
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica
Programa de Licenciatura en Ingeniería Electrónica



**Desarrollo de un prototipo de collar inteligente para
gestión de ganado con monitoreo de desplazamiento,
temperatura y cercas virtuales.**

Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede San Carlos.

Informe de Trabajo Final de Graduación para optar por el título de

Ingeniero en Electrónica

con el grado académico de

Licenciatura

Jeison Manuel Rivera Solís

Cartago, 25 de Noviembre de 2025



Desarrollo de un prototipo de collar inteligente para gestión de ganado con monitoreo de desplazamiento, temperatura y cercas virtuales © 2025 by Jeison Manuel Rivera Solís is licensed under Creative Commons [Attribution-NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

**Defensa del Trabajo Final de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del Trabajo Final de Graduación denominado Desarrollo de un prototipo de collar inteligente para gestión de ganado con monitoreo de desplazamiento, temperatura y cercas virtuales., realizado por el señor Jeison Manuel Rivera Solís y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

**SERGIO ALBERTO
ARRIOLA
VALVERDE (FIRMA)**

Firmado digitalmente por
SERGIO ALBERTO ARRIOLA
VALVERDE (FIRMA)
Fecha: 2025.12.02 12:43:00
-06'00'

Ing. Sergio Arriola Valverde

Profesor lector

JAVIER MAURICIO PEREZ RODRIGUEZ (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-1110-0856.
Fecha declarada: 02/12/2025 11:43:05 a. m.

Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor lector

PAOLA VEGA CASTILLO (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-0937-0493.
Fecha declarada: 02/12/2025 11:17:52 AM
Esta representación visual no es fuente
de confianza. Valide siempre la firma.

Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

Profesor asesor

Cartago, 25 de noviembre de 2025.

Resumen

El presente proyecto desarrolla un sistema integral de monitoreo para ganado en lechería mediante un collar inteligente de bajo costo, diseñado para registrar temperatura corporal, rastrear la ubicación periódicamente mediante GPS y generar alertas por cruce de cercas virtuales configurables. El dispositivo integra sensores y módulos electrónicos de bajo consumo, junto con tecnologías de comunicación que permiten la transmisión continua y fiable de datos.

La implementación del prototipo permitió validar las funcionalidades principales del sistema: medición de temperatura con alta precisión, rastreo geográfico estable bajo condiciones adecuadas de señal y detección efectiva de eventos relacionados con límites virtuales. Los resultados obtenidos evidencian beneficios potenciales en el bienestar animal, la gestión eficiente del hato y la reducción de costos operativos. Asimismo, se desarrolló una plataforma digital que facilita el análisis de información y respalda la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. El avance logrado demuestra la viabilidad técnica de la propuesta y su potencial para impulsar una ganadería más moderna, tecnificada y sostenible, accesible para pequeños y medianos productores.

Palabras clave: Comunicación LoRa, rastreo GPS, temperatura corporal, ganadería de precisión, cercas virtuales.

Abstract

This project presents the development of an integrated monitoring system for dairy cattle using a low-cost smart collar designed to record body temperature, periodically track location via GPS, and generate alerts when crossing configurable virtual fences. The device incorporates low-power sensors and electronic modules, along with communication technologies that enable continuous and reliable data transmission.

The prototype implementation enabled the validation of the system's main functionalities: high-precision temperature measurement, stable geographic tracking under adequate signal conditions, and effective detection of events related to virtual fence boundaries. The results demonstrate potential benefits in animal welfare, efficient herd management, and reduced operational costs. In addition, a digital platform was developed to facilitate data analysis and support decision-making based on real-time information. The progress achieved confirms the technical feasibility of the proposal and its potential to promote a more modern, technology-driven, and sustainable livestock system, accessible to small and medium-scale producers.

Keywords: LoRa communication, GPS tracking, body temperature, precision livestock farming, geofencing.

A mi querida familia, a mi novia y a mis amigos, por ser mi apoyo incondicional. A cada persona que me inspiró a seguir adelante en los momentos de adversidad, recordándome siempre que el esfuerzo sí vale la pena, incluso cuando no parece evidente. Gracias por acompañarme en este camino y por creer en mí

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	7
1 Introducción	9
2 Planteamiento del problema	11
2.1. Entorno del problema	11
2.2. Definición de problema e importancia de su solución	13
2.3. Soluciones Propuestas	14
2.4. Evaluación de soluciones y elección	15
2.5. Meta	18
2.6. Objetivos	19
3 Marco Téorico	20
3.1. Sistemas de monitoreo en ganadería inteligente	20
3.2. Collares Inteligentes	22
3.3. Tecnología LoRa y comunicación de largo alcance	24
3.4. Sistemas de posicionamiento global (GPS)	26
3.5. Sensores de temperatura y su relevancia en la salud animal	29
3.6. Gestión eficiente de energía en sistemas IoT rurales	31
3.7. Interfaces gráficas para monitoreo remoto	32
3.8. Estado del arte: soluciones comerciales y académicas similares	33
4 Desarrollo del Sistema Propuesto	36
4.1. Descripción general del sistema	36
4.2. Arquitectura del sistema	38
4.3. Diseño del hardware del collar inteligente	42

4.4.	Diseño del código del collar (Tx)	46
4.5.	Diseño del módulo base (Rx)	57
4.6.	Diseño de la interfaz gráfica (PC)	66
4.7.	Integración completa del sistema	71
5	Pruebas y Resultados	73
5.1.	Metodología de pruebas	73
5.2.	Resultados del sistema de comunicación LoRa	74
5.3.	Resultados del ADR	80
5.4.	Resultados del GPS y precisión de geocercas	84
5.5.	Resultados del monitoreo de temperatura	87
5.6.	Resultados de la autonomía energética	89
5.7.	Evaluación de la interfaz de usuario	90
5.8.	Análisis general de desempeño	92
6	Conclusiones y Recomendaciones	95
6.1.	Conclusiones generales	95
6.2.	Cumplimiento de objetivos	96
6.3.	Recomendaciones técnicas	97
6.4.	Proyecciones futuras del sistema	98
	Bibliografía	99

CAPÍTULO 1

Introducción

En los últimos años, el sector agropecuario ha comenzado a incorporar cada vez más herramientas tecnológicas que permiten mejorar la eficiencia en distintas actividades de [1]. Aunque durante mucho tiempo muchas de estas labores se han realizado de forma manual o apoyadas en métodos tradicionales, hoy existe un interés creciente por aprovechar sistemas electrónicos, sensores y comunicaciones inalámbricas que faciliten el monitoreo y la toma de decisiones a tiempo [1]. Esta transformación abre la puerta a soluciones más accesibles y adaptadas a las necesidades reales de quienes trabajan directamente en zonas rurales.

Las tecnologías actuales permiten combinar sensores de variables ambientales, módulos GPS, sistemas de comunicación de largo alcance y plataformas de visualización que integran toda la información en un mismo lugar. Gracias a esto, es posible desarrollar dispositivos que operen con bajo consumo energético, que alcancen largas distancias de transmisión y que puedan funcionar de manera autónoma incluso en lugares donde la in-

fraestructura es limitada [2]. Este tipo de avances resulta especialmente útil en fincas y entornos rurales, donde la conectividad, los recursos y el mantenimiento suelen ser factores restrictivos.

La ventaja de trabajar con sistemas integrados es que permiten recopilar datos de forma continua y confiable, lo cual facilita detectar patrones, anticipar posibles problemas y tomar decisiones basadas en información real y no únicamente en observación indirecta [1]. Además, la tendencia actual apunta a que estas herramientas no solo sean eficientes, sino también cada vez son más accesibles permitiendo que productores puedan beneficiarse de la tecnología sin incurrir en costos elevados.

Dentro de este panorama, surge la necesidad de explorar soluciones que combinen electrónica, comunicaciones y procesamiento de datos en un único sistema capaz de funcionar en condiciones reales de campo. Este trabajo se desarrolla con esa visión: aprovechar el potencial de estas tecnologías para plantear una propuesta funcional, evaluar su desempeño y analizar su utilidad en un entorno rural actual.

CAPÍTULO 2

Planteamiento del problema

2.1. Entorno del problema

El presente proyecto surge a partir de las necesidades identificadas en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), sede San Carlos, donde el personal veterinario ha señalado diversas limitaciones en la gestión del ganado, especialmente en aspectos relacionados con el monitoreo de salud y la localización del hato. Con el fin de explorar posibles soluciones tecnológicas, el proyecto fue canalizado mediante la profesora Paola Vega, estableciéndose un vínculo de colaboración con el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Esta organización internacional, con sede en Costa Rica, promueve el desarrollo agrícola y rural en las Américas, y respalda iniciativas orientadas a mejorar la productividad, sostenibilidad y adopción de tecnologías innovadoras en el sector agropecuario [3]

En Costa Rica, la ganadería es un sector clave de la economía rural, con aproximadamente 1.5 millones de cabezas de ganado, principalmente dedicado a la producción de carne y leche [4]. El país ha adoptado prácticas de manejo ganadero avanzadas, enfocándose en mejorar la eficiencia y sostenibilidad[5]. El ganado se cría en diversas regiones, desde las áreas bajas de la región atlántica hasta las zonas montañosas del occidente. Sin embargo, la ganadería enfrenta desafíos como la gestión eficiente del pastoreo, la prevención de enfermedades y la optimización de la nutrición.

La tecnología en monitoreo de ganado ha avanzado para abordar estos desafíos. Se han desarrollado sistemas que utilizan sensores y dispositivos para el seguimiento de la salud y el comportamiento del ganado, facilitando una gestión más precisa y eficiente. Estos sistemas incluyen collares con sensores de GPS y temperatura, que permiten a los ganaderos monitorizar la ubicación y el estado de salud del ganado en tiempo real, mejorando así el manejo del rebaño y la toma de decisiones [6].

En este contexto, el desarrollo de este proyecto resulta especialmente relevante para el Instituto Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos que dedica estudios en las ramas agropecuarias y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), ya que se alinea con su misión de impulsar el desarrollo sostenible del sector agropecuario. Además, al tratarse de una solución tecnológica de bajo costo, este proyecto representa una oportunidad concreta para apoyar a pequeños y medianos ganaderos, quienes usualmente enfrentan mayores limitaciones económicas y menor acceso a tecnologías avanzadas. De esta forma, se contribuye a cerrar brechas en el sector rural, facilitando la inclusión tecnológica y fomentando la igualdad de oportunidades. Además, al promover prácticas ganaderas más eficientes, sostenibles y accesibles, se potencia el crecimiento del sector más vulnerable, haciendo del proyecto una iniciativa verdaderamente sostenible, escalable y coherente con los objetivos de desarrollo rural que el IICA promueve en toda la región.

En este sentido, el proyecto también contribuye al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, entre ellos el ODS 1 (Fin de la pobreza), ODS 2 (Hambre cero), ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y ODS 10 (Reducción de las desigualdades) [7]. Esto refuerza la importancia de impulsar iniciativas como esta, que no

solo abordan un problema específico del sector agropecuario, sino que también generan un impacto positivo a nivel social, económico y ambiental.

2.2. Definición de problema e importancia de su solución

La gestión del ganado en las fincas ganaderas costarricenses enfrenta varios desafíos que afectan tanto la salud del ganado como la rentabilidad económica. El monitoreo de la temperatura del ganado es crucial para actuar y así evitar el estrés térmico en el animal, que puede deteriorar la salud del mismo, reducir la eficiencia en la conversión de alimentos a energía en su proceso de extracción y absorción de nutrientes, así como mermar la producción de carne y leche. Además, incrementa la susceptibilidad a enfermedades, disminuye la ganancia de peso y el rendimiento reproductivo, generando pérdidas económicas significativas.

Otro problema relevante que se enfrenta es el costo asociado con la construcción y mantenimiento de cercas físicas para delimitar las áreas de pastoreo. Estas estructuras requieren una inversión inicial considerable, así como gastos continuos en mantenimiento y reparación. La falta de un sistema adecuado para monitorear y gestionar el movimiento del ganado puede resultar en extravíos, incursiones en áreas no autorizadas y exposición a condiciones adversas, incrementando los costos de manejo y exposición a pérdidas económicas.

Síntesis del problema

La falta de un sistema de bajo costo con capacidad escalable para el monitoreo de temperatura, delimitación de áreas de pastoreo y la prevención de pérdidas en el ganado.

2.3. Soluciones Propuestas

Para abordar los desafíos en la gestión del ganado y mejorar tanto el bienestar animal como la rentabilidad económica en las fincas costarricenses, se han propuesto tres soluciones. Estas alternativas están diseñadas para ofrecer un monitoreo efectivo del ganado, controlar su desplazamiento y gestionar su salud, todo ello con un enfoque en la reducción de costos y la optimización de la producción. A continuación, se describen las tres propuestas planteadas, cada una con capacidades específicas para enfrentar los problemas previamente identificados.

Prototipo de collar inteligente con monitoreo de temperatura, GPS y cercas virtuales

Este prototipo estaría equipado con un sensor para medir la temperatura corporal del ganado, un módulo GPS para rastrear su ubicación en tiempo real, un acelerómetro para detectar inactividad sospechosa en el ganado y tecnología de cercas virtuales para definir y controlar los límites de pastoreo. El monitoreo de temperatura permite detectar condiciones de estrés térmico o enfermedades potenciales, mientras que el GPS facilita el seguimiento del movimiento y ubicación del ganado y la tecnología de cercas virtuales permite gestionar el pastoreo sin la necesidad de barreras físicas, notificando a los ganaderos si el animal se aleja de las áreas designadas y emitiendo alertas al animal que le permitan conocer los límites de pastoreo.

Prototipo de arete con sensores de temperatura y GPS

El arete estaría diseñado para colocarse en la oreja del ganado e incorporaría sensores para el monitoreo de temperatura, así como un módulo GPS para la localización. El arete permite la vigilancia continua de la temperatura corporal y el rastreo de la posición del animal, facilitando la gestión del pastoreo y la identificación rápida de problemas de salud o desviaciones en el comportamiento.

Sistema de monitoreo con cámaras y visión por computadora

Este sistema consiste en instalar cámaras en puntos estratégicos del área donde se encuentra el ganado. Las cámaras capturan imágenes y videos que son procesados por un software de visión por computadora, el cual está equipado con algoritmos de inteligencia artificial. Este software analiza las imágenes para identificar a los animales, monitorear su comportamiento, detectar su posición y analizar patrones de movimiento, así como la temperatura corporal mediante el uso de cámaras térmicas.

2.4. Evaluación de soluciones y elección

Se aplicó una herramienta de análisis comparativo conocida como Matriz de Pugh. Esta técnica permite evaluar varias alternativas en función de criterios definidos, comparando cada opción contra una referencia o base (en este caso implícita). Cada alternativa recibe una puntuación por cada criterio: positiva (+1) si es mejor, neutra (0) si es igual, y negativa (-1) si es peor. La suma de estas puntuaciones proporciona una visión clara de cuál opción es globalmente superior. Este método facilita la toma de decisiones al permitir una comparación estructurada y objetiva entre diferentes soluciones tecnológicas[8].

Categorías de evaluación

- **Costo:** Evaluación del costo total de implementación y mantenimiento del sistema. Se considera tanto el costo inicial de adquisición como los costos recurrentes asociados con la operación y el mantenimiento del dispositivo.
- **Precisión del monitoreo:** Exactitud en la medición de temperatura y ubicación del ganado. Esto incluye la capacidad del sistema para detectar y reportar de forma precisa tanto la temperatura corporal como la posición del ganado.
- **Facilidad de implementación:** Simplicidad en la instalación y puesta en marcha del sistema. Se valora la facilidad con la que el dispositivo puede ser instalado y utilizado, sin requerir una configuración inicial compleja.

- **Flexibilidad de uso:** Adaptabilidad del sistema a diferentes condiciones y tipos de ganado. Se evalúa la capacidad del sistema para ajustarse a diversos entornos de trabajo y su compatibilidad con distintos tipos de ganado.
- **Durabilidad y mantenimiento:** Resistencia del dispositivo y necesidades de mantenimiento a lo largo del tiempo. Se considera la robustez del dispositivo, así como la frecuencia y el tipo de mantenimiento requeridos para garantizar su funcionamiento óptimo sin comprometer la comodidad del animal.
- **Interacción con el animal:** Evaluación del impacto del dispositivo en el bienestar diario del animal. Se analiza si genera incomodidad y si su peso, forma o materiales podrían afectar la salud física del animal a largo plazo. También se valora que el dispositivo mantenga su funcionalidad sin comprometer la libertad de movimiento ni generar lesiones o molestias, garantizando un equilibrio entre rendimiento técnico y respeto por el bienestar animal.

Matriz de Pugh

Categoría	Collar	Arete	Cámaras
Costo	1	1	-1
Precisión del monitoreo	1	0	-1
Facilidad de implementación	0	0	-1
Flexibilidad de uso	1	1	0
Durabilidad y mantenimiento	1	0	-1
Interacción con el animal	1	-1	1
Puntuación Total	5	1	-3

Cuadro 2.1: Matriz de Pugh para la evaluación de soluciones

Justificación de la selección

Según los resultados obtenidos en la matriz de Pugh, **el collar inteligente es claramente la solución más adecuada**, con una puntuación de 4 por encima de la siguiente opción más viable, superando significativamente al arete y a las cámaras. Esta ventaja se

mantiene incluso al compararla con tecnologías documentadas en investigaciones recientes, donde se evidencian limitaciones similares a las encontradas en este análisis. Estudios como los de *RFID tags for livestock monitoring* [9] y *ear-tag-based monitoring technologies* [10] destacan problemas comunes relacionados con durabilidad, precisión y comodidad para el animal.

Aunque el arete presenta cierto potencial, enfrenta limitaciones importantes en cuanto a durabilidad, precisión e interacción con el animal. Esto se debe a que, para no comprometer el bienestar del animal, su diseño debe ser muy liviano y compacto, lo que restringe el uso de materiales altamente resistentes y de bajo peso. Optar por estos materiales incrementaría significativamente el costo, lo cual no es viable; en su lugar, se recurriría a plásticos livianos, que generalmente ofrecen menor resistencia. Además, la oreja no es una zona adecuada para el monitoreo de la temperatura corporal, ya que su delgado espesor impide obtener mediciones realistas de la temperatura del animal, sin mencionar lo incómodo que se vuelve el mantenimiento (carga). En particular, en la categoría de interacción con el animal, el arete obtuvo una puntuación negativa debido a la necesidad de perforar la oreja para su instalación y al hecho de que, al ubicarse en una zona tan sensible, su peso puede generar molestias, afectando la comodidad e incluso comprometiendo su salud. Estas limitaciones lo colocan por debajo del collar inteligente en la evaluación general. Las cámaras, por su parte, obtienen puntuaciones negativas en la mayoría de los aspectos, siendo la opción menos viable.

Además, el collar inteligente tiene como ventaja adicional la posibilidad de implementar cercas virtuales, una funcionalidad clave que permite reducir costos asociados a cercas físicas y mejorar el control del pastoreo. Esta característica que es de suma importancia para el IICA, junto con su buena relación entre costo y funcionalidad, convierte al collar en la opción más completa, eficiente y escalable para enfrentar los desafíos actuales en la gestión del ganado costarricense.

En cuanto al prototipo del collar, se plantea una comunicación a larga distancia con una estación base, donde el usuario pueda monitorear las variables, definir zonas de pastoreo

por medio de coordenadas y recibir alertas generadas por el collar inteligente, alertas como un animal fuera de la zona permitida, temperatura fuera de rango saludable o inactividad sospechosa. Por esta razón una tecnología de comunicación que abarque un largo rango de comunicación es importante.

Existen tecnologías eficientes en velocidad de datos como wifi o bluetooth, sin embargo su alcance se ve limitado por lo que no son tecnologías ideales para una aplicación en donde el bajo consumo y largo alcance son fundamentales, por otro lado existe la tecnología de comunicación LoRa [2], que justo ofrece las características deseadas por lo que se designa como sistema de comunicación entre collar y base.

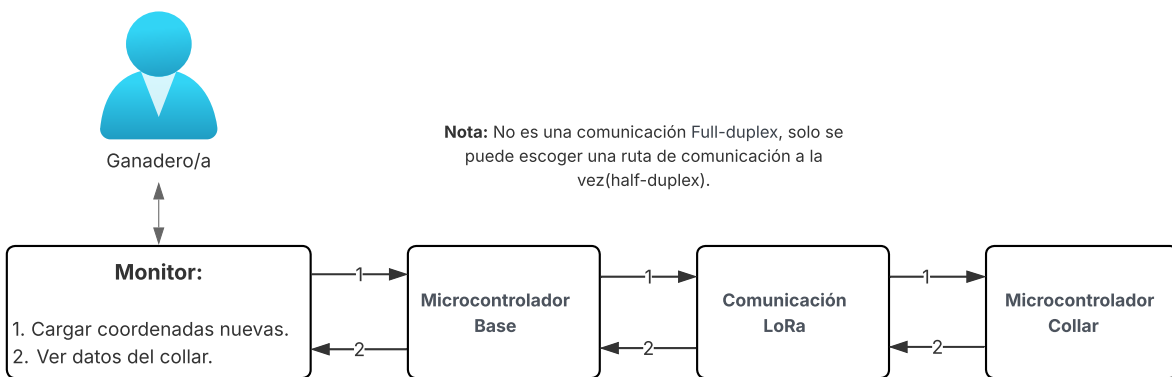


Figura 2.1: Flujo de datos de la solución propuesta.

2.5. Meta

Contribuir a una gestión ganadera más eficiente y sostenible mediante un sistema de monitoreo accesible que reduzca costos operativos y facilite el manejo de pastoreo con cercas virtuales.

2.6. Objetivos

Objetivo general: Desarrollar un prototipo funcional de un sistema de monitoreo a distancia para ganado que integre el monitoreo de temperatura, el seguimiento de desplazamiento mediante GPS y la gestión de cercas virtuales.

Indicador: Prototipo probado que cumpla con exactitud de $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ en temperatura, margen de error de ± 3 m en ubicación GPS y funcionamiento continuo de 1 semana.

Objetivos específicos:

1. Diseñar un prototipo de collar inteligente que incluya sensor de temperatura y módulo GPS.

Indicador: Prototipo con exactitud de $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ en temperatura y ± 3 metros en GPS.

2. Implementar un sistema de cercas virtuales con soporte de procesamiento GPS y transmisión inalámbrica a estación base.

Indicador: Validación en pruebas de campo de: alertas generadas, configuración de área de pastoreo y margen de error de ± 3 m en delimitación.

3. Desarrollar una interfaz gráfica que permita la visualización de la información recopilada y la gestión de cercas virtuales.

Indicador: GUI funcional probada que muestre en tiempo real los datos del prototipo y permita la configuración de cercas virtuales.

CAPÍTULO 3

Marco Téorico

3.1. Sistemas de monitoreo en ganadería inteligente

La ganadería inteligente, también conocida como *Precision Livestock Farming* (PLF), se refiere a la aplicación de tecnologías avanzadas para el monitoreo y gestión eficiente de animales en explotaciones ganaderas. Estos sistemas integran sensorización, comunicación inalámbrica y análisis de datos para mejorar la productividad, el bienestar animal y la sostenibilidad de las operaciones ganaderas[11].

Los sistemas de monitoreo en ganadería inteligente permiten registrar variables fisiológicas y de comportamiento de los animales, como temperatura corporal, ritmo cardíaco, actividad motora, consumo de alimento y patrones de descanso. La información obtenida se utiliza para detectar de manera temprana enfermedades, prevenir estrés térmico, optimizar la alimentación y gestionar de forma eficiente los recursos[11].

Existen diferentes tipos de sistemas de monitoreo según el nivel de automatización y la tecnología empleada:

1. **Monitoreo basado en sensores portátiles:** Estos incluyen collares, pulseras o sensores implantables que registran datos biométricos y de movimiento. Su ventaja es la recopilación continua de información individualizada del animal, lo que permite intervenciones tempranas[12].
2. **Sistemas de rastreo geográfico:** Utilizan tecnologías como GPS para determinar la ubicación y los desplazamientos de los animales en el terreno. Esto facilita la gestión de pasturas y la detección de extravíos[11].
3. **Plataformas de integración y análisis de datos:** Los datos capturados por los sensores se transmiten a plataformas centralizadas que permiten su almacenamiento, análisis y visualización. Estas plataformas pueden generar alertas automáticas ante eventos críticos y ofrecer indicadores de desempeño del hato[12].
4. **Sistemas híbridos con comunicación de largo alcance:** La combinación de sensorización con tecnologías de comunicación como LoRa o NB-IoT permite monitorear animales en zonas rurales con cobertura limitada de red celular o Wi-Fi, garantizando autonomía energética y confiabilidad en la transmisión de datos[13].

La implementación de estos sistemas ofrece beneficios concretos, incluyendo la reducción de pérdidas económicas por enfermedades o extravíos, la mejora en el bienestar animal y la optimización de los recursos productivos. No obstante, su adopción en contextos rurales de países en desarrollo, como Costa Rica, se ve limitada por factores económicos, disponibilidad de infraestructura de comunicación y consumo energético de los dispositivos.

En este sentido, la investigación y el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en tecnologías de bajo consumo y comunicación de largo alcance se presentan como una solución viable para cerrar la brecha tecnológica existente, adaptándose a las necesidades específicas de la ganadería extensiva rural.

3.2. Collares Inteligentes

Los **collares inteligentes** son dispositivos electrónicos portátiles diseñados para colocarse en el cuello de animales de producción, fauna silvestre o animales domésticos, con el fin de realizar funciones avanzadas de monitoreo y rastreo. Estos sistemas integran tecnologías de geolocalización, sensores biométricos o de movimiento, y módulos de comunicación inalámbrica que permiten transmitir información relevante hacia una plataforma remota de análisis. Según diversos fabricantes y soluciones comerciales, los collares inteligentes se emplean para mejorar la gestión, el bienestar animal, la seguridad del ganado y la eficiencia operativa en entornos productivos [14, 15, 16, 17, 18].

Tecnologías y funciones principales

Los collares inteligentes modernos se componen de una arquitectura electrónica robusta, optimizada para ambientes exteriores y para garantizar autonomía energética prolongada. Entre las tecnologías más comunes se encuentran:

- **Geolocalización por GPS/GNSS:** Permite obtener la posición exacta del animal en intervalos configurables. Esta información es fundamental para el rastreo en zonas extensivas, la localización rápida en caso de pérdida y el análisis de rutas o patrones de movimiento [15].
- **Sensores de actividad:** Acelerómetros, giroscopios y otros sensores permiten registrar niveles de movimiento, actividad física, patrones de descanso e incluso comportamientos anormales. Esto contribuye al monitoreo del bienestar y a la detección temprana de problemas de salud [16].
- **Tecnologías de comunicación inalámbrica:** Los datos pueden ser transmitidos mediante redes celulares (2G/3G/4G), tecnologías de bajo consumo como LoRaWAN o Sigfox, WiFi o enlaces de radiofrecuencia. La elección depende del alcance requerido, la disponibilidad de red y la autonomía esperada del dispositivo [14].
- **Geocercas y cercas virtuales:** Algunos sistemas incorporan el concepto de *geofencing*, permitiendo definir zonas seguras y recibir alertas cuando el animal sale

de los límites establecidos. Esta funcionalidad es usada para control de pastoreo, reducción de pérdidas y prevención de robo [17].

Clasificación de los collares inteligentes según su aplicación

La literatura y las soluciones comerciales proponen diversas categorías de collares inteligentes:

- **Collares para ganadería y producción animal:** Orientados al monitoreo de ganado bovino, ovino o caprino en sistemas extensivos. Son altamente resistentes, con baterías de larga duración y capacidades de geolocalización y alertas [16, 18].
- **Collares para investigación y fauna silvestre:** Priorizan el bajo peso, la precisión del GPS y la capacidad de comunicación de largo alcance, siendo utilizados en estudios de migración, comportamiento y conservación [19].
- **Collares para mascotas:** Más ligeros y orientados principalmente a rastreo y zonas seguras, pero sin los niveles de robustez requeridos en ambientes de ganadería [20].

Importancia de los collares inteligentes

La inclusión de los collares inteligentes en el marco teórico es esencial, debido a que representan el eje tecnológico que permite comprender el funcionamiento del sistema de rastreo propuesto en este proyecto. Su importancia se relaciona con distintos aspectos:

- **Contextualización tecnológica:** Facilita comprender qué funcionalidades se esperan de un collar moderno, tales como rastreo, sensores, comunicación o autonomía, permitiendo justificar las decisiones de diseño adoptadas.
- **Relación directa con los sistemas de comunicación:** Tecnologías como LoRa, radiofrecuencia APRS o redes celulares se integran directamente al comportamiento y desempeño del collar, por lo que entender su operación es esencial para evaluar desempeño y alcance.

- **Justificación de la necesidad energética:** Los collares inteligentes requieren energía para GPS, microcontroladores y transmisión de datos. Esto vincula directamente su funcionamiento con la necesidad de sistemas energéticos eficientes, como los sistemas fotovoltaicos analizados en este proyecto.
- **Fundamento para evaluar desempeño y limitaciones:** Permite establecer criterios de evaluación como precisión, autonomía, robustez, cobertura de comunicación y durabilidad, todos relevantes para seleccionar o diseñar un sistema de rastreo funcional.

En síntesis, los collares inteligentes constituyen una solución tecnológica avanzada que permite realizar monitoreo remoto, rastreo geográfico y análisis del comportamiento animal.

3.3. Tecnología LoRa y comunicación de largo alcance

La comunicación de largo alcance con bajo consumo energético se ha convertido en un componente clave para aplicaciones IoT en entornos rurales, donde la infraestructura de red es limitada. La tecnología LoRa (*Long Range*) surge como una solución eficiente para transmitir datos de sensores distribuidos en áreas extensas, siendo especialmente adecuada para el monitoreo de ganado en fincas con cobertura celular intermitente o inexistente[2].

LoRa es un protocolo de modulación de espectro ensanchado de chirp (*Chirp Spread Spectrum*, CSS), que permite la transmisión de paquetes de datos a distancias superiores a varios kilómetros, con un consumo energético significativamente menor al de tecnologías como Wi-Fi o redes celulares convencionales [2]. Esta característica permite que dispositivos autónomos, puedan operar durante largos períodos con baterías de capacidad limitada.

Principios de funcionamiento LoRa

LoRa utiliza modulación CSS para codificar la información en chirps de frecuencia variable, lo que le confiere alta resistencia a interferencias y al ruido ambiental. La principal

ventaja de este esquema de modulación es su capacidad de mantener la integridad de los datos en entornos con obstáculos físicos, como bosques, colinas o estructuras rurales, que suelen degradar otras señales de radiofrecuencia [21].

El rango de comunicación de LoRa depende de varios factores, incluyendo la frecuencia utilizada (por ejemplo, 433 MHz, 868 MHz o 915 MHz), la potencia de transmisión, la sensibilidad del receptor y la topografía del terreno. En condiciones óptimas, es posible alcanzar enlaces de hasta 15 km en campo abierto, lo que supera ampliamente las distancias cubiertas por tecnologías Wi-Fi convencionales [21].

ADR (Adaptive Data Rate) y su importancia en la eficiencia energética

El mecanismo ADR (*Adaptive Data Rate*) permite optimizar automáticamente la velocidad de transmisión y la potencia de salida de los dispositivos LoRa según la calidad del enlace. Este ajuste dinámico busca un equilibrio entre confiabilidad de la comunicación y eficiencia energética [22].

En la práctica, ADR reduce el tiempo de transmisión de paquetes y disminuye el consumo de batería, extendiendo la autonomía de los dispositivos desplegados en campo. Además, contribuye a la minimización de colisiones en redes densas de nodos, al adaptar la tasa de datos de cada nodo según su distancia y condiciones de señal hacia la puerta de enlace (*gateway*) [22].

Mecanismos de confirmación (ACK) y reintentos en LoRa

La confiabilidad en la transmisión de datos se asegura mediante el uso de ACKs (*Acknowledgements*) y reintentos automáticos. Cuando un nodo envía un paquete, espera una confirmación de recepción por parte del receptor, es decir en la base se verifica que la información recibida sea la correcta, mediante un checksum. En caso de no recibir un ACK dentro de un tiempo determinado, el nodo realiza reintentos de transmisión según un número predefinido [21], es decir, funciona como mecanismo de confirmación de recepción

de mensajes, en realidad los reintentos es un caso específico de uso, sin embargo depende completamente del desarrollador como programar o usar este tipo de mecanismos (ACK).

Este mecanismo es esencial para aplicaciones críticas, donde la pérdida de información puede tener consecuencias significativas. La combinación de ADR, ACKs y reintentos permite que las redes LoRa funcionen de manera robusta y confiable, incluso en entornos con interferencias o cambios en la cobertura de señal.

En el contexto del presente proyecto, la tecnología LoRa se utiliza como columna vertebral del sistema de comunicación entre el collar inteligente y la estación base, asegurando la transmisión confiable de datos con bajo consumo energético y capacidad de operación continua en zonas rurales de Costa Rica.

3.4. Sistemas de posicionamiento global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una tecnología fundamental para el monitoreo de ubicación en aplicaciones IoT, como collares inteligentes, autos modernos, drones y otras aplicaciones. Los sistemas GPS permiten determinar la posición geográfica de un dispositivo en cualquier lugar del planeta con precisión suficiente para la mayoría de aplicaciones, incluso en zonas rurales remotas sin infraestructura de comunicación terrestre[23].

Un receptor GPS obtiene su ubicación mediante la recepción de señales de satélites que forman parte de la constelación GPS, calculando coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) a partir de la triangulación de al menos cuatro satélites visibles. La precisión estándar de estos receptores es del orden de 3 a 10 metros [23], aunque puede mejorarse mediante técnicas como PPK (*Post-Processing Kinematic*) o el uso de módulos con múltiples constelaciones (GLONASS, GNSS, Galileo, BeiDou).

Adquisición y validación de coordenadas

La adquisición de coordenadas implica que el módulo GPS se sincronice con los satélites y obtenga los datos necesarios para calcular su posición. Este proceso depende de factores

como la visibilidad de los satélites, la densidad de cobertura del cielo, la interferencia de obstáculos (árboles, colinas, edificaciones) y la calidad del receptor GPS[23].

Una vez obtenidas, las coordenadas deben validarse para descartar lecturas erróneas. Esto puede realizarse mediante filtros de plausibilidad que detectan saltos abruptos en la posición, imposibles de ocurrir físicamente para el objeto monitoreado, o mediante promedios de múltiples lecturas para suavizar pequeñas fluctuaciones. La validación es crítica para garantizar que la información de ubicación sea confiable y útil para el seguimiento del desplazamiento del dispositivo o animal que se desea monitorear [23].

Métricas de precisión y calidad de posicionamiento

La calidad de una solución GPS no depende únicamente del número de satélites visibles, sino también de su distribución espacial respecto al receptor. Para evaluar esta relación se utilizan métricas denominadas *Dilution of Precision* (DOP), las cuales cuantifican la influencia geométrica en el error final de posicionamiento [24].

Entre las métricas más empleadas se encuentran:

- **HDOP (Horizontal Dilution of Precision):** refleja la influencia geométrica en la precisión horizontal, es decir, en los cálculos de latitud y longitud. Un HDOP bajo indica buena distribución de satélites y mayor exactitud en la componente horizontal [25].
- **VDOP (Vertical Dilution of Precision):** mide la precisión en el eje vertical o altitud. Generalmente presenta valores mayores que el HDOP debido a limitaciones geométricas inherentes al sistema GPS, pues los satélites se encuentran sobre el horizonte y no por debajo del receptor [25].
- **PDOP (Position Dilution of Precision):** integra las componentes horizontal y vertical, representando una métrica global de la calidad de la solución tridimensional [25].

Valores de DOP bajos (1–3) indican condiciones geométricas favorables, mientras que valores altos (mayores a 6) suelen estar asociados a errores incrementados y posiciones

menos confiables. Estas métricas permiten evaluar si una solución GPS es adecuada para tareas que requieren niveles mínimos de precisión.

Cálculo de desplazamiento y geocercas mediante GPS

El cálculo de desplazamiento consiste en determinar el movimiento de un animal o dispositivo a partir de cambios sucesivos en sus coordenadas GPS. Esta información permite estimar velocidad, dirección y patrones de desplazamiento, datos útiles para análisis de comportamiento y detección de anomalías.

Las geocercas son áreas geográficas virtuales delimitadas mediante coordenadas GPS y radios específicos que permiten establecer fronteras digitales sobre un mapa. Su funcionamiento se basa en la comparación constante entre la ubicación de un objeto o dispositivo y los límites establecidos, generando eventos automáticos cuando dicho objeto entra o sale del área definida [26]. Estas notificaciones, denominadas “eventos de límite”, son utilizadas en múltiples aplicaciones de monitoreo y control, como la gestión de flotas, el rastreo de activos, la seguridad perimetral, la logística y la agricultura de precisión. Las geocercas pueden configurarse con diferentes formas: círculos, polígonos o rutas lineales y pueden operar de forma estática o dinámica, dependiendo del contexto de aplicación. Entre sus principales funciones destacan la generación de alertas automáticas, el registro histórico de movimientos, la optimización de rutas y la automatización de acciones basadas en ubicación, como el encendido o apagado de dispositivos[27].

En términos de procesamiento, las geocercas se apoyan en algoritmos de geolocalización y en servicios de cartografía digital para realizar cálculos de pertenencia espacial con baja latencia y alta exactitud, lo que las convierte en una herramienta fundamental dentro de los sistemas inteligentes de localización y control [28].

3.5. Sensores de temperatura y su relevancia en la salud animal

Los sensores de temperatura son dispositivos electrónicos diseñados para detectar y cuantificar el nivel térmico de un entorno, cuerpo o superficie, convirtiendo la magnitud física del calor en una señal eléctrica medible. Su principio de funcionamiento varía según la tecnología empleada: algunos operan mediante cambios en la resistencia eléctrica (como los termistores o RTD), otros utilizan voltajes generados por diferencias térmicas (termopares), y los más modernos recurren a semiconductores que integran circuitos de medición digital[29].

En los sistemas electrónicos, la información de temperatura se obtiene mediante la conversión analógico-digital de la señal generada por el sensor. Esta señal puede procesarse localmente por un microcontrolador o transmitirse a plataformas externas para su registro y análisis. La precisión, el rango operativo, la estabilidad y el consumo energético son parámetros determinantes para seleccionar el tipo de sensor más adecuado en una aplicación determinada [30].

Cuando se aplican en el ámbito agropecuario, los sensores de temperatura permiten realizar un seguimiento continuo de las condiciones térmicas tanto del ambiente como del propio animal. En este último caso, las mediciones corporales son un indicador esencial del estado fisiológico, ya que las variaciones de temperatura pueden reflejar procesos como enfermedades infecciosas, estrés calórico o alteraciones metabólicas[31].

En entornos rurales o sistemas distribuidos de monitoreo, los sensores deben poseer características específicas, como bajo consumo energético, resistencia a condiciones ambientales adversas y capacidad de integrarse en redes de adquisición de datos. Esto posibilita la recopilación automática y en tiempo real de información, lo que mejora la gestión sanitaria y productiva en explotaciones ganaderas modernas.

Entre los sensores más utilizados en ambientes rurales destacan los siguientes:

- **Termistores:** ofrecen alta sensibilidad y buena precisión en un rango limitado de temperaturas, aunque requieren calibración periódica [32].

- **Sensores digitales de temperatura** (como *DS18B20* o *TMP117*): entregan la lectura directamente en formato digital, reduciendo la necesidad de conversión analógica-digital y simplificando la integración con microcontroladores [32].
- **Sensores infrarrojos (IR)**: permiten la medición sin contacto, útil para estimar la temperatura superficial; sin embargo, pueden verse afectados por suciedad o presencia de pelo en animales [32].

Funcionalidad del sensor en sistemas IoT

La incorporación de sensores de temperatura en un collar inteligente posibilita múltiples ventajas:

1. **Monitoreo continuo**: permite la medición periódica de la temperatura corporal sin intervención humana, reduciendo el estrés animal.
2. **Alertas tempranas**: facilita la detección inmediata de valores fuera del rango fisiológico normal, indicando posibles casos de fiebre, hipotermia o estrés ambiental.
3. **Optimización del manejo sanitario**: prioriza la atención veterinaria en animales con anomalías, disminuyendo pérdidas económicas y aumentando la eficiencia operativa.

La combinación de sensores de temperatura y sistemas de comunicación LoRa permite transmitir los datos en tiempo real hacia una estación base, conformando un sistema integral de monitoreo de **salud animal**. Esto favorece la gestión de alertas, la toma de decisiones basada en datos y la implementación de estrategias preventivas, especialmente en zonas rurales con limitada cobertura de red.

3.6. Gestión eficiente de energía en sistemas IoT rurales

La gestión eficiente de energía constituye un desafío crítico en los sistemas IoT implementados en entornos rurales, especialmente cuando los dispositivos operan de manera autónoma y en lugares con acceso limitado a la red eléctrica. En estos dispositivos, el consumo energético debe ser optimizado para garantizar un funcionamiento continuo, minimizando la frecuencia de recarga o reemplazo de baterías y asegurando la confiabilidad del sistema.

Estrategias de eficiencia energética

1. **Selección de componentes de bajo consumo:** los microcontroladores, sensores, módulos de comunicación y demás componentes de un sistema deben ser seleccionados considerando su perfil de consumo tanto en modos activos como de suspensión, priorizando aquellos que soporten estados de reposo prolongados con mínima pérdida de energía [33].
2. **Modos de operación por ciclos:** los sistemas IoT pueden implementar *muestreo periódico* o *duty cycling*, donde los sensores y los módulos de comunicación permanecen activos únicamente cuando es necesario, reduciendo significativamente la demanda energética diaria [34].
3. **Uso de protocolos de comunicación eficientes:** tecnologías como **LoRa** permiten transmitir datos a larga distancia con bajo consumo energético. La selección adecuada de la potencia de transmisión y la frecuencia de envío resulta esencial para prolongar la autonomía de un dispositivo [35].
4. **El procesamiento local de datos (edge computing):** procesar información directamente en el dispositivo limitado por batería, como el filtrado de datos o la detección de eventos críticos antes de su transmisión, reduce la cantidad de datos enviados y, por ende, el consumo energético global del sistema; sin embargo, debe

buscarse un equilibrio entre lo realmente necesario para procesar o si el procesamiento es innecesario y puede ser procesado por alguna parte posterior del sistema [36].

Relevancia de la eficiencia energética en entornos rurales

En contextos rurales, la eficiencia energética impacta directamente en la viabilidad operativa y económica del sistema. Un dispositivo que requiere recargas frecuentes no solo incrementa los costos de operación, sino que también genera riesgos de interrupción en el monitoreo. Por ello, los sistemas inteligentes dependientes de batería deben diseñarse para operar de manera autónoma durante períodos prolongados, asegurando la confiabilidad en la recopilación y transmisión de datos críticos sobre temperatura, ubicación y demás información relevante que se desee recopilar.

3.7. Interfaces gráficas para monitoreo remoto

Las interfaces gráficas de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) desempeñan un papel fundamental en los sistemas de monitoreo remoto dentro del ámbito del Internet de las Cosas (IoT). Estos entornos requieren la supervisión continua de variables provenientes de sensores distribuidos, así como la interpretación de datos en tiempo real para apoyar procesos de toma de decisiones. Una GUI adecuada permite transformar información técnica y compleja en elementos visuales accesibles, facilitando la interacción humano-máquina y mejorando la eficiencia operativa del sistema [37].

En términos generales, una interfaz gráfica orientada al monitoreo remoto debe integrar varias funcionalidades esenciales:

- **Representación clara y visualmente intuitiva:** los datos provenientes del sistema deben presentarse mediante recursos gráficos tales como paneles de indicadores, mapas, gráficas de tendencia o señales en tiempo real. Esto permite al usuario comprender el estado global del sistema sin requerir interpretación técnica avanzada.

- **Actualización de información constantemente:** dado que muchos sistemas IoT dependen de cambios rápidos en las variables monitoreadas, la GUI debe reflejar de manera inmediata al recibir cualquier variación significativa, ya sea en parámetros ambientales, ubicación, estado operativo de los dispositivos o condiciones del entorno.
- **Capacidad de interacción y control:** además de visualizar información, la interfaz debe habilitar la configuración de parámetros del sistema, el envío de comandos y la modificación de modos de operación. Esto convierte la GUI en un vínculo directo entre el usuario y la infraestructura IoT, permitiendo supervisión y control desde un mismo entorno.
- **Registro histórico y análisis de datos:** una interfaz robusta debe incorporar herramientas de almacenamiento, consulta y análisis de información histórica. Estas funciones posibilitan la detección de patrones, la evaluación del desempeño y la toma de decisiones basadas en tendencias a largo plazo.
- **Usabilidad y diseño centrado en el usuario:** debido a que las GUIs se utilizan en contextos operativos diversos, es fundamental que su diseño priorice la facilidad de uso, la navegabilidad y la adaptación a distintos niveles de experiencia técnica.

La integración de estas características convierte a las interfaces gráficas en un componente indispensable dentro de los sistemas de monitoreo remoto, al proporcionar una plataforma que centraliza la visualización, supervisión y control de dispositivos distribuidos [38].

3.8. Estado del arte: soluciones comerciales y académicas similares

El monitoreo de ganado mediante sistemas electrónicos ha sido objeto de numerosos desarrollos tanto en el ámbito comercial como académico. Estos sistemas buscan mejorar la trazabilidad, el bienestar animal y la eficiencia operativa, pero presentan diferencias

significativas en cuanto a tecnología de comunicación, consumo energético, alcance y costos de implementación.

Soluciones comerciales

Las soluciones comerciales disponibles suelen dividirse en dos grandes categorías:

1. **Sistemas basados en comunicación celular y Wi-Fi:** plataformas como **Cow-Manager** o **Moocall** utilizan collares inteligentes que envían datos a través de redes celulares[39, 40]. Estos sistemas permiten **monitoreo en tiempo real** de ubicación, actividad y temperatura, y suelen incorporar **alertas automáticas** por eventos críticos. Sin embargo, presentan limitaciones importantes para zonas rurales:
 - Dependencia de cobertura celular o Wi-Fi, que puede ser irregular o inexistente en áreas remotas.
 - Consumo energético relativamente alto, lo que limita la autonomía de los dispositivos.
 - Costos elevados de adquisición y mantenimiento, restringiendo su adopción en pequeños y medianos productores [6].
2. **Sistemas de corto alcance (RFID o Bluetooth):** algunos dispositivos utilizan comunicación de corto alcance para transmitir datos a estaciones base cercanas. Aunque el consumo energético es menor, su **alcance limitado** requiere múltiples nodos o infraestructura adicional, lo que incrementa el costo y la complejidad del sistema [41].

Soluciones académicas

En la investigación académica, se han explorado alternativas más adaptables y de bajo consumo, incluyendo **tecnologías de radiofrecuencia de largo alcance (LoRa)** y **redes mesh**[42, 43]. Ejemplos destacados incluyen:

- **Proyectos universitarios** que integran difentes tipos de sensores y comunicación LoRa para monitoreo de animales en entornos extensivos. Estos sistemas demuestran:

- Capacidad de transmisión a distancias de varios kilómetros sin necesidad de infraestructura celular.
- Consumo energético reducido, con posibilidad de operación autónoma por días con baterías recargables.
- Flexibilidad en el despliegue de datos de manera remota mediante **GUI**.

Estudios recientes han evaluado la eficiencia de **algoritmos de transmisión** y manejo de **ACKs** para garantizar la fiabilidad de los datos y optimizar la duración de la batería, mostrando mejoras significativas frente a sistemas comerciales tradicionales[44, 45].

Análisis comparativo

Comparando las soluciones comerciales y académicas, se observa que los **sistemas basados en LoRa y RF de bajo consumo** ofrecen ventajas clave para el contexto rural costarricense:

- **Autonomía energética:** permite largos periodos de operación sin recarga frecuente.
- **Cobertura extensa:** comunicación confiable en zonas remotas, incluso en terrenos con obstáculos.
- **Costo reducido:** menor inversión inicial y de mantenimiento respecto a soluciones comerciales con dependencia celular.
- **Escalabilidad y personalización:** facilita la adaptación a distintos tamaños de hatos y necesidades de monitoreo.

En este sentido, el presente proyecto se alinea con las tendencias académicas más recientes, enfocándose en un sistema de monitoreo de ganado basado en comunicación LoRa, con sensores de temperatura, GPS y gestión de cercas virtuales, diseñado específicamente para condiciones rurales y con atención especial a la eficiencia energética y bajo costo de implementación.

CAPÍTULO 4

Desarrollo del Sistema Propuesto

4.1. Descripción general del sistema

El sistema desarrollado corresponde a una plataforma de monitoreo y rastreo diseñada bajo una arquitectura modular, donde cada subsistema cumple una función específica dentro del proceso de adquisición, transmisión y procesamiento de datos. Esta sección se centra en los aspectos técnicos relacionados con la integración y operación del sistema.

El dispositivo principal es un collar inteligente que incorpora sensores para la medición de variables fisiológicas, un módulo de posicionamiento global y un transceptor de largo alcance basado en la tecnología **LoRa (Long Range)** (solo se desarrolla el sistema para un collar). Estos elementos se integran mediante un microcontrolador que ejecuta las rutinas de adquisición de datos, validación, empaquetamiento y envío mediante protocolos optimizados para enlaces de baja potencia.

La metodología de integración adoptada sigue el enfoque tradicional en sistemas embebidos, que consiste en el desarrollo por capas: *(i)* integración de módulos de hardware, *(ii)* verificación funcional individual, *(iii)* desarrollo del código, *(iv)* pruebas de comunicación punto a punto, y finalmente, *(v)* integración completa del sistema. Este enfoque permitió detectar fallos tempranos en módulos aislados antes de acoplarlos al sistema final, reduciendo el riesgo de incompatibilidades durante la puesta en marcha.

En la estación base se implementa un receptor LoRa conectado a un sistema de procesamiento capaz de decodificar los paquetes recibidos y enviarlos vía USB para almacenar y visualizar los datos mediante una interfaz gráfica. Esta interfaz permite supervisar el estado de los dispositivos, acceder al historial de mediciones y gestionar herramientas de análisis como la delimitación de geocercas y la generación de alertas.

En conjunto, ambos componentes (collar y estación base) conforman un sistema embebido distribuido, en el cual la comunicación, la sincronización de datos y la eficiencia energética son elementos clave para garantizar su funcionamiento continuo en campo.

La arquitectura general se compone de tres subsistemas principales:

1. **Collar transmisor (Tx):** dispositivo portátil colocado en el animal, responsable de adquirir parámetros como temperatura y coordenadas GPS, y de transmitirlos periódicamente a través de un enlace LoRa hacia la estación base, así como del procesamiento de los parámetros de cercas virtuales y la activación de actuadores.
2. **Módulo base receptor (Rx):** unidad fija encargada de recibir los datos provenientes de uno o varios collares, procesarlos y almacenarlos temporalmente. Además, puede presentar información en una pantalla OLED, retransmitirla a un sistema superior mediante un enlace serial o inalámbrico secundario y envía coordenadas nuevas de cerca virtual al collar cuando las recibe de la interfaz por comunicación serial.
3. **Interfaz de visualización y análisis:** componente de software que recibe los datos del módulo base y los presenta de forma estructurada al usuario, permitiendo

el registro histórico, el análisis de trayectorias y el monitoreo del estado de cada dispositivo.

El diseño además de tomar en cuenta lo descrito en la tabla 2.1, se enfoca en la **eficiencia energética** y la **robustez de la comunicación**, ya que el collar deben operar en condiciones ambientales variables y sin acceso a una fuente de energía constante. Por ello, se implementaron estrategias de bajo consumo, como el uso de microcontroladores de arquitectura eficiente, módulos LoRa configurados en potencia mínima necesaria, y rutinas de suspensión que optimizan la autonomía de las baterías, así como la implementación de un ADR que ajuste parámetros de transmisión a los mínimos necesarios para operar sin gastar energía de más.

En conjunto, el sistema ofrece una alternativa práctica y escalable para proyectos de seguimiento animal en campo abierto, con la ventaja de combinar bajo consumo energético, largo alcance de transmisión y simplicidad operativa, sin depender de infraestructura celular o de Internet.

4.2. Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema propuesto se basa en un esquema de comunicación de tipo estrella, donde un collar transmisor (Tx) instalado en el animal envía periódicamente datos de posición y temperatura hacia una estación base receptora (Rx) mediante un enlace de radiofrecuencia LoRa. Posteriormente, la estación base procesa y retransmite la información hacia una interfaz gráfica en computadora, encargada de visualizar, almacenar y analizar los datos en tiempo real.

Este enfoque de arquitectura distribuida permite mantener un sistema modular, escalable y de bajo consumo energético, adaptado a las condiciones de operación en zonas rurales o de difícil acceso.

El sistema está diseñado para operar de manera autónoma, incluso en ausencia de conexión a Internet, priorizando la robustez de comunicación y la eficiencia energética de cada subsistema.

La Figura 4.1 muestra el esquema conceptual de la arquitectura general, destacando los tres niveles funcionales principales:

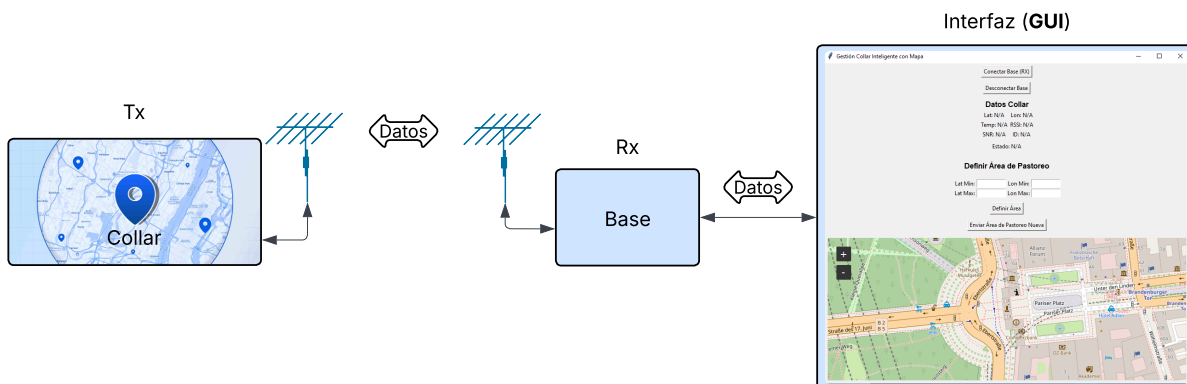


Figura 4.1: Esquema conceptual de la arquitectura general.

- **Nivel 1 – Collar transmisor (Tx):** realiza la lectura de los sensores de temperatura, activación de cercas virtuales y GPS, procesando la información localmente y transmitiéndola mediante el módulo LoRa.
- **Nivel 2 – Estación base receptora (Rx):** recibe los paquetes LoRa, verifica la integridad de los datos y genera confirmaciones (**ACK**) al transmisor, así como el procesamiento y envío de parámetros del ADR. Además, envía coordenadas de geocerca al collar y comunica los datos hacia la interfaz por medio de una conexión serial.
- **Nivel 3 – Interfaz gráfica (PC):** interpreta los datos recibidos, los representa en un mapa y permite configurar **geocercas** o revisar el estado térmico del animal.

Diagrama general de bloques

El sistema de rastreo y monitoreo propuesto se compone de tres bloques principales: **collar transmisor (Tx)**, **estación base receptora (Rx)** e **interfaz gráfica de usuario (PC)**. Cada uno de estos bloques cumple funciones específicas dentro del flujo de comunicación, garantizando la adquisición, transmisión, recepción y visualización de los datos recolectados.

El **collar transmisor** está diseñado para operar de forma autónoma y de bajo consumo energético. Incorpora un microcontrolador encargado de la lectura del sensor de temperatura y del módulo GPS, los cuales proporcionan información sobre el estado térmico del animal y su ubicación geográfica. Posteriormente, los datos son empaquetados y enviados mediante un módulo de comunicación LoRa, operando en la banda sub-GHz, hacia la estación base.

La **estación base receptora** cumple un doble propósito: recibir los paquetes provenientes del transmisor y retransmitirlos hacia la interfaz de visualización. Esta estación dispone de su propio microcontrolador y módulo LoRa, que establecen la comunicación punto a punto con el collar. Una vez que el paquete es recibido correctamente, el sistema genera una confirmación (ACK) hacia el transmisor y envía los datos procesados a la computadora mediante una conexión serial (UART–USB).

Finalmente, la **interfaz gráfica de usuario** en la computadora actúa como el punto central de visualización y control. A través de ella se pueden observar en tiempo real los datos de temperatura, ubicación del animal en un mapa, y el estado general del enlace. Además, desde esta interfaz se pueden definir o modificar geocercas, visualizar registros históricos y verificar la conectividad del sistema.

En la Figura 4.3 se presenta el diagrama general de bloques del sistema, donde se ilustran las principales interconexiones entre el transmisor, la base y la interfaz, así como los flujos de información y energía entre ellos.

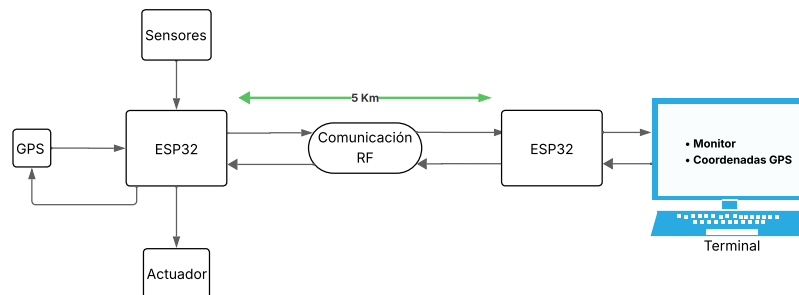


Figura 4.2: Diagrama de tercer nivel de la solución propuesta.

Flujo de comunicación collar–base–interfaz

El flujo de comunicación del sistema se fundamenta en un esquema **bidireccional** entre el collar transmisor (Tx) y la estación base (Rx), mientras que la comunicación entre la base y la interfaz gráfica se establece mediante un enlace serial bidireccional hacia la computadora y de la computadora a la base. Este diseño permite garantizar una comunicación confiable, de bajo consumo y adecuada para entornos rurales donde no se dispone de infraestructura de red.

El proceso de comunicación inicia en el **collar transmisor**, el cual realiza la adquisición de datos provenientes del sensor de temperatura y del módulo GPS. Una vez recolectada la información, el microcontrolador organiza los datos en un paquete estructurado que incluye lo siguiente: identificador del dispositivo, coordenadas geográficas, temperatura, contador de transmisión y una etiqueta de tiempo. Dicho paquete se envía a través del módulo LoRa hacia la estación base.

La **estación base receptora** se mantiene en modo de escucha permanente, esperando la llegada de los paquetes transmitidos. Al recibir un paquete válido, el microcontrolador del receptor verifica su integridad mediante el control de errores implementado con un checksum y, si la recepción es correcta, genera una respuesta de confirmación (ACK) dirigida al transmisor y la actualización de parámetros del enlace **LoRa**(ADR). Este mecanismo asegura que el collar únicamente retransmita los datos cuando no se reciba una confirmación, reduciendo significativamente el consumo energético y la congestión del canal RF.

Una vez validada la recepción, la base parsea y envía la información recibida a la interfaz gráfica en la computadora, utilizando una conexión serial (UART–USB). En este nivel, la interfaz interpreta el flujo de datos y los presenta al usuario de manera organizada, mostrando la ubicación del animal en el mapa, su temperatura corporal, y el estado de la comunicación en tiempo real. Además, la interfaz puede enviar comandos hacia la base, como la configuración de geocercas.

Este flujo de comunicación se resume en la Figura 2.1, donde se representa las 2 rutas de comunicación que existen en el sistema así como secuencia de transmisión, recepción, validación y visualización de datos dentro del sistema completo.

4.3. Diseño del hardware del collar inteligente

El **collar inteligente** que se desarrolló constituye el componente principal del sistema de monitoreo, encargado de la adquisición y transmisión de datos desde el animal hacia la estación base. Su diseño se centró en tres ejes fundamentales: bajo consumo energético, robustez en la comunicación RF y confiabilidad en la adquisición de parámetros fisiológicos y de ubicación.

El hardware del collar integra un microcontrolador con un esp32, el cual actúa como unidad central de procesamiento, coordinando la lectura de los sensores y el manejo del módulo de comunicación LoRa. Este microcontrolador opera con un algoritmo optimizado que permite entrar en modos de suspensión entre transmisiones, extendiendo así la autonomía energética del dispositivo.

Para la obtención de datos ambientales y fisiológicos, el sistema incorpora un sensor de temperatura digital, ubicado en contacto con la piel del animal, capaz de registrar variaciones térmicas con alta precisión y estabilidad. Por otro lado, un módulo GPS de bajo consumo energético se encarga de determinar las coordenadas geográficas del animal, actualizando su posición a intervalos configurables según la aplicación.

La comunicación con la **estación base** se realiza mediante un módulo LoRa, que opera en la banda ISM de 433 MHz y permite alcanzar distancias de varios kilómetros en línea de vista. Este módulo ofrece una alta inmunidad al ruido y una modulación de espectro ensanchado que mejora la confiabilidad en entornos rurales o con obstáculos naturales.

El sistema del collar alimentado por una batería recargable de ion de litio, acompañada de un circuito de protección y gestión de carga. Se implementaron estrategias de ahorro energético, como la desactivación temporal de periféricos y la reducción de la tasa de transmisión, permitiendo maximizar la duración de la batería durante la operación en campo.

Finalmente, todos los componentes electrónicos se integran en una placa de circuito compacto y encapsulado resistente al agua y polvo, diseñado para soportar condiciones adversas propias del entorno ganadero. El diseño mecánico del collar busca mantener el confort del animal, asegurando al mismo tiempo la estabilidad de las lecturas de los

sensores.

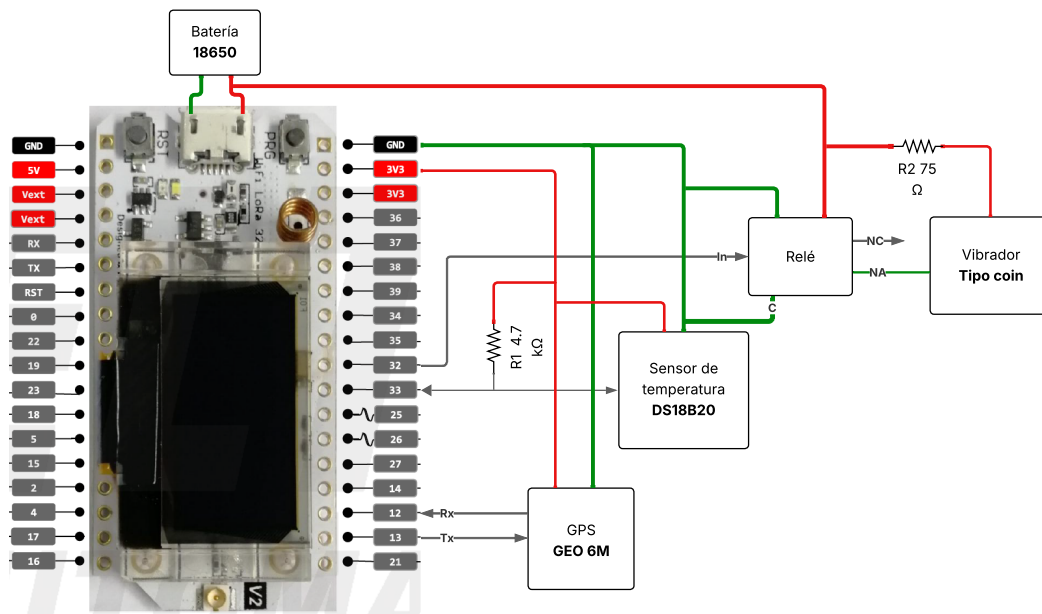


Figura 4.3: Diagrama de collar inteligente.

Componentes electrónicos utilizados

Para el desarrollo del collar de monitoreo, se ha realizado una estimación de costos basada en módulos de bajo precio y fácil acceso. La Tabla 4.3 detalla los componentes necesarios, sus precios aproximados y las cantidades requeridas para construir un prototipo funcional. Los componentes seleccionados garantizan un equilibrio entre costo y funcionalidad, lo que permite el desarrollo de un dispositivo efectivo para el monitoreo del ganado.

Es importante notar que en la estación base se utiliza una de las placas WiFi LoRa 32 v2 que integra el ESP32 y LoRa, como se muestra en la Figura 4.3. Esto implica un incremento en los costos iniciales; sin embargo, la misma estación base podría recibir señal de múltiples collares. Además, el mismo cargador puede cargar la batería de diferentes collares, por lo que, en la producción de futuras unidades, **el precio se reduce en aproximadamente \$18.5.**

Módulo	Precio (USD)	Cantidad
Módulo GPS	14.00	1
Placa Wifi LoRa 32 v2	15.00	2
Sensor de temperatura (DS18B20)	3.00	1
Motor vibrador tipo coin (bajo consumo)	4.00	1
Batería Li-Ion 18650	7.00	1
Módulo cargador TP4056	3.50	1
Carcasa resistente al agua (IP67)	4.00	1
Cirturón de seguridad	6.00	1
Total estimado	71.5	

Cuadro 4.1: Presupuesto estimado para el desarrollo del prototipo de collar inteligente para monitoreo y cercas virtuales.

Cada componente ha sido cuidadosamente seleccionado para garantiza la funcionalidad óptima del collar de monitoreo bajo los requisitos y restricciones que la lechería solicita, manteniendo un enfoque en la eficiencia de costos y la robustez del sistema.

El módulo GPS permite el rastreo de la ubicación del ganado y la implementación efectiva de cercas virtuales. El sensor de temperatura (DS18B20) proporciona datos esenciales sobre la actividad física y el estado de salud del animal, facilitando una monitorización integral.

El microprocesador (ESP32-WROOM-32) en la placa WiFi LoRa 32 v2 se encarga de gestionar tanto la adquisición de datos como la comunicación inalámbrica en el módulo de comunicación RF LoRa integrado, asegurando una transmisión de datos eficiente y confiable entre dispositivos. Para alertar al ganado cuando se acerca o supera los límites de pastoreo, se integra un motor vibrador tipo coin, que ofrece una señal táctil efectiva con bajo consumo energético, ideal para el bienestar animal y la autonomía del dispositivo.

Por otro lado, la alimentación del sistema está garantizada por una batería recargable Li-Ion, que proporciona una duración prolongada para el uso continuo. Además, se incluye un módulo de carga TP4056 con protección integrada, que permite una recarga segura y práctica de la batería mediante conexión USB, facilitando su mantenimiento sin

comprometer la integridad del collar. Finalmente, la carcasa resistente al agua con certificación IP67 protege todos los componentes electrónicos del ambiente externo, asegurando la durabilidad y fiabilidad del sistema en condiciones de campo.

Consideraciones de bajo consumo energético

El diseño del **collar inteligente** prioriza la **eficiencia energética** como uno de los factores críticos para garantizar una operación prolongada en entornos rurales, donde no siempre es posible realizar recargas frecuentes o disponer de infraestructura eléctrica. Para ello, se implementaron diversas estrategias tanto a nivel de hardware como de algoritmo, orientadas a minimizar el consumo sin comprometer la funcionalidad del sistema.

A nivel de hardware, la selección de componentes se realizó considerando su bajo consumo en reposo y operación activa. El microcontrolador empleado cuenta con modo de bajo consumo (deep sleep) que permiten reducir drásticamente el consumo entre ciclos de transmisión, activándose únicamente para la lectura de sensores y el envío de datos. Asimismo, el módulo LoRa se configura para operar en el nivel de potencia más bajo posible, ajustando la velocidad de transmisión mediante el factor de dispersión (*Spreading Factor*), ancho de banda (*Bandwidth*) y tasa de codificación (*Coding Rate*) según la distancia y las condiciones del enlace.

El **módulo GPS** se activa únicamente durante las ventanas de actualización necesarias, y posteriormente es deshabilitado por software para evitar consumo continuo. Esta estrategia, junto con la configuración de intervalos dinámicos de adquisición, permite mantener un balance adecuado entre precisión en la ubicación y autonomía energética.

Desde el punto de vista del código, se implementaron rutinas de control que priorizan el ciclo de trabajo (duty cycle) bajo. El sistema permanece la mayor parte del tiempo en estado inactivo, despertando únicamente para tomar medidas y transmitir los datos al receptor. Además, se aplicaron técnicas de Adaptive Data Rate (ADR), que permiten optimizar el rendimiento del enlace LoRa en función de la calidad de la señal, reduciendo el gasto energético asociado.

En la Figura 4.4 se ilustra el esquema conceptual de **gestión de energía** implementado en el collar, donde se observan las fases de suspensión, adquisición y transmisión.

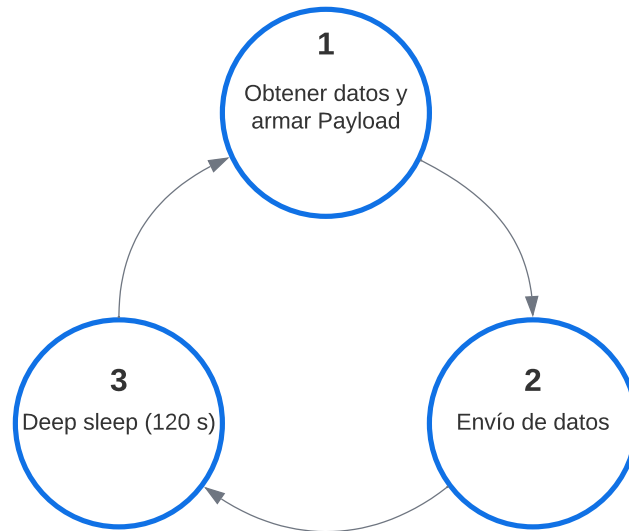


Figura 4.4: Gestión de energía mediante suspensión profunda.

4.4. Diseño del código del collar (Tx)

El código del **collar inteligente** desarrollado en C++ constituye el núcleo funcional del sistema, encargado de gestionar la adquisición de datos, el control de energía, la comunicación inalámbrica y la lógica de operación general, así como el manejo de actuadores para cercas virtuales. Su desarrollo se realizó en lenguaje C++, utilizando el entorno de programación **Arduino IDE**, con el fin de asegurar compatibilidad con el microcontrolador integrado en la placa principal y facilitar la depuración del código.

El diseño del código se estructuró bajo una arquitectura modular, donde cada bloque cumple una función específica dentro del ciclo operativo. De esta forma, el sistema mantiene un orden lógico en la ejecución de tareas, garantizando confiabilidad, eficiencia energética y facilidad de mantenimiento.

El ciclo general de operación del collar sigue la secuencia descrita a continuación:

1. **Inicialización del sistema:** configuración de periféricos, sensores, módulo LoRa y GPS.

2. **Adquisición de datos:** lectura de temperatura corporal y coordenadas geográficas del animal.
3. **Procesamiento básico:** validación de datos adquiridos, conversión de unidades y verificación de límites de seguridad.
4. **Transmisión LoRa:** envío del paquete con los datos al módulo receptor (base), esperando confirmación mediante ACK.
5. **Gestión de energía:** entrada en modo de **suscripción profunda** durante el intervalo de reposo programado.

El código fue diseñado para operar de forma totalmente **autónoma**, reduciendo la intervención humana y optimizando los recursos de hardware. En la Figura 4.5 se muestra el diagrama general del algoritmo implementado en el transmisor.

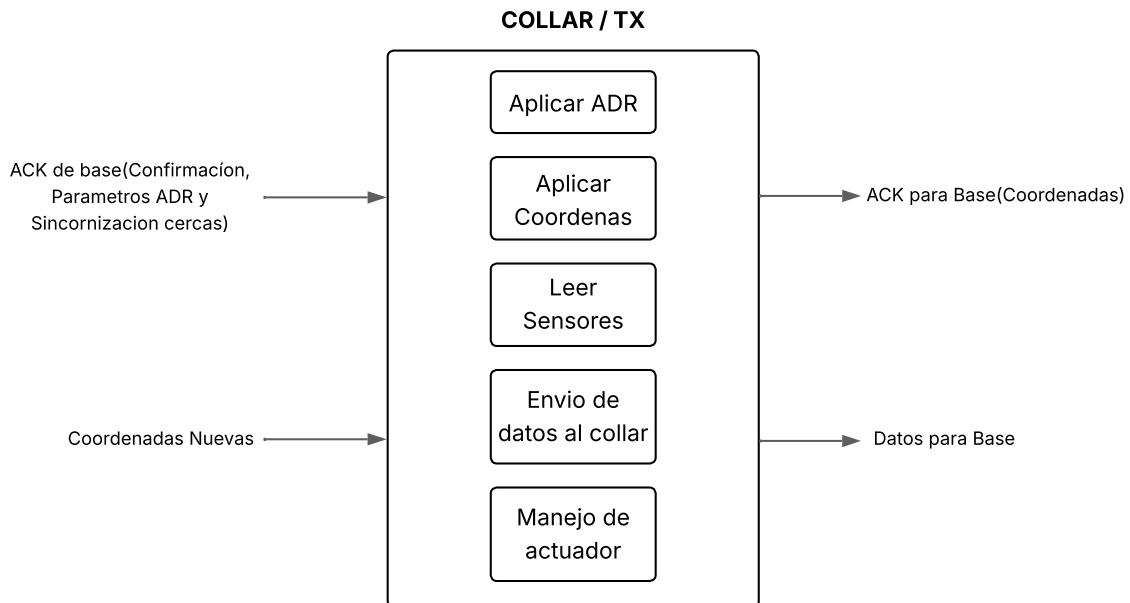


Figura 4.5: Diagrama general del algoritmo del collar (Tx).

Cada módulo del algoritmo cumple un papel específico en la arquitectura general, los cuales se detallan en las siguientes subsecciones.

Estructura del código

El código del **collar inteligente** se organizó en una estructura modular, con el objetivo de facilitar su mantenimiento, escalabilidad a futuro y comprensión del flujo de ejecución. Esta estructura se compone principalmente de tres bloques fundamentales: **setup**, **loop** y **funciones auxiliares**, cada uno de los cuales cumple un rol específico en la operación del sistema.

1. **Setup:** Esta sección se ejecuta una sola vez al encender el collar y se encarga de inicializar todos los periféricos y módulos de comunicación. Las tareas realizadas incluyen:
 - Configuración de los pines del microcontrolador.
 - Inicialización del módulo GPS y del módulo LoRa.
 - Inicio de la comunicación serial para depuración.
 - Verificación del estado de la batería y del sistema antes de iniciar el ciclo de adquisición de datos.
2. **Loop:** Representa el ciclo principal del algoritmo, el cual se ejecuta de forma continua. En este bloque se implementan las siguientes acciones:
 - Lectura de sensores y adquisición de datos (posición GPS, temperatura, etc.).
 - Procesamiento de los datos adquiridos, incluyendo filtrado de errores y verificación de límites.
 - Preparación y envío del paquete de datos al receptor mediante tecnología LoRa.
 - Activación del modo de ahorro energético tras completar el envío, reduciendo el consumo hasta la siguiente iteración.
3. **Funciones auxiliares:** Este conjunto de funciones soporta las operaciones de los bloques anteriores y permite modularizar el código para mejorar su legibilidad. Entre las funciones más relevantes se encuentran:

- Lectura de sensores: obtiene y convierte los datos crudos en valores útiles tanto de temperatura como ubicación.
- Gestión de energía: controla el paso del microcontrolador a modos de baja potencia y velocidad de transmisión.
- Comunicación LoRa: empaqueta, envía y confirma la recepción de datos.
- Manejo de errores: detecta fallos de comunicación o lectura de sensores y ejecuta rutinas de corrección.

La **estructura modular** permite que el algoritmo sea robusto y flexible, de modo que cualquier cambio en los sensores o en el protocolo de comunicación pueda implementarse sin afectar otras funciones del sistema. En la Figura 4.6 se muestra un esquema representativo de la organización del código del algoritmo.

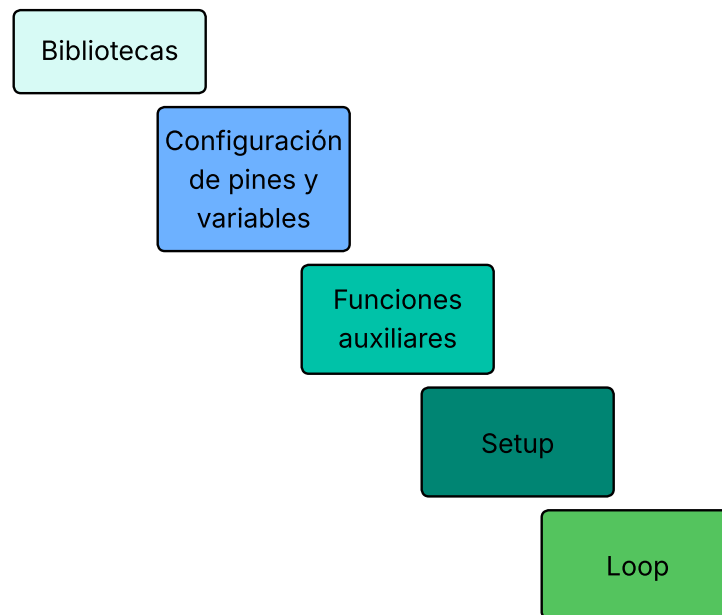


Figura 4.6: Estructura modular del código del collar inteligente.

Lectura de sensores (temperatura y GPS)

El código del **prototipo de collar inteligente** está diseñado para adquirir datos de los sensores de manera periódica y eficiente, garantizando que la información relevante sobre el animal se registre y se transmita con precisión. Los sensores principales que incluye son un

sensor de temperatura para monitoreo corporal, y un **módulo GPS** para determinar la ubicación geográfica del animal.

1. Sensor de temperatura:

- El sensor se inicializa al arrancar el sistema y se realiza una calibración básica para asegurar la exactitud de las mediciones.
- La lectura de temperatura se ejecuta en intervalos configurables, permitiendo un balance entre frecuencia de muestreo y consumo de energía.
- Los datos obtenidos se almacenan temporalmente en memoria RAM antes de ser empaquetados para la transmisión al módulo base.

2. Módulo GPS:

- El GPS se activa únicamente durante el ciclo de adquisición para optimizar la duración de la batería.
- Se configuran los parámetros de actualización y filtrado de señal para asegurar la precisión de la ubicación, considerando posibles pérdidas de señal o entornos con cobertura limitada.
- La lectura GPS incluye latitud, longitud. Estos datos se sincronizan con la lectura de temperatura para generar un registro completo por intervalo de medición.

3. Sincronización y empaquetado de datos de sensores:

- El algoritmo organiza los datos de temperatura y GPS en paquetes de información(bytes) que se enviarán al módulo base mediante el protocolo LoRa.
- Cada paquete contiene un identificador único y las mediciones correspondientes, garantizando la trazabilidad de los datos y facilitando la correlación con eventos de geocercas o alertas de movimiento.

4. Manejo de errores y validación en obtención de datos:

- Se implementan rutinas de validación para detectar lecturas erróneas o ausentes.
- En caso de pérdida de señal GPS o fallo en la lectura de temperatura, el sistema registra un valor nulo o indicador de error, evitando que datos corruptos afecten el análisis posterior.

Gestión de cercas virtuales

El código del **prototipo de collar inteligente** incorpora un módulo de gestión de **geocercas**, que permite monitorear y controlar la ubicación del animal dentro de áreas predeterminadas, aumentando la seguridad y facilitando la gestión del rebaño. Esta funcionalidad se basa en la comparación continua de la posición GPS del collar con los límites de la geocerca definida por coordenadas.

1. Definición de geocercas:

- Las geocercas son áreas virtuales definidas por un conjunto de coordenadas que delimitan un polígono simulando la ubicación de una cerca física.
- La interfaz gráfica (PC) permite crear, modificar y enviar estas coordenadas que forman el area de pastoreo al módulo base, que posteriormente las transmite al collar mediante el protocolo LoRa.

2. Detección de entrada y salida a área definida:

- El algoritmo realiza cálculos de proximidad en cada ciclo de lectura del GPS para determinar si el animal se encuentra dentro o fuera del área establecida.
- Cuando se detecta una salida de la geocerca, se genera un evento de alerta con el propósito de avisar al ganadero para que tome medidas con el animal, así como para facilitar la ubicación exacta de un daño en la cerca física en caso de existir.

3. Actualización y almacenamiento de geocercas:

- El collar mantiene en memoria las geocercas activas, actualizándolas únicamente cuando recibe nuevas coordenadas desde el módulo base.

- Se implementa un mecanismo de confirmación mediante ACK para garantizar que los cambios de geocerca enviados desde la interfaz gráfica sean efectivamente recibidos y aplicados por el collar.

4. Optimización energética en geocercas:

- Para minimizar el consumo de batería, las comprobaciones de geocerca se sincronizan con la lectura GPS y se realizan solo en los intervalos necesarios, evitando un procesamiento constante e innecesario.

La Figura 4.7 ilustra el flujo de gestión de geocercas dentro del algoritmo del collar, mostrando cómo se compara la ubicación GPS con los límites establecidos y cómo se generan los eventos de alerta para el animal en el collar.

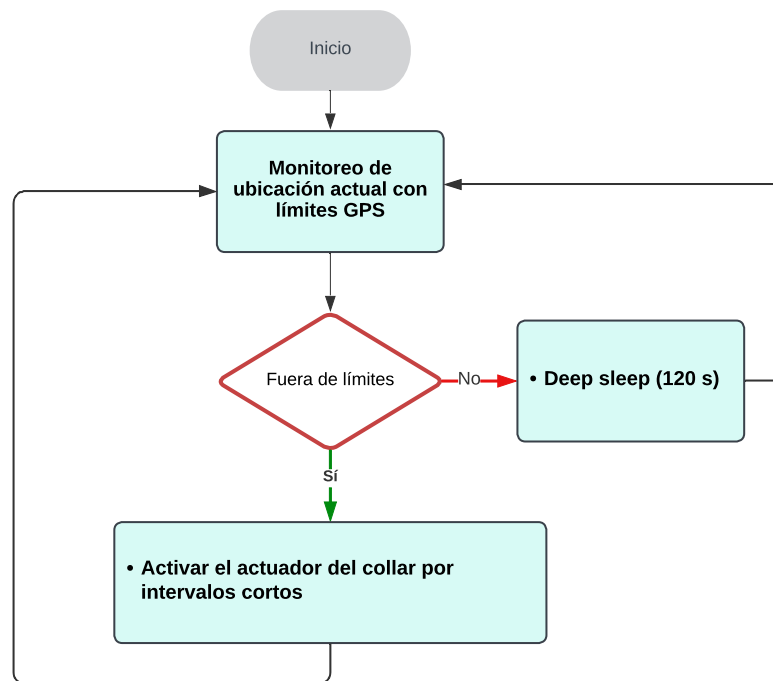


Figura 4.7: Flujo de gestión de geocercas en el algoritmo del collar.

Comunicación LoRa y manejo de ACKs

El **collar inteligente** utiliza la tecnología **LoRa** para transmitir datos al módulo base de manera eficiente y con bajo consumo energético, lo que permite una cobertura

amplia incluso en áreas rurales o de difícil acceso. La comunicación se implementa con un protocolo basado en mensajes de datos y confirmaciones (**ACKs**) para garantizar la entrega confiable de la información.

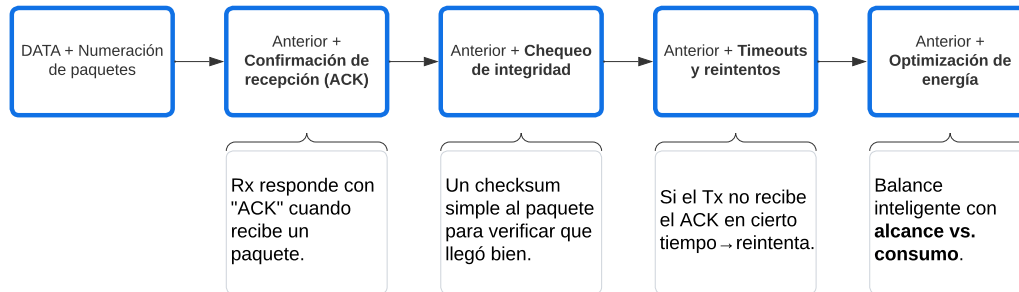


Figura 4.8: Evolución de la comunicación LoRa de inicio a fin.

1. Estructura de los paquetes LoRa:

- Cada paquete enviado por el collar contiene la siguiente información:
 - Identificador único con la base (Header).
 - Tamaño del paquete.
 - Contador de transmisión para evitar duplicados(ID).
 - Coordenadas GPS actuales.
 - Valor de temperatura.
 - Valor del Checksum.
- La estructura está diseñada para minimizar el tamaño del paquete y reducir el tiempo de transmisión, disminuyendo el consumo energético.

2. Envío de datos y retransmisión:

- El collar transmite paquetes de manera periódica según el intervalo de envío configurado.
- Tras cada transmisión, el collar espera un ACK del módulo base. Si no se recibe confirmación dentro de un tiempo predefinido, el paquete se retransmite hasta un máximo de 3 intentos, asegurando la entrega confiable de la información.

- Si en los 3 intentos de envío no se recibe confirmación, el collar como protocolo descarta ese paquete para armar uno nuevo y proceder con su envío.

3. Manejo de ACKs:

- El algoritmo procesa la información de los ACKs de forma selectiva, los ACKs además de confirmar traen información importante para el funcionamiento del sistema, como sincronización para una nueva cerca o parámetros adaptativos del ADR.
- El algoritmo distingue entre ACKs normales y envío de ACKs de geocerca, priorizando la confirmación de cambios en configuraciones importantes.

4. Optimización del consumo energético en transmisión LoRa:

- Para reducir el gasto de batería, el módulo LoRa se activa únicamente durante la transmisión y recepción de datos.
- En periodos de espera entre transmisiones, el collar entra en un modo de bajo consumo (deep sleep), manteniendo solo los módulos esenciales activos.
- La implementación de un **ADR** (*Adaptive Data Rate*) para reducir consumo de energía por parte del sistema de comunicación LoRa en condiciones de un buen enlace.

5. Robustez frente a interferencias:

- Se implementan técnicas de retransmisión y verificación de integridad mediante sumas de verificación (**checksum**) en cada paquete.
- Los datos corruptos no son procesados y los intentos de retransmisión aumentan la confiabilidad de la comunicación.
- El sistema equilibra parámetros de comunicación para aumentar la redundancia de información y protegerla de interferencia o ruido.

Por medio de estos 5 puntos clave se trata de ejemplificar la robustez que mantiene todo el sistema en el área de comunicación para brindar al usuario una experiencia con seguridad al recibir datos o enviar nuevos al collar.

La Figura 4.9 muestra el flujo de comunicación LoRa del collar, incluyendo el envío de paquetes, la espera de ACKs y la retransmisión en caso de fallo. Esta figura 4.9 también muestra el flujo que sigue el collar para procesar el ingreso de nuevas coordenadas de parte de la base para delimitar una nueva región de pastoreo definida por el usuario ganadero desde la interfaz.

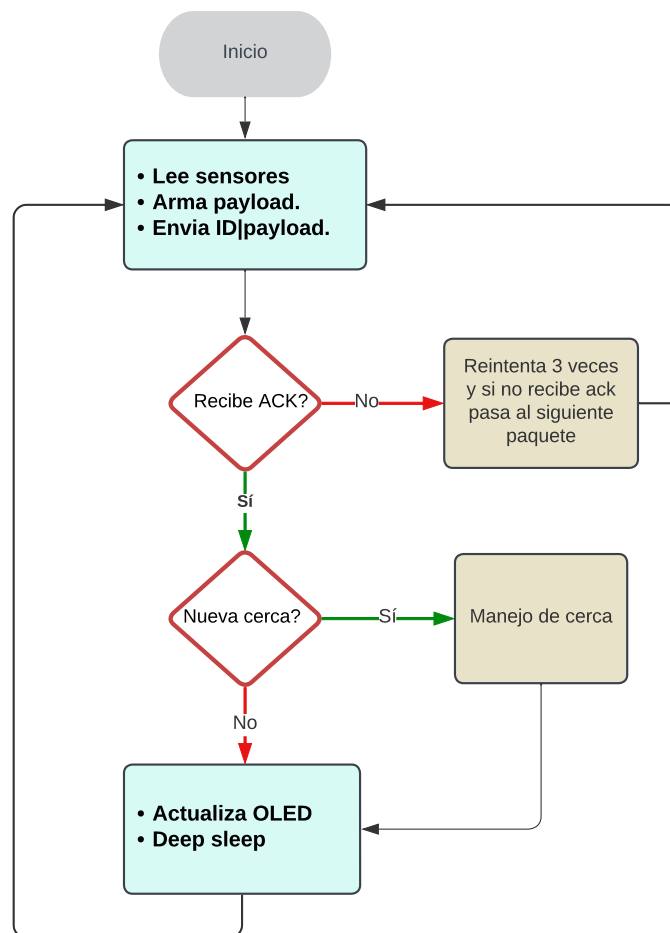


Figura 4.9: Flujo de comunicación LoRa y manejo de ACKs en el algoritmo del collar.

Implementación de ADR y modo seguro de resincronización

Para optimizar el rendimiento de la comunicación LoRa y garantizar la confiabilidad del sistema, el algoritmo del collar implementa **ADR** (*Adaptive Data Rate*) y un modo seguro de resincronización.

1. Adaptive Data Rate (ADR):

- El ADR permite ajustar dinámicamente la tasa de transmisión (**CR** (*Coding Rate*), **BW** (*Bandwidth*), **SF** (*Spreading Factor*)) y la potencia del módulo LoRa según la calidad de la señal recibida en el módulo base (**SNR** (*Signal-to-Noise Ratio*), **RSSI** (*Received Signal Strength Indicator*)).
- Si el collar detecta que la señal es fuerte y estable, puede aumentar la tasa de datos y reducir la potencia reduciendo así el tiempo de transmisión y el consumo de energía.
- En condiciones de señal débil, el collar disminuye la tasa de datos y aumenta la potencia, asegurando la entrega de paquetes sin pérdida de información.

2. Modo seguro de resincronización:

- En caso de pérdida de comunicación prolongada o errores recurrentes en la transmisión, el collar activa un protocolo de resincronización automática con el módulo base. Este modo incluye:
 - Actualización de parámetros de comunicación del ADR a un valor conocido tanto para base como para el collar (Máximo alcance).
 - Manejo de activación de modo seguro por número de fallos consecutivos en recepción de paquetes (2 consecutivos).
- La resincronización garantiza que el sistema pueda recuperarse automáticamente de fallos temporales y reinicio, evitando la pérdida de información y la necesidad de intervención manual.

3. Beneficios del ADR y resincronización:

- Reducción significativa del consumo energético, al adaptar la potencia y tasa de transmisión.
- Mejora de la robustez del sistema, minimizando la pérdida de paquetes críticos.
- Incremento de la autonomía del collar, al optimizar el uso de la batería en función de la calidad de enlace y disminuyendo la intervención humana.

La Figura 4.10 ilustra el flujo de implementación del ADR y del modo seguro de resincronización, mostrando cómo el collar ajusta automáticamente los parámetros y recupera la comunicación ante fallos.

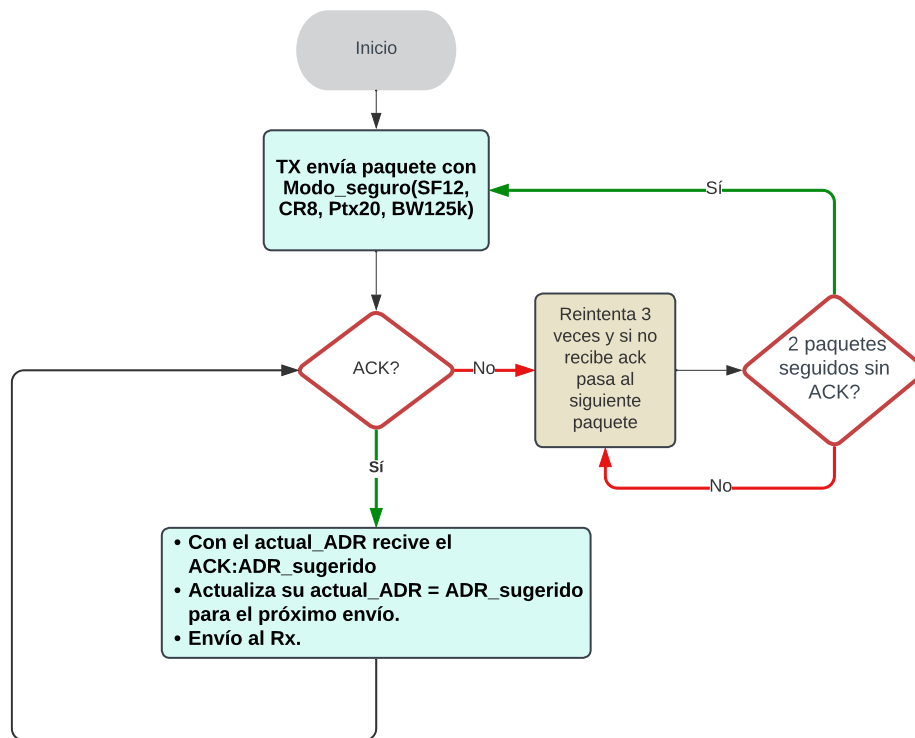


Figura 4.10: Flujo de ADR y resincronización en el algoritmo del collar.

4.5. Diseño del módulo base (Rx)

El módulo base (Rx) se encarga de recibir los datos transmitidos por el collar, procesarlos y actuar como intermediario entre el collar y la interfaz gráfica en PC. Su diseño

realizado en C++ se centra en la **fiabilidad de la comunicación**, el **registro de información** y el **control de geocercas**, asegurando que cada paquete enviado desde el collar sea recibido y confirmado correctamente.

El módulo base está compuesto por tres componentes principales:

1. **Módulo LoRa receptor:** Encargado de la comunicación inalámbrica con el collar.
2. **Microcontrolador de procesamiento:** Administra la recepción de paquetes, validación de datos, cálculo de parámetros del ADR y envío de confirmaciones (ACKs) tanto al collar como a la interfaz cuando sea necesario.
3. **Comunicación con la PC:** Permite el envío de datos recibidos a la interfaz gráfica, así como la recepción de geocercas actualizadas o comandos de configuración.

El funcionamiento del módulo base se divide en los siguientes procesos, los cuales se desarrollarán en las secciones posteriores:

- Recepción de paquetes LoRa
- Confirmación de ACKs hacia el collar
- Envío y recepción de coordenadas de geocerca
- Procesamiento para estimar parámetros del ADR
- Registro de paquetes y conteo de transmisiones

La Figura 4.11 muestra la arquitectura general del módulo base y su interacción con la interfaz gráfica.

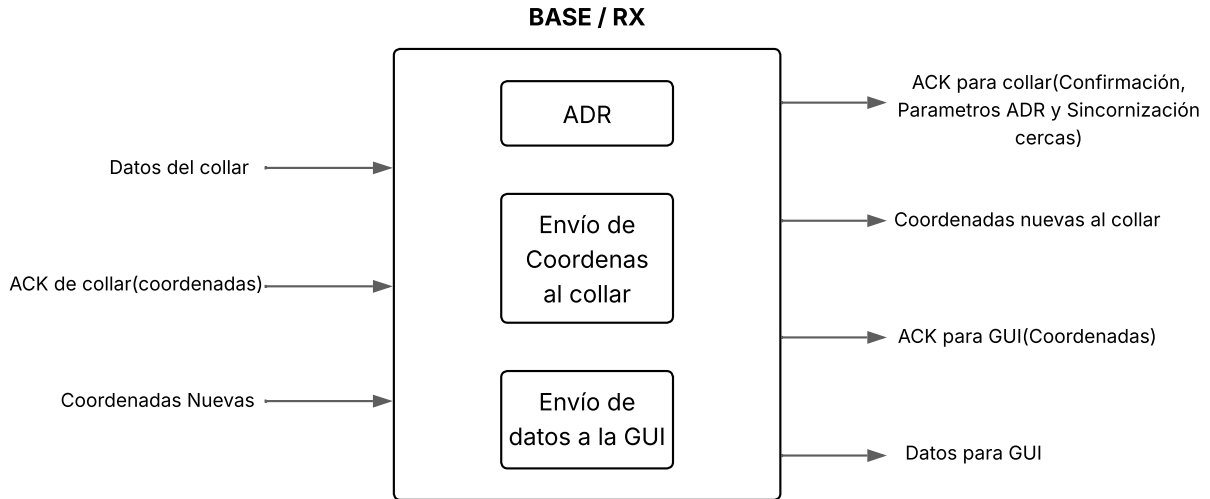


Figura 4.11: Diagrama de bloques del módulo base (Rx).

Recepción de paquetes LoRa

La recepción de paquetes LoRa en el módulo base es un proceso crítico para garantizar la integridad y confiabilidad de la información transmitida por los collares inteligentes. El microcontrolador encargado de controlar la recepción se mantiene en **modo escucha permanente**, capturando los paquetes enviados por cada collar y procesando sus contenidos en tiempo real.

Cada paquete transmitido contiene información estructurada que incluye:

- Identificador único del paquete.
- Datos(temperatura, GPS, batería, etc.).
- Checksum.
- Header.

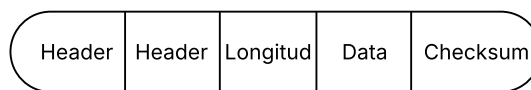


Figura 4.12: Estructura en bytes del paquete LoRa.

El flujo de recepción se realiza de la siguiente manera:

1. **Detección del preámbulo:** El módulo LoRa identifica el inicio de un paquete válido.
2. **Recepción de datos:** Se almacena temporalmente el contenido completo del paquete en buffers internos del microcontrolador.
3. **Validación de integridad:** Se verifica la coherencia del paquete mediante *checksum* o código de verificación, asegurando que los datos no hayan sido corrompidos durante la transmisión.
4. **Envío a procesamiento:** Una vez validado, el paquete se envía al módulo de control interno para su registro, análisis, generación de ACKs y envío a la interfaz.

El microcontrolador implementa mecanismos de tolerancia a errores, como la retransmisión automática en caso de paquetes corruptos o perdidos, lo que garantiza que el collar reciban confirmación y que la interfaz gráfica reciba información precisa y confiable.

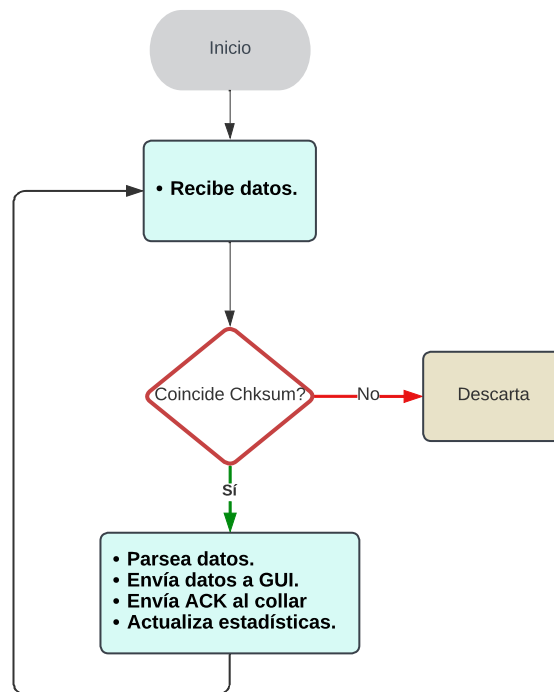


Figura 4.13: Proceso de recepción de datos LoRa en el módulo base.

Confirmación de ACKs hacia el collar

Una vez que el módulo base recibe y valida correctamente un paquete LoRa enviado por el collar, se genera un **ACK (Acknowledgment)** que sirve para confirmar la recepción exitosa de la información. Este mecanismo es fundamental para mantener la integridad de la comunicación y garantizar que el collar pueda continuar operando sin pérdidas de datos importantes.

El proceso de confirmación se realiza de la siguiente manera:

1. **Generación del ACK:** El microcontrolador del módulo base crea un paquete de respuesta que incluye el ID del collar y un código de confirmación asociado al paquete recibido.
2. **Transmisión del ACK:** El paquete de confirmación se envía inmediatamente al collar correspondiente utilizando el mismo canal LoRa.
3. **Recepción por el collar:** El collar recibe el ACK y verifica si corresponde al último paquete enviado. Si la confirmación es correcta, el collar puede proceder con la siguiente transmisión o entrar en modo de ahorro de energía.
4. **Manejo de errores:** Si el collar no recibe el ACK en un tiempo predeterminado, se realiza una retransmisión del paquete original, asegurando que la información no se pierda, incluso en condiciones de señal débil o interferencia.

Este mecanismo permite un control bidireccional confiable, asegurando que los datos de sensores, coordenadas y batería lleguen de manera segura a la base, y que el collar actúe de forma coordinada con el sistema central.

Envío y recepción de coordenadas de geocerca

El módulo base no solo se encarga de recibir datos del collar, sino también de gestionar las **geocercas** que delimitan las áreas de movimiento permitidas para los animales. Para ello, implementa un sistema de envío y recepción de coordenadas que asegura que el collar

conozca los límites establecidos.

El proceso se desarrolla de la siguiente manera:

1. **Definición de geocerca:** El usuario, a través de la interfaz gráfica, define un polígono de geocerca en el mapa. Estas coordenadas son enviadas al módulo base por medio de comunicación serial.
2. **Paquete de transmisión:** El módulo base empaqueta las coordenadas en un mensaje LoRa estructurado, que incluye el ID, data, Checksum.. etc (Figura 4.12), el mismo formato que utiliza el collar para comunicarse con la base.
3. **Sincronización con el collar:** El sistema retiene el paquete de transmisión esperando recibir un paquete de parte del collar para en ese ACK de vuelta notificar por medio de una bandera que existe una geocerca pendiente, de este modo colocar el collar en modo recepción y así proceder con el envío de las coordenadas.
4. **Envío al collar:** El paquete de geocerca se transmite hacia el collar. Para garantizar la entrega, se utiliza un mecanismo de ACK, de modo que la base confirme que el collar recibió y procesó correctamente las coordenadas. En caso de no recibir ACK, se reintenta con el mismo protocolo hasta asegurarse que el collar recibió las coordenadas de la geocerca.
5. **Actualización y validación:** Una vez que el collar recibe las coordenadas y las valida, las almacena en su memoria y activa la monitorización de geocerca. Si ocurre un movimiento fuera del área definida, la interfaz puede generar alertas cuando el collar envía las coordenadas al módulo base.
6. **Gestión de cambios:** Si el usuario modifica la geocerca desde la interfaz, el módulo base vuelve a enviar las coordenadas actualizadas y espera la confirmación de recepción del collar, asegurando que la información siempre esté sincronizada.

Este flujo garantiza un control dinámico y seguro del movimiento de los animales, permitiendo reaccionar ante cualquier violación de los límites geográficos definidos por el usuario ganadero.

Para mostrar este proceso con una mayor claridad en la siguiente Figura 4.14 se tiene un diagrama de flujo de la base en cuanto al manejo que dedica al procesamiento de cercas, tanto el recibir la información desde la interfaz así como la distribución de la información al collar.

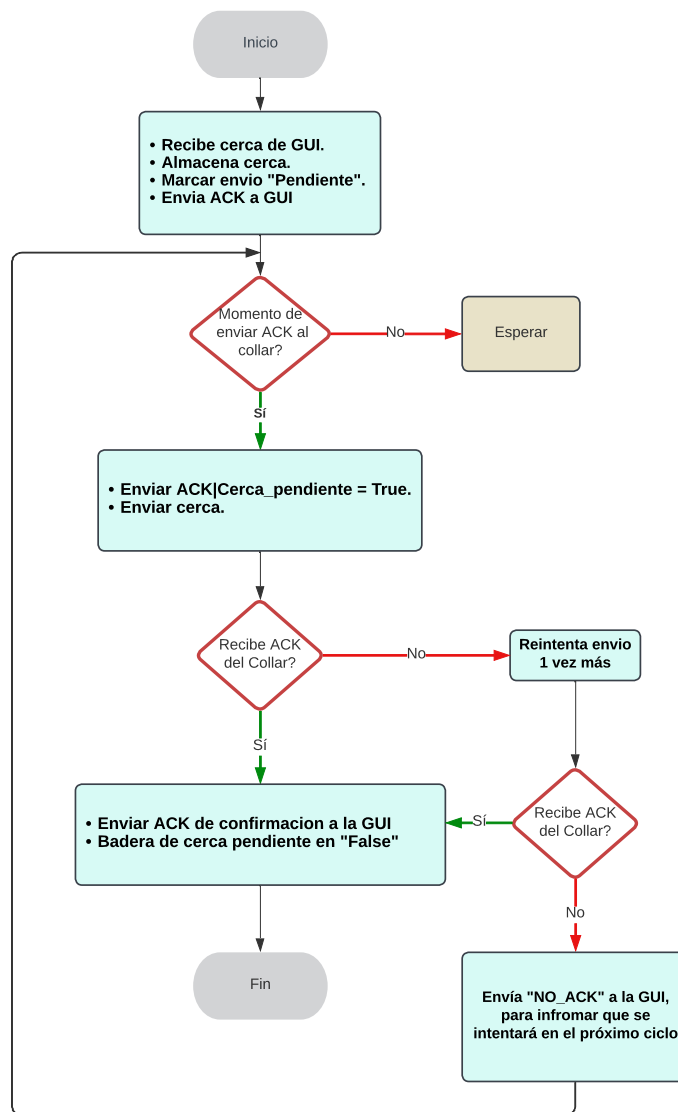


Figura 4.14: Proceso de gestión de geocercas vía módulo base.

Registro de paquetes y conteo de transmisiones

El módulo base incluye un sistema de **registro y monitoreo de paquetes** que permite llevar un control preciso sobre todas las comunicaciones entre el collar y la base. Esto es fundamental para garantizar la integridad de los datos y monitorizar el rendimiento de la red LoRa.

El funcionamiento se describe a continuación:

1. **Registro de recepción:** Cada vez que la base recibe un paquete del collar, se almacena un registro con la siguiente información:
 - ID de paquete
 - Estado de validación del paquete (checksum)
 - Datos
2. **Conteo de transmisiones:** Para evaluar la eficiencia de la comunicación y la salud del enlace, el sistema mantiene un contador de transmisiones en el collar. Esto permite identificar posibles pérdidas de paquetes, duplicados y recibidos correctamente, eso a causa de interferencias o fallos.
3. **Historial y análisis:** Los datos registrados se pueden consultar desde la pantalla OLED de la base con excepción de los datos, con esta información se puede generar reportes de eficiencia, con:
 - Número total de paquetes recibidos
 - Paquetes perdidos o duplicados
 - Calidad del enlace

Este mecanismo de registro y conteo de transmisiones no solo mejora la confiabilidad del sistema, sino que también proporciona herramientas para el diagnóstico de fallas y optimización de la red con el collar.

Procesamiento para estimar parámetros del ADR

El módulo base incluye una sección dedicada al procesamiento de la calidad del enlace para los cálculos de parámetros del ADR para la comunicación. Se base en reglas con rangos de **SNR** y **RSSI** para asignar un valor a cada variable. Estos rangos de decisión fueron basados en teoría, pero fueron ajustados empíricamente para perfeccionar cada rango.

Los 4 parámetros que estima a partir de la calidad del enlace son:

- Spreading factor (SF)
- Bandwidth (BW)
- Coding Rate (CR)
- Potencia de transmisión (Ptx)

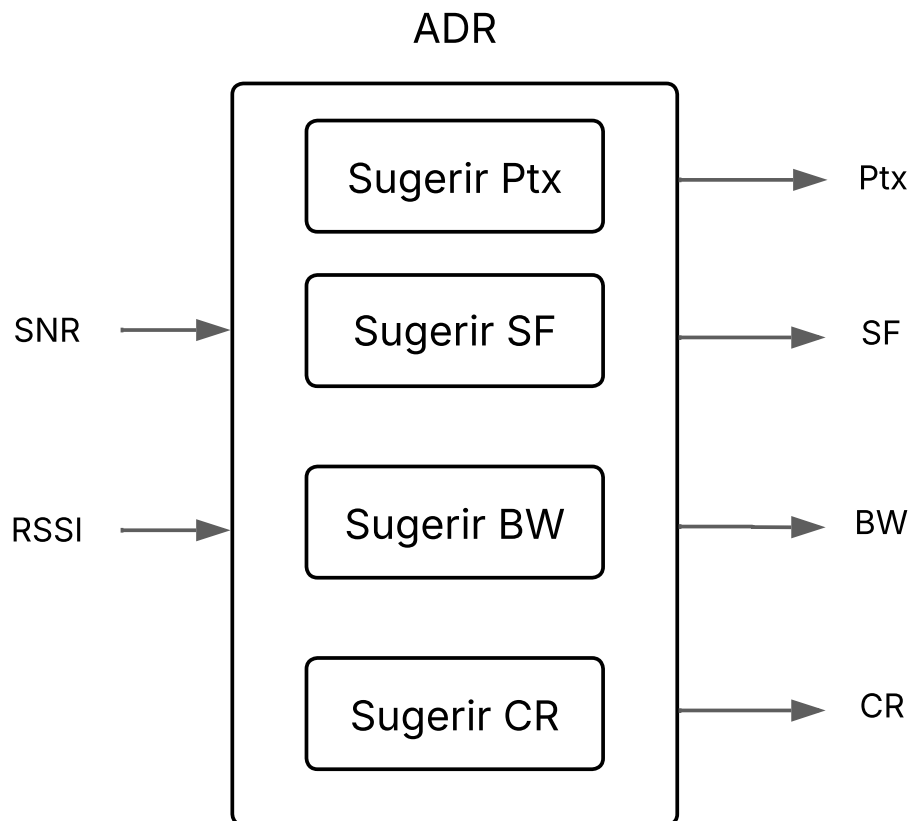


Figura 4.15: Diagrama de bloques de parámetros ADR.

4.6. Diseño de la interfaz gráfica (PC)

La **interfaz gráfica (GUI)** se desarrolla con *python*, como el punto central de interacción entre el usuario y el sistema, permitiendo visualizar la información recibida desde el collar a través del módulo base, así como enviar configuraciones y geocercas de manera sencilla e intuitiva. Esta GUI se diseñó con el objetivo de facilitar la monitorización en tiempo real y la gestión eficiente del dispositivo, ofreciendo indicadores visuales claros y controles directos para cada función del sistema.

Las funciones principales de la interfaz gráfica incluyen:

- Visualización de la ubicación de los animales en el mapa, con la opción de mostrar la geocerca activa.
- Monitoreo de datos como temperatura, estado de batería y señal LoRa.
- Alertas generadas por la violación de geocercas.
- Envío de geocercas y configuraciones al collar mediante la base.
- Registro de historial de paquetes y transmisiones, permitiendo el análisis de rendimiento y diagnóstico de fallas.
- Cuadros de información para mostrar mensajes críticos al usuario como confirmaciones o fallas de comunicación.

Descripción general

La interfaz gráfica está diseñada para brindar al usuario una visión completa y centralizada de todos los datos del collar dentro del sistema. Se implementó utilizando un entorno de desarrollo que permite la integración de mapas interactivos, paneles de control y elementos visuales para alertas y notificaciones.

El diseño se enfocó en tres principios clave:

1. **Claridad visual:** Todos los datos importantes, como ubicación GPS, estado de batería y temperatura, se muestran de manera intuitiva, evitando sobrecargar la pantalla con información innecesaria.

2. **Interactividad:** El usuario puede visualizar su historial de datos en un Excel generado automáticamente y configurar geocercas directamente desde la interfaz.
3. **Gestión centralizada:** La GUI actúa como el centro de comunicación con el módulo base, permitiendo enviar comandos, geocercas y recibir confirmaciones de manera confiable.

Además, la interfaz cuenta con un **registro de eventos y alertas**, que permite al usuario monitorear situaciones críticas, como salidas de geocercas o fallas de comunicación, facilitando una respuesta rápida y efectiva.

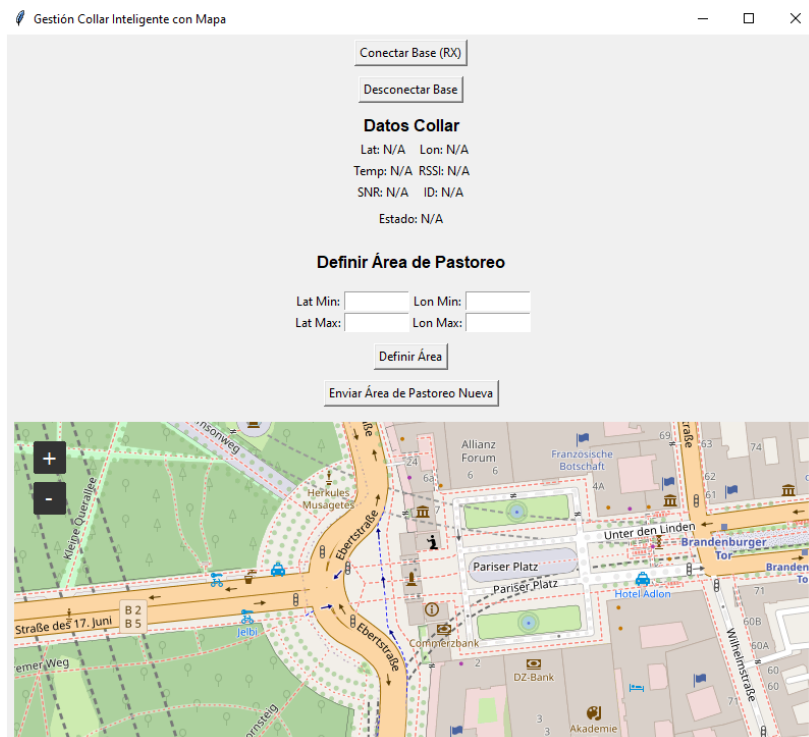


Figura 4.16: Pantalla principal de la interfaz gráfica.

Comunicación serial con la base

La comunicación entre la interfaz gráfica y el módulo base se realiza mediante un enlace serial bidireccional, que permite tanto el envío de comandos como la recepción de información en tiempo real. Este enlace utiliza un protocolo simple de mensajes estructurados,

es decir una llave de identidad, asegurando que cada paquete de datos enviado o recibido pueda ser interpretado de manera confiable por ambas partes.

Las funciones principales de esta comunicación son:

1. **Transmisión de geocercas:** La interfaz envía coordenadas y parámetros de geocercas al módulo base, que posteriormente las transmite a los collares.
2. **Recepción de datos de sensores:** La interfaz recibe información periódica de temperatura, ubicación y estado de batería del collar, permitiendo su visualización en tiempo real.
3. **Confirmación de ACKs:** Cada paquete enviado desde la interfaz requiere una confirmación por parte del módulo base para garantizar que los comandos fueron recibidos correctamente, así como la confirmación del collar al procesar y aplicar geocercas correctamente.
4. **Gestión de errores:** En caso de pérdida de paquetes o errores de comunicación, la interfaz implementa alertas visuales para notificar al usuario sobre la situación.

Este método de comunicación vía serial USB permite una comunicación confiable y veloz entre la estación base y la interfaz para el usuario.

Visualización de datos (mapa, estado, temperatura)

La interfaz gráfica está diseñada para proporcionar al usuario una visión completa y en tiempo real del estado del collar y su interacción con las geocercas definidas. Para lograrlo, se implementan tres módulos principales de visualización:

1. **Mapa de ubicación de collar:** Utilizando un mapa interactivo, la interfaz muestra la posición actual del collar. Las coordenadas recibidas desde el módulo base se traducen en marcadores que se actualizan periódicamente, permitiendo identificar rápidamente la ubicación de los animales monitoreados.
2. **Indicadores de estado:** La interfaz posee indicadores visuales que muestran su estado operativo, incluyendo nivel de batería, señal de comunicación y estado de

sensores. Esto permite al usuario detectar anomalías de manera inmediata, como que se encuentre fuera de servicio o con batería baja.

Envío de geocercas y validación de ACKs en GUI

El módulo de la interfaz gráfica permite al usuario definir y enviar geocercas al sistema del collar a través del módulo base. Este proceso garantiza que el collar tenga un área de operación previamente establecida y que se generen alertas si un animal sale de los límites definidos.

1. **Definición de geocercas:** El usuario puede crear geocercas de forma interactiva, visualizándose sobre el mapa, especificando 2 puntos de coordenadas diagonales de un área cuadrada. La interfaz traduce estas configuraciones en paquetes de datos compatibles con el protocolo de comunicación LoRa del sistema.
2. **Envío de geocercas:** Una vez definidas, las geocercas se envían al módulo base mediante comunicación serial. El módulo base se encarga de transmitir los paquetes hacia los collares correspondientes. Cada paquete incluye un identificador único y la información de la geocerca.
3. **Validación de ACKs:** Para garantizar que la información fue recibida correctamente, los collares responden con un ACK (*acknowledgment*). La interfaz monitorea estos ACKs y muestra al usuario el estado de cada envío. En caso de no recibir confirmación, el sistema puede reintentar el envío automáticamente y alertar al usuario.

Este mecanismo asegura que la geocerca definida sea implementada de manera confiable en cada collar, minimizando errores de transmisión y optimizando la seguridad del monitoreo animal.

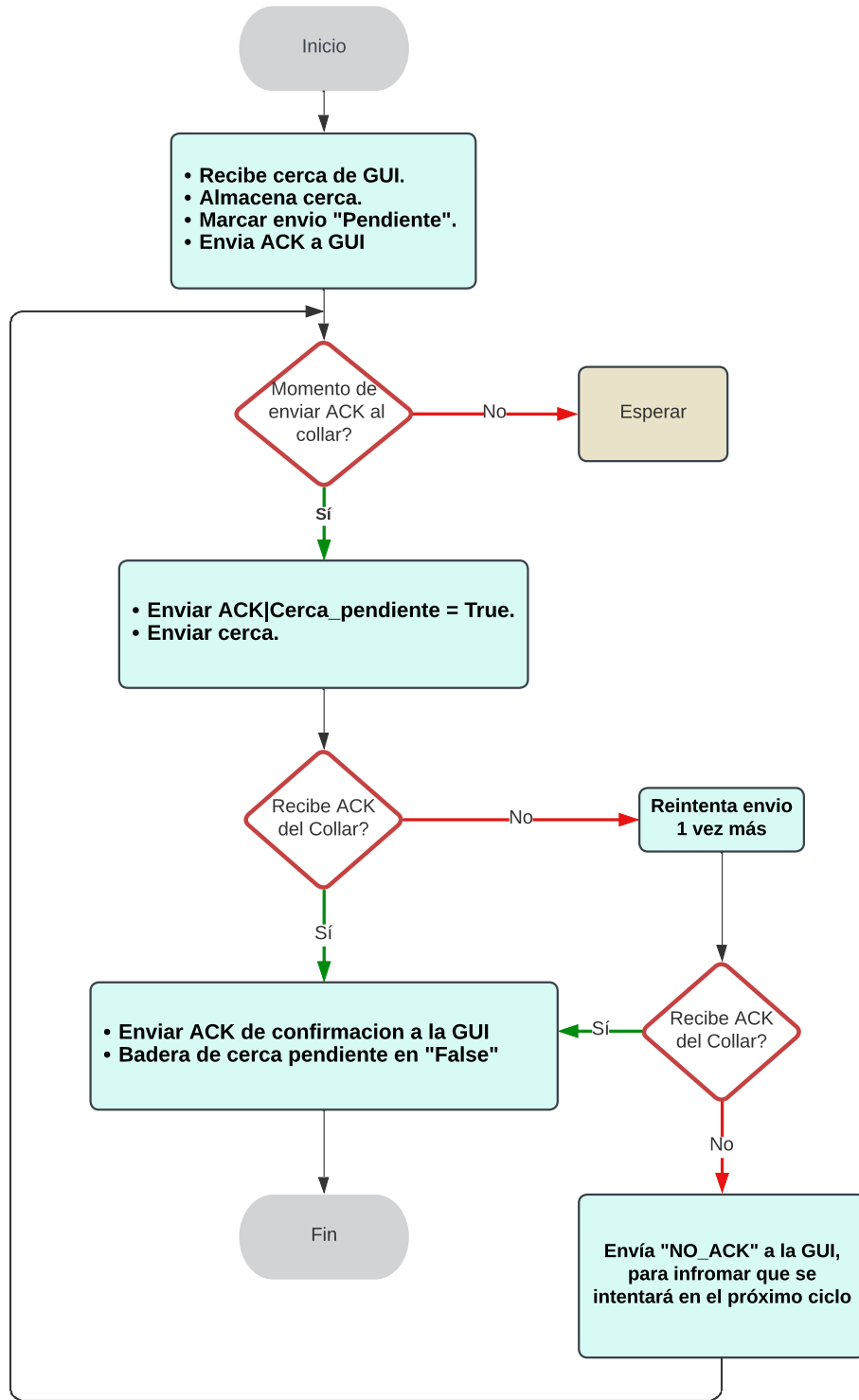


Figura 4.17: Lógica de envío de geocercas y validación de ACKs en la base.

4.7. Integración completa del sistema

La integración completa del sistema consiste en combinar el collar inteligente, el módulo base y la interfaz gráfica en un flujo operativo coherente y confiable. Esto permite que todos los componentes trabajen de manera sincronizada, garantizando la adquisición de datos, transmisión de información, control de geocercas y monitoreo en tiempo real.

La integración se enfoca en tres aspectos principales:

1. **Comunicación entre los módulos:** Asegura que los collares, el módulo base y la interfaz gráfica intercambien información de manera eficiente y sin pérdida de datos. Se implementan protocolos de transmisión y confirmación (ACKs) para mantener la sincronización y confiabilidad de los datos.
2. **Validación de la información:** Los datos recibidos por el módulo base son verificados y procesados antes de ser enviados a la interfaz gráfica. Esto incluye comprobaciones de integridad mediante Checksum, filtrado de errores y registro de paquetes, garantizando que la información mostrada al usuario sea precisa y consistente.

Comunicación collar–base–interfaz

El flujo de comunicación se establece de manera jerárquica y bidireccional:

1. **Collar → Base:** El collar transmite periódicamente información de ubicación (GPS), batería y temperatura. Cada paquete contiene un identificador único y datos del estado del collar.
2. **Base → Interfaz:** El módulo base recibe los datos del collar y los retransmite a la interfaz gráfica a través de comunicación serial. La interfaz registra la información y la muestra en tiempo real, permitiendo al usuario monitorear los múltiples datos simultáneamente.
3. **Interfaz → Base → Collar:** Cuando el usuario define nuevas geocercas o solicita reconfiguración del collar, la interfaz envía estos datos al módulo base, que los trans-

mite al collar. Se implementa la validación mediante ACKs para asegurar la correcta recepción.

Este flujo garantiza una transmisión confiable y segura entre todos los componentes del sistema, reduciendo pérdidas de información y errores de sincronización.

Estrategias de sincronización y ahorro energético

El collar inteligente incorpora estrategias para maximizar la duración de la batería, incluyendo:

- Modos de sueño y despertar según intervalos de transmisión.
- Ajuste automático de potencia de transmisión en función de la proximidad al módulo base (Adaptive Data Rate).
- Reintentos de envío solo cuando sea necesario, evitando consumo innecesario.

Estas estrategias aseguran que el collar pueda operar de manera autónoma durante períodos prolongados, sin comprometer la precisión del monitoreo y la confiabilidad de la comunicación.



Figura 4.18: Ilustración de técnicas de ahorro energético empleadas.

CAPÍTULO 5

Pruebas y Resultados

5.1. Metodología de pruebas

Escenarios de prueba en campo

Las pruebas de campo se llevaron a cabo en dos ubicaciones principales. La primera correspondió a la zona de Túfares, Puriscal, San José, Costa Rica, un entorno rural seleccionado para simular condiciones reales de operación. Esta área se caracteriza por su topografía irregular, con terrenos quebradizos, abundante cobertura arbórea y diversos obstáculos naturales que pueden afectar la propagación de la señal.

La segunda ubicación fue un entorno urbano en la provincia de Cartago, Costa Rica. Esta ciudad presenta una alta densidad poblacional, gran concentración de edificaciones, múltiples fuentes de interferencia y un elevado número de señales coexistentes, condiciones óptimas para evaluar el desempeño del sistema en escenarios con congestión e interferencias

electromagnéticas.

Pruebas de enlace y robustez de comunicación

Para asegurar la efectividad del sistema, se realizan pruebas de enlace que evalúan:

- Alcance de la comunicación LoRa bajo condiciones reales de terreno.
- Tasa de pérdida de paquetes y confirmación mediante ACKs.
- Respuesta del sistema ante interferencias externas y obstáculos físicos.
- Capacidad de la interfaz para mostrar información sin retrasos significativos.

Estas pruebas permiten identificar posibles puntos débiles y ajustar rangos que manipulan los parámetros del ADR.

5.2. Resultados del sistema de comunicación LoRa

Alcance y estabilidad de enlace

Durante las pruebas realizadas en la zona rural, el dispositivo alcanzó un rango efectivo de comunicación de aproximadamente 450 m, sin requerir infraestructura adicional más allá de los módulos empleados. En este recorrido, el RSSI presentó valores comprendidos entre -37 dBm y $-98,6$ dBm, tal como se muestra en el gráfico correspondiente de la figura 5.2.

Al inicio del trayecto, la señal registró niveles óptimos cercanos a -37 dBm, indicando una comunicación muy estable. Conforme aumentó la distancia y se añadieron obstáculos naturales propios de la topografía rural, el RSSI disminuyó gradualmente hasta aproximadamente -98 dBm, manteniéndose en ese rango mientras el transmisor permaneció alejado. Posteriormente, al acercarse nuevamente al receptor, se observó una mejora progresiva del nivel de señal, validando el comportamiento esperado para enlaces LoRa.

Es importante destacar que estos valores se encuentran dentro del rango operativo esperado para tecnología LoRa, cuya sensibilidad típica límite puede alcanzar entre -118

dBm y -120 dBm, dependiendo del factor de dispersión (SF). Por lo tanto, un RSSI mínimo de -98 dBm mantiene un margen significativo respecto al umbral de sensibilidad, confirmando que la comunicación se mantuvo en condiciones adecuadas y dentro de los parámetros establecidos por el fabricante. En esta distancia se tuvo una tasa de entrega bastante elevada por encima del 95 % como se evidencia en la sección posterior, mostrando un alto desempeño en cuanto a estabilidad y alcance para su aplicación.

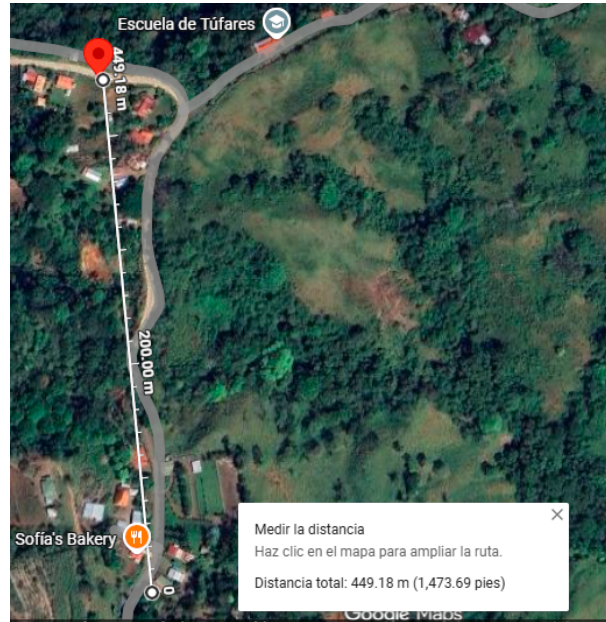


Figura 5.1: Distancia máxima en ambiente rural sin infraestructura extra y línea vista obstruida por obstáculos como árboles y casas.

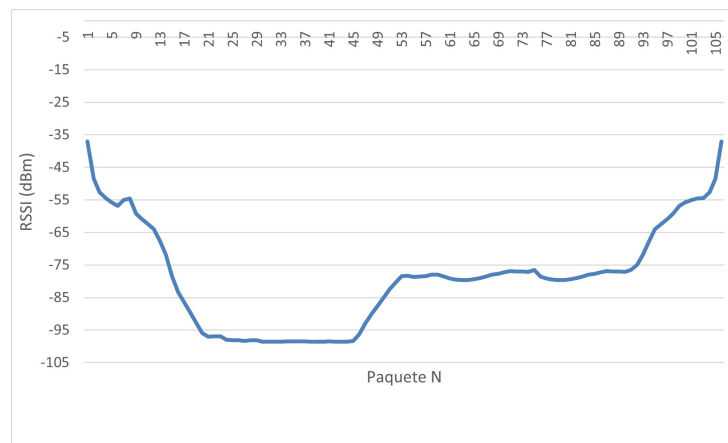


Figura 5.2: Gráfico de RSSI durante transmisión de datos en la ruta de la imagen 5.1.

Eficiencia de los reintentos y ACKs

Para analizar adecuadamente el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación, fue necesario evaluar no solo la comunicación en escenarios favorables, sino también su desempeño en situaciones extremas o de borde. Esto permite determinar la capacidad del dispositivo para manejar pérdidas temporales de enlace, gestionar retransmisiones y validar la eficacia de los mecanismos de *ACK* implementados.

Con este propósito, se diseñó una prueba controlada en la que el transmisor recorrió una trayectoria que inicia en condiciones óptimas de proximidad y avanza progresivamente hacia un punto en el que la comunicación se degrada hasta perderse por completo. Posteriormente, el trayecto continúa de regreso hacia la estación base, recorrido ilustrado en la figura 5.1 y 5.2, permitiendo observar la recuperación del enlace y la respuesta del sistema al restablecerse la comunicación. Esta metodología, fue seleccionada para replicar un ciclo realista de operación en entornos rurales, donde los animales pueden desplazarse fuera del alcance y luego retornar a zonas de cobertura.

Evaluar el sistema bajo este tipo de escenarios extremos permite cuantificar de forma precisa la eficiencia de los reintentos de transmisión, la detección de pérdida de paquetes y la confiabilidad de los *ACKs*. De esta manera, los resultados obtenidos no solo reflejan el desempeño en condiciones ideales, sino también la robustez del sistema ante eventos de distancia, obstrucción e interferencia, aportando una base sólida para validar su funcionamiento en campo.

Categoría	Valor
Total de enviados	105
Recibidos	102
Duplicados	0
Perdidos	3
Media de intentos de re-envío	0,9134615

Cuadro 5.1: Resumen de métricas de transmisión de paquetes de datos de la figura 4.12

Teniendo esto en cuenta se muestra la siguiente tasa de datos:

$$\text{Tasa de mensajes recibidos correctamente} = \frac{\text{Recibidos}}{\text{Total}} = \frac{102}{105} \approx 97,14\%$$

$$\text{Tasa de mensajes duplicados} = \frac{\text{Duplicados}}{\text{Total}} = \frac{0}{105} \approx 0\%$$

$$\text{Tasa de mensajes perdidos} = \frac{\text{Perdidos}}{\text{Total}} = \frac{3}{105} \approx 2,86\%$$

Donde, mediante este análisis, se logra evidenciar el desempeño que tiene el enlace de comunicación LoRa en la ruta específica mostrada en la figura 5.1, con una tasa de éxito de entrega del 97.14% donde estos 3 mensajes perdidos se deben a un extremo en donde la comunicación fue interrumpida por la distancia entre los módulos y su gran cantidad de obstáculos.

Por lo que, para evaluar el desempeño real del sistema se amplía el espacio muestral donde se incluyen pruebas realizadas en el entorno rural con variaciones de distancia, obstáculos y realizadas en días diferentes, para así evitar outliers o casos ideales, donde se registra lo siguiente.

Muestra	Recibidos	Perdidos	Duplicados
1	535	1	1
2	2576	3	2
3	119	0	0
4	102	3	0

Cuadro 5.2: Resumen de paquetes por muestra

Muestra	Tasa de duplicados (%)	Tasa de perdidos (%)	Tasa de recibidos (%)
1	0.1869	0.1869	99.8131
2	0.0776	0.1165	99.8835
3	0	0	100
4	0	2.9412	97.0588

Cuadro 5.3: Tasas de duplicados, perdidos y recibidos para cada muestra de la tabla 5.2.

Por lo que, con esta información del cuadro 5.3 se genera un promedio general de la transmisión de datos del sistema reflejado en la siguiente tabla.

	Tasa de duplicados (%)	Tasa de perdidos (%)	Tasa de recibidos (%)
Promedio de pruebas	0.0661	0.8111	99.1889

Cuadro 5.4: Promedio general de tasas de transmisión

Los resultados obtenidos en la tabla 5.4 muestran un rendimiento sólido del sistema de comunicación LoRa durante las pruebas realizadas. La tasa promedio de mensajes recibidos es de 99.19 %, lo cual indica que el enlace mantiene una elevada confiabilidad en la entrega de paquetes incluso bajo condiciones de pruebas variadas. Este valor confirma que el sistema es capaz de sostener una comunicación continua y estable, adecuada para aplicaciones de monitoreo remoto donde la pérdida de información debe mantenerse al mínimo.

La tasa de mensajes perdidos, con un valor promedio de apenas 0.81 %, sugiere que la mayoría de los paquetes que inicialmente no alcanzaron la estación base fueron recuperados mediante los reintentos programados. Es decir, el sistema detectó la ausencia de ACK y reenvió el paquete para lograr la entrega, reduciendo significativamente el impacto de fallos momentáneos del canal de comunicación. Este resultado evidencia que la estrategia de reenvío es eficiente y que no se generan ciclos de retransmisión excesivos que comprometan el consumo energético del collar.

De manera complementaria, la baja tasa de duplicados (0.066 %) demuestra que el esquema de numeración de paquetes y filtrado en la estación base está funcionando correctamente. A pesar de que algunos reintentos pueden generar la recepción repetida del mismo paquete, los mecanismos del sistema impiden que estos duplicados afecten el procesamiento de datos o saturen la interfaz. Esto confirma que la combinación entre ACKs y validación de secuencias minimiza la redundancia y mantiene la integridad de la información.

En conjunto, los tres indicadores evidencian que el sistema no solo transmite con alta fiabilidad, sino que los reintentos y el uso de ACKs están optimizados, actuando únicamente cuando es necesario y recuperando eficazmente los paquetes que podrían haberse

perdido. Esta robustez es esencial en aplicaciones de monitoreo animal, donde los dispositivos operan en movimiento, pueden enfrentarse a obstrucciones y requieren un consumo energético controlado para maximizar la autonomía del collar.

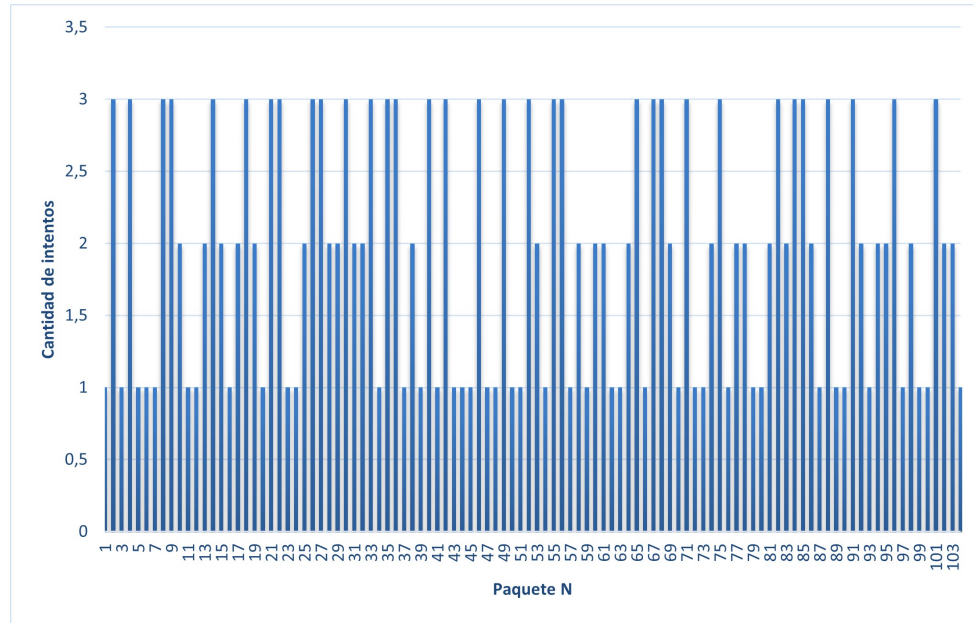


Figura 5.3: Re-intentos de envío causados por falta de confirmación implementados con ACKs.

En la figura 5.3 se observa la cantidad de reintentos por paquete realizados por el collar transmisor (Tx), gracias al uso del mecanismo de confirmación mediante ACKs. Al contrastar esta información con los resultados de la tabla 4.12, donde se obtuvo una alta tasa de entrega del 97.14%, se evidencia que el primer intento de envío no siempre es suficiente para lograr una recepción exitosa.

Este comportamiento puede explicarse por diversas causas, como la presencia de interferencias que corrompen los datos y obligan a descartar el mensaje, o bien pérdidas completas del paquete antes de llegar a la estación base. Debido a estas condiciones, en varias ocasiones se generan dos o incluso tres reenvíos, lo cual asegura la correcta transmisión de la información reflejada en los resultados de la tabla.

Sin embargo, mantener un número fijo de reintentos sin el uso de ACKs no sería lo más adecuado debido al costo energético ya cada envío produce un gasto energético en la batería, de esta manera se evita retransmitir información innecesariamente cuando en el

primer intento se recibió el paquete correctamente. En ocasiones el primer envío (envío 1) es suficiente para una adecuada recepción, esto se puede saber al observar la figura 5.3 con ausencia de un segundo reintento de envío en algunos paquetes, es decir, la base confirmó la entrega del paquete mediante ACK por lo que no se produjo un nuevo reenvío, de aquí la importancia y eficiencia del uso combinado de reintentos con ACKs donde se asegura la trasmisión de información de punto a punto sin necesidad de un gasto energético innecesario.

5.3. Resultados del ADR

Cambios dinámicos de los parámetros

La sugerencia de parámetros ADR se basan en rangos de SNR y RSSI, es decir la calidad del enlace, de la siguiente manera.

Rango	SF sugerido	Interpretación
Según SNR		
$SNR \geq 10$	SF7	Canal excelente, máxima velocidad
$7 \leq SNR < 10$	SF8	Canal estable
$4 \leq SNR < 7$	SF9	Calidad media
$1 \leq SNR < 4$	SF10	Señal débil
$0 \leq SNR < 1$	SF11	Señal muy débil
$SNR < 0$	SF12	Señal crítica
Según RSSI		
$RSSI \geq -40$	SF7	Enlace excelente
$-70 \leq RSSI < -40$	SF8	Señal fuerte
$-95 \leq RSSI < -70$	SF9	Señal moderada
$-109 \leq RSSI < -95$	SF10	Señal débil
$-119 \leq RSSI < -109$	SF11	Señal muy débil
$RSSI < -119$	SF12	Señal límite
Resultado final		
$SF = \max(SF_{snr}, SF_{rssi})$	Rango: 7–12	Selección conservadora

Cuadro 5.5: Rangos y sugerencias para el Spreading Factor (SF).

Rango	BW sugerido	Interpretación
Según SNR		
$SNR \geq 12$	500 kHz	Canal excelente, máxima velocidad
$5 \leq SNR < 12$	250 kHz	Canal estable
$SNR < 5$	125 kHz	Señal débil, mayor sensibilidad
Según RSSI		
$RSSI \geq -40$	500 kHz	Señal muy fuerte
$-80 \leq RSSI < -40$	250 kHz	Señal moderada
$RSSI < -80$	125 kHz	Señal débil
Resultado final	$BW = \min(BW_{snr}, BW_{rssi})$	Selección conservadora

Cuadro 5.6: Rangos y sugerencias para el Bandwidth (BW).

Rango	CR sugerido	Interpretación
Según SNR		
$SNR \geq 10$	4/5 (CR=5)	Buena calidad del canal
$5 \leq SNR < 10$	4/6 (CR=6)	Canal moderado
$0 \leq SNR < 5$	4/7 (CR=7)	Canal pobre
$SNR < 0$	4/8 (CR=8)	Canal crítico, máxima corrección
Según RSSI		
$RSSI \geq -60$	4/5 (CR=5)	Señal fuerte
$-80 \leq RSSI < -60$	4/6 (CR=6)	Señal media
$-105 \leq RSSI < -80$	4/7 (CR=7)	Señal débil
$RSSI < -105$	4/8 (CR=8)	Señal muy débil, FEC máximo
Resultado final	$CR = \max(CR_{snr}, CR_{rssi})$	Mayor robustez

Cuadro 5.7: Rangos y sugerencias para el Coding Rate (CR).

Condición	Ajuste PTX	Interpretación
Según RSSI (objetivo: -70 dBm)		
RSSI \gg -70 dBm	-1 dBm	Enlace excelente, ahorro energético
RSSI \approx -70 dBm	Mantener Ptx	Operación óptima
RSSI \ll -70 dBm	+1 dBm	Señal débil, mejorar enlace
Ajuste adicional según SNR (objetivo: 6 dB)		
SNR $>$ 9 dB	-1 dBm	Canal mejor de lo esperado
SNR $<$ 3 dB	+1 dBm	Canal peor de lo esperado
Rango final permitido	6–20 dBm	Límite de potencia

Cuadro 5.8: Rangos y sugerencias para la potencia de transmisión (Ptx).

Basando en la trayectoria de la figura 5.1 se evidencia la adaptación de los parámetros del ADR (SF, BW, CR y Ptx) en la figura 5.4 y 5.5, debido a cambios en las condiciones del enlace según los rangos de SNR y RSSI mostrados en las anteriores tablas 5.5, 5.6, 5.7, 5.8.

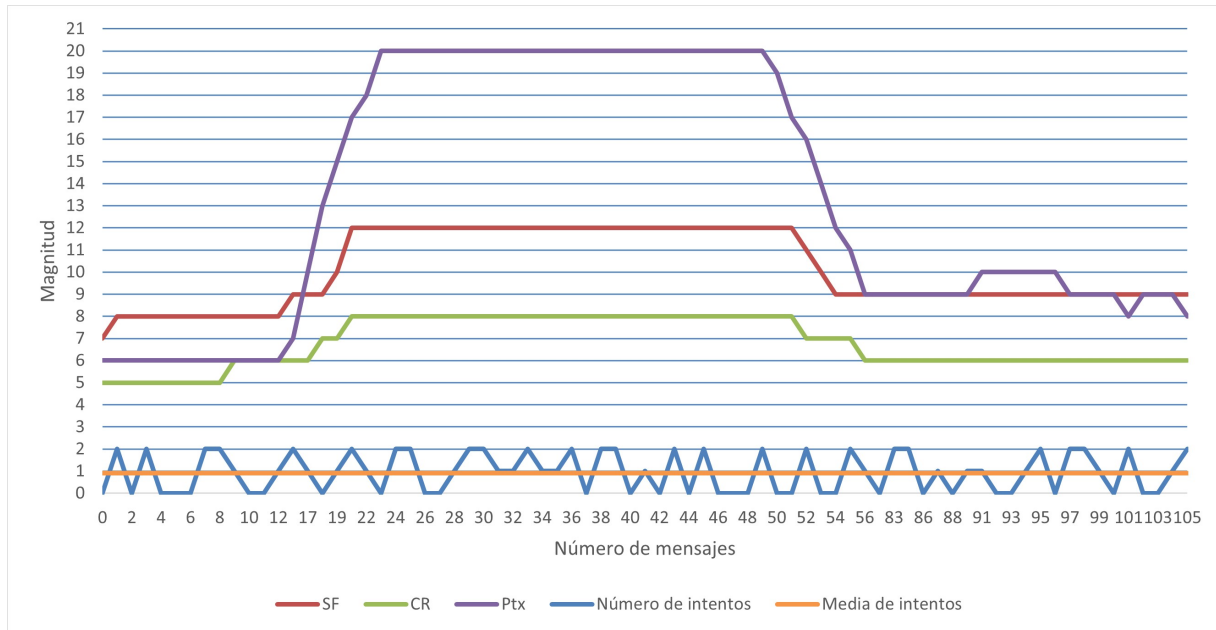


Figura 5.4: Cambio dinámico de 3 de los 4 parámetros del ADR y reintentos de envío.

En el caso de la figura 5.4 se evidencia como al aumentar la distancia entre el collar y la estación base, se da un aumento considerable en la potencia de transmisión hasta

llegar a su punto máximo de saturación para mejorar el alcance de la señal. También se produce un aumento en la tasa de codificación (CR) y factor de dispersión (SF) para evitar distorsión por ruido o interferencia al aumentar distancia y con esto la cantidad de obstáculos y señales a la que es expuesta la onda de información LoRa mientras se propaga por el aire. De igual manera, se logra apreciar en la figura 5.4 cómo al mejorar las condiciones del enlace (más cercanía) de nuevo los parámetros se vuelven a adaptar para transmitir información sin tener un consumo excesivo e innecesario.

Por otro lado, en la figura 5.5 se tiene el cuarto parámetro adaptativo de la comunicación LoRa que es el ancho de banda. En el que se observa un comportamiento contrario a los demás parámetros, en vez de aumentar disminuye. Al estar en condiciones de mala señal (ver tabla 5.6), el collar es capaz de disminuir su ancho de banda para tener una mayor inmunidad al ruido y un mayor alcance de señal. Si se analiza con detenimiento las figuras 5.5 y 5.4 se nota como ambos cambios comienzan a ocurrir en los mismos momentos. Donde baja el ancho de banda se da el aumento del Sf, Ptx y CR, lo cual tiene sentido, ya que el collar se está alejando de la base y como consecuencia empeorando la calidad de señal mostrado en la figura 5.2.



Figura 5.5: Cambio dinámico del ancho de banda de la comunicación.

En el caso del ancho de banda, en la figura 5.5 no se observa un tercer valor posible para este parámetro: 500 kHz. Este ancho de banda únicamente se alcanza bajo condiciones de señal muy óptimas mejorando considerablemente la velocidad de transmisión de datos. Aunque en algunas pruebas el sistema logró adaptarse a dicho valor, las interferencias presentes en el canal de transmisión dificultan su aparición, por lo que resulta poco común utilizarlo si se busca garantizar una recepción de información continua y confiable.

Estos 4 parámetros se adaptan según los niveles promedio de RSSI y SNR presentes en la recepción de los últimos 8 paquetes para evitar cambios rápidos por ruido en un instante en específico. Por esta razón el ADR adapta conforme aumenta o disminuye la distancia entre el collar y la estación base (calidad de enlace). De esta manera, se logra mantener una transmisión confiable sin sacrificar energía extra necesaria cuando las condiciones del enlace no requieren parámetros exigentes para proteger los paquetes del ruido e interferencia.

5.4. Resultados del GPS y precisión de geocercas

Exactitud en detección de posición

Para evidenciar la exactitud del GPS se realizaron distintas pruebas. Sin embargo, para evidenciar de manera clara se escogieron 3 capturas juntas realizadas a la interfaz en momentos diferentes para comparar el punto GPS reportado y sus variaciones (el mismo collar sin variar su ubicación real). En la figura 5.6 se logra apreciar cómo el pin en el mapa se mantiene de forma exacta sin variar, justo al límite exterior de la cerca definida por el usuario en cada una de sus 3 capturas en paquetes diferentes (ID). Por otra parte, también se aprecian las coordenadas numéricas en forma de longitud y latitud, donde se logran observar pequeñas variaciones en sus decimales más alejados de la unidad (sexto y quinto decimal) lo que representa inexactitud menor de dos metros según la tabla 5.9, lo cual las vuelve insignificantes según el objetivo requerido por la lechería. Esto da como resultado una exactitud aceptable con respecto a las restricciones de la lechería del TEC San Carlos, con menos de 3 metros de margen de error en condiciones de buena señal a satélites.

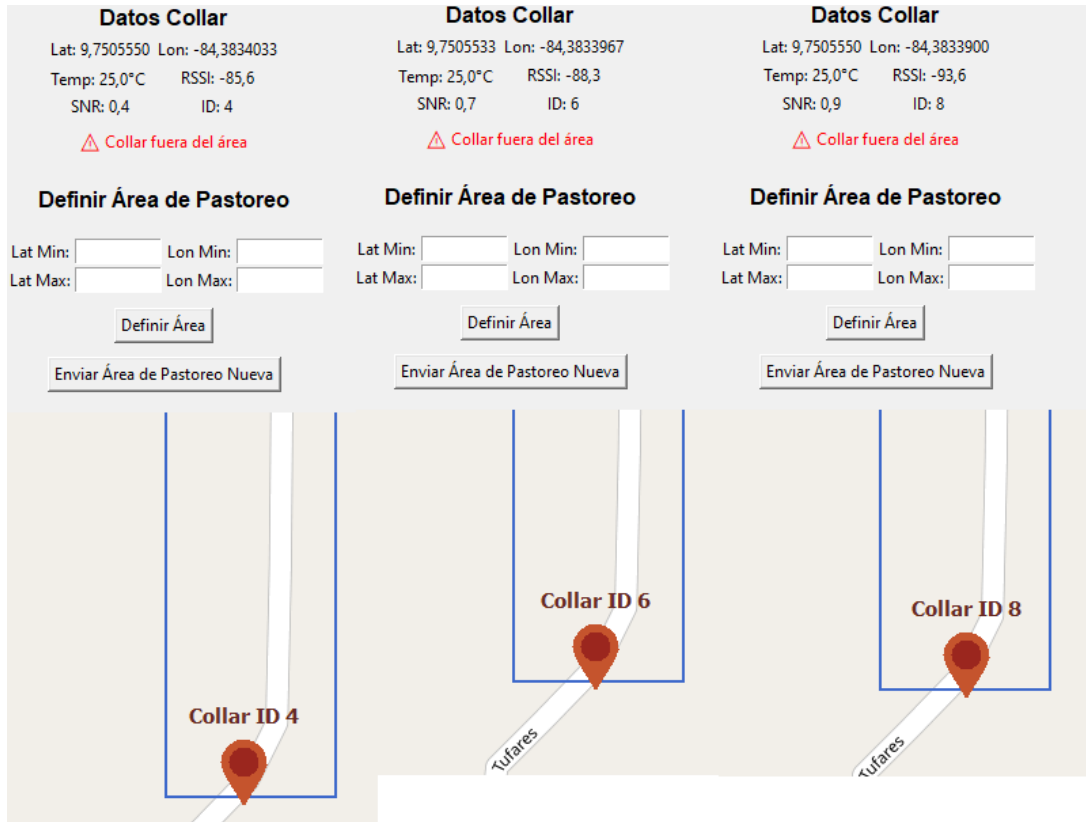


Figura 5.6: Comparación de 3 envíos distintos de coordenadas gps.

Cambio decimal	Latitud (m)	Longitud a 10°N (m)
0.1°	11 113	10 960
0.01°	1 111.3	1 096
0.001°	111.13	109.6
0.0001°	11.113	10.96
0.00001°	1.1113	1.096
0.000001°	0.11113	0.1096

Cuadro 5.9: Equivalencia entre variación en grados decimales y distancia aproximada en la superficie terrestre en latitud 10°N (aproximación a la zona de Costa Rica) [46].

Sin embargo, es importante notar que la exactitud del GPS es así de efectiva siempre y cuando las condiciones lo permitan, es decir, que el collar se encuentre en condiciones con vista al cielo para así acceder a la señal de los satélites. Se realizaron pruebas bajo techos de casas (Cartago, Costa Rica), donde la señal de los satélites era mucho menor y se reportó una pérdida de exactitud del GPS de alrededor 8 metros en el peor de los

casos registrados, sin embargo, no es el lugar de aplicación real del collar, por lo que esta inexactitud en este tipo de ambientes no resulta relevante; solo se realizaron pruebas para tratar de abarcar distintos escenarios de funcionamiento del prototipo.

Detección dentro/fuera del área definida

En el caso de la detección de eventos asociados a cercas virtuales, se obtuvo un desempeño satisfactorio en la generación de alertas por cruce de límite. Esto se evidencia en las figuras 5.7 y 5.8, donde se muestran correctamente las alertas tanto fuera como dentro de la cerca, respectivamente. Debido a que esta funcionalidad depende completamente del GPS y las técnicas empleadas para mejorar la precisión, el comportamiento mantiene la misma necesidad de contar con una línea de vista despejada hacia el cielo para asegurar una alta fiabilidad en la detección de cruces y en la activación de estímulos al ganado cuando se sobrepasa un límite establecido.

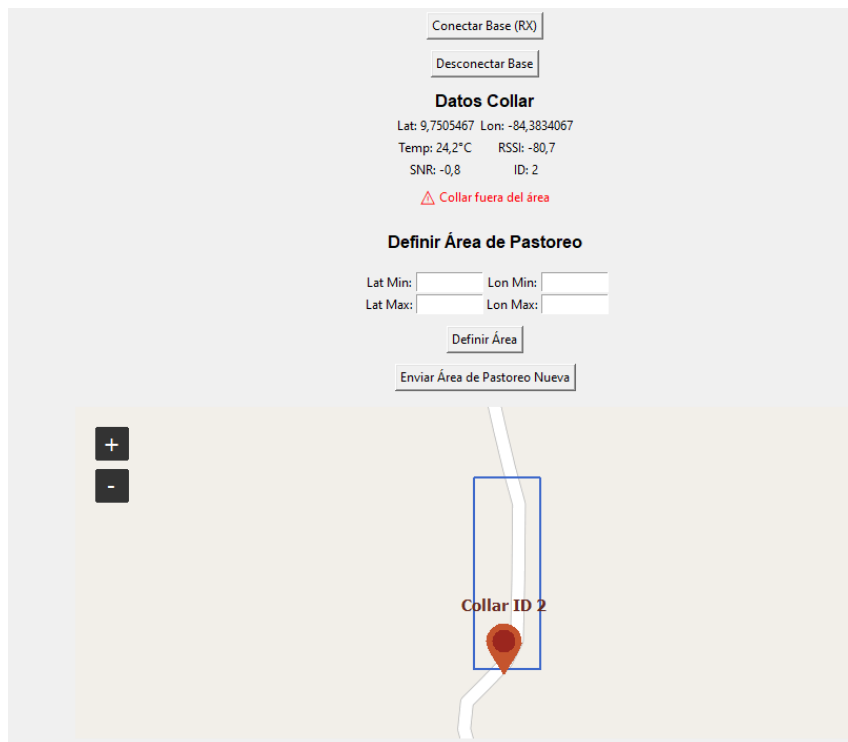


Figura 5.7: Detección fuera de cerca virtual.

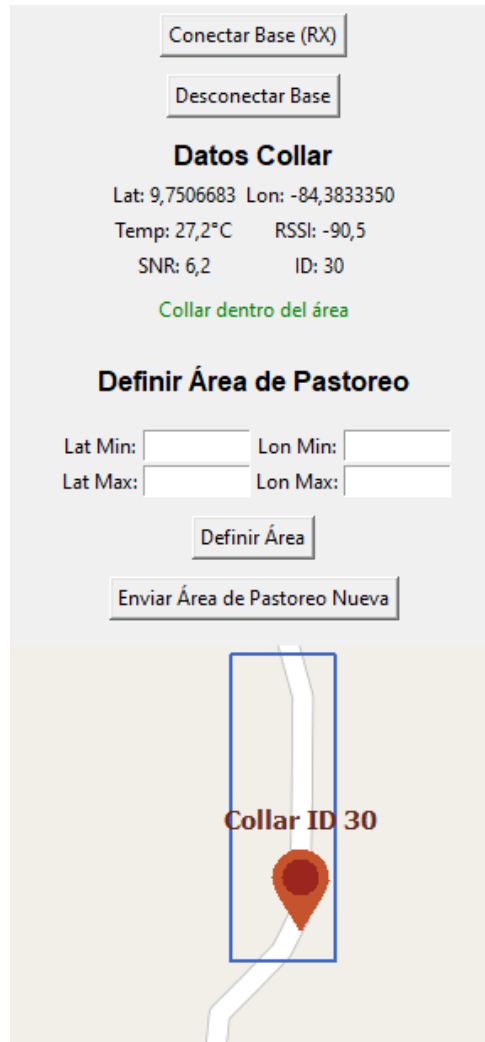


Figura 5.8: Detección dentro de cerca virtual.

Se logró también una exactitud con detección fuera y dentro de un límite igual a la reportada por el GPS debido a su total dependencia para detectar estos límites.

5.5. Resultados del monitoreo de temperatura

Exactitud y estabilidad del sensor

Para el caso de la temperatura se puede observar una alta exactitud del sensor en la figura 5.6, donde los datos de temperatura se mantienen constantes en los 3 distintos

paquetes provenientes del mismo collar. Por otro lado para evaluar su exactitud se puso a prueba con un termómetro de mercurio el cual tiene una alta exactitud según su ficha técnica [47], donde tuvo una exactitud del sensor mayor al 99 % en 5 distintas mediciones realizadas contra el termómetro.

Medición	DS18B20 (°C)	Mercurio (°C)	Diferencia (°C)
1	25.0	25.1	-0.1
2	25.1	25.0	0.1
3	25.0	25.0	0.0
4	25.2	25.1	0.1
5	25.1	25.2	-0.1
Dev. estandar	0.0836	0.0836	

Cuadro 5.10: Comparación entre el sensor DS18B20 y un termómetro de mercurio en un vaso de agua en Puriscal, Costa Rica.

En la tabla 5.10 se observa una exactitud aceptable y elevada según los requerimientos de la lechería implícitos en los indicadores.

Detección de variaciones fisiológicas simuladas

Para evaluar la capacidad del sistema de detectar cambios en la temperatura corporal, se realizó una simulación controlada con dos escenarios contrastantes. En primer lugar, el sensor se expuso al ambiente exterior bajo incidencia solar directa, obteniéndose una temperatura elevada cercana a los 29 °C. Posteriormente, el sensor se colocó bajo sombra sobre un trozo de hielo con el propósito de generar una variación térmica abrupta y verificable.

Las condiciones de prueba se controlaron garantizando que el sensor permaneciera en reposo térmico durante cada escenario, es decir, se esperó a que la lectura se estabilizara antes de registrar los datos. Además, las pruebas se realizaron sin variaciones bruscas de viento o humedad que pudieran alterar la medición, asegurando así la validez de los resultados presentados.

El sensor de temperatura utilizado cuenta con una incertidumbre típica máxima de $\pm 0,5$ °C y mínima de $\pm 0,0625$ °C, de acuerdo con su hoja de datos. Esto confirma que los

cambios reportados son reales y atribuibles a las condiciones físicas impuestas durante la prueba, y no a ruido o fluctuaciones propias del sensor.

La figura 5.9 muestra la captura de pantalla correspondiente a ambas condiciones, evidenciando la capacidad del sistema para registrar y reportar variaciones térmicas de manera inmediata en el siguiente paquete recibido.

Datos Collar		Datos Collar	
Lat: 9,7505783	Lon: -84,3832983	Lat: 9,7506933	Lon: -84,3833133
Temp: 29,6°C	RSSI: -88,4	Temp: 2,5°C	RSSI: -87,5
SNR: 7,1	ID: 45	SNR: 7,3	ID: 46
Collar dentro del área		Collar dentro del área	

Figura 5.9: Simulación de variaciones de temperatura.

5.6. Resultados de la autonomía energética

En cuanto a la autonomía energética el collar logró tener un rendimiento de 5 días sin necesidad de recarga de la batería. Esto se logró por medio de técnicas de descanso profundo de los dispositivos que componen el sistema, ADR y con dispositivos y tecnologías de bajo consumo como lo es LoRa. Es importante notar que este desempeño se puede ver extendido con el uso de una batería de mayor capacidad, sin embargo para esta aplicación en específico que se trata de una solución de un prototipo de bajo presupuesto se prefiere un balance entre duración y costo por lo que 5 días se consideran adecuado para una batería 18650, según los requisitos de la lechería, donde se buscaba una autonomía cercana a una semana de tiempo.

Es importante señalar que procesos como la activación constante del actuador al superar límites y una mala calidad del enlace son los procesos que tienen un mayor consumo energético en el collar. El primero se da porque el actuador es el periférico con más consumo de energía, sin embargo pasa desactivado la mayoría del tiempo y el segundo proceso es porque al empeorar la calidad del enlace los parámetros como SF, CR y Ptx aumentan,

generando un mayor tiempo del paquete en el aire y un mayor consumo de potencia para poder mantener la comunicación.

5.7. Evaluación de la interfaz de usuario

Fluidez de datos

En cuanto a la interfaz, se logró apreciar con éxito de manera fluida todos los datos suministrados por el collar. La interfaz se encarga también de almacenar datos en un Excel, actualizando cada transmisión del collar de manera correcta. Además genera alertas al ganadero, incluyendo cuadros de dialogo informando la recepción de coordenadas de cercas virtual en base y collar, al collar exceder limites de geocerca y demás eventos críticos en la interfaz fueron un éxito.

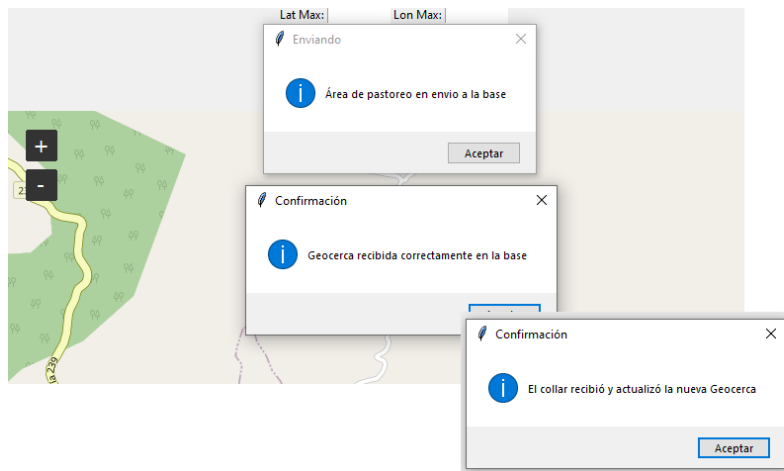


Figura 5.10: Mensajes de información en tiempo real para el ganadero.

Visualización y control de geocercas

La visualización y control de cercas virtuales se implementó por medio de un dibujo de la zona delimitada en un mapa. Esta zona se carga automáticamente al abrir el programa en caso de existir una establecida anteriormente. Además, para la ubicación del animal se utilizó el típico pin de ubicación en mapa para que sea intuitivo. Cada vez que se recibe un paquete con una ubicación válida, el mapa se actualiza constantemente para no

perder detalles de la ubicación del animal dentro de la cerca establecida por el ganadero, actualmente el sistema se encuentra diseñado para procesar unicamente un collar, sin embargo puede modificarse a futuro.

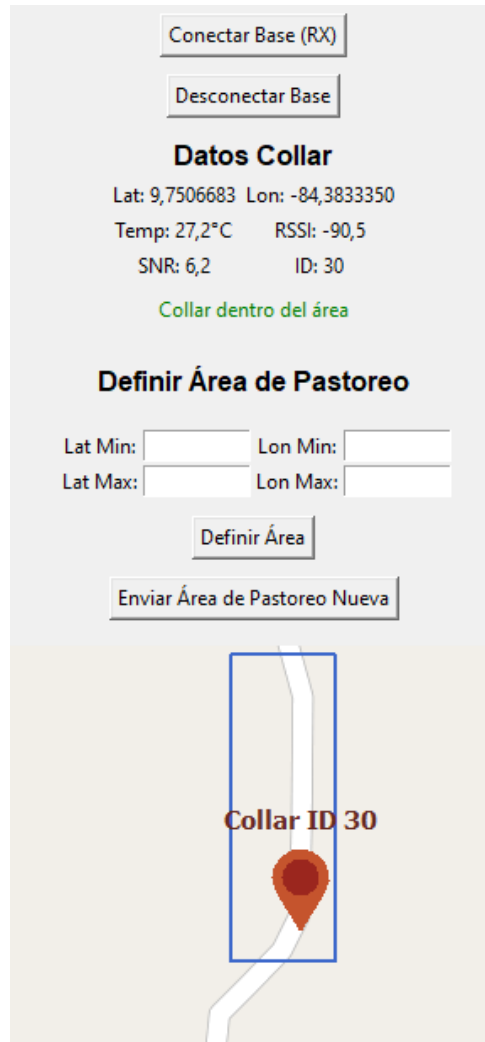


Figura 5.11: Visualización de cerca virtual y ubicación del animal.

De igual forma, en la figura 5.11 se puede apreciar claramente la sección donde se maneja el control de las cercas virtuales, teniendo 4 cuadros para escribir los puntos diagonales que delimitan el área rectangular, así como definir esa área como deseada y enviarla al collar.

5.8. Análisis general de desempeño

Cualidades positivas del sistema

El sistema desarrollado demuestra un desempeño aceptable en las distintas áreas evaluadas, integrando de forma eficiente los módulos de comunicación LoRa, GPS, sensado de temperatura, gestión energética y visualización en la interfaz de usuario.

En el caso del enlace inalámbrico, los resultados evidencian una alta tasa de entrega aproximada del 99%. Este rendimiento es consecuencia directa de la implementación de reintentos controlados y confirmación mediante ACKs, lo cual reduce significativamente la probabilidad de pérdida de información y evita la duplicación innecesaria de paquetes. Además, la adecuada adaptación de los parámetros del ADR permitió mantener un enlace robusto bajo variaciones de distancia, obstáculos y condiciones de interferencia.

En cuanto al sistema de posicionamiento, el GPS mostró una exactitud adecuada para el propósito del proyecto, con un margen de error promedio inferior a 2 m en condiciones de buena recepción satelital. Esto permitió una detección confiable del cruce de geocercas, tanto hacia el interior como hacia el exterior de los límites definidos, garantizando así la correcta generación de alertas al ganadero.

El monitoreo de temperatura, apoyado por el sensor DS18B20, demostró alta estabilidad y coherencia entre mediciones. La comparación con un termómetro de mercurio confirmó una exactitud superior al 99%, con una desviación estándar entre mediciones baja, aproximadamente de 0.08 °C, lo que valida la fiabilidad del sensado térmico para detectar variaciones fisiológicas o ambientales.

La gestión energética del sistema también presentó resultados satisfactorios. Gracias al uso de modos de bajo consumo, técnicas de sueño profundo y la adaptación dinámica de potencia de transmisión, se logró una autonomía aproximada de 5 días utilizando una batería 18650 de bajo costo, resultado adecuado para el objetivo del prototipo.

Finalmente, la interfaz de usuario mostró un comportamiento fluido y estable, capaz de procesar datos en tiempo real, generar alertas, almacenar información y visualizar geocercas sin retrasos perceptibles, incluso durante periodos prolongados de operación.

Limitaciones observadas

A pesar del desempeño satisfactorio del sistema en general, se identificaron ciertas limitaciones inherentes a la tecnología utilizada y al entorno de prueba.

En primer lugar, la calidad del enlace LoRa depende significativamente de la línea de vista entre los módulos. Aunque las pruebas demostraron un alcance de aproximadamente 450 m en condiciones rurales, la presencia de estructuras metálicas, paredes gruesas o zonas con alta densidad de árboles puede reducir el alcance efectivo o incrementar la cantidad de reintentos necesarios para completar la transmisión.

Asimismo, el desempeño del GPS presenta limitaciones esperadas bajo techos, estructuras o entornos donde la recepción satelital es pobre, alcanzando márgenes de error de hasta 8 m en los casos más críticos. Esto afecta directamente la exactitud en la detección de cruce de geocercas, por lo que su funcionamiento óptimo depende de condiciones adecuadas de visibilidad al cielo.

En el ámbito energético, si bien se alcanzó una autonomía adecuada para pruebas de campo, la duración de la batería podría reducirse en aplicaciones que requieran una mayor frecuencia de transmisión, entornos hostiles o integración de sensores adicionales. En tales casos, sería necesaria una batería de mayor capacidad o la incorporación de soluciones de recarga solar para garantizar un funcionamiento continuo.

Por último, aunque la interfaz de usuario funcionó de manera estable, su rendimiento depende del hardware del equipo en el que se ejecute y del manejo adecuado de archivos de registro. La escritura constante en hojas de cálculo puede representar una limitación en escenarios de transmisión intensiva, requiriéndose optimización futura en el manejo de almacenamiento.

En general, las limitaciones observadas no comprometen la funcionalidad principal del sistema en un entorno real de aplicación, pero sí representan oportunidades claras para mejoras en versiones posteriores orientadas a robustecer aún más el desempeño en entornos reales y condiciones adversas.



Figura 5.12: Collar inteligente para ganado.

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones generales

El desarrollo del prototipo permitió demostrar la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo para ganado que integra sensado de temperatura, posicionamiento GPS y gestión de cercas virtuales utilizando tecnologías de bajo costo y largo alcance. Los resultados experimentales evidencian que el sistema es funcional, estable y capaz de operar de forma continua bajo las condiciones esperadas para un entorno rural.

La comunicación LoRa demostró una tasa de entrega mayor al 99 % validando la efectividad del mecanismo de ACKs y reintentos automáticos. El sensor DS18B20 alcanzó una exactitud superior al 99 %, cumpliendo ampliamente con el indicador establecido de $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$. El sistema GPS presentó un margen de error promedio inferior a 3 m en condiciones reales de aplicación, es decir adecuadas de recepción satelital, lo que permitió una

correcta detección de entradas y salidas de geocercas. Por su parte, la autonomía energética del prototipo superó las 120 horas de funcionamiento, acercándose al indicador de una semana estipulada en el objetivo general.

En conjunto, el prototipo desarrollado cumple con la meta del proyecto al ofrecer una solución de bajo costo, funcional y técnicamente sólida para mejorar la gestión ganadera mediante monitoreo remoto y cercas virtuales.

6.2. Cumplimiento de objetivos

Objetivo general

Desarrollar un prototipo funcional de un sistema de monitoreo a distancia para ganado que integre el monitoreo de temperatura, el seguimiento de desplazamiento mediante GPS y la gestión de cercas virtuales.

Resultado: El prototipo integra de forma efectiva los módulos de temperatura, GPS y cercas virtuales, transmitiendo información de manera estable mediante LoRa hacia la estación base.

- Exactitud de temperatura lograda: $\pm 0,1$ °C
- Exactitud GPS lograda: $\leq \pm 2$ m
- Funcionamiento continuo alcanzado: Aproximadamente 120 horas.

Indicador cumplido.

Objetivos específicos

1. **Diseñar un prototipo de collar inteligente con sensor de temperatura y módulo GPS.**

- Exactitud de temperatura obtenida: $\pm 0,1$ °C.
- Margen de error GPS obtenido: $\leq \pm 2$ m.

Indicador cumplido.

2. Implementar un sistema de cercas virtuales con soporte de procesamiento GPS y transmisión inalámbrica a estación base.

- El sistema detectó correctamente eventos de entrada y salida en la geocerca.
- Margen de error en delimitación: $\leq \pm 2$ m.
- Alertas generadas en tiempo real en la interfaz visual.

Indicador cumplido.

3. Desarrollar una interfaz gráfica que permita la visualización de la información recopilada y la gestión de cercas virtuales.

- La GUI mostró con fluidez la temperatura, posición y estado del enlace.
- Permitió configurar la geocerca y visualizar alertas sin retraso perceptible.

Indicador cumplido.

6.3. Recomendaciones técnicas

Con base en los resultados obtenidos y las limitaciones observadas, se plantean las siguientes recomendaciones para fortalecer futuras versiones del sistema:

- Implementar un pequeño panel solar que permita extender la autonomía y acercarse a operación continua sin intervención humana.
- Integrar algoritmos mejorados de suavizado de trayectorias (por ejemplo, filtros Kalman) para reducir las variaciones del GPS en zonas con mala señal, actualmente solo implementa una media con un buffer de 8 lecturas para cuidar la cantidad de procesamiento y su gasto energético.
- Utilizar antenas LoRa de mayor ganancia (5–7 dBi) para aumentar el alcance y mejorar la estabilidad del enlace.

- Migrar el almacenamiento del sistema a una base de datos ligera (SQLite) para reducir la carga al registrar múltiples paquetes.
- Diseñar un encapsulado más robusto y resistente al agua, polvo y golpes, considerando los entornos rurales donde operará el sistema.

Estas recomendaciones permitirían mejorar la robustez y escalabilidad del sistema sin alterar los logros alcanzados por el prototipo actual.

6.4. Proyecciones futuras del sistema

El prototipo desarrollado abre la posibilidad de evolucionar hacia un sistema de monitoreo comercial orientado a la productividad y bienestar animal. Entre las principales líneas de desarrollo futuro destacan:

- Migración hacia una versión LoRaWAN que permita escalar el sistema a cientos de collares en grandes fincas.
- Integración de sensores adicionales como acelerómetros, frecuencia cardíaca o humedad, para ofrecer información fisiológica más completa.
- Desarrollo de una plataforma web centralizada con acceso remoto, almacenamiento en la nube y análisis histórico.
- Implementación de modelos de inteligencia artificial para detectar comportamientos anómalos y generar alertas predictivas.
- Optimización energética mediante sistemas híbridos batería-solar.
- Fabricación de una PCB dedicada que reduzca tamaño, mejore la fiabilidad y permita integrar protección eléctrica avanzada.
- Modificación del código para habilitar y diferenciar recepción de múltiples collares.

Estas proyecciones demuestran que el sistema puede evolucionar hacia soluciones más avanzadas, escalables y adaptadas a necesidades de la ganadería moderna.

Bibliografía

- [1] M. Electrónica, “Agricultura inteligente: tendencias agrícolas 2021 y nuevas tecnologías.” <https://www.maherelectronica.com/agricultura-inteligente-tendencias-tecnologicas/>, 2021. Consultado en diciembre de 2025.
- [2] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016. Consultado en octubre de 2025.
- [3] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), “Iica 2024.” <https://iica.int/es/about-us/main>, 2024.
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Hato vacuno 2022.” <https://inec.cr/noticias/hato-vacuno-se-estima-15-millones-cabezas>, 2022.
- [5] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), “¿qué hacemos?.” <https://apps.iica.int/dashboardproyectos/>, 2022.
- [6] MSD Salud Animal, “Sensehub dairy.” <https://www.msd-salud-animal.com.co/sensehub-dairy/>, 2024.

-
- [7] Organización de las Naciones Unidas, “Objetivos de desarrollo sostenible (ods).” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>, 2024.
- [8] S. Pugh, *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Addison-Wesley, 1991.
- [9] Y. Liu, H. Zhang, and X. Chen, “Rfid-based livestock monitoring: Challenges and advances,” *IEEE Access*, 2024. Consultado en diciembre de 2025.
- [10] L. Wang, R. Kumar, and J. Torres, “Advances in electronic ear-tag technologies for livestock monitoring,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Agriculture Systems*, 2024. Consultado en diciembre de 2025.
- [11] E. C. S. Animal, “Smart farming o agricultura y ganadería de precisión.” <https://ruminants.ceva.pro/es/smart-farming-o-agricultura-y-ganaderia-de-precision>, 2023. Consultado en octubre de 2025.
- [12] S. G. SG, “Collares inteligentes tru-test para la detección de celo y salud.” <https://softwareganadero.com/collar.aspx>, 2025. Consultado en octubre de 2025.
- [13] S. C. H. . S. S. B. Project, “Gps collars (en español) : seguimiento de ganado mediante collares gps.” https://southwestbeef.org/wp-content/uploads/gps_collars_508.pdf, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [14] D. Matter, “Livestock tracking applications,” 2024. Accedido: 2025-12-01.
- [15] Ixorigue, “Collares gps para ganadería,” 2024. Accedido: 2025-12-01.
- [16] Digitanimal, “Gps livestock tracking for extensive farming,” 2024. Accedido: 2025-12-01.
- [17] Nofence, “Virtual fencing for livestock,” 2024. Accedido: 2025-12-01.
- [18] FarmRanger, “Livestock monitoring solutions,” 2024. Accedido: 2025-12-01.

- [19] GM-Tracking, “Radio collars for wildlife tracking.” <https://www.gm-tracking.com/es/radio-collars-for-wildlife-tracking/>. Consultado: 01-12-2025.
- [20] Tractive, “Mejor collar inteligente para perros 2025: por qué tractive es el líder de la manada.” <https://tractive.com/blog/es/tecnologia/collar-inteligente-para-perros>, 2025. Consultado: 01-12-2025.
- [21] A. W. Azim, A. Bazzi, R. Shubair, and M. Chafii, “Chirp spread spectrum-based waveform design and detection mechanisms for lpwan-based iot: A survey,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 145321–145345, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [22] R. Kufakunesu, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, “A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges,” *Sensors*, vol. 20, no. 18, p. 5044, 2020. Consultado en octubre de 2025.
- [23] U. D. of Defense, “Global positioning system standard positioning service performance standard.” <https://www.navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/gps/geninfo/2020SPSPPerformanceStandardFINAL.pdf>, 2020.
- [24] A. Autor and B. Otros, “Study of global navigation satellite system receivers’ accuracy for unmanned vehicles,” *Sensors*, vol. 24, no. 18, p. 5909, 2024.
- [25] A. Sukhenko and A. Syzdykov, “Gnss for high-precision and reliable positioning: A review of correction techniques and system architectures,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 22, p. 12304, 2025.
- [26] Q. M. Ilyas and M. Ahmad, “Smart farming: An enhanced pursuit of sustainable remote livestock tracking and geofencing using iot and gprs,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, pp. 1–12, 2020. Consultado en octubre de 2025.
- [27] D. International, “¿qué es la geovalla? / geofencing.” <https://es.digi.com/resources/definiciones/geofencing>, 2025. Accedido: 2025-12-02.
- [28] I. Sasaki, M. Arikawa, M. Lu, T. Utsumi, and R. Sato, “Data-driven geofencing design for point-of-interest notifiers utilizing genetic algorithm,” *ISPRS International*

-
- Journal of Geo-Information*, vol. 13, no. 6, p. 174, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [29] L. Liu, X. Zhang, J. Li, and Y. Wang, “Recent advances in flexible temperature sensors: Materials, sensing mechanisms and applications,” *Advanced Science*, vol. 11, no. 20, p. 2405003, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [30] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, 5th ed., 2016.
- [31] I. Merkelytė, M. Arikawa, M. Lu, T. Utsumi, and R. Sato, “The role of sensor technologies in estrus detection and animal monitoring: A review on temperature sensors and behavioural devices for dairy and beef cows,” *Animals*, vol. 15, no. 15, p. 2313, 2025. Consultado en octubre de 2025.
- [32] J. A. Abdinoor and et al., “Performance of low-cost air temperature sensors: Comparison of contact and non-contact devices,” *Atmosphere*, vol. 16, no. 7, p. 842, 2025. Consultado en octubre de 2025.
- [33] T. M. S. Kumar, “Low-power design techniques for internet of things (iot) devices: Current trends and future directions,” *Progress in Electronics and Communication Engineering*, vol. 1, no. 1, p. 19–25, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [34] M. Gerndt, M. Ispir, I. Nunez, and S. Benedict, “Energy-aware duty cycle management for solar-powered iot devices,” *Sensors*, vol. 25, no. 14, p. 4500, 2025. Consultado en octubre de 2025.
- [35] M. Wybraniak-Kujawa, I. Jacyna-Golda, P. Kotylak, A. Panek, R. Wojtchnik, and T. Siedlecka-Wójcikowska, “Energy footprint and reliability of iot communication protocols for remote sensor networks,” *Sensors*, vol. 25, no. 19, p. 6042, 2025. Consultado en octubre de 2025.
- [36] Z. Almudayni and et al., “Energy inefficiency in iot networks: Causes, impact, and a comprehensive review,” *Electronics*, vol. 14, no. 1, p. 159, 2025. Consultado en octubre de 2025.

- [37] J. González, R. Álvarez, and M. Mañana, “Una interfaz gráfica para monitorización, control y teleoperación de robots móviles,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [38] A. Dix, J. Finlay, G. Abowd, and R. Beale, *Human-Computer Interaction*. Pearson Education, 3rd ed., 2004.
- [39] Moocall Ltd., “Moocall - calving sensor and cow fertility management.” <https://www.moocall.com/>, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [40] CowManager B.V., “Cowmanager - smart cow monitoring system.” <https://www.cowmanager.com/>, 2024. Consultado en octubre de 2025.
- [41] E. Pereira, I. B. Queiroz Araujo, M. S. Batista, and otros, “Rfid technology for animal tracking: A survey,” *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2023. PP(99):1–1.
- [42] S. Nyamuryekung’e, G. Duff, S. Utsumi, R. Estell, M. M. McIntosh, M. Funk, A. Cox, H. Cao, S. Spiegel, A. Perea, and A. F. Cibils, “Real-time monitoring of grazing cattle using lora-wan sensors to improve precision in detecting animal welfare implications via daily distance walked metrics,” *Animals*, vol. 13, no. 16, p. 2641, 2023.
- [43] L. Schulthess, F. Longchamp, C. Vogt, and M. Magno, “A lora-based and maintenance-free cattle monitoring system for alpine pastures and remote locations,” in *Proceedings of the 11th International Workshop on Energy Harvesting Energy-Neutral Sensing Systems (ENSsys’23)*, 2023.
- [44] B. R. Dos Reis, Z. M. Easton, R. R. White, and D. R. Fuka, “Lora sensor network for monitoring pastured livestock location and activity,” *Translational Animal Science*, vol. 5, no. 2, 2021.
- [45] L. Alliance, “How lorawan technology supports smart agriculture – precise animal production.” https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/12/THE-FARMING-OF-TOMORROW-IS-ALREADY-HERE-HOW-LoRaWAN%C2%

AE-TECHNOLOGY-SUPPORTS-SMART-AGRICULTURE-PRECISE-ANIMAL-PRODUCTION.
pdf, 2020.

- [46] J. D. Cook, “How far is a degree of latitude and longitude?.” https://www.johndcook.com/how_big_is_a_degree.html, 2016. Consultado el 1 de diciembre de 2025.
- [47] InsumosFirstPro, “Termómetro de mercurio – ficha técnica.” <https://insumosfirstpro.com/wp-content/uploads/2024/07/TERMOMETRO-DE-MERCURIO.pdf>, 2024. Accedido: 01-12-2025.