica. Gracias a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron en este proyecto con su apoyo, consejos y motivación. Este logro no es solo mío, sino también de quienes me acompañaron en este camino.

Ninrod Alexander Vargas Ayala

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, quien me ha guiado y fortalecido en cada paso de este camino. A mis queridos padres, Mayra Vera y Joffre Pincay, les dedico este trabajo con todo mi amor y admiración. Su apoyo incondicional, sus sabios consejos y su ejemplo de vida han sido mi mayor inspiración. A mis hermanos, Joffre y Jordy Pincay, por su cariño, compañía y por celebrar cada uno de mis logros. A ti, Rosa Brito, gracias por tu paciencia, comprensión y por creer en mí siempre. Tu amor ha sido mi motor en los momentos más difíciles. Y cómo olvidar a mi fiel compañero, Brando, quien con su alegría y lealtad me acompañó en este recorrido. Finalmente, agradezco sinceramente a quienes contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

Allan Stuard Pincay Vera

I. RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un sistema de monitoreo basado en IoT para la supervisión del estado de salud del ganado vacuno. Este sistema, implementado en un collar inteligente, permite registrar temperatura corporal, ubicación geográfica y actividad física mediante sensores avanzados, facilitando la detección temprana de anomalías y mejorando la gestión ganadera.

La transmisión de datos se realiza a través de LoRaWAN, garantizando conectividad en zonas rurales. La información recolectada es procesada por un gateway, enviada a la nube mediante The Things Network (TTN) y visualizada en una plataforma web accesible desde dispositivos móviles y de escritorio. El sistema cuenta con autonomía energética gracias a la integración de paneles solares y baterías de litio recargables, asegurando su operatividad sin necesidad de infraestructura eléctrica adicional.

La solución propuesta es escalable y de bajo costo, con la posibilidad de integrar sensores adicionales para monitorear más parámetros fisiológicos. Su implementación representa un avance en la digitalización del sector agropecuario, optimizando la productividad y mejorando la toma de decisiones mediante el análisis en tiempo real del comportamiento y salud del ganado.

Palabras claves: IoT, monitoreo ganadero, collar inteligente, sensores avanzados, temperatura corporal, GPS, LoRaWAN, energía solar, the things network, bienestar animal, productividad, detección temprana de posibles enfermedades.

II. ABSTRACT

This work develops a monitoring system based on IoT for monitoring the health status of cattle. This system, implemented in an intelligent collar, allows to record body temperature, geographic location and physical activity using advanced sensors, facilitating the early detection of anomalies and improving livestock management.

Data transmission is done through LoRaWAN, guaranteeing connectivity in rural areas. The information collected is processed by a gateway, sent to the cloud through The Things Network (TTN) and displayed on a web platform accessible from mobile and desktop devices. The system has energy autonomy thanks to the integration of solar panels and rechargeable lithium batteries, ensuring its operation without the need for additional electrical infrastructure.

The proposed solution is scalable and inexpensive, with the possibility of integrating additional sensors to monitor more physiological parameters. Its implementation represents an advance in the digitization of the agricultural sector, optimizing productivity and improving decision-making through real-time analysis of livestock behavior and health.

Keywords: IoT, livestock monitoring, smart collar, advanced sensors, body temperature, GPS, LoRaWAN, solar energy, the things network, animal welfare, productivity, early detection of possible diseases.

ÍNDICE

I.	RESUMEN	7
II.	ABSTRACT	8
III.	INTRODUCCIÓN	1
IV.	PROBLEMA	2
V.	JUSTIFICACIÓN	3
VI.	OBJETIVOS	4
	VI-A. Objetivo general	4
	VI-B. Objetivos específicos	4
VII.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
	VII-A. Ganadería a través del tiempo	5
	VII-A1. Reparto regional de ganado bovino en Ecuador	5
	VII-B. Enfermedades comunes del ganado región costa	7
	VII-B1. Babesiosis	7
	VII-B2. Tripanosomiasis bovina	7
	VII-C. Comparativa de tecnologías IoT aplicadas al monitoreo ganadero	8
	VII-C1. ¿Por qué nuestra propuesta supera las limitaciones de los trabajos previos e incorpora mejoras significativas para el monitoreo del ganado vacuno?	9
	VII-D. Componentes tecnológicos del collar	10
	VII-D1. Internet de las cosas(IoT)	10
	VII-D2. LoRaWAN	10
	VII-D3. Topología de comunicación	11
	VII-E. Hardware utilizado	11
	VII-E1. Heltec WIFI LoRaWAN	11
	VII-F. Sensores	11
	VII-F1. GPS u-blox NEO-6M-V2	11
	VII-F2. Sensor de temperatura MLX90614	12
	VII-F3. MPU-6050	13
	VII-G. Sistema de alimentación	13
	VII-G1. Panel solar	13
	VII-G2. Baterías de Litio	14
	VII-H. Estructura física	14
	VII-H1. Impresión 3D	14
	VII-H2. Collar de correa para ganado	15
	VII-I. Componentes electrónicos y de conexión	15
	VII-I1. PCB (Placa de Circuito Impreso)	15
	VII-J. Infraestructura de red	16
	VII-J1. Puerta de enlace y enrutador	16
	VII-J2. TTN (The Things Network)	17
	VII-K. Software utilizado	18
	VII-K1. EasyEDA	18
	VII-K2. IDE Arduino	18
	VII-K3. Google Maps	19
	VII-L. Librerías utilizadas	19

VII-L1.	Librería [TinyGPS++.h]	19
VII-L2.	Librería [Wire.h]	19
VII-L3.	Librería [MPU6050.h]	20
VII-L4.	Librería [LoRaWan_APP.h]	20
VII-L5.	Librería [lora.h]	21
VIII.	MARCO METODOLÓGICO	22
VIII-A.	Análisis	23
VIII-B.	Diseño	23
VIII-B1.	Diseño electrónico	23
VIII-B2.	Control	25
VIII-B3.	Software	26
VIII-C.	Simulación	28
VIII-C1.	Diseño del circuito electrónico con EasyEDA	28
VIII-C2.	Simulación de comunicación LoRaWAN	29
VIII-C3.	Validación del flujo de datos y almacenamiento	29
VIII-C4.	Resultados de la simulación y ajustes realizados	29
VIII-D.	Prototipo	29
VIII-D1.	Diseño del prototipo	29
VIII-D2.	Construcción del prototipo	29
VIII-D3.	Pruebas de funcionamiento en campo	30
VIII-E.	Validación del sistema	31
VIII-E1.	Diseño e instalación de los collares	31
VIII-E2.	Monitoreo mediante dispositivo aereo	32
VIII-E3.	Evaluación de la autonomía energética	33
VIII-F.	Diagrama de funcionamiento	34
IX.	RESULTADOS	35
IX-A.	Funcionamiento técnico del sistema	35
IX-A1.	Precisión de los sensores	35
IX-B.	Conectividad y transmisión de datos	36
IX-C.	Interpretación de los datos obtenidos	36
X.	CRONOGRAMA	38
XI.	PRESUPUESTO	39
XII.	CONCLUSIONES	40
XIII.	RECOMENDACIONES	41
Anexo A:	Diseño y Esquemáticos del Sistema	45
Anexo B:	Proceso de Ensamblaje del Dispositivo.	46
Anexo C:	Implementación en el Entorno Ganadero	48
Anexo D:	Validación y Resultados de Pruebas	49
Anexo E:	Plataforma de Visualización y Monitoreo	50

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Comparativa del reparto regional de ganado bovino en Ecuador [18].	5
2.	Existencia de ganado [18].	6
3.	Existencia de ganado por raza [18].	6
4.	Internet de las cosas(IoT) [25].	10
5.	Arquitectura de una red LoraWan [27].	10
6.	Placa heltec [29].	11
7.	Placa GPS [29].	12
8.	Sensor de temperatura[31]	12
9.	Giroscopio [32]	13
10.	Panel fotovoltaico [33].	13
11.	Diversas celdas de litio [35].	14
12.	Impresora 3D.[Fuente: Autores]	15
13.	PCB [43].	16
14.	Gateway [44].	17
15.	TTN [48].	17
16.	IDE Arduino [51].	18
17.	Diagrama de flujo [Fuente: Autores].	22
18.	Placa PCB usada como prototipo [Fuente: Autores].	24
19.	Placa final [Fuente: Autores].	24
20.	Elementos utilizados en la placa [Fuente: Autores].	25
21.	Conexión al router y gateway [Fuente: Autores].	26
22.	Programación en el IDE de arduino [Fuente: Autores].	26
23.	Nodos en TTN[Fuente: Autores].	27
24.	Programación en SQL [Fuente: Autores].	27
25.	Programación en HTML[Fuente: Autores].	28
26.	Circuito electrónico en EasyEDA [Fuente: Autores].	28
27.	Construcción del prototipo[Fuente: Autores].	30
28.	Pruebas de campo[Fuente: Autores].	30
29.	Instalación del gateway[Fuente: Autores].	31
30.	Instalación de los collares[Fuente: Autores].	32
31.	Monitoreo mediante dispositivo aereo	32
32.	Autonomía energética[Fuente: Autores].	33
33.	Validación del collar[Fuente: Autores].	33
34.	Diagrama de funcionamiento del collar, con su salida en página web [Fuente: Autores].	34
35.	Datos de temperatura obtenidos [Fuente: Autores].	35
36.	Métodos tradicionales [Fuente: Autores].	35
37.	Datos obtenidos del sensore MPU6050 [Fuente: Autores].	36
38.	Cronograma	38
39.	Diagramas eléctricos y PCB utilizados en el sistema [Fuente: Autores].	45
40.	Esquemáticos de conexión de sensores y módulos electrónicos [Fuente: Autores].	45
41.	Placa final del dispositivo IoT para monitoreo de ganado [Fuente: Autores].	46
42.	Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].	46
43.	Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].	47
44.	Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].	47
45.	Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].	47
46.	Instalación del sistema en el ganado [Fuente: Autores].	48
47.	Fotografías de la validación de funcionamiento en campo [Fuente: Autores].	48
48.	Fotografías de la validación de funcionamiento en campo [Fuente: Autores].	48
49.	Datos recolectados durante las pruebas de campo [Fuente: Autores].	49

50.	Datos visualizados en la web durante las pruebas de campo [Fuente: Autores].	49
51.	Resultado final [Fuente: Autores].	49
52.	Capturas de pantalla de la interfaz web desarrollada [Fuente: Autores].	50
53.	Resultados de pruebas con visualización de parámetros en tiempo real [Fuente: Autores].	50

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Datos de temperatura, actividad y ubicación del ganado.	37
II.	Presupuesto	39

III. INTRODUCCIÓN

La ganadería es un sector fundamental en la economía y seguridad alimentaria de muchos países, ya que provee productos esenciales como carne y leche. Sin embargo, el crecimiento y sostenibilidad de esta industria dependen en gran medida de la eficiencia en la gestión del ganado y del uso de tecnologías avanzadas que permitan optimizar su manejo. A lo largo del tiempo, los avances tecnológicos han permitido mejorar la producción y el bienestar animal, aunque persisten desafíos significativos que requieren soluciones innovadoras.

Las tecnologías digitales han modernizado la ganadería, facilitando la toma de decisiones con sensores avanzados y sistemas de comunicación remota. La integración de sensores inteligentes en dispositivos portátiles ha demostrado ser una alternativa eficiente para recopilar información relevante sobre los animales, permitiendo la detección temprana de cambios en su comportamiento y estado de salud.

Además de la adopción de tecnología, otro aspecto crucial en la ganadería moderna es el manejo eficiente de los recursos y la sostenibilidad ambiental. La implementación de soluciones basadas en energía renovable, como paneles solares, junto con sistemas de comunicación de bajo consumo energético, permite desarrollar herramientas accesibles y adaptables a diferentes condiciones geográficas y climáticas. Estas innovaciones no solo mejoran la productividad, sino que también reducen el impacto ambiental y los costos operativos.

En cuanto al uso de vacas mestizas, su adopción responde a los beneficios del vigor híbrido, que resulta del cruce entre dos o más razas de bovinos. Este proceso combina las características de las razas involucradas, como en el caso de las vacas Brahman cruzadas con criollas, lo que genera una descendencia con mejor rendimiento que el promedio de sus progenitores. Este enfoque no solo mejora la productividad, sino que también contribuye a la adaptación de los animales a diferentes entornos y desafíos sanitarios.

El presente proyecto plantea el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo inteligente para la supervisión del ganado, combinando sensores avanzados, transmisión de datos mediante LoRaWAN y almacenamiento en la nube. Su diseño tiene el propósito de ofrecer una herramienta que facilite el seguimiento del estado del animal, optimizando la gestión ganadera y permitiendo una respuesta rápida ante posibles riesgos para la salud del ganado.

Este trabajo describe el proceso de diseño, implementación y validación del sistema, destacando su impacto en la industria bovina y su contribución a la modernización del sector. La integración de nuevas tecnologías en la ganadería representa una oportunidad para fortalecer la producción animal, mejorar la calidad de los productos derivados y establecer un modelo de gestión basado en el análisis de datos en tiempo real.

IV. PROBLEMA

Según la Organización Mundial de la Salud Animal, se estima que el 20 % de la producción ganadera global se pierde anualmente debido a enfermedades. Este impacto económico es significativo, y un análisis realizado por Oxford en colaboración con Health For Animals revela que las pérdidas actuales alcanzan aproximadamente 80.000 millones de kg de carne y 180.000 millones de kg de productos lácteos. Estas pérdidas ascienden a \$358 billones de dólares a nivel mundial [1]. En el contexto ecuatoriano, la producción lechera en 2016 superó los 6 millones de litros diarios, destacándose la región Sierra, y en particular la provincia de Pichincha, con una producción de 873.272 litros diarios. Cantones como Cayambe y Pedro Moncayo contribuyen significativamente a esta producción [2].

En cuanto a las enfermedades bovinas, la mastitis es una de las más prevalentes y se presenta en dos formas principales. La mastitis subclínica, que no muestra signos visibles de inflamación, pero se caracteriza por un elevado número de células somáticas en la leche debido a la presencia de agentes infecciosos, es una de las principales causas de pérdidas económicas en la industria lechera, ya que reduce tanto la cantidad como la calidad de la leche [3]. Por otro lado, la mastitis clínica se manifiesta con signos externos como enrojecimiento e hinchazón en la ubre, acompañados de fiebre, pérdida del apetito y una notable disminución en la producción de leche [4].

Debido a la dificultad de eliminar la mastitis inducida por el ordeño, la vigilancia constante y la detección temprana son fundamentales. Herramientas de diagnóstico rápidas y precisas, que identifiquen los patógenos causantes, pueden ser esenciales para controlar la enfermedad y mitigar las pérdidas económicas [5]. La sensibilidad de una prueba diagnóstica indica su capacidad para identificar correctamente a los animales enfermos. Una prueba diagnóstica con alta sensibilidad es crucial para minimizar los falsos negativos, asegurando que casi todos los casos de mastitis sean detectados a tiempo [6].

Las vacas lecheras pueden sufrir diversas lesiones debido a las condiciones de manejo en actividades como el ordeño, el confinamiento y el traslado. Entre las lesiones más frecuentes se encuentran las cojeras, contusiones y problemas articulares, que suelen ser consecuencia de prácticas inadecuadas como la exposición a superficies resbaladizas y el prolongado tiempo de pie sobre superficies duras. La cojera es particularmente problemática, ya que afecta el bienestar del animal, reduce la producción de leche y compromete el rendimiento reproductivo. Estas lesiones tienden a desarrollarse de manera progresiva, lo que dificulta su detección temprana y aumenta los costos de manejo [7],[8].

A pesar de la importancia de la salud animal en la ganadería, el sector enfrenta desafíos debido a la persistencia de prácticas tradicionales y la limitada adopción de tecnologías modernas. La falta de herramientas tecnológicas avanzadas, como sistemas de localización y sensores remotos, afecta la eficiencia productiva y aumenta la vulnerabilidad a pérdidas económicas por eventos como el abigeato. Esta brecha tecnológica impide que el sector ganadero ecuatoriano alcance su máximo potencial, limitando su competitividad en un mercado global que exige altos estándares de trazabilidad y sostenibilidad [9],[10],[11]. Además, los exámenes veterinarios periódicos presentan limitaciones en cuanto a eficiencia y costos, lo que subraya la necesidad urgente de encontrar alternativas más rentables para asegurar el bienestar animal y optimizar la producción [12].

V. JUSTIFICACIÓN

El sector ganadero ha mantenido prácticas tradicionales de monitoreo y manejo del ganado, las cuales, aunque efectivas en su momento, se han quedado rezagadas frente a las necesidades actuales de precisión y rapidez. Para optimizar la gestión ganadera y reducir riesgos como enfermedades, es necesario implementar tecnologías avanzadas que permitan la recopilación de datos en tiempo real y el análisis detallado de los patrones de comportamiento animal [10].

El uso de tecnología GPS para localizar objetos y seguir rutas es ampliamente conocido y aceptado. Se estima que su aplicación en el monitoreo del ganado permitirá determinar con precisión la ubicación de los animales, además de verificar si están alimentándose en áreas predeterminadas. Al integrar esta tecnología en un collar inteligente, se puede mejorar el control sobre la alimentación del ganado, optimizando así su nutrición y evitando pérdidas asociadas con una alimentación inadecuada [10].

En este contexto, el sistema de monitoreo propuesto utiliza sensores infrarrojos para detectar de manera precisa cambios en la temperatura corporal del ganado, lo cual es fundamental para identificar enfermedades bovinas. Esta tecnología, que ya ha sido probada en la detección de la fiebre en humanos durante la pandemia de COVID-19, permite obtener un diagnóstico temprano sin contacto físico directo, lo que reduce el estrés y minimiza el riesgo de contagio entre los animales [13].

Por otro lado, los acelerómetros, comúnmente utilizados en dispositivos móviles para rastrear la actividad física, pueden ser integrados en los collares inteligentes para monitorear los movimientos del ganado. Analizar los datos de aceleración permite identificar patrones anormales, como la disminución de la actividad física o irregularidades en la alimentación, los cuales podrían indicar problemas de salud en etapas tempranas. Combinados con los datos de temperatura, estos parámetros brindan una imagen más completa del estado de salud del animal, permitiendo una intervención rápida antes de que aparezcan síntomas graves [14].

La fusión de estas tecnologías, como se ha demostrado en otros campos, mejora la precisión del monitoreo al combinar datos de varios sensores. Los acelerómetros y giroscopios son esenciales para medir tanto la aceleración como la rotación del animal, proporcionando una visión más integral de su actividad diaria. Esto es crucial para prevenir problemas de salud al detectar patrones inusuales, tales como una disminución en el movimiento o cambios en su orientación, lo que permite una acción preventiva más eficaz. Por ejemplo, si una vaca muestra una actividad reducida y simultáneamente un aumento de temperatura detectado por sensores infrarrojos, esto puede señalar un problema de salud que requiere atención inmediata [9].

Además, la integración de múltiples sensores en un solo dispositivo minimiza los errores que podrían surgir al usar un solo sensor de manera aislada. Mientras que el acelerómetro mide los cambios de aceleración, el giroscopio proporciona información sobre la rotación y orientación del animal, mejorando la precisión en el análisis de su comportamiento. Esta estrategia integrada ofrece a los ganaderos una herramienta poderosa para garantizar que sus animales mantengan un nivel adecuado de actividad y salud, optimizando a su vez los recursos y la productividad del rebaño [15].

VI. OBJETIVOS

VI-A. Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo para el análisis del estado de salud del ganado vacuno aplicando IoT.

VI-B. Objetivos específicos

1. Monitorear la temperatura, movimiento y ubicación del ganado vacuno mediante un dispositivo que emplea tecnología IoT.
2. Implementar un algoritmo de análisis de datos identificando comportamientos relacionados con enfermedades bovinas.
3. Validar el sistema mediante la realización de pruebas de campo.

VII. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

VII-A. Ganadería a través del tiempo

La domesticación del ganado ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de la civilización humana. Desde hace más de 10,000 años, las comunidades dejaron atrás el nomadismo para establecer asentamientos agrícolas, donde la ganadería se consolidó como una actividad esencial. Durante la época colonial en Ecuador, la introducción de ganado europeo transformó significativamente las prácticas productivas y económicas, facilitando la producción de leche, quesos y otros derivados lácteos que pronto se integraron en la dieta cotidiana [16].

Sin embargo, a pesar de su importancia histórica y su impacto en las economías rurales, la ganadería tradicional ha enfrentado diversas limitaciones. Problemas como enfermedades recurrentes, bajos niveles de productividad, y altos costos de manutención han afectado la rentabilidad de esta actividad. Además, el impacto ambiental asociado con prácticas convencionales ha motivado la búsqueda de soluciones más sostenibles [17].

En respuesta a estos desafíos, la ganadería ha evolucionado hacia un modelo inteligente que emplea tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT). Estas innovaciones permiten monitorear de forma precisa y en tiempo real factores clave como la salud de los animales, su comportamiento y las condiciones ambientales. Los sistemas inteligentes, que integran sensores IoT y tecnologías de comunicación como LoRaWAN, no solo incrementan la productividad y reducen pérdidas económicas, sino que también mejoran la sostenibilidad y el bienestar animal [16].

Hoy en día, esta transición hacia la ganadería inteligente representa un cambio trascendental, no solo en términos de eficiencia productiva, sino también en la promoción de un manejo más sostenible y rentable de los recursos. Este enfoque asegura que los ganaderos puedan afrontar los retos del mercado moderno, al tiempo que minimizan su huella ecológica [17].

VII-A1. Reparto regional de ganado bovino en Ecuador: Dentro de una comparativa del reparto de ganado bovino dentro de las regiones del Ecuador. La región Sierra es la que alberga la mayor cantidad de cabezas de ganado vacuno, representando el 53 % del total nacional [18].

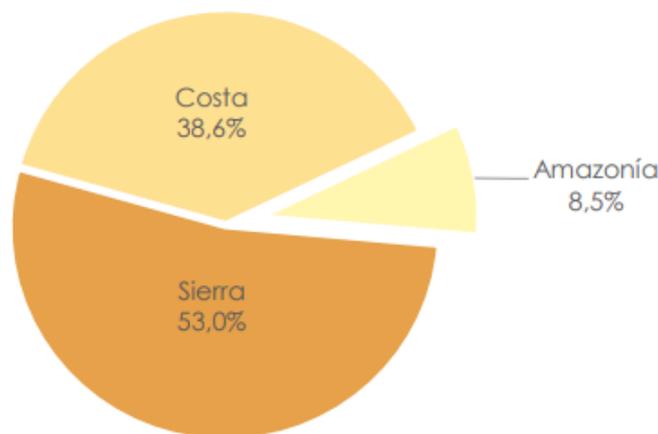


Figura 1: Comparativa del reparto regional de ganado bovino en Ecuador [18].

La provincia de Manabí destaca por tener la mayor concentración de ganado vacuno a nivel nacional, representando el 20.9 % del total con 805.455 cabezas [18].

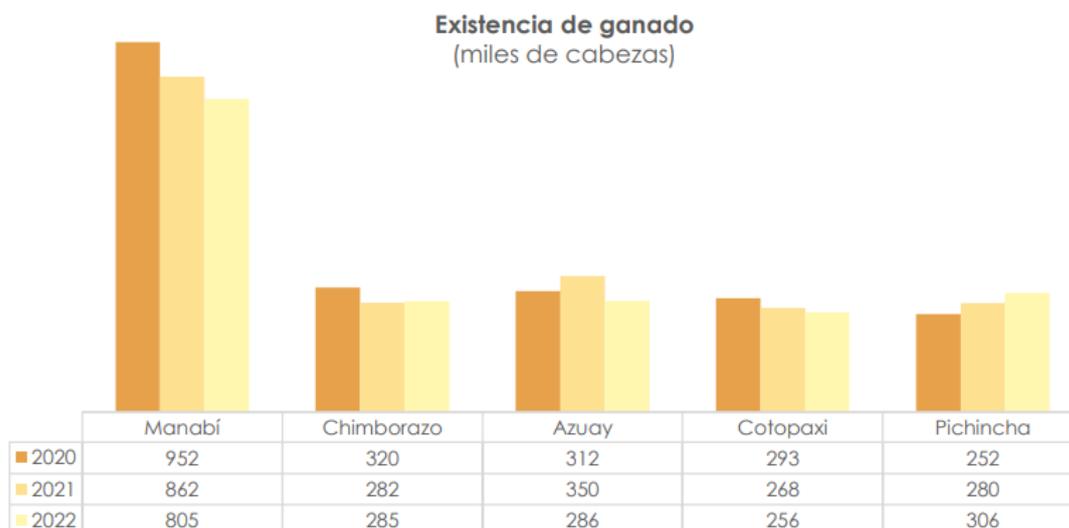


Figura 2: Existencia de ganado [18].

En el año 2022, el ganado mestizo predominó en la población ganadera, alcanzando un total de 1.4 millones de cabezas, lo que equivale al 35.9 % del total. Le siguieron los animales criollos con un 24.8 % [18].

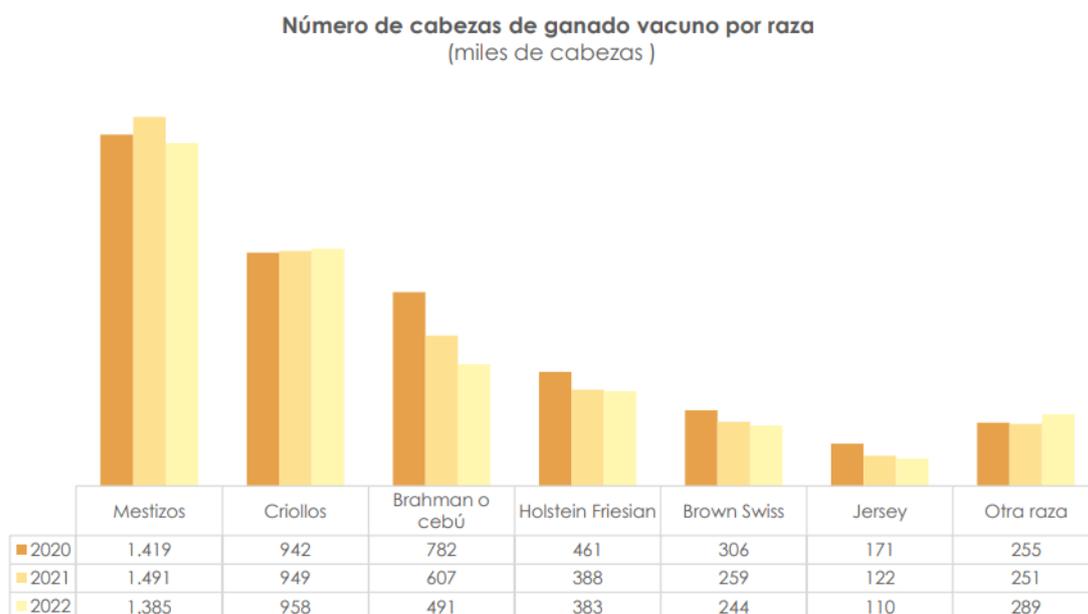


Figura 3: Existencia de ganado por raza [18].

VII-B. Enfermedades comunes del ganado región costa

De acuerdo con la entrevista realizada al veterinario y experto ganadero, propietario de la finca El Diamante, Vet. Javier Olivares, se destacó que las enfermedades más comunes en su ganado son de origen parasitario, siendo la fiebre de la garrapata y la tripanosomiasis las principales, los cuales plantean un desafío significativo para la salud del ganado, afectando tanto su bienestar como su productividad.

VII-B1. Babesiosis: La babesiosis, una infección parasitaria transmitida por vectores, es causada por protozoos del género *Babesia* y provoca graves enfermedades en el ganado, especialmente en bovinos [19].

Ciclo de la babesiosis: El ciclo de la enfermedad comienza con la transmisión de parásitos *Babesia* desde una garrapata infectada a un animal sano. Una vez dentro del organismo, estos parásitos se multiplican rápidamente dentro de los glóbulos rojos, causándoles daño y provocando anemia. Los signos clínicos suelen aparecer pocas semanas después de la infección [19].

Síntomas: La fiebre de la garrapata puede manifestarse con una variedad de síntomas que van desde leves hasta severos. Entre los más comunes se encuentran la fiebre alta, que suele ser uno de los primeros indicios de la enfermedad. A medida que progresa, la destrucción de los glóbulos rojos provoca anemia, lo que se traduce en palidez de las mucosas y debilidad general del animal. La acumulación de bilirrubina en el organismo da lugar a ictericia, evidenciada por la coloración amarillenta de la piel y las mucosas. Además, la presencia de hemoglobina en la orina oscurece su color. La pérdida de apetito y la anemia contribuyen a una significativa pérdida de peso. Los animales afectados suelen mostrarse débiles y apáticos, y en casos graves, la enfermedad puede resultar fatal [19].

Diagnóstico: La confirmación de la fiebre de la garrapata se logra mediante un proceso diagnóstico que involucra el análisis del historial clínico del animal, la evaluación de los signos clínicos y la realización de pruebas de laboratorio, como el examen de muestras de sangre para detectar la presencia de parásitos o anticuerpos [19].

Tratamiento: La terapia para la fiebre de la garrapata implica el uso de fármacos diseñados para combatir los parásitos, entre los que destacan las tetraciclinas y los compuestos de diamidina. Sin embargo, la eficacia de estos tratamientos puede verse afectada por la diversidad de especies de *Babesia* y por la gravedad de la enfermedad en cada caso particular [19].

VII-B2. Tripanosomiasis bovina: La tripanosomiasis bovina es una enfermedad parasitaria transmitida por vectores, como la mosca tse-tsé, y causada por protozoos del género *Trypanosoma*. Principalmente, *T. vivax* y *T. congolense* son los responsables de esta afección en el ganado bovino. Esta enfermedad constituye un serio problema de salud animal en muchas zonas cálidas del planeta, ocasionando pérdidas económicas considerables en la industria ganadera [20].

Transmisión: La transmisión de *Trypanosoma* se realiza a través de la picadura de un insecto infectado. Una vez dentro del bovino, los parásitos se diseminan por el organismo, multiplicándose y causando daño tisular. Esta respuesta inflamatoria sistémica afecta negativamente a diversos órganos vitales del animal [20].

Síntomas clínicos: La tripanosomiasis bovina, una enfermedad parasitaria transmitida por insectos como la mosca tse-tsé, representa un grave problema para la ganadería en regiones tropicales y subtropicales. Causada por protozoos del género *Trypanosoma*, esta enfermedad provoca una serie de síntomas debilitantes en los bovinos, incluyendo fiebre, pérdida de peso, anemia, edemas y, en casos severos, la muerte. El ciclo de vida del parásito involucra al insecto vector y al animal, donde se multiplica y causa daño en diversos tejidos. Esta afección genera pérdidas económicas significativas en la producción ganadera al reducir la productividad y aumentar la mortalidad del ganado [20].

Diagnóstico: El diagnóstico de la tripanosomiasis bovina se establece mediante una combinación de evaluación clínica y pruebas de laboratorio. La historia clínica del animal, junto con un examen físico detallado, proporcionan pistas importantes. Sin embargo, el diagnóstico definitivo se basa en la identificación de los parásitos causantes de la enfermedad. Para ello, se realizan pruebas de laboratorio como el examen microscópico de muestras de sangre para detectar directamente los parásitos, pruebas serológicas para identificar los anticuerpos producidos por el organismo en respuesta a la infección, y la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) para detectar el material genético del parásito, ofreciendo una mayor sensibilidad y especificidad en el diagnóstico [20].

Tratamiento: El tratamiento de la tripanosomiasis bovina se basa en la administración de fármacos tripanocidas, como la diminazina aceturato. Sin embargo, la creciente resistencia de los parásitos a estos medicamentos representa un desafío significativo para el control de la enfermedad [20].

VII-C. Comparativa de tecnologías IoT aplicadas al monitoreo ganadero

Toma de datos geográficos con Arduino y GPS: Mediante la implementación de la tecnología LoRa, esta investigación ofrece una solución vanguardista para optimizar la gestión del ganado en Ecuador. Al combinar sensores GPS y microcontroladores en un sistema IoT, se logra un monitoreo preciso y económico del ganado, reduciendo significativamente las pérdidas por robo y extravío. Esta propuesta, fundamentada en una sólida base teórica y metodológica, no solo incrementa la productividad y competitividad del sector ganadero, sino que también fomenta prácticas sostenibles al minimizar la infraestructura requerida y simplificar la gestión en áreas rurales [21].

Sistema de geolocalización y termometría para ganado: Esta propuesta presenta una solución innovadora y altamente especializada para la gestión ganadera, integrando tecnología de punta como GPS, sensores de temperatura y conectividad inalámbrica. El diseño modular y la utilización de componentes como el ESP32 garantizan un sistema robusto y fácil de mantener. Los resultados de las pruebas demuestran la efectividad del sistema en la recolección de datos precisos y confiables, los cuales, a través de una interfaz web intuitiva, permiten a los productores tomar decisiones informadas para optimizar la gestión de su ganado, reduciendo pérdidas y aumentando la eficiencia operativa [22].

Dispositivo de seguimiento y seguridad para ganado: Esta propuesta tecnológica presenta una solución innovadora y práctica para el sector ganadero, especialmente en zonas rurales. Al aprovechar las ventajas de la tecnología LoRa, como su bajo consumo energético y largo alcance, se ha desarrollado un sistema de monitoreo que permite localizar y proteger el ganado de manera efectiva. La integración de dispositivos IoT como el ESP32 y Orange Pi, junto con la combinación de GPS y comunicación LoRa, garantiza un funcionamiento confiable y sostenible, incluso en áreas remotas. Además, la implementación de una interfaz amigable a través de Telegram y Node-RED facilita el acceso a la información en tiempo real, permitiendo a los usuarios tomar decisiones informadas para proteger su inversión [23].

La complejidad técnica general de los sistemas, que requieren habilidades avanzadas en programación y configuración para su implementación y mantenimiento; la dependencia de componentes específicos, como el Orange Pi, que tiene una comunidad de soporte limitada en comparación con alternativas más populares como Raspberry Pi; y el costo elevado de implementación inicial y escalabilidad, que puede ser una barrera económica para pequeños productores ganaderos. Además, se observa una limitada documentación y pruebas de campo extensivas, lo que podría dificultar la replicabilidad del proyecto en diferentes entornos o condiciones.

Finalmente, Los trabajos previos sobre monitoreo de ganado presentan limitaciones significativas que afectan su funcionalidad e impacto en el sector. Algunos se centran únicamente en la medición de parámetros básicos, como ubicación o temperatura, sin abordar un monitoreo integral que incluya datos de salud o movimiento del ganado. Otros se limitan a modelos teóricos sin una implementación práctica que demuestre su utilidad en el campo. Además, hay dispositivos que emplean materiales rudimentarios, como trapos para sujetar componentes, lo que compromete la durabilidad y comodidad para los animales. La falta de fuentes de energía renovables, como paneles solares, también restringe la autonomía de estos sistemas, dificultando su uso en zonas rurales donde el acceso a reemplazo de baterías es limitado. Estas carencias resaltan la necesidad de un sistema más completo, eficiente y sostenible.

VII-C1. ¿Por qué nuestra propuesta supera las limitaciones de los trabajos previos e incorpora mejoras significativas para el monitoreo del ganado vacuno?: La implementación de un sistema de monitoreo permite analizar el estado de salud del ganado vacuno mediante IoT se distingue significativamente frente a las propuestas analizadas en los otros tres trabajos gracias a la integración de tecnologías avanzadas y un enfoque integral que prioriza tanto la funcionalidad como la sostenibilidad. A diferencia de las soluciones previas, este sistema no solo se limita al rastreo de ganado, sino que incorpora un monitoreo detallado del estado de salud de los animales mediante sensores como el MLX90614 para la medición de temperatura y el MPU6050 para la detección de aceleración y giroscopio, proporcionando así una visión más completa del bienestar del ganado [24].

Un elemento diferenciador crucial es el uso de energía solar a través de un panel solar de 5V 1W, lo que convierte al sistema en una solución autosuficiente, ideal para zonas rurales sin acceso a electricidad. Este diseño sostenible reduce costos operativos a largo plazo y garantiza un funcionamiento continuo, incluso en entornos remotos. Además, las baterías de litio recargables refuerzan la autonomía del dispositivo, superando las limitaciones energéticas presentes en las propuestas comparadas [24].

Otro aspecto destacado es la calidad y diversidad de los componentes empleados. La inclusión de la placa Heltec WiFi LoRa, junto con librerías especializadas como TinyGPS++.h y MPU6050.h, mejora la precisión y confiabilidad del sistema. Asimismo, el uso de impresión 3D y un diseño de PCB personalizado asegura una construcción robusta y adaptable, lo cual contrasta con las soluciones menos refinadas de los otros proyectos. El diseño de una correa ergonómica para vacas también incrementa la comodidad y practicidad del dispositivo, mientras que la conexión a redes IoT como TTN (The Things Network) y la integración con Google Maps permiten un monitoreo en tiempo real con alta precisión y facilidad de uso [24].

Además, el sistema se ha validado a través de pruebas de campo exhaustivas en escenarios reales, demostrando su eficacia en zonas rurales con acceso limitado a infraestructura tecnológica. Estas pruebas prácticas garantizan la funcionalidad y confiabilidad del sistema en condiciones reales, resolviendo así uno de los principales desafíos identificados en los trabajos analizados: la dependencia de infraestructuras insuficientes. Este enfoque integral y probado asegura que el sistema represente una solución innovadora y efectiva para el manejo y cuidado del ganado [24].

VII-D. Componentes tecnológicos del collar

VII-D1. *Internet de las cosas(IoT)*: El Internet de las Cosas (IoT) es una red de dispositivos cotidianos, desde electrodomésticos hasta maquinaria industrial, que están equipados con tecnología para conectarse a internet, intercambiar datos y realizar acciones de manera automática [25]. El Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la comunicación entre dispositivos, facilitando la automatización y el análisis de datos en tiempo real. No obstante, su implementación en zonas remotas representa un desafío debido a las limitaciones de conectividad. Para abordar esta problemática, el uso de tecnologías como LoRa y gateways se ha convertido en una solución eficiente, permitiendo ampliar el alcance del IoT y mejorar su integración en diversos entornos [26].

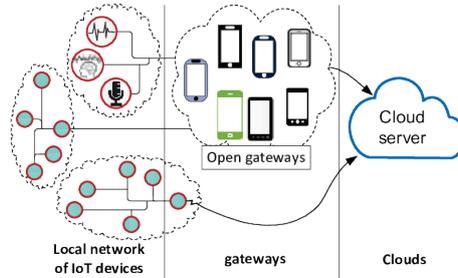


Figura 4: Internet de las cosas(IoT) [25].

VII-D2. *LoRaWAN*: LoRa es una tecnología de radiofrecuencia de espectro ensanchado que ofrece un alcance extendido y un bajo consumo energético. Gracias a su robustez y flexibilidad, LoRa se ha convertido en una opción popular para aplicaciones de IoT en entornos industriales, agrícolas y urbanos [27].

LoRaWAN es una tecnología inalámbrica de largo alcance que utiliza una técnica de modulación especial para superar obstáculos y consumir muy poca energía. Gracias a esto, los dispositivos conectados a LoRaWAN pueden enviar datos a grandes distancias sin necesidad de cambiar las baterías con frecuencia. Esta red se compone de tres elementos principales: las puertas de enlace, que actúan como puentes entre los dispositivos y internet; los dispositivos finales, que recolectan y envían información; y el servidor de red, que gestiona toda la comunicación y almacena los datos [27].

La creciente demanda de conectividad en nuestro mundo digital ha impulsado el desarrollo de tecnologías como LoRa y LoRaWAN. Su capacidad para conectar dispositivos en entornos desafiantes y a un bajo costo las posiciona como una solución ideal para el futuro del IoT. A medida que la tecnología avanza, podemos esperar ver un crecimiento exponencial en el número de dispositivos conectados a través de estas redes [27].



Figura 5: Arquitectura de una red LoraWan [27].

VII-D3. Topología de comunicación: La topología de una red es la disposición física y lógica de sus elementos, determinando el flujo de información y la eficiencia de la comunicación [28]. Por lo tanto, se empleará una topología en estrella donde los collares actúan como nodos, enviando información al Gateway central para su posterior procesamiento y almacenamiento en la nube.

Topología estrella: En esta configuración, los collares están conectados a un hub central que funciona como un conmutador, dirigiendo la información de un collar a otro [28]. La topología en estrella ofrece una gestión centralizada de los datos, permitiendo un monitoreo y control eficiente del ganado. Al concentrar la información en un punto central, simplifica las tareas de gestión y mejora la seguridad de los datos. Además, esta configuración es altamente escalable, adaptándose fácilmente al crecimiento del sistema [28].

VII-E. Hardware utilizado

VII-E1. Heltec WiFi LoRaWAN: La Heltec WiFi LoRa es una placa multifuncional que combina lo mejor de varios mundos: la potencia de procesamiento del ESP32, la comunicación de largo alcance de LoRa y la conectividad inalámbrica de Wi-Fi y Bluetooth. Ideal para proyectos IoT, esta placa permite crear dispositivos inteligentes y autónomos, perfectos para aplicaciones en entornos remotos o con limitaciones de energía. Gracias a su diseño compacto y potente, el Heltec WiFi LoRa es ideal para una amplia gama de aplicaciones, desde la agricultura inteligente hasta el rastreo de activos, ofreciendo soluciones innovadoras para optimizar procesos [29].

La placa Heltec WiFi LoRa se emplea en una amplia gama de aplicaciones IoT, incluyendo el despliegue de redes de sensores ambientales, sistemas de gestión agrícola, plataformas de rastreo de activos y soluciones de gestión de recursos. Su bajo consumo y largo alcance la hacen ideal para entornos remotos y aplicaciones que requieren una alta fiabilidad [29].

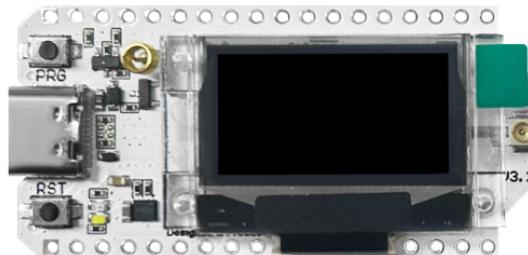


Figura 6: Placa heltec [29].

VII-F. Sensores

VII-F1. GPS u-blox NEO-6M-V2: El módulo GPS u-blox NEO-6M-V2 es un dispositivo compacto y eficiente diseñado para recibir señales satelitales y proporcionar datos de ubicación precisos. Este módulo incluye un chip GPS de alta sensibilidad que permite el posicionamiento en tiempo real, incluso en entornos con señal débil, como áreas urbanas o interiores. Su diseño compacto incluye un receptor GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), una antena cerámica integrada para una recepción estable y una memoria EEPROM para guardar configuraciones. Además, es compatible con interfaces UART, lo que facilita la conexión a microcontroladores como Arduino, permitiendo aplicaciones como rastreo vehicular, sistemas de navegación y monitoreo remoto. [30].

El NEO-6M-V2 admite el protocolo NMEA, que entrega información en forma de cadenas de datos estándar, incluyendo coordenadas, velocidad y tiempo. Este módulo es altamente eficiente en consumo energético, lo que lo hace ideal para dispositivos portátiles o autónomos. Su instalación requiere una fuente de alimentación estable (3.3V-5V) y una buena exposición al cielo para optimizar el número de satélites visibles. Entre sus características destacadas están su capacidad de fijar una posición en menos de un minuto bajo condiciones ideales y su fácil integración con plataformas de software para análisis de datos GPS. [30].



Figura 7: Placa GPS [29].

VII-F2. Sensor de temperatura MLX90614: El sensor MLX90614 es un dispositivo de medición de temperatura sin contacto que emplea tecnología de infrarrojos para detectar la radiación térmica emitida por los objetos. Basado en el principio de radiación térmica de cuerpos negros, utiliza una termopila como detector para convertir la energía radiada en una señal eléctrica. Este sensor incorpora un conversor analógico a digital (ADC) de 17 bits junto con un procesador de señales digitales (DSP) que optimiza el procesamiento y la precisión de los datos capturados., lo que permite obtener lecturas de alta precisión. Es muy extendido en aplicaciones como monitoreo de temperatura corporal, sistemas industriales y proyectos de Internet de las Cosas (IoT) debido a su diseño compacto y capacidad para medir rangos de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sensor y de $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el objeto [31].

El MLX90614 cuenta con una interfaz compatible con I2C y PWM, lo que facilita su integración en sistemas electrónicos. Su precisión es de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperaturas de objetos en el rango de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que lo hace ideal para aplicaciones médicas y agrícolas. Además, su bajo consumo de energía y diseño encapsulado garantizan resistencia a interferencias electromagnéticas y durabilidad en condiciones adversas. Este sensor no solo permite un monitoreo continuo, sino que también admite la medición de temperaturas puntuales o la implementación en sistemas de alerta temprana, lo que lo posiciona como una herramienta esencial en la implementación de sistemas inteligentes de monitoreo para la salud del ganado y otros entornos críticos [31].



Figura 8: Sensor de temperatura[31]

VII-F3. MPU-6050: Utilizado en diversas aplicaciones de monitoreo y control, el MPU-6050 integra en un solo módulo un acelerómetro y un giroscopio, ambos de tres ejes, permitiendo la detección precisa de movimientos y rotaciones. Este sensor emplea tecnología MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) para captar aceleraciones lineales y velocidades angulares con alta precisión. Diseñado para sistemas de navegación, estabilización de drones y robótica, su procesador digital de movimiento (DMP) interno permite el análisis de datos directamente en el dispositivo, reduciendo la carga computacional en los controladores principales [32].

Con su interfaz I2C y rangos ajustables de medición, que varían entre $\pm 2g$ y $\pm 16g$ para aceleración y entre $\pm 250^\circ/s$ y $\pm 2000^\circ/s$ para velocidades angulares, el MPU-6050 ofrece flexibilidad y adaptabilidad en proyectos tecnológicos. Además, su bajo nivel de ruido y consumo energético lo posicionan como una solución eficiente para aplicaciones en tiempo real. Este sensor ha demostrado ser crucial en proyectos de monitoreo inteligente, como la detección de patrones de comportamiento en ganado o el análisis de movimientos en dispositivos portátiles [32].

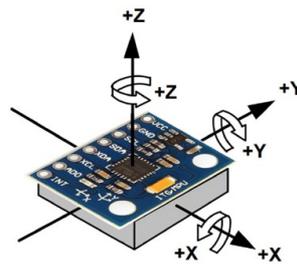


Figura 9: Giroscopio [32]

VII-G. Sistema de alimentación

VII-G1. Panel solar: El panel fotovoltaico aprovecha la radiación solar para generar electricidad a través de células de silicio cristalino de alta pureza, cuyo tamaño varía entre 0.8 y 2 metros cuadrados. Cuando la luz incide sobre estas células, se activa un flujo de electrones que circula por un circuito externo, transformando la energía solar en corriente eléctrica. Gracias a su eficiencia, se emplea ampliamente en sistemas de generación de energía renovable [33].

En la última década la energía solar se ha posicionado como una fuente de alimentación ideal para dispositivos de bajo consumo en entornos aislados. Desde la alimentación de sensores IoT en áreas rurales hasta la carga de baterías en sistemas autónomos, su aplicación es versátil. En el ámbito educativo, la energía solar se utiliza como plataforma para enseñar principios de electricidad y electrónica, mientras que en aplicaciones industriales, se emplea en sistemas de monitoreo remoto y estaciones meteorológicas [34].

La capacidad limitada de los paneles solares para generar energía restringe su aplicación en dispositivos de alto consumo. Sin embargo, son ideales para alimentar dispositivos de bajo consumo o como parte de sistemas de almacenamiento de energía [34].

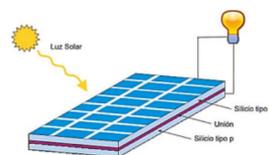


Figura 10: Panel fotovoltaico [33].

VII-G2. Baterías de Litio: Las baterías de litio funcionan mediante un proceso electroquímico en el que la energía potencial almacenada se transforma en corriente eléctrica a partir del desplazamiento controlado de iones de litio entre los electrodos de carga positiva y negativa. Este mecanismo de conversión energética se basa en la capacidad del material electrolítico para facilitar el flujo de electrones, garantizando una entrega eficiente de energía. Debido a su alta densidad energética, su capacidad de recarga y su prolongada vida útil, estas baterías resultan fundamentales en múltiples aplicaciones, abarcando desde dispositivos electrónicos portátiles hasta infraestructuras de almacenamiento energético de gran escala [35]

Las baterías 18650 son celdas de litio-ion cilíndricas que ofrecen una alta densidad energética en un formato compacto. Su curva de descarga plana proporciona un voltaje estable durante largos períodos, lo que las hace ideales para alimentar dispositivos electrónicos portátiles, herramientas eléctricas y sistemas de almacenamiento de energía. Aunque son capaces de suministrar altas corrientes de descarga, es fundamental utilizar un BMS para protegerlas de condiciones de funcionamiento extremas y garantizar una larga vida útil. La implementación de un BMS también permite equilibrar las celdas en baterías de múltiples celdas, mejorando así el rendimiento y la seguridad del sistema [36].



Figura 11: Diversas celdas de litio [35].

VII-H. Estructura física

VII-H1. Impresión 3D: La manufactura aditiva, o impresión 3D, ha cambiado radicalmente la forma en que se fabrican objetos, permitiendo la creación de estructuras complejas con alta precisión. Su capacidad para utilizar distintos materiales y optimizar procesos la ha convertido en una tecnología clave en sectores como la ingeniería, la medicina y la manufactura. Además, al reducir el desperdicio de material y los costos de producción, facilita la fabricación de piezas personalizadas que antes eran difíciles de obtener con métodos tradicionales [37].

La impresión 3D ha revolucionado la manufactura moderna, ofreciendo una flexibilidad y personalización sin precedentes. Al permitir la creación de objetos tridimensionales a partir de un modelo digital, esta tecnología ha transformado la forma en que diseñamos y producimos bienes. Desde la fabricación de prototipos hasta la producción en serie de piezas complejas, la impresión 3D ha demostrado ser una herramienta invaluable en diversos sectores industriales, facilitando la creación de productos altamente personalizados y adaptados a las necesidades específicas de cada cliente [38].

El sector médico ha sido uno de los más beneficiados por la adopción de la impresión 3D. Esta tecnología ha permitido la fabricación rápida y precisa de dispositivos médicos, implantes y prótesis personalizadas, mejorando significativamente la calidad de vida de los pacientes. Al adaptar los dispositivos médicos a las características anatómicas de cada individuo, se ha logrado una mayor eficacia en los tratamientos y una mejor recuperación de los pacientes. La impresión 3D ha abierto nuevas posibilidades en la medicina regenerativa y la cirugía personalizada, transformando la forma en que se abordan las necesidades de salud [39].

Más allá de sus beneficios en términos de personalización y eficiencia, la impresión 3D también contribuye a una producción más sostenible. Al reducir el desperdicio de material, minimizar el consumo de energía y disminuir la necesidad de herramientas y maquinaria especializadas, esta tecnología ofrece una alternativa más ecológica a los métodos de fabricación tradicionales. Además, la impresión 3D permite la producción local de piezas y componentes, reduciendo la huella de carbono asociada al transporte y la logística [40].

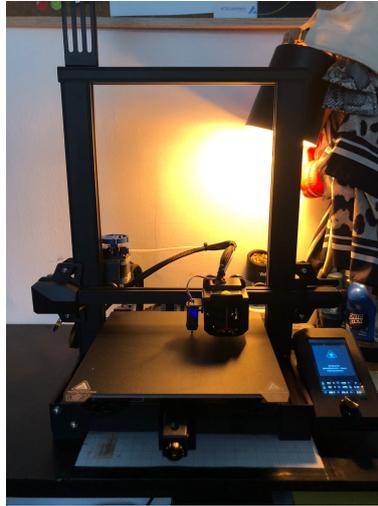


Figura 12: Impresora 3D.[Fuente: Autores]

VII-H2. Collar de correa para ganado: Diseñado específicamente para aplicaciones agrícolas, el collar de correa avanzado está fabricado con un material de alta resistencia que incluye protección contra rayos UV y propiedades a prueba de abrasión. Este material garantiza durabilidad incluso en condiciones extremas de exposición solar y contacto con elementos abrasivos como polvo y suciedad. Su diseño robusto permite que sea adecuado para la sujeción de dispositivos tecnológicos como sensores de monitoreo en ganado, manteniendo la funcionalidad y comodidad del animal [41].

Gracias a su resistencia mecánica y flexibilidad, este tipo de collar es una solución ideal para proyectos que requieren la instalación de dispositivos inteligentes, como sistemas IoT para el seguimiento de salud y actividad del ganado. La capacidad de soportar la intemperie y el desgaste prolongado asegura una larga vida útil, reduciendo los costos de mantenimiento y reposición. Además, la incorporación de hebillas de polímeros y ajustes precisos permite una instalación rápida y segura en animales de diferentes tamaños [41].

VII-I. Componentes electrónicos y de conexión

VII-11. PCB (Placa de Circuito Impreso): Una PCB se caracteriza por ser una lámina no conductora, generalmente de fibra de vidrio, recubierta con finas capas de cobre. Estas capas de cobre se graban con patrones específicos para formar pistas conductoras que interconectan los componentes electrónicos, creando así un circuito eléctrico funcional [42].

Las PCB están compuestas por múltiples capas superpuestas, cada una con una función específica. El sustrato, un material dieléctrico, actúa como soporte mecánico y aislante entre las capas conductoras de cobre. Estas capas, que pueden ser múltiples, conforman las pistas por donde circula la corriente eléctrica, interconectando los componentes electrónicos. Para proteger las pistas y definir las áreas de soldadura, se aplica una máscara de soldadura. Finalmente, la serigrafía, una capa impresa, proporciona información visual sobre la ubicación de los componentes y las conexiones, facilitando el ensamblaje y la inspección de la placa [42].

Las PCB son la base de la electrónica moderna, proporcionando la interconexión física y eléctrica necesaria para el funcionamiento de una amplia gama de dispositivos. Desde los pequeños gadgets electrónicos de consumo hasta los sistemas electrónicos complejos utilizados en la industria aeroespacial y de defensa, las PCB desempeñan un papel crucial. En la electrónica de consumo, las PCB se encuentran en teléfonos inteligentes, computadoras, televisores y una gran variedad de dispositivos cotidianos. En el sector médico, se utilizan en equipos de diagnóstico, equipos quirúrgicos y dispositivos implantables. La industria automotriz también depende en gran medida de las PCB para el control de motores, sistemas de seguridad y otros componentes electrónicos [43].

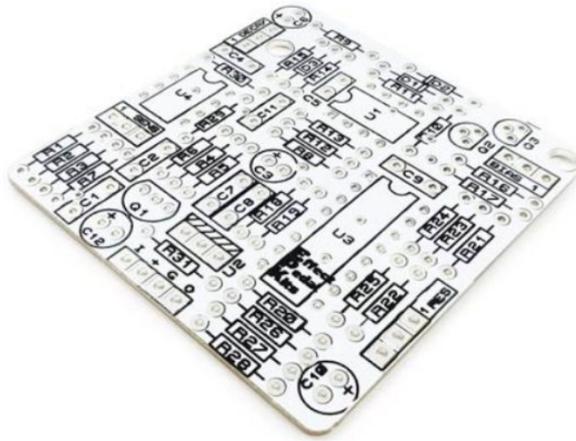


Figura 13: PCB [43].

VII-J. Infraestructura de red

VII-J1. Puerta de enlace y enrutador: El Gateway funciona como un puente fundamental entre los dispositivos de monitoreo, como los collares inteligentes y la red de comunicación. En este caso, el Gateway recibe los datos recopilados por los sensores en los collares y los prepara para ser transmitidos hacia la nube. Este dispositivo se encarga de traducir y gestionar los datos provenientes de los dispositivos IoT, facilitando su integración con redes de mayor alcance [44].

Por su parte, el enrutador es el dispositivo encargado de proporcionar conectividad a Internet. En este sistema, el Gateway se conecta al Router mediante WiFi, estableciendo una conexión inalámbrica que permite enviar los datos hacia los servidores en la nube. Este proceso asegura que los datos recopilados sean accesibles para análisis en tiempo real y almacenamiento, maximizando la eficiencia en sistemas de monitoreo ganadero y otras aplicaciones tecnológicas [44].

El Gateway SenseCAP M2 representa un avance significativo en el ecosistema de las redes LoRaWAN, destacándose por su capacidad para habilitar una conectividad robusta y eficiente en entornos de Internet de las Cosas (IoT). Este dispositivo es capaz de gestionar de manera simultánea múltiples canales y frecuencias, lo que lo convierte en una solución ideal para escenarios donde la densidad de dispositivos IoT es alta. Gracias a su arquitectura basada en hardware de alto rendimiento, asegura una transmisión de datos confiable y con latencia reducida, factores esenciales en aplicaciones que demandan respuestas inmediatas. Además, el SenseCAP M2 integra funcionalidades de administración remota, permitiendo actualizaciones de firmware y configuraciones a distancia, lo cual no solo simplifica el mantenimiento, sino que también contribuye a la optimización de costos operativos a largo plazo [45].

En el ámbito de la interoperabilidad, el SenseCAP M2 destaca por su compatibilidad con diversas plataformas en la nube, facilitando la integración de los datos capturados en sistemas analíticos para un soporte decisional más efectivo. Su diseño modular no solo permite una implementación ágil, sino también una expansión escalable acorde con las necesidades dinámicas de los proyectos IoT. Asimismo, la seguridad de los datos transmitidos es un elemento central, respaldado por protocolos de encriptación avanzados que garantizan la integridad y confidencialidad de la información. Con este conjunto de capacidades, el SenseCAP M2 se posiciona como una solución estratégica para el despliegue de infraestructuras IoT fiables y seguras, impulsando el desarrollo de aplicaciones inteligentes en sectores industriales, comerciales y urbanos [46].



Figura 14: Gateway [44].

VII-J2. TTN (The Things Network): (TTN) representa una infraestructura que se basa en la tecnología LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) para facilitar la transmisión de datos entre dispositivos IoT (Internet of Things). Diseñada para cubrir largas distancias con un consumo mínimo de energía, esta red opera mediante gateways que reciben señales de los dispositivos y las envían a servidores centrales a través de internet. Una vez en los servidores, los datos se procesan y se distribuyen a las aplicaciones finales, ofreciendo una solución efectiva en áreas con conectividad tradicional limitada. Además, su modelo fomenta redes comunitarias abiertas, donde los usuarios pueden instalar gateways y contribuir al ecosistema global, democratizando el acceso a la conectividad [47].

El sistema funciona mediante tres elementos clave: los dispositivos de extremo (nodos), los gateways y el Network Server. Los nodos transmiten datos utilizando bandas de frecuencia libre, como las asignadas para LoRaWAN, mientras que los gateways interceptan estas señales y las dirigen al servidor de red. Dicho servidor desempeña funciones esenciales como la autenticación, el enrutamiento y la distribución de datos hacia aplicaciones específicas. Entre los beneficios más notables se incluyen su capacidad para integrar diversas aplicaciones IoT, la seguridad garantizada por cifrado de extremo a extremo, y los bajos costos de implementación. Esto lo posiciona como una opción ideal para sectores como agricultura inteligente, ciudades sostenibles y monitoreo ambiental [48].

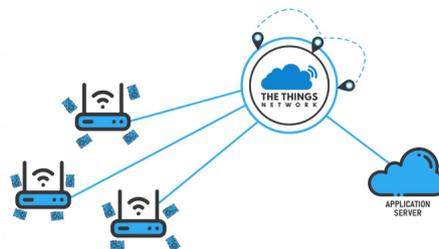


Figura 15: TTN [48].

VII-K. Software utilizado

VII-K1. EasyEDA: En el ámbito del diseño electrónico, EasyEDA se posiciona como una plataforma innovadora que combina accesibilidad y funcionalidad, destacándose por ser completamente en línea. Al operar en la nube, permite a sus usuarios desarrollar proyectos desde cualquier ubicación con acceso a internet, eliminando las barreras tradicionales asociadas a las herramientas locales. Su diseño intuitivo responde a las necesidades de ingenieros, estudiantes y aficionados, integrando herramientas para la elaboración de esquemáticos, diseño de PCB y simulaciones de circuitos analógicos y digitales. Una característica distintiva es su biblioteca integrada, que incluye una amplia gama de componentes electrónicos vinculados directamente a proveedores como LCSC y JLCPCB, optimizando el proceso entre diseño y fabricación. Este ecosistema no solo acelera el flujo de trabajo, sino que también reduce errores comunes en el desarrollo de proyectos electrónicos [49].

La arquitectura basada en el modelo SaaS elimina la necesidad de instalaciones locales y facilita el acceso a actualizaciones automáticas, lo que representa un beneficio significativo para los usuarios. EasyEDA ofrece un esquema de servicios escalable que abarca desde cuentas gratuitas con funciones básicas hasta opciones premium con características avanzadas, como almacenamiento ampliado y proyectos privados. Su capacidad para soportar el diseño colaborativo y la compatibilidad con formatos estándar de la industria refuerza su versatilidad como herramienta integral. La simulación incorporada permite validar diseños antes de la fabricación, optimizando recursos y garantizando precisión. Estas características han consolidado a EasyEDA como una solución esencial para proyectos electrónicos que abarcan desde prototipos experimentales hasta aplicaciones comerciales a gran escala [50].

VII-K2. IDE Arduino: El Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino representa una aplicación multiplataforma escrita en Java que proporciona un conjunto completo de herramientas para el desarrollo de software para las placas Arduino. Este IDE incluye un editor de código con resaltado de sintaxis, un compilador que traduce el código fuente en un formato comprensible para el microcontrolador, y un cargador de arranque que transfiere el programa a la placa. Además, ofrece bibliotecas y ejemplos de código que facilitan la implementación de diversas funcionalidades [51].

El IDE de Arduino es una aplicación multiplataforma que proporciona un entorno de desarrollo completo para programar microcontroladores Arduino. Su editor de código, con características como resaltado de sintaxis y autocompletado, facilita la escritura y la lectura del código. El IDE incluye un compilador que traduce el código fuente en un lenguaje comprensible para el microcontrolador y un cargador de arranque que transfiere el programa a la placa. Además, cuenta con una amplia biblioteca de funciones predefinidas que permiten a los usuarios implementar rápidamente funcionalidades comunes, como el control de sensores y actuadores. La compatibilidad con múltiples sistemas operativos y su interfaz intuitiva hacen del IDE de Arduino una herramienta popular tanto para principiantes como para desarrolladores experimentados [51].



```
Blink | Arduino 1.8.5
Blink 5
This example code is in the public domain.
http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}
// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
```

17 Arduino/Genuino Uno on COM1

Figura 1.1.

Figura 16: IDE Arduino [51].

VII-K3. Google Maps: Google Maps se ha consolidado como una plataforma clave para servicios de navegación y mapeo, destacándose por su precisión y facilidad de uso. La herramienta permite a los usuarios explorar ubicaciones en tiempo real, generar direcciones detalladas y monitorear el tráfico, facilitando así la planificación de rutas. Con funciones avanzadas como Street View, mapas en 3D y la posibilidad de guardar ubicaciones personalizadas, se adapta a las necesidades de una amplia variedad de usuarios. Además, su integración con múltiples plataformas asegura compatibilidad con diversos dispositivos y sistemas operativos [52].

Las funcionalidades de Google Maps van más allá de la navegación, siendo esenciales en sectores como el comercio electrónico, la logística y el turismo. Empresas aprovechan su API para optimizar procesos de entrega, rastrear flotas y mejorar la experiencia del cliente mediante servicios de localización en tiempo real. También destaca como una herramienta indispensable para investigadores y urbanistas gracias a sus datos geoespaciales detallados. Con innovaciones constantes, como la realidad aumentada para navegación peatonal, reafirma su liderazgo en soluciones de geolocalización [53].

VII-L. Librerías utilizadas

VII-L1. Librería [TinyGPS++.h]: La librería TinyGPS++ es una herramienta indispensable para aquellos que desean incorporar capacidades de posicionamiento global en sus proyectos basados en Arduino. Esta librería especializada se encarga de interpretar los datos proporcionados por los módulos GPS, que se comunican utilizando el protocolo NMEA. Gracias a TinyGPS++, los desarrolladores pueden extraer de forma sencilla y eficiente información crucial como la latitud, longitud, altitud, velocidad y hora actual. Su diseño orientado a objetos facilita la interacción con los datos GPS, permitiendo a los programadores centrarse en la lógica de su proyecto sin preocuparse por los detalles de la decodificación de los mensajes NMEA [54].

Una de las grandes ventajas de TinyGPS++ es su versatilidad. Además de soportar las sentencias NMEA más comunes como \$GPGGA y \$GPRMC, esta librería puede adaptarse para trabajar con otros formatos de datos, lo que la hace compatible con una amplia gama de módulos GPS disponibles en el mercado. Su tamaño compacto y eficiencia la convierten en una excelente opción para proyectos con recursos limitados, como aquellos que utilizan microcontroladores de baja potencia. Gracias a TinyGPS++, los desarrolladores pueden agregar funcionalidades de posicionamiento a sus proyectos de Arduino de manera rápida y sencilla, abriendo un mundo de posibilidades en aplicaciones como seguimiento de vehículos, robótica móvil y sistemas de navegación [54].

VII-L2. Librería [Wire.h]: La arquitectura de bus I2C, soportada por la librería Wire.h en Arduino, se caracteriza por su simplicidad y flexibilidad. Al utilizar solo dos líneas de comunicación, SDA y SCL, este protocolo permite conectar múltiples dispositivos a un microcontrolador de manera eficiente. Esta característica, combinada con su bajo costo de implementación, ha llevado a la adopción generalizada del I2C en una variedad de aplicaciones, desde sensores ambientales y actuadores hasta pantallas LCD y módulos de memoria [55].

La librería Wire.h de Arduino ofrece una interfaz intuitiva y flexible para implementar el protocolo I2C, un estándar de comunicación serial de bajo costo y bajo consumo de energía. Esta librería permite configurar el microcontrolador Arduino como maestro o esclavo, lo que otorga una gran versatilidad a la hora de integrar múltiples dispositivos en un mismo sistema. La capacidad de establecer una comunicación bidireccional simplifica la interacción entre el microcontrolador y una amplia variedad de sensores, actuadores y otros periféricos I2C, convirtiendo a Wire.h en una herramienta esencial para el desarrollo de proyectos electrónicos [55].

La librería Wire.h proporciona un conjunto de funciones sencillas y eficientes para gestionar la comunicación I2C. Entre las principales funcionalidades se encuentran: la inicialización del bus I2C, el envío y recepción de datos, y la configuración de la dirección de los dispositivos esclavos. Además, la librería incluye soporte para resistencias pull-up internas, lo que simplifica el proceso de configuración del hardware. La velocidad de comunicación también es configurable, permitiendo adaptar el protocolo a las necesidades específicas de cada proyecto. Al operar en modo estándar (100 kHz) o rápido (400 kHz), el protocolo I2C ofrece un equilibrio entre velocidad y fiabilidad [55].

La simplicidad y eficiencia del protocolo I2C, junto con la facilidad de uso de la librería Wire.h, han contribuido a su amplia adopción en la comunidad de desarrolladores de Arduino. Gracias a esta librería, es posible construir sistemas electrónicos complejos y escalables, desde prototipos sencillos hasta sistemas embebidos industriales. La capacidad de conectar múltiples dispositivos a un solo bus I2C reduce el número de pines del microcontrolador necesarios para la comunicación, lo que resulta en diseños más compactos y eficientes. Además, la amplia disponibilidad de componentes compatibles con I2C facilita la integración de sensores, actuadores y otros periféricos en proyectos de electrónica [55].

VII-L3. Librería [MPU6050.h]: La librería MPU6050.h constituye un pilar fundamental en el desarrollo de proyectos electrónicos que requieren una precisa medición de movimiento. Diseñada para interactuar con el sensor MPU-6050, esta librería proporciona una interfaz intuitiva y robusta para acceder a los datos de aceleración y velocidad angular proporcionados por este dispositivo. Al combinar un acelerómetro y un giroscopio en un solo chip, el MPU-6050, en conjunto con la librería, permite a los desarrolladores implementar una amplia gama de funcionalidades, desde la estabilización de plataformas hasta el seguimiento de movimientos en tiempo real. Su versatilidad y facilidad de uso han convertido a esta combinación en una elección popular en proyectos de robótica, drones, wearables y sistemas de control de movimiento [56].

Por otro lado destaca por su compatibilidad con múltiples plataformas Arduino, lo que facilita su integración en una gran variedad de proyectos. Además, su instalación es sencilla y se realiza directamente desde el administrador de librerías del IDE de Arduino, agilizando el proceso de desarrollo. La librería proporciona un conjunto de funciones bien documentadas que permiten configurar el sensor, calibrar los ejes y leer los datos de aceleración y velocidad angular. Gracias a estas características, la librería MPU6050.h se ha convertido en una herramienta indispensable para los desarrolladores que buscan agregar capacidades de detección de movimiento a sus proyectos. Su amplia comunidad de usuarios y el constante desarrollo de la librería garantizan una larga vida útil y una gran cantidad de recursos disponibles para aquellos que deseen profundizar en su uso [56].

VII-L4. Librería [LoRaWan_APP.h]: La [librería LoRaWan_APP.h] permite a los desarrolladores simplificar la implementación de aplicaciones IoT utilizando tecnología LoRaWAN. Con esta herramienta, se facilita la comunicación a largas distancias mientras se optimiza el consumo energético, lo que la hace especialmente útil para dispositivos IoT que operan en entornos remotos o de difícil acceso. Entre sus capacidades se encuentran la configuración personalizada de frecuencias, clases de dispositivo (A, B o C) y tasas de datos (DR). También proporciona soporte para los modos ABP (Activation By Personalization) y OTAA (Over-The-Air Activation), ofreciendo opciones versátiles para la conexión y autenticación [57].

Esta librería encuentra aplicaciones destacadas en proyectos IoT que exigen conectividad robusta y una gestión eficiente de recursos energéticos. Sectores como la agricultura de precisión, las ciudades inteligentes y el monitoreo ambiental recurren frecuentemente a sus funcionalidades. La compatibilidad con plataformas como Arduino y STM32 facilita la creación de soluciones seguras y escalables en plazos cortos. Además, incorpora herramientas avanzadas para gestionar mensajes confirmados, reintentos de transmisión y modos de bajo consumo, consolidándose como una elección estratégica para proyectos basados en LoRaWAN [58].

VII-L5. *Librería [lora.h]*: La librería LoRa.h se erige como una herramienta fundamental para aquellos desarrolladores que buscan incorporar capacidades de comunicación de largo alcance a sus proyectos basados en Arduino. Diseñada para interactuar con módulos LoRa basados en los chips Semtech SX1276/77/78/79, esta librería proporciona una interfaz sencilla y eficiente para enviar y recibir datos a través de este protocolo de comunicación de bajo consumo energético. Al exponer directamente las funcionalidades del radio LoRa, la librería ofrece un alto grado de flexibilidad, permitiendo a los desarrolladores configurar y personalizar la comunicación de acuerdo a las necesidades específicas de cada proyecto [59].

Una de las grandes ventajas de la librería LoRa.h es su facilidad de integración en proyectos Arduino. Su instalación es sencilla y se realiza directamente desde el administrador de librerías del IDE de Arduino. Además, la librería proporciona una amplia gama de funciones para configurar los parámetros de comunicación del módulo LoRa, como la potencia de transmisión, el factor de expansión y el ancho de banda de la señal. Esta flexibilidad permite optimizar el rendimiento del enlace de comunicación en función de las condiciones ambientales y las características del entorno de operación. Asimismo, la librería ofrece una interfaz intuitiva que facilita la interacción con el módulo LoRa, lo que reduce significativamente el tiempo de desarrollo y puesta en marcha de proyectos [59].

VIII. MARCO METODOLÓGICO

La implementación de tecnologías IoT en la ganadería representa una respuesta innovadora a los retos tradicionales del sector, como la detección oportuna de enfermedades, la optimización de recursos y la reducción de pérdidas económicas. En este contexto, el desarrollo de un sistema de monitoreo integral, que combina sensores avanzados con plataformas digitales, permite no solo recolectar datos en tiempo real, sino también analizar patrones clave para la toma de decisiones estratégicas. Este enfoque metodológico busca transformar la gestión ganadera mediante la integración de herramientas tecnológicas accesibles, confiables y sostenibles, maximizando la productividad y garantizando el bienestar animal. A partir de un diseño experimental riguroso, se valida la funcionalidad del prototipo en entornos reales, asegurando su aplicabilidad práctica y su impacto positivo en las dinámicas del sector.

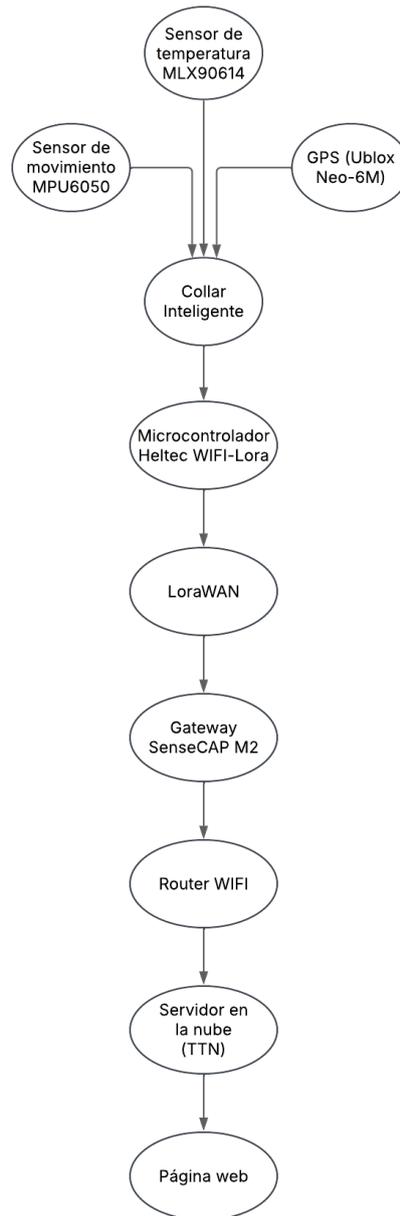


Figura 17: Diagrama de flujo [Fuente: Autores].

VIII-A. *Análisis*

Para establecer una base sólida para el desarrollo del collar inteligente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura académica y técnica, enfocándose en las aplicaciones de tecnologías IoT en la ganadería. Los análisis previos destacan la creciente integración de sensores avanzados en sistemas de monitoreo, los cuales han demostrado ser herramientas eficaces para la gestión del ganado. En particular, investigaciones recientes destacan la importancia de los sensores en la detección temprana de anomalías relacionadas con la salud del rebaño, como fiebre, estrés térmico y patrones de movimiento inusuales que pueden ser indicadores de enfermedades o incomodidades físicas. Estos avances han permitido a los productores ganaderos no solo mitigar pérdidas económicas significativas, sino también optimizar la productividad mediante un manejo más eficiente de los recursos.

Un aspecto crucial identificado en los estudios revisados es la capacidad de los sistemas IoT para proporcionar datos en tiempo real, lo que habilita un enfoque predictivo y no solo reactivo en la gestión del ganado. Los análisis previos destacan que la combinación de sensores GPS con dispositivos de monitoreo biométrico puede revolucionar el sector, especialmente en regiones rurales donde las visitas veterinarias frecuentes pueden no ser prácticas.

Además, se han explorado modelos de machine learning integrados a dispositivos IoT para predecir enfermedades comunes basadas en patrones de comportamiento y datos fisiológicos. Sin embargo, se identificó que la adopción de estas tecnologías en países en desarrollo enfrenta desafíos significativos, como la falta de infraestructura digital, la formación técnica limitada de los usuarios y los costos iniciales elevados, lo que refuerza la necesidad de soluciones accesibles y adaptadas al contexto local.

Es importante subrayar que la revisión reveló una carencia fundamental de estudios que aborden la implementación de soluciones IoT en el contexto específico de la ganadería en Ecuador. Si bien existen estudios generales sobre el uso de estas tecnologías en América Latina, pocos abordan las condiciones particulares del país, como la diversidad geográfica, las variaciones climáticas y los tipos de ganado predominantes. Este vacío académico subraya la relevancia del presente proyecto, que no solo busca contribuir a la literatura existente, sino también proponer un modelo adaptado a las necesidades específicas de los ganaderos ecuatorianos. Además, se identificó la necesidad de integrar fuentes de energía renovable, como paneles solares, en los dispositivos IoT, dado el acceso limitado a redes eléctricas confiables en áreas rurales. Esta revisión no solo proporcionó un marco conceptual para el desarrollo del sistema, sino que también delineó los parámetros críticos que deben abordarse para garantizar la viabilidad técnica y económica del proyecto.

VIII-B. *Diseño*

VIII-B1. Diseño electrónico: El desarrollo del sistema de monitoreo comenzó con la identificación de las necesidades del sector ganadero. Se priorizaron componentes que permitieran medir temperatura, ubicación y movimiento del ganado de manera eficiente y precisa. El sensor de temperatura MLX90614 fue seleccionado por su capacidad de mediciones sin contacto, una característica esencial para evitar molestias al animal. Para el rastreo de ubicación, se utilizó el módulo GPS Ublox Neo-6M-v2, debido a su precisión satelital y compatibilidad con entornos rurales. Finalmente, el acelerómetro y giroscopio MPU6050 fue incorporado para captar datos de movimiento y comportamiento, fundamentales para monitorear la actividad del ganado.

El ensamblaje inicial se realizó con una vaquelita para pruebas preliminares. Este prototipo permitió verificar la funcionalidad de cada componente y la interacción entre ellos. Durante las pruebas, se identificaron limitaciones en la integración de los dispositivos, como la fragilidad de las conexiones y la falta de resistencia a condiciones adversas. Por ello, se decidió diseñar una PCB personalizada, optimizada para compactar y robustecer el sistema. Esta mejora permitió garantizar la estabilidad del circuito y una mayor durabilidad en campo.

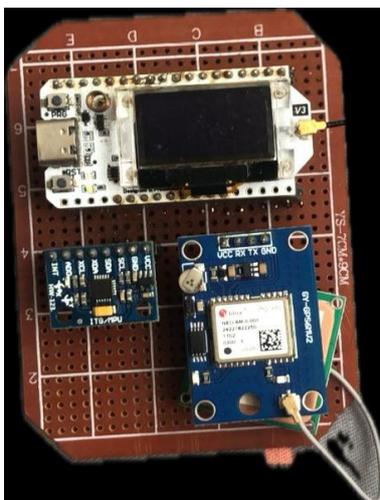


Figura 18: Placa PCB usada como prototipo [Fuente: Autores].

El diseño electrónico de la placa se desarrolló utilizando la plataforma EasyEDA , aprovechando sus herramientas intuitivas para esquematizar y crear un circuito impreso (PCB) optimizado para el sistema de monitoreo del ganado. La placa integra diversos componentes esenciales conectados de forma eficiente para garantizar la funcionalidad del dispositivo.



Figura 19: Placa final [Fuente: Autores].

El microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3 actúa como el núcleo del sistema, encargado de procesar y transmitir los datos recopilados por los sensores mediante la tecnología LoRaWAN . Entre los sensores conectados destaca el MLX90614 , un sensor de temperatura infrarrojo diseñado para medir la temperatura corporal del ganado sin contacto. Este sensor se conecta al microcontrolador a través de la interfaz I2C, lo que permite una comunicación precisa y confiable para registrar variaciones térmicas en tiempo real.

Además, se incluye el módulo MPU6050 , que combina un acelerómetro y un giroscopio para capturar datos relacionados con el movimiento y la actividad del ganado. Este módulo también utiliza la interfaz I2C para comunicarse con el microcontrolador, compartiendo el bus de datos con el MLX90614 . De igual manera, el módulo GPS (Ublox Neo-6M) se conecta al microcontrolador mediante una interfaz UART, permitiendo el registro de la ubicación geográfica del ganado con alta precisión, incluso en zonas rurales con conectividad limitada.

Para la gestión de energía, la placa incorpora un regulador de voltaje (BCM8768), que estabiliza la alimentación procedente de un sistema híbrido compuesto por un panel solar de 5V y baterías recargables de litio. Esta configuración asegura un funcionamiento autónomo y eficiente en condiciones de campo. El regulador alimenta tanto los sensores como el microcontrolador, maximizando la duración de la batería y optimizando el consumo energético.

Las pistas del PCB fueron diseñadas cuidadosamente para minimizar interferencias y garantizar una señal estable entre los componentes. En la parte inferior de la placa se encuentran los conectores para el panel solar y las baterías, facilitando el mantenimiento y reemplazo. También se integró una antena LoRa para permitir la transmisión de datos a larga distancia, una característica crucial en entornos rurales.

En conjunto, el diseño del circuito electrónico asegura un equilibrio entre funcionalidad, robustez y eficiencia energética, posicionándose como una solución innovadora para el monitoreo inteligente de ganado.

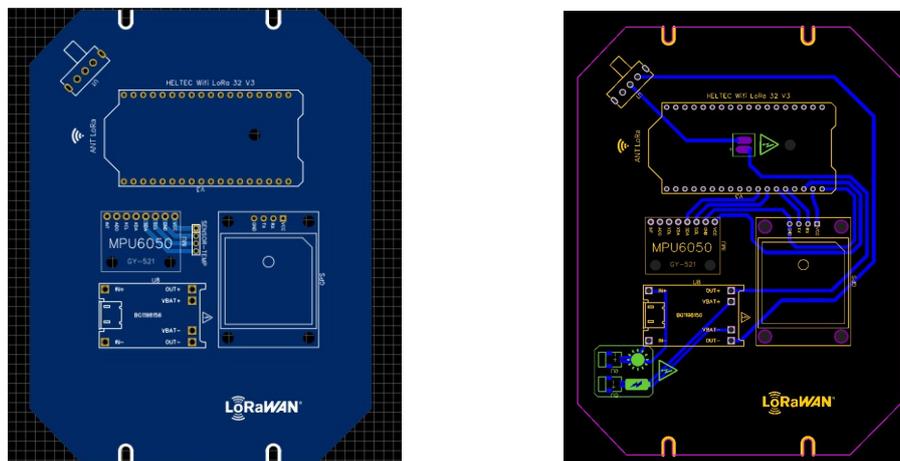


Figura 20: Elementos utilizados en la placa [Fuente: Autores].

VIII-B2. Control: En el sistema desarrollado, la central de control está cargada por el microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3 , un dispositivo diseñado específicamente para aplicaciones IoT con capacidades de conectividad LoRa y WiFi. Este controlador se conecta al Gateway SenseCAP M2 , el cual actúa como puente para la transmisión de datos hacia la nube o servidores locales. La programación del microcontrolador Heltec se realizó mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE , siguiendo las guías y documentación proporcionadas por el fabricante, que facilitan la configuración y el establecimiento de comunicación entre el Heltec y el Gateway.

Para garantizar la conectividad WiFi necesaria para el funcionamiento del Gateway SenseCAP M2, se instaló un enrutador en la hacienda El Diamante , configurando una red inalámbrica dedicada para este propósito. El Gateway se ubicó estratégicamente en la hacienda, donde puede recibir las señales LoRa provenientes del Heltec y transmitir las de forma eficiente a través de la red WiFi instalada.



Figura 21: Conexión al router y gateway [Fuente: Autores].

Este enfoque asegura una comunicación confiable entre los dispositivos y permite la supervisión en tiempo real de los parámetros monitoreados. Además, la elección del Gateway SenseCAP M2, junto con el microcontrolador Heltec, garantiza un alcance adecuado para la transmisión de datos en áreas rurales, optimizando así la operatividad del sistema bajo condiciones reales de campo.

VIII-B3. Software: Para implementar la comunicación entre los dispositivos del sistema de monitoreo y el gateway, se utilizó el microcontrolador Heltec WiFi LoRa, el cual permite integrar conectividad WiFi y LoRaWAN, siendo ideal para la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo energético. La programación del Heltec se realizó utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE, empleando librerías como `lorawan` para gestionar la comunicación mediante el protocolo LoRa. Durante este proceso, se configuraron los pines de entrada/salida del microcontrolador y se programaron de manera personalizada los sensores de temperatura (MLX90614), GPS (Ublox Neo-6M) y acelerómetro (MPU6050). Antes de la implementación definitiva, se llevaron a cabo pruebas de conexión y validación, garantizando que las mediciones fueran precisas y consistentes.

 The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The main window displays the following code:


```

COLLAR_VACAS.ino
27
28 Serial.println("LoRa inicializado correctamente");
29
30 // Inicializar MPU6050
31 if (!mpu.begin()) {
32   Serial.println("Error al iniciar MPU6050");
33   while (1);
34 }
35 Serial.println("MPU6050 inicializado correctamente");
36
37 // Inicializar MLX90614
38 if (!mlx.begin()) {
39   Serial.println("Error al iniciar el sensor MLX90614");
40   while (1);
41 }
42 Serial.println("MLX90614 inicializado correctamente");
43
44
45 void loop() {
46   // Leer datos del GPS
47   while (GPS_Serial.available() > 0) {
48     gps.encode(GPS_Serial.read());
49     if (gps.location.isUpdated()) {
50       float lat = gps.location.lat();
51       float lng = gps.location.lng();
52     }
  
```

 The output window at the bottom shows the following message:


```

El sketch usa 338968 bytes (9%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 3342336 bytes.
Las variables globales usan 28920 bytes (6%) de la memoria dinámica, dejando 386760 bytes para las variables locales. El máximo es 327680 bytes.
  
```

Figura 22: Programación en el IDE de arduino [Fuente: Autores].

La transmisión de los datos recolectados por los collares inteligentes fue posible gracias a la configuración de un Gateway conectado a la red The Things Network (TTN). Los nodos se registraron en TTN utilizando una cuenta creada específicamente para el proyecto, asignándoles un identificador único (DevEUI) que permitió asociar correctamente los datos con su dispositivo origen. La configuración del Gateway incluyó la selección de la frecuencia de transmisión (915 MHz para Ecuador) y el ajuste de parámetros como la potencia de emisión y la sensibilidad de recepción. Una vez configurados, se realizaron pruebas para garantizar la estabilidad de la conexión y la correcta transmisión de los datos hacia la nube, donde fueron procesados en tiempo real a través de TTN. Este flujo facilitó el almacenamiento y posterior visualización de los datos en la aplicación web.

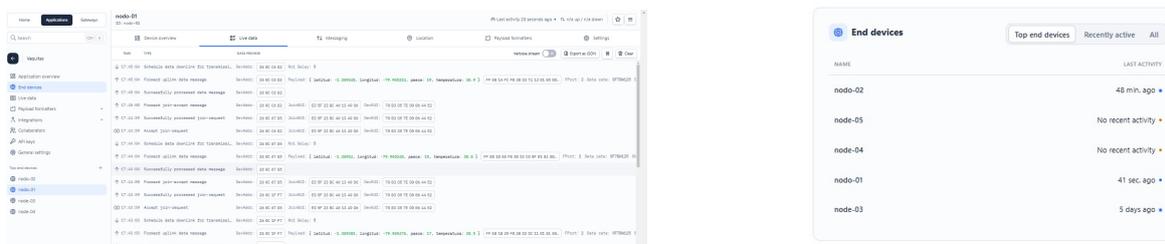


Figura 23: Nodos en TTN[Fuente: Autores].

El almacenamiento de los datos recolectados fue implementado mediante una base de datos relacional diseñada en SQL, la cual permite gestionar grandes volúmenes de información de manera eficiente. Esta base de datos incluyó tablas específicas para almacenar datos clave como latitud, longitud, temperatura, número de pasos y marca temporal. El flujo de datos iniciaba con los collares inteligentes, que enviaban las mediciones al Gateway. Este último transmitía la información hacia la nube mediante TTN, donde los datos eran procesados y almacenados en la base de datos. Además, la configuración del sistema permitió que la aplicación web accediera a estos datos en tiempo real, ofreciendo al usuario una experiencia fluida y confiable.

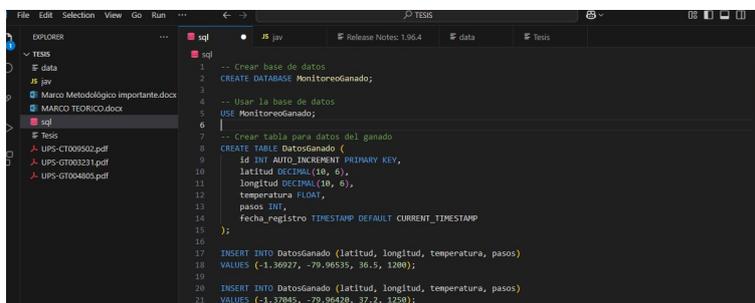
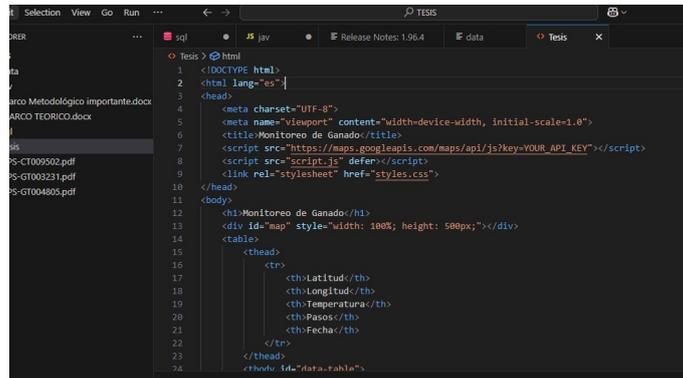


Figura 24: Programación en SQL [Fuente: Autores].

La visualización de los datos recolectados se realizó a través de una aplicación web desarrollada para este proyecto. La interfaz gráfica fue diseñada utilizando HTML y CSS, garantizando una experiencia intuitiva y compatible con dispositivos móviles y de escritorio. Para manejar los datos y representarlos dinámicamente en tiempo real, se emplearon JavaScript y bibliotecas específicas como Chart.js. La aplicación integró la API de Google Maps, lo que permitió representar la ubicación geográfica del ganado en mapas interactivos. Adicionalmente, se generaron gráficas que correlacionaban métricas como la temperatura y la actividad física, facilitando la identificación de patrones de comportamiento y posibles anomalías. Estas herramientas contribuyeron a una gestión más eficiente y basada en datos del ganado.



```
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="es">
3 <head>
4 <meta charset="UTF-8">
5 <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
6 <title>Monitoreo de Ganado</title>
7 <script src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=YOUR_API_KEY"></script>
8 <script src="script.js" defer></script>
9 <link rel="stylesheet" href="styles.css">
10 </head>
11 <body>
12 <h1>Monitoreo de Ganado</h1>
13 <div id="map" style="width: 100%; height: 500px;">
14 <table>
15 <thead>
16 <tr>
17 <th>Latitud</th>
18 <th>Longitud</th>
19 <th>Temperatura</th>
20 <th>Pasos</th>
21 <th>Fecha</th>
22 </tr>
23 </thead>
24 </table>
25 </div>
26 </body>
27 </html>
```

Figura 25: Programación en HTML [Fuente: Autores].

VIII-C. Simulación

La simulación desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de este proyecto, permitiendo validar previamente los componentes y funcionalidades del sistema antes de su implementación física. Este proceso facilitó la identificación de posibles fallos en el diseño del circuito, la comunicación entre dispositivos y el flujo de datos hacia la plataforma web. Se utilizaron herramientas específicas que simularon tanto los aspectos electrónicos como las condiciones reales de operación, permitiendo analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios.

Además, la simulación proporcionó un marco para optimizar el diseño, asegurando que el sistema cumpliera con los requisitos de eficiencia y robustez. En este apartado, se detalla cómo las herramientas de software y las metodologías empleadas contribuyeron a garantizar el correcto funcionamiento del sistema en un entorno controlado.

VIII-C1. Diseño del circuito electrónico con EasyEDA: El diseño del circuito electrónico fue realizado utilizando EasyEDA, una plataforma que permite diseñar y simular placas de circuito impreso (PCB) de manera eficiente. Esta herramienta permitió integrar los sensores de temperatura (MLX90614), GPS (Ublox Neo-6M) y el acelerómetro (MPU6050) con el microcontrolador Heltec WiFi LoRa. En esta fase, se analizaron las conexiones entre los componentes, verificando que cada sensor pudiera transmitir datos de forma confiable. EasyEDA facilitó además la generación de los archivos Gerber requeridos para la fabricación de la PCB, asegurando que el diseño cumpliera con los estándares requeridos. Durante la simulación, se evaluaron posibles problemas como interferencias eléctricas y errores de conexión, implementando ajustes antes de pasar a la fase de construcción.

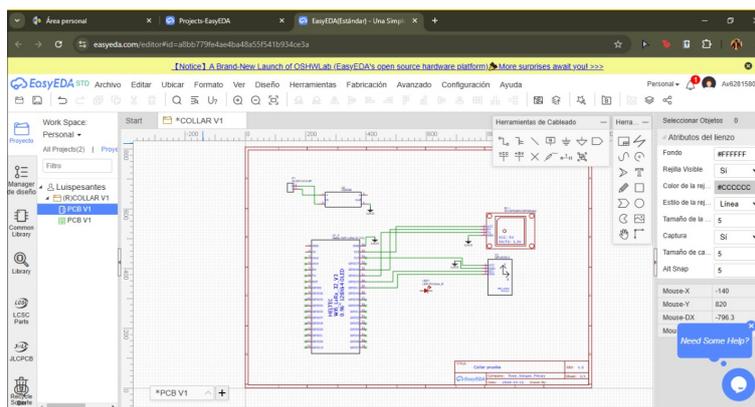


Figura 26: Circuito electrónico en EasyEDA [Fuente: Autores].

VIII-C2. Simulación de comunicación LoRaWAN: Se llevó a cabo una simulación para analizar la comunicación entre los nodos del sistema y el Gateway utilizando el protocolo LoRaWAN. Este protocolo fue evaluado en términos de alcance y estabilidad, asegurando la transmisión de datos en entornos rurales con obstáculos físicos y largas distancias. Se utilizó la consola de The Things Network (TTN) para simular la recepción de datos, verificando que las lecturas generadas por los sensores fueran decodificadas correctamente. Esta simulación permitió validar que el sistema fuera capaz de operar en condiciones reales sin interrupciones en el flujo de datos.

VIII-C3. Validación del flujo de datos y almacenamiento: La simulación también abarcó el flujo de datos desde los collares inteligentes hasta la base de datos SQL, asegurando la correcta integración de todos los componentes del sistema. Se generaron datos simulados para representar las lecturas de temperatura, ubicación y actividad física del ganado, los cuales fueron enviados a través de TTN y almacenados en una base de datos diseñada específicamente para este proyecto.

VIII-C4. Resultados de la simulación y ajustes realizados: Los resultados obtenidos durante la simulación fueron esenciales para garantizar la viabilidad del sistema en su implementación final. Se identificaron y corrigieron problemas como interferencias en la comunicación y desajustes en la estructura de la base de datos, mejorando significativamente su rendimiento. Además, las simulaciones confirmaron que el diseño del sistema era capaz de operar de manera estable en las condiciones previstas, proporcionando datos precisos y confiables. Las pruebas realizadas permitieron validar no solo los aspectos técnicos, sino también la funcionalidad práctica del sistema, reduciendo los riesgos asociados a su implementación física.

VIII-D. Prototipo

VIII-D1. Diseño del prototipo: El desarrollo del prototipo inició con la creación de un diseño tridimensional mediante un software especializado. Este enfoque permitió generar un modelo preciso que incluía todas las características necesarias para garantizar su funcionalidad en el entorno previsto. Diseñar en 3D ofreció la ventaja de visualizar de manera anticipada el ensamblaje del dispositivo y prever posibles inconvenientes estructurales antes de materializarlo. Además, el diseño estuvo orientado a optimizar los componentes y garantizar que cada pieza pudiera ser fabricada mediante impresión 3D, asegurando un alto grado de exactitud en las dimensiones. Este proceso evitó discrepancias que pudieran comprometer la funcionalidad del dispositivo en campo.

VIII-D2. Construcción del prototipo: Una vez concluido el diseño, se procedió a la construcción del prototipo. Dada la necesidad de proteger los componentes electrónicos del dispositivo y reducir los tiempos de desarrollo, se optó por utilizar una carcasa adquirida en una ferretería local. Esta decisión no solo permitió ahorrar tiempo, sino también asegurarse de que el dispositivo tuviera un nivel adecuado de resistencia para las condiciones de trabajo en la hacienda. La carcasa seleccionada cumplió con las especificaciones necesarias para albergar los módulos y sensores del dispositivo, garantizando la protección contra golpes y otros factores ambientales. Esta solución práctica y accesible fue clave para avanzar rápidamente hacia las pruebas de campo sin comprometer la calidad del prototipo. Además, permitió enfocar los esfuerzos en optimizar los sistemas internos del dispositivo, dejando la estructura externa en manos de una opción confiable y funcional.



Figura 27: Construcción del prototipo[Fuente: Autores].

VIII-D3. Pruebas de funcionamiento en campo: Con el prototipo completamente ensamblado, se realizaron pruebas en una hacienda para evaluar su desempeño en condiciones reales. Estas pruebas se centraron principalmente en observar cómo reaccionaba el ganado al dispositivo y verificar la precisión de los datos transmitidos por los sensores. Se confirmó que el dispositivo era capaz de registrar y enviar correctamente información sobre la ubicación, el movimiento y la temperatura del animal, cumpliendo con los objetivos propuestos. Para garantizar la precisión del sensor de temperatura, se compararon las lecturas obtenidas con las mediciones realizadas mediante el método tradicional empleado por el ganadero. Este procedimiento validó la utilidad del dispositivo como una herramienta complementaria en el monitoreo de la salud y el comportamiento del ganado. Las observaciones realizadas durante estas pruebas proporcionaron información valiosa para identificar áreas de mejora y optimizar la funcionalidad del prototipo en futuras iteraciones.



Figura 28: Pruebas de campo[Fuente: Autores].

VIII-E. Validación del sistema

La validación del sistema se llevó a cabo en la hacienda El Diamante, situada en el cantón Balzar, provincia del Guayas, bajo la supervisión del ganadero Vet. Javier Olivares. Este proceso tuvo como propósito probar el dispositivo en un entorno real, asegurando su funcionalidad y rendimiento en condiciones propias del manejo ganadero. Para ello, se configuró el microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3 mediante el entorno Arduino IDE, adaptándolo para gestionar los datos recopilados por los sensores integrados. Además, se instaló un Gateway SenseCAP M2 en una posición central de la hacienda, maximizando la cobertura de transmisión de datos a través de la tecnología LoRaWAN. El Gateway fue conectado a un router dedicado, el cual proporcionó conectividad WiFi estable para enviar información a servidores remotos.



Figura 29: Instalación del gateway[Fuente: Autores].

VIII-E1. Diseño e instalación de los collares: El prototipo fue diseñado para vacas mestizas lecheras, ampliamente utilizadas en la región debido a su adaptabilidad al clima tropical y su eficiencia productiva. Los collares se diseñaron para ajustarse cómodamente al ganado, integrando componentes clave como el sensor MLX90614 para medir la temperatura corporal, el MPU6050 para monitorear actividad y movimiento, y el módulo GPS Ublox Neo-6M para registrar la ubicación geográfica. Durante las pruebas, se verificó que los collares recolectaban y transmitían datos en tiempo real, incluyendo la cantidad de pasos, la posición dentro del terreno y la temperatura corporal de las vacas. En el caso de las vacas mestizas lecheras, las mediciones mostraron una temperatura corporal promedio entre 38°C y 39°C, valores normales en condiciones de reposo. El dispositivo también evidenció alta sensibilidad al detectar variaciones en estos parámetros, confirmando su precisión..



Figura 30: Instalación de los collares[Fuente: Autores].

VIII-E2. Monitoreo mediante dispositivo aereo: Para complementar las observaciones de campo, se empleó un dron equipado con una cámara de alta resolución, permitiendo una supervisión visual detallada del ganado. Las imágenes capturadas evidenciaron que las vacas mestizas lecheras mantenían un comportamiento natural, sin signos de incomodidad ni rechazo hacia los collares. Además, la integración del dron facilitó la correlación de las coordenadas proporcionadas por el sistema GPS con las posiciones visuales del ganado en el terreno. Este método mejoró la validación de la precisión del dispositivo y permitió identificar patrones de movimiento y actividad de las vacas en tiempo real, lo cual es crucial para la gestión eficiente del hato.



Figura 31: Monitoreo mediante dispositivo aereo

VIII-E3. Evaluación de la autonomía energética: El dispositivo fue diseñado con un sistema de alimentación híbrido que incluye un panel solar de 5V y baterías recargables. Este enfoque permitió que el prototipo operara de manera continua durante un periodo prolongado, incluso bajo condiciones climáticas cambiantes. La autonomía energética demostrada por el dispositivo asegura su viabilidad para el uso en ambientes rurales, donde el acceso a fuentes convencionales de energía puede ser limitado. El sistema se mantuvo operativo y eficiente, confirmando su robustez y adaptabilidad a las necesidades del sector ganadero.



Figura 32: Autonomía energética[Fuente: Autores].

La validación realizada bajo la dirección del ganadero Vet. Javier Olivares confirmó la eficacia del dispositivo en el monitoreo y gestión del ganado, particularmente en vacas mestizas lecheras. La integración de sensores, junto con el monitoreo remoto y la autonomía energética, permitió implementar una herramienta innovadora que mejora significativamente la administración del hato ganadero. Este avance tecnológico destaca como una solución práctica para optimizar la productividad y el bienestar del ganado en climas tropicales.



Figura 33: Validación del collar[Fuente: Autores].

VIII-F. Diagrama de funcionamiento

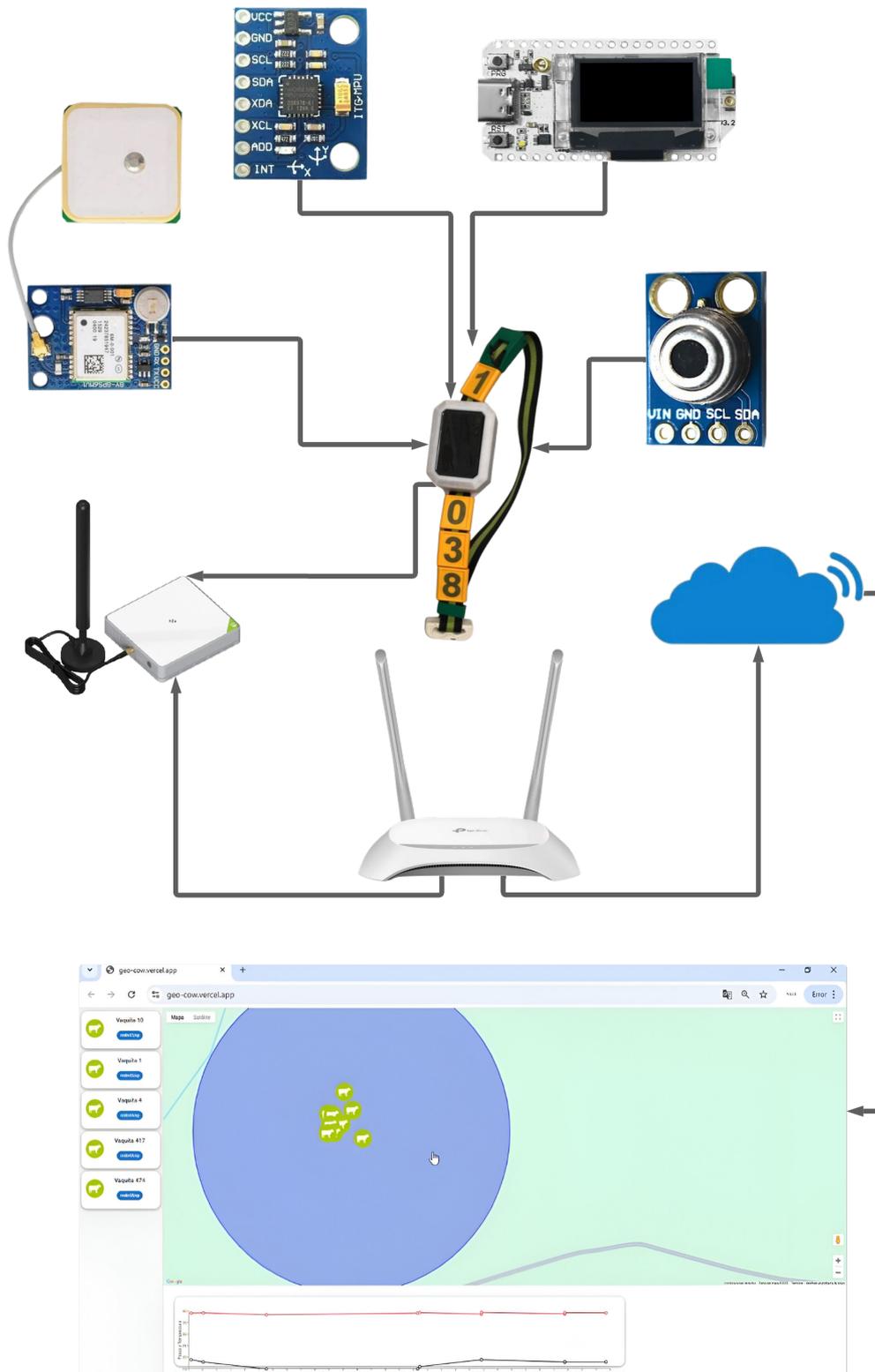


Figura 34: Diagrama de funcionamiento del collar, con su salida en página web [Fuente: Autores].

IX. RESULTADOS

El monitoreo del ganado vacuno mediante Internet de las Cosas (IoT) ha demostrado ser una herramienta efectiva para la supervisión de la salud y comportamiento de los animales. La implementación de sensores en un collar inteligente permite la recolección de datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones para los productores ganaderos. Las pruebas realizadas en la hacienda El Diamante, ubicada en Balzar, Ecuador, permitieron evaluar el rendimiento del sistema en un entorno real. El análisis de los datos recopilados evidenció la precisión de los sensores y la efectividad de la plataforma web en la identificación de patrones de comportamiento, detección de anomalías y generación de alertas tempranas.

IX-A. Funcionamiento técnico del sistema

IX-A1. Precisión de los sensores: El sensor de temperatura MLX90614 permitió la medición precisa de la temperatura corporal sin contacto directo, evitando el estrés en los animales. Durante las pruebas, se registró un promedio de 38.5°C, con fluctuaciones en función del nivel de actividad. En periodos de mayor movimiento, la temperatura alcanzó 39.2°C, mientras que en estado de reposo descendió hasta 37.8°C, dentro del rango fisiológico esperado. En comparación con métodos tradicionales, como el uso de termómetros rectales, la tecnología de medición sin contacto del MLX90614 redujo el tiempo necesario para la toma de datos y evitó la manipulación directa del animal, lo que representa una ventaja tanto en términos de eficiencia operativa como de bienestar animal.

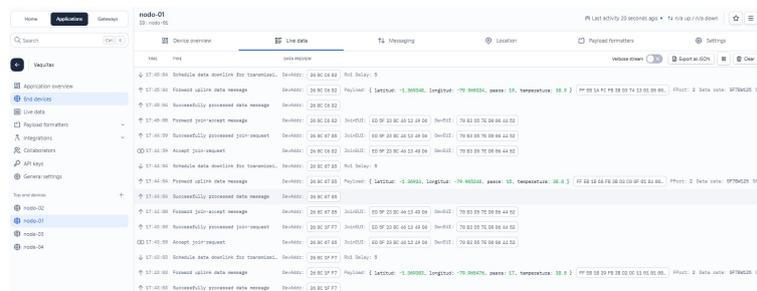


Figura 35: Datos de temperatura obtenidos [Fuente: Autores].



Figura 36: Métodos tradicionales [Fuente: Autores].

El módulo GPS Ublox Neo-6M permitió una geolocalización precisa con un margen de error inferior a 3 metros, facilitando la supervisión del ganado y generando alertas ante desplazamientos fuera del perímetro. El sensor MPU6050 registró la actividad con intervalos de 25 minutos, detectando entre 10 y 15 pasos por minuto, equivalentes a 250-300 pasos por ciclo. Se observó mayor movilidad en la mañana y al atardecer, con un promedio de 570 a 855 pasos diarios, mientras que en horas de alta radiación solar los animales reducían su actividad y permanecían en zonas de sombra.

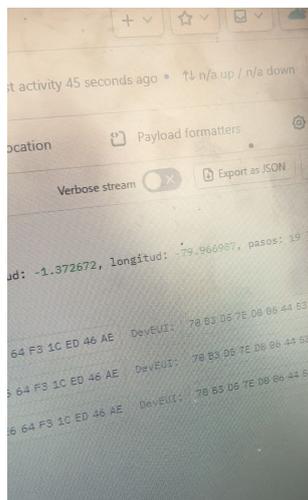


Figura 37: Datos obtenidos del sensor MPU6050 [Fuente: Autores].

IX-B. Conectividad y transmisión de datos

El sistema de transmisión de datos basado en LoRaWAN demostró alta eficiencia en entornos rurales, asegurando una comunicación estable y en tiempo real. La interacción entre el Heltec WiFi LoRa 32 V3 y el Gateway SenseCAP M2 permitió alcanzar una cobertura de hasta 2 km en línea de vista, garantizando la transmisión continua de la información recopilada por los sensores. Gracias a su bajo consumo energético y baja latencia, este protocolo permitió la recepción de datos sin interrupciones, incluso en zonas con densa vegetación y terrenos irregulares.

La estabilidad del enlace entre los dispositivos fue determinante para la correcta sincronización de la información en la base de datos, asegurando la integridad de los registros obtenidos. Para la visualización de los datos, se implementó una plataforma web, que facilita el acceso a reportes detallados sobre la temperatura, ubicación y actividad del ganado. Esta herramienta permite a los productores monitorear el estado de los animales desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, optimizando así la gestión y toma de decisiones en tiempo real.

IX-C. Interpretación de los datos obtenidos

El análisis de los datos recopilados revela patrones de comportamiento en el ganado que pueden ser aprovechados para mejorar su manejo. Las mediciones de temperatura muestran variaciones dentro del rango fisiológico normal, con un promedio de 38.5°C y valores máximos de 39.2°C en periodos de mayor actividad. Estas fluctuaciones reflejan la capacidad del sistema para detectar cambios térmicos en tiempo real, facilitando la identificación de posibles anomalías relacionadas con estrés calórico o enfermedades. Además, el uso del sensor MLX90614 sin contacto directo representa una mejora significativa frente a los métodos tradicionales, al permitir mediciones precisas sin generar estrés en los animales. De manera complementaria, los registros del sensor MPU6050 permitieron identificar picos de movilidad en horarios de menor radiación solar, con estimaciones que indican entre 570 y 855 pasos diarios. Este comportamiento es coherente con la tendencia del ganado a reducir su movimiento durante las horas más calurosas del día.

Por otro lado, la integración del GPS Ublox Neo-6M demostró una alta precisión en la geolocalización del ganado, con un margen de error inferior a 3 metros, lo que facilita la supervisión de desplazamientos y permite generar alertas ante posibles extravíos o situaciones de riesgo. La sincronización de estos datos con la plataforma de monitoreo remoto fortalece la capacidad de los productores para gestionar su rebaño de manera eficiente y en tiempo real. En conjunto, la implementación del sistema basado en LoRaWAN se consolida como una solución efectiva para la ganadería de precisión, proporcionando datos clave para la toma de decisiones estratégicas y la optimización del rendimiento productivo.

Tabla I: Datos de temperatura, actividad y ubicación del ganado.

Nodo	Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Pasos por minuto	Latitud	Longitud
Nodo 1	12 de enero	17:00:30	38,2	10	-1,370812	-79,960521\$
Nodo 2	12 de enero	17:00:30	37,9	12	-1,370654	-79,960389\$
Nodo 3	12 de enero	17:00:30	38,5	9	-1,370923	-79,960632\$
Nodo 4	12 de enero	17:00:30	38	15	-1,370785	-79,960471\$
Nodo 5	12 de enero	17:00:30	38,1	8	-1,370702	-79,960527\$
Nodo 1	12 de enero	17:25:30	38,3	11	-1,370834	-79,960412\$
Nodo 2	12 de enero	17:25:30	38	13	-1,370728	-79,960387\$
Nodo 3	12 de enero	17:25:30	37,8	10	-1,370911	-79,960499\$
Nodo 4	12 de enero	17:25:30	38,2	14	-1,370798	-79,960451\$
Nodo 5	12 de enero	17:25:30	38,4	10	-1,370673	-79,960572\$
Nodo 1	13 de enero	23:35:30	38,4	9	-1,370689	-79,960511\$
Nodo 2	13 de enero	23:35:30	37,8	11	-1,370732	-79,960489\$

X. CRONOGRAMA

PROYECTO DE TESIS		DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO DE SALUD DEL GANADO VACUNO APLICANDO IOT																															
		ITEM	ACTIVIDAD	SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEBRERO									
				S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4						
1	INVESTIGACIÓN TEORICA	X	X	X	X	X	X																										
2	PROTOTIPADO						X	X	X																								
3	SELECCIÓN Y ADQUISICIÓN DE COMPONENTES												X	X	X																		
4	FABRICACIÓN																X	X	X														
5	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA																				X	X	X										
6	OPTIMIZACIÓN Y AJUSTE																								X	X	X						
7	DOCUMENTACIÓN Y PRESENTACIÓN																												X	X	X	X	X

Figura 38: Cronograma

A través de un proceso de cotización a nivel nacional, se han obtenido los datos que conforman la tabla presupuestaria, la cual servirá como guía financiera para la implementación de la tesis.

XI. PRESUPUESTO

Tabla II: Presupuesto

Nombre del elemento	Descripción	Unidades	Valor total
Batería	Batería SMD Button And Strip Battery Connector	5	6.232\$
C1, C2, C11	Condensador Multilayer Ceramic	20	0.044 \$
C10	Condensador Multilayer Ceramic	20	0.412 \$
CM1	Conector 1x2P 2P XH 1 2.54mm Tin	6	0.0348 \$
D1	Diodo Schottky 40V 500mV@1A 1A	7	0.9555\$
DATA-IN, MLX90...	Direct Insert Policy 2mm 4P 4mm	11	0.1848 \$
DC3	Condensador Multilayer Ceramic	5	0.044 \$
DC4	Resistor Thick Film	20	0.088 \$
LED3	LED 20mA 199mcd Colorless transparent lens	6	1.83 \$
DR1	Resistor Thick Film	5	0.025 \$
DR4	Resistor Thick Film	5	0.0275 \$
DR5	Diodo	5	0.2907 \$
ESP32	Heltec WIFI LoRaWAN:	5	23.123 \$
TS3	SMD, 18x25.5mm WiFi Modules	9	23.1231 \$
LED1	LED 0805 verde	5	0.25 \$
LED2	LED 0805 rojo	5	0.29 \$
Q1,Q2	Transistor 2N3904	20	4.36 \$
Q4	Transistor 2N3904	4	0.87 \$
R1	Resistencia 5.1k	5	0.01\$
R2	Resistencia 5600	20	0.24\$
R13	Resistencia 10k	5	0.01\$
TP4056	Controlador de batería	5	4.17\$
U1	Módulo LoRa	5	151\$
GPS	GPS u-blox NEO-6M-V2	5	20\$
MPU6050-2	Sensor de movimiento	5	30\$
Filamento	PLA	3	15\$
Panel solar	5v	5	50\$
Antena	Gateway SenseCAP M2	2	200\$
Visual Basic	Software	1	0.1\$
TOTAL			532.7144\$

XII. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del sistema de monitoreo basado en IoT para la gestión del ganado vacuno ha demostrado ser una solución eficiente y viable para optimizar la supervisión del estado de salud de los animales. A lo largo del estudio, se evidenció que el dispositivo diseñado es capaz de registrar con precisión variables esenciales como la temperatura corporal, la ubicación geográfica y la actividad física del ganado. La integración de estos datos en una plataforma digital permitió un análisis en tiempo real, facilitando la detección temprana de posibles anomalías en el comportamiento o la salud de los animales. Esto representa un avance significativo en la automatización del monitoreo ganadero, permitiendo a los productores mejorar la toma de decisiones y prevenir pérdidas económicas asociadas a enfermedades no detectadas a tiempo.

Desde el punto de vista tecnológico, el sistema ha demostrado un desempeño sólido en la transmisión de datos a largas distancias mediante la red LoRaWAN, asegurando una comunicación estable y eficiente, incluso en zonas rurales con acceso limitado a infraestructura de telecomunicaciones. La validación de la conectividad entre el microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3 y el Gateway SenseCAP M2 evidenció que el sistema es capaz de mantener una cobertura de hasta 2 km en línea de vista, lo que garantiza su funcionamiento óptimo en explotaciones ganaderas de gran extensión. Asimismo, la implementación de una red WiFi en la hacienda permitió la transmisión fluida de datos hacia los servidores en la nube, asegurando la disponibilidad de la información en cualquier momento y desde cualquier dispositivo con conexión a internet.

Otro aspecto clave del sistema es su autonomía energética, lograda gracias a la combinación de un panel solar de 5V 1W y baterías de litio recargables. Las pruebas realizadas confirmaron que el dispositivo puede operar de manera continua durante 15 días sin necesidad de intervención, e incluso en condiciones de baja radiación solar, las baterías ofrecieron una autonomía adicional de hasta 48 horas. Esta característica refuerza la viabilidad del sistema en entornos rurales, donde el acceso a fuentes de energía convencionales es limitado, consolidándolo como una solución autosuficiente y sostenible.

El impacto del sistema en la ganadería no solo se limita a la eficiencia en la recolección y análisis de datos, sino también en la adaptabilidad del ganado al dispositivo. Durante el período de pruebas, las vacas mestizas no mostraron signos de estrés o incomodidad al portar los collares inteligentes, lo que valida su diseño ergonómico y su adecuada integración con el comportamiento natural de los animales. Adicionalmente, la observación mediante dron corroboró que el uso del collar no alteró significativamente la dinámica del hato, lo que demuestra que la tecnología implementada no interfiere con el bienestar del ganado.

En términos económicos, el sistema ha demostrado ser una alternativa rentable y escalable para su implementación en diferentes tipos de explotaciones ganaderas. Los costos de operación y mantenimiento se han mantenido en niveles reducidos, gracias a la eficiencia energética del sistema y a la utilización de una arquitectura modular que permite futuras expansiones. La flexibilidad del diseño facilita la integración de sensores adicionales para monitorear otros parámetros de salud, como la frecuencia cardíaca, el nivel de estrés y el consumo de agua, lo que posiciona a esta tecnología como una herramienta adaptable y en constante evolución.

XIII. RECOMENDACIONES

Para fortalecer la implementación del sistema de monitoreo basado en IoT en la ganadería, es recomendable ampliar su aplicación a un mayor número de animales y en diversas explotaciones ganaderas. La expansión del sistema permitiría evaluar su desempeño en diferentes condiciones ambientales y geográficas, validando su eficacia en climas extremos y terrenos de difícil acceso. Al extender su uso en múltiples escenarios, se podrían optimizar los algoritmos de análisis y mejorar la precisión en la detección de patrones anómalos en el comportamiento del ganado, asegurando así su adaptación a diversas realidades productivas.

Es fundamental seguir mejorando el diseño del collar inteligente, enfocándose en la ergonomía y comodidad para el animal. La utilización de materiales más ligeros, resistentes y adaptables al tamaño del ganado garantizaría que el dispositivo sea funcional sin generar incomodidades. Además, se recomienda la incorporación de sensores adicionales que permitan medir otras variables fisiológicas, como la frecuencia cardíaca, los niveles de estrés y el consumo de agua. Estos parámetros adicionales contribuirían a un monitoreo integral del estado de salud del ganado, mejorando la capacidad de los productores para anticiparse a enfermedades y optimizar el bienestar de los animales.

La capacitación de los ganaderos en el uso y mantenimiento del sistema es un aspecto clave para su adopción exitosa. Se sugiere desarrollar programas de formación que incluyan sesiones prácticas sobre la instalación y configuración de los dispositivos, así como la interpretación de los datos obtenidos a través de la plataforma web. Además, la elaboración de manuales digitales e interactivos facilitaría el acceso a información clave para resolver dudas y garantizar el correcto uso del sistema en el tiempo. Promover la interacción continua con los usuarios finales permitiría recopilar retroalimentación valiosa para futuras mejoras, asegurando que la tecnología se adapte mejor a las necesidades del sector.

Para garantizar una conectividad más estable en zonas rurales, se recomienda evaluar la instalación de infraestructuras complementarias, como antenas de alta ganancia o repetidores LoRaWAN. La mejora en la cobertura de la red permitiría mantener una comunicación más confiable entre los collares inteligentes y el gateway, reduciendo posibles pérdidas de datos en entornos con obstáculos naturales o limitaciones de señal.

Se sugiere explorar la integración de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el machine learning, con el objetivo de mejorar la exactitud en la detección de patrones de comportamiento del ganado. La implementación de algoritmos avanzados permitiría identificar de manera más efectiva anomalías que podrían indicar enfermedades en etapas tempranas, facilitando una respuesta oportuna por parte de los ganaderos.

Finalmente, sería beneficioso fomentar alianzas estratégicas con instituciones académicas, organismos gubernamentales y empresas tecnológicas para impulsar la investigación y desarrollo de nuevas funcionalidades en el sistema. Estas colaboraciones permitirían acceder a recursos adicionales para mejorar la escalabilidad del proyecto y promover su adopción en un mayor número de explotaciones ganaderas. La modernización del sector a través del uso de herramientas digitales contribuiría significativamente a la sostenibilidad y competitividad de la ganadería en el contexto actual.

REFERENCIAS

- [1] Oxford, *2,8 millones de toneladas Sostenibilidad económica*, 2023. dirección: <https://healthforanimals.org/wp-content/uploads/2023/06/Sanidad-animal-y-sostenibilidad.pdf>.
- [2] D. Salazar, W. Villafuerte, M. Cuichán, D. Orbe y J. Márquez, *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2016 Dirección responsable de la información estadística y contenidos: DIRECCIÓN DE ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES Ing. María José Murgueitio Directora de Estadísticas Agropecuarias y Ambientales Realizadores*, 2016. dirección: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2016/Informe%20ejecutivo%20ESPAC_2016.pdf.
- [3] Hessisches, *Métodos de detección de la mastitis bovina (Methods of detection of the bovine mastitis)*, 2013. dirección: https://www.produccion-animal.com.ar/sanidad_intoxicaciones_metabolicos/infecciosas/bovinos_leche/12-mastitis.pdf.
- [4] M. Peters, I. Silveira y V. Fischer, «Impact of subclinical and clinical mastitis on sensitivity to pain of dairy cows,» *Animal*, vol. 9, n.º 12, págs. 2024-2028, 2015.
- [5] K. R. Acharya, G. Brankston, D. Slavic y A. L. Greer, «Spatio-Temporal Variation in the Prevalence of Major Mastitis Pathogens Isolated From Bovine Milk Samples Between 2008 and 2017 in Ontario, Canada,» *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 8, nov. de 2021, ISSN: 22971769. DOI: 10.3389/fvets.2021.742696. dirección: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2021.742696/full>.
- [6] K. R. Acharya, G. Brankston, D. Slavic y A. L. Greer, «Spatio-Temporal Variation in the Prevalence of Major Mastitis Pathogens Isolated From Bovine Milk Samples Between 2008 and 2017 in Ontario, Canada,» *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 8, nov. de 2021, ISSN: 22971769. DOI: 10.3389/fvets.2021.742696. dirección: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2021.742696/full>.
- [7] PennState, *Impacts of Lameness-Part 1: Preventing Lame Cows*, jul. de 2023. dirección: <https://extension.psu.edu/impacts-of-lameness-part-1-preventing-lame-cows>.
- [8] AHDB, *Lameness in dairy cows*, 2023. dirección: <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/lameness-in-dairy-cows>.
- [9] FAO, «ORGANI 1,» 2018. dirección: <https://www.fao.org/ecuador/noticias/detail-events/es/c/1151391/>.
- [10] ContextoGanadero, *Ecuador le apuesta a la ganadería climáticamente inteligente*, jun. de 2021. dirección: <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/ecuador-le-apuesta-la-ganaderia-climaticamente-inteligente>.
- [11] ElProductor, *Ecuador: Innovación tecnológica para una ganadería sostenible*, nov. de 2024. dirección: <https://elproductor.com/2020/02/ecuador-innovacion-tecnologica-para-una-ganaderia-sostenible/>.
- [12] R. Jain, «Real Time Cattle Health Monitoring Using IoT, ThingSpeak, and a Mobile Application,» *Journal of Ethology Animal Science*, vol. 5, 1 2023. DOI: 10.23880/jeasc-16000131.
- [13] B. Baker, *Aplicar la fusión de sensores a acelerómetros y giroscopios*, ene. de 2018. dirección: <https://www.digikey.es/es/articles/apply-sensor-fusion-to-accelerometers-and-gyroscopes>.
- [14] SantiagoUtsumi, *Collares p Collares para ara el monitoreo del el monitoreo del g ganado anado ¿Qué es Ganadería de Precisión?* 2019.
- [15] U. Rahway NJ e its affiliates Merck Co., *3 Ejemplos de tecnologías en ganadería inteligente*, 2023. dirección: <https://www.clubganadero.com/ganaderia-inteligente/>.
- [16] R. Vizcarra, D. Tapia, R. Lasso y M. Jiménez, *La Leche del Ecuador: Historia de la lechería ecuatoriana*. Quito, Ecuador: Centro de la Industria Láctea del Ecuador (CIL-Ecuador), 2015.
- [17] L. A. Cueva Gonzalez, *Desarrollo del ganado bovino en el Ecuador durante el período 2008-2013*. 2014.
- [18] I. N. de Estadística y Censos (INEC), *Ecuador Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2022*, 2022.
- [19] J. Fernandez, M. Lopez y A. Ramirez, «Efficacy of a new vaccine against Babesia bovis in cattle in Colombia,» *Veterinary Parasitology*, vol. 300, pág. 111 234, 2023.
- [20] J. Fernandez, M. Lopez y A. Ramirez, «Efficacy of a new vaccine against Trypanosoma congolense in cattle in Tanzania,» *Veterinary Parasitology*, vol. 300, pág. 111 234, 2023.

- [21] C. A. Pazmiño, J. Andrade y J. Llerena, «Protocolo Lora para análisis de medición con GPS y Arduino en la industria ganadera del Ecuador: Una revisión sistemática,» Universidad Politécnica Salesiana, inf. téc., 2021. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20340/1/UPS-GT003231.pdf>.
- [22] E. Loja Alex y Naula, «Diseño de un sistema de monitoreo de posicionamiento y de la temperatura del entorno para ganado bovino utilizando una red de área local,» Universidad Politécnica Salesiana, inf. téc., 2021. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21620/1/UPS-CT009502.pdf>.
- [23] D. Paz Peter y Yagual, «Diseño e implementación de una herramienta de rastreo y seguridad de ganado en zonas rurales vía LoRa,» Universidad Politécnica Salesiana, inf. téc., 2023. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26390/1/UPS-GT004805.pdf>.
- [24] M. A. Q. Martinez, D. M. R. Zapata, M. D. G. Rios y M. Y. L. Vazquez, «Design of an IoT Architecture in Livestock Environments for the Treatment of Information for the Benefit of Cattle,» en *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering*, H. Ayaz, U. Asgher y L. Paletta, eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, págs. 442-450, ISBN: 978-3-030-80285-1.
- [25] D. Johnson, «The internet of things will change the world,» *MIT Technology Review*, vol. 117, n.º 3, págs. 16-21, 2014.
- [26] P. Bertoleti, *Proyectos con ESP32 y LoRa*. Editora NCB, 2019.
- [27] A. Van der Heijden, S. Borst, T. Conte et al., «LoRaWAN: A low-power wide-area network solution for the internet of things,» *Computer communications*, vol. 87, págs. 168-178, 2016.
- [28] A. S. Tanenbaum, *Redes de computadoras*. Pearson Educación, 2011.
- [29] H. Automation, *Heltec WiFi LoRa - Placa de desarrollo IoT con ESP32 y LoRa SX1276*, Placa de desarrollo IoT con soporte para LoRa, Wi-Fi, Bluetooth y pantalla OLED integrada, ideal para aplicaciones rurales y urbanas., 2023. dirección: <https://heltec.org/>.
- [30] u-blox AG, *NEO-6M GPS Module Data Sheet*, <https://www.u-blox.com/en/product/neo-6-series>, u-blox AG, 2018.
- [31] M. T. NV, *MLX90614 Infrared Thermometer Sensor Datasheet*, Online, Available at: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/mlx90614-datasheet> [Accessed: 15-Jan-2025], 2023.
- [32] I. Inc., *MPU-6050 6-Axis Gyroscope and Accelerometer Datasheet*, Online, Available at: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> [Accessed: 15-Jan-2025], 2023.
- [33] O. Christian y P. Diego, *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA "MODELADO MATEMÁTICO DE UNA ESTRUCTURA REFLECTIVA PARA INCREMENTAR LA IRRADIANCIA SOBRE PANELES SOLARES"*, 2019.
- [34] F. Genérico, *Panel Solar 5V 1W - Dispositivo de energía renovable para aplicaciones IoT y sistemas autónomos*, Panel solar compacto y eficiente, ideal para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo., 2023. dirección: <https://example.com/panel-solar-5v-1w>.
- [35] F. A. D. CORTÉS, «Metodologías-para-la-evaluacion-caracterizacion-y-reutilizacion-de-baterias-de-litio-en-formato-18650-para-aplicaciones-de-segunda-vida,» 2021.
- [36] E. Richards, *¿Qué es la batería 18650 y cuáles son las aplicaciones clave y consideraciones de diseño para soluciones modernas de almacenamiento de energía?* 2024. dirección: https://insights.made-in-china.com/es/What-Is-the-18650-Battery-Key-Applications-and-Design-Considerations-for-Modern-Energy-Storage-Solutions_NfaGBjSYgmiD.html.
- [37] A. O. Gil, *LAS IMPRESORAS 3D COMO HERRAMIENTAS CIENTÍFICAS*, 2019.
- [38] L. Incursión, *Explorando el impacto de la impresión 3D en la producción industrial*, 2023. dirección: <https://www.laincursion.com.ar/blog/explorando-el-impacto-de-la-impresion-3d-en-la-produccion-industrial>.
- [39] D. Systèmes, *Sitio oficial de Dassault Systèmes: Soluciones de diseño 3D y manufactura aditiva*, 2025. dirección: <https://www.3ds.com/es/>.
- [40] Markforged, *Markforged: Soluciones avanzadas de impresión 3D para manufactura industrial*, 2025. dirección: <https://markforged.com/es/>.
- [41] F. Genérico, *Collar de Correa para Monitoreo Ganadero*, Material promocional del fabricante, 2023.
- [42] G. W. PCB, *Guía completa para el diseño y conceptos básicos de PCB*, 2025. dirección: <https://www.globalwellpcb.com/es/>.

- [43] Hilelectronic, *Aplicaciones de PCB: Usos y ventajas en electrónica moderna*, 2025. dirección: <https://hilelectronic.com/es/>.
- [44] J. Smith y A. Brown, *Fundamentos de Redes IoT y Comunicación Inalámbrica*. Nueva York, EE.UU.: TechNetwork Press, 2021.
- [45] SenseCAP. «SenseCAP M2 LoRaWAN Gateway.» (2025), dirección: <https://www.sensecap.com/product/sensecap-m2-lorawan-gateway>.
- [46] J. Smith, «Advancements in LoRaWAN Gateways: A Case Study of SenseCAP M2,» *Journal of IoT Innovations*, vol. 10, n.º 4, págs. 45-56, 2023.
- [47] T. T. N. Foundation. «What is The Things Network?» (2025), dirección: <https://www.thethingsnetwork.org/>.
- [48] L. Alliance. «LoRaWAN 1.1 Specification.» (2023), dirección: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-specifications>.
- [49] EasyEDA. «EasyEDA: Online PCB Design Circuit Simulator.» (2025), dirección: <https://easyeda.com>.
- [50] J. Yang, «Facilitating PCB Design with EasyEDA: An Overview,» *Journal of Electronic Design Tools*, vol. 5, n.º 2, págs. 123-129, 2018.
- [51] C. Peña, *Arduino IDE: Domina la programación y controla la placa*. RedUsers, 2020.
- [52] G. LLC. «Google Maps - Navigate Explore.» (2025), dirección: <https://maps.google.com/>.
- [53] G. Cloud. «Google Maps Platform Overview.» (2025), dirección: <https://developers.google.com/maps>.
- [54] M. Hart, *TinyGPS++: A New View of Global Positioning*, 2013. dirección: <https://arduiniana.org/2013/09/tinygps-a-new-view-of-global-positioning/>.
- [55] Arduino, *Arduino Reference: Wire Library*, 2025. dirección: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Wire>.
- [56] E. Cats, *MPU6050 Arduino Library*, 2025. dirección: <https://github.com/ElectronicCats/mpu6050>.
- [57] H. Automation. «LoRaWan_APP Library Documentation.» (2025), dirección: <https://github.com/HelTecAutomation/LoRa>.
- [58] S. Corporation. «LoRaWAN Overview.» (2024), dirección: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lorawan-overview/>.
- [59] S. Mistry, *Arduino LoRa Library*, 2025. dirección: <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>.

ANEXO A DISEÑO Y ESQUEMÁTICOS DEL SISTEMA

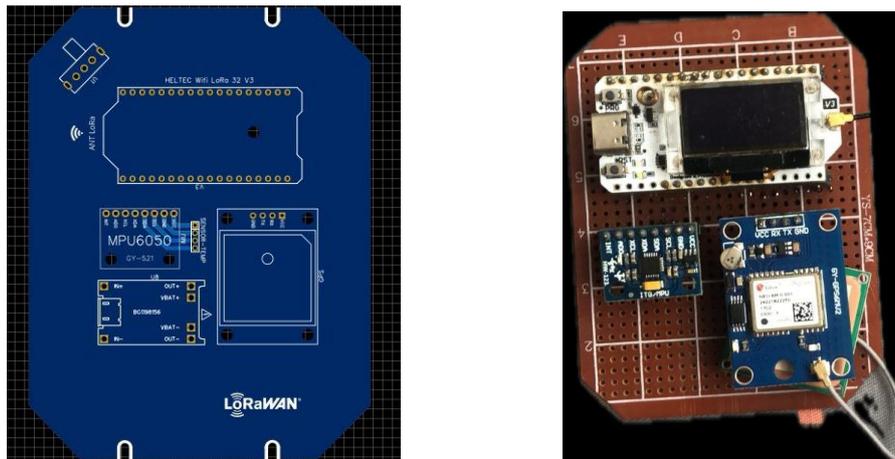


Figura 39: Diagramas eléctricos y PCB utilizados en el sistema [Fuente: Autores].

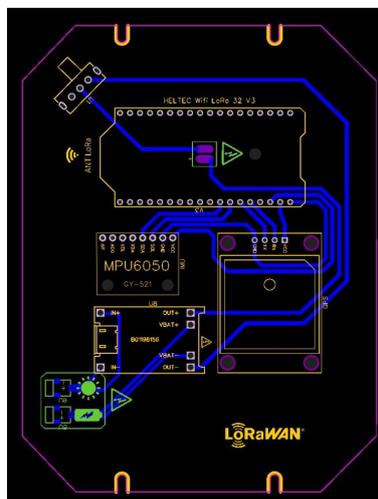


Figura 40: Esquemáticos de conexión de sensores y módulos electrónicos [Fuente: Autores].

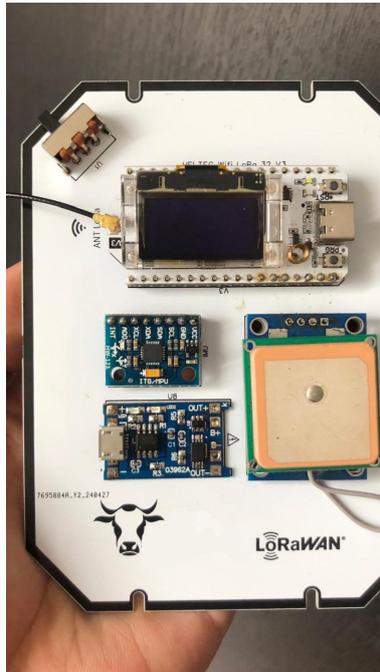


Figura 41: Placa final del dispositivo IoT para monitoreo de ganado [Fuente: Autores].

ANEXO B PROCESO DE ENSAMBLAJE DEL DISPOSITIVO.



Figura 42: Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].



Figura 43: Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].



Figura 44: Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].



Figura 45: Proceso de integración del sistema en la estructura física del collar [Fuente: Autores].

ANEXO C
IMPLEMENTACIÓN EN EL ENTORNO GANADERO



Figura 46: Instalación del sistema en el ganado [Fuente: Autores].



Figura 47: Fotografías de la validación de funcionamiento en campo [Fuente: Autores].



Figura 48: Fotografías de la validación de funcionamiento en campo [Fuente: Autores].

ANEXO D VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE PRUEBAS

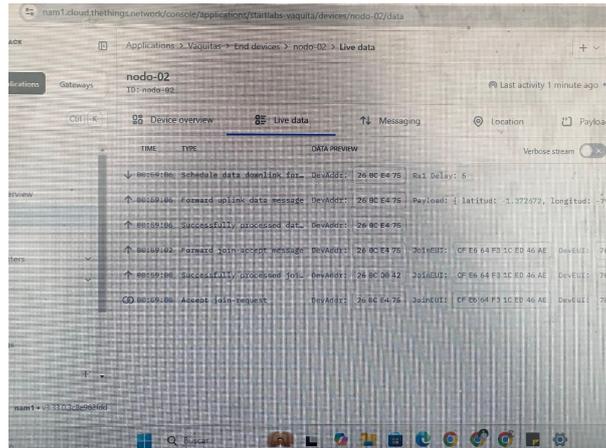


Figura 49: Datos recolectados durante las pruebas de campo [Fuente: Autores].

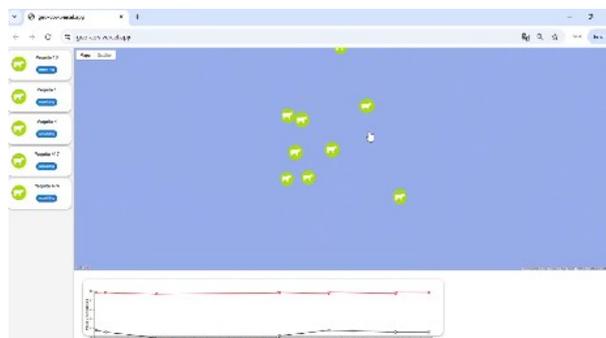


Figura 50: Datos visualizados en la web durante las pruebas de campo [Fuente: Autores].



Figura 51: Resultado final [Fuente: Autores].

ANEXO E
PLATAFORMA DE VISUALIZACIÓN Y MONITOREO

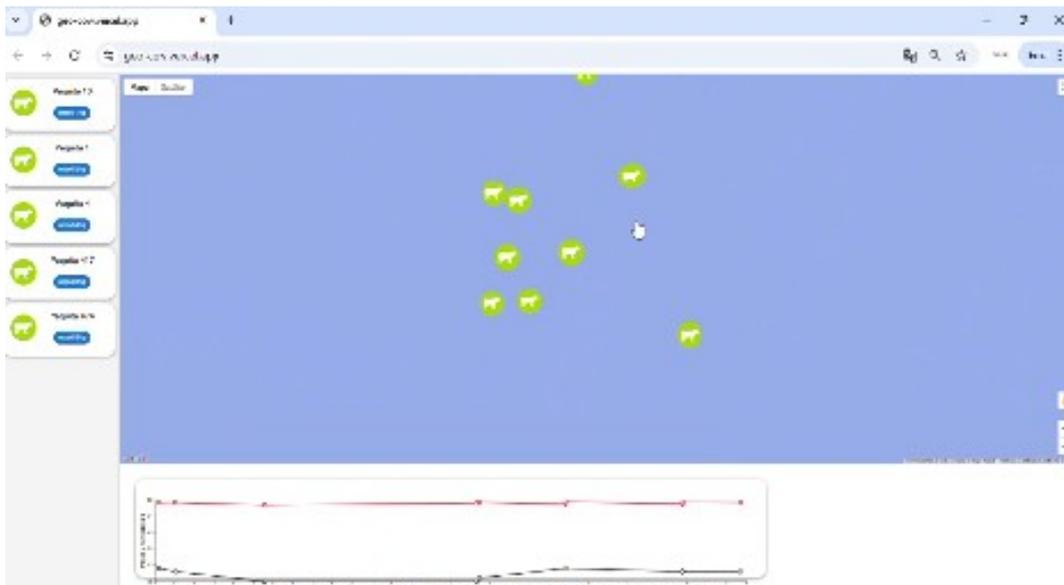


Figura 52: Capturas de pantalla de la interfaz web desarrollada [Fuente: Autores].

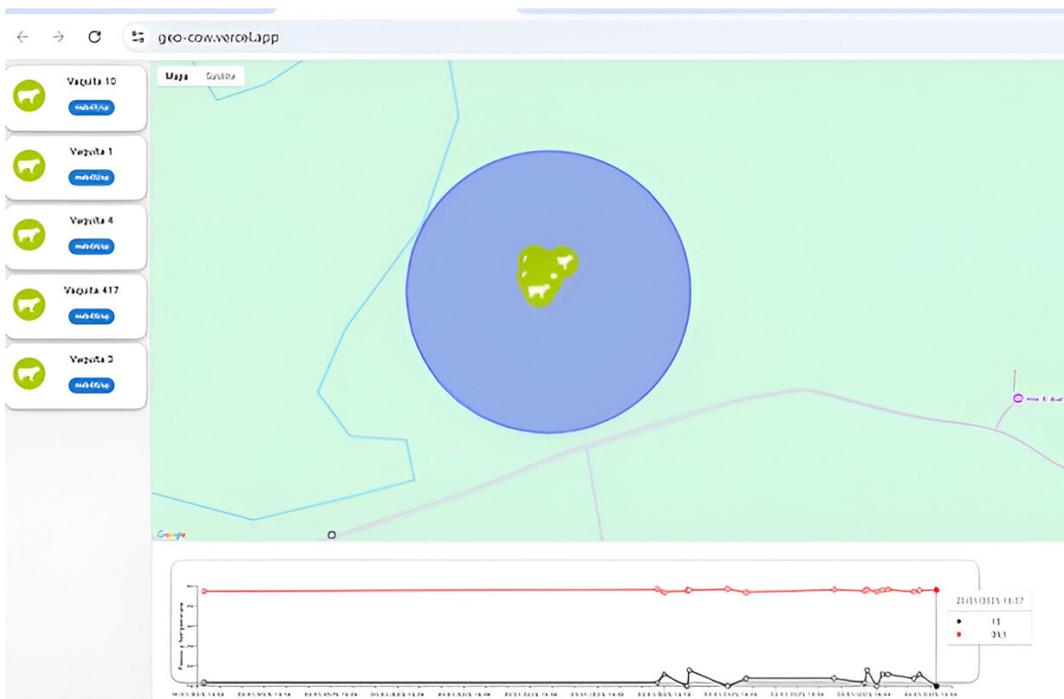


Figura 53: Resultados de pruebas con visualización de parámetros en tiempo real [Fuente: Autores].