

**Desarrollo firmware para un dispositivo electrónico de monitoreo mediante
posicionamiento global GNSS basado en tecnología Cat-M1 para la empresa
Iot Tech Solutions**



Anderson David Macias Zúñiga

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingenierías y Ciencias Naturales
Programa de Ingeniería Electrónica
Popayán – Cauca
2025

**Desarrollo firmware para un dispositivo electrónico de monitoreo mediante
posicionamiento global GNSS basado en tecnología Cat-M1 para la empresa Iot
Tech Solutions**



Anderson David Macias Zúñiga

Trabajo de Grado modalidad Pasantía para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

Director

Yamir Hernando Bolaños Muñoz

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingenierías y Ciencias Naturales

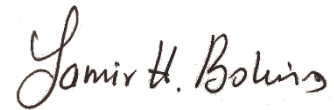
Programa de Ingeniería Electrónica

Popayán – Cauca

2025

Nota de Aceptación

Una vez revisado y aprobado el documento final del trabajo de grado titulado *Desarrollo firmware para un dispositivo electrónico de monitoreo mediante posicionamiento global GNSS basado en tecnología Cat-M1 para la empresa Iot Tech Solutions*, realizado por el estudiante Anderson David Macias Zúñiga, se autoriza para optar el título de profesional en Ingeniería Electrónica en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



Director.
YAMIR HERNANDO BOLAÑOS MUÑOZ



Jurado 1.
CARLOS FELIPE LÓPEZ CÓRDOBA



Jurado 2.
VALENTINA ARCINIEGAS SOLARTE

Popayán, 2025

Tabla de Contenido

Resumen.....	9
Introducción	11
1. Planteamiento del Problema.....	12
2. Justificación	14
3. Objetivos	15
3.1. Objetivo General	15
3.2. Objetivos Específicos.....	15
4. Marco Teórico.....	16
4.1. Tecnologías de comunicación basadas en redes celulares LTE	17
4.1.1. NB-IoT	18
4.1.2. Cat-M1	18
4.1.3. Cat-1.....	19
4.1.4. Tecnologías para sistemas de rastreo	19
4.1.5. Protocolo de Comunicación MQTT.....	21
5. Diseño General del Sistema Electrónico.....	24
6. Diseño Firmware.....	28
6.1. Arquitectura firmware.....	29
6.1.1. Descripción de los estados y su transición.....	30
6.1.2. Sub-máquinas de estados	32
6.2. Diseño de trama de posición a enviar	39
6.2.1. Estructura de la trama	39
6.2.2. Plataforma de desarrollo de Firmware	40
6.2.3. Comunicación con el Módulo SIM7080G	41
7. Desarrollo.....	48
7.1. Herramientas empleadas	48
7.2. Proceso de codificación	48
7.3. Pruebas	51
7.3.1. Fase 1: Verificación de recepción de trama de posición.....	51

7.3.2. Fase 2: Evaluación de Precisión Geográfica.....	55
7.3.3. Fase 3: Verificación de Eficiencia Energética	59
Conclusiones	63
Referencias.....	64

Lista de Tablas

Tabla I. Comparativa sobre tecnologías de comunicación	19
Tabla II. Comparativa de protocolos de comunicación	22
Tabla III. Requisitos funcionales del firmware	28
Tabla IV. Descripción de los estados y su transición	31
Tabla V. Sub-máquina de estados.....	34
Tabla VI. Sub-máquina de estados de transición.....	38
Tabla VII. Estructura de la trama	40
Tabla VIII. Ejemplo de una trama.....	40
Tabla IX. Características tarjeta de desarrollo CatM Unit.....	42
Tabla X. Ejemplo de Comando AT	45
Tabla XI. Ejemplo de Comando LTE.....	47
Tabla XII. Funciones de Bajo Nivel.....	49
Tabla XIII. Funciones de alto Nivel.....	50
Tabla XIV. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo.....	55
Tabla XV. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 1.	56
Tabla XVI. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 2.	56
Tabla XVII. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 3.	57
Tabla XVIII. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 4.....	58
Tabla XIX. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 5.....	59

Lista de figuras

Fig. 1. Arquitectura general de un sistema de rastreo.....	17
Fig. 2. Funcionamiento MQTT.....	24
Fig. 3. Diseño General del Sistema Electrónico.	24
Fig. 4. Diagrama General.....	30
Fig. 5. Sub-máquina de estados de obtención de datos GNSS.	34
Fig. 6. Sub-máquina de estados de transición de mensaje.....	37
Fig. 7. Tarjeta de desarrollo CatM Unit.....	41
Fig. 8. Comunicación Dispositivo SIM7080G.	43
Fig. 9. Montaje para pruebas de funcionamiento del módulo SIM7080G	43
Fig. 10. Comunicación mediante comandos AT con el módulo SIM7080G.....	44
Fig. 11. Secuencia detallada, paso a paso, de los comandos AT.	53
Fig. 12. Recepción de la trama en la aplicación MQTT Box.	54
Fig. 13. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo.	54
Fig. 14. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 1.....	55
Fig. 15. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 2.....	56
Fig. 16. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 3.....	57
Fig. 17. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 4.....	58
Fig. 18. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 5.....	58
Fig. 19. Dispositivo Nordic Semiconductor NRF-PPK2.....	59
Fig. 20. Funcionamiento Normal de Activación.	61
Fig. 21. Bajo Consumo del Dispositivo.....	61
Fig. 22. Cambio de Modo Activo a Bajo Consumo.	62

**Desarrollo firmware para un dispositivo electrónico de monitoreo mediante
posicionamiento global GNSS basado en tecnología Cat-M1 para la empresa Iot Tech
Solutions**

Ficha de información general del proyecto

Título:	Desarrollo firmware para un dispositivo electrónico de monitoreo mediante posicionamiento global GNSS basado en tecnología Cat-M1 para la empresa Iot Tech Solutions
Modalidad:	Pasantía
Facultad:	Ingeniería y Ciencias Naturales
Programa:	Ingeniería Electrónica.
Director del Trabajo de Grado:	Yamir Hernando Bolaños Muñoz
Estudiante:	Anderson David Macias Zúñiga

Resumen

El documento presenta el desarrollo de firmware para un dispositivo de monitoreo mediante posicionamiento global GNSS, utilizando tecnología Cat-M1, diseñado para la empresa IoT Tech Solutions S.A.S. Este trabajo responde a la necesidad de integrar soluciones avanzadas de rastreo en aplicaciones como el seguimiento de personas, vehículos y objetos. La propuesta incluye el diseño de una arquitectura basada en RTOS (sistema operativo en tiempo real) y optimizada para bajo consumo energético, garantizando mayor eficiencia y prolongada vida útil del dispositivo. Además, se realizaron pruebas en campo para validar su desempeño, destacando la implementación de tecnologías emergentes como Cat-M1 frente a opciones tradicionales como GSM y GPRS. Este proyecto impulsa el uso de redes LTE en aplicaciones IoT, superando limitaciones de cobertura y consumo energético, y establece una base sólida para futuros desarrollos en el ámbito del rastreo y monitoreo.

Palabras claves: *Arquitectura basada en RTOS, Firmware embebido.*

Abstract

The document presents the development of firmware for a GNSS global positioning monitoring device, using Cat-M1 technology, designed for the company IoT Tech Solutions S.A.S. This work responds to the need to integrate advanced tracking solutions in applications such as tracking people, vehicles and objects. The proposal includes the design of an architecture based on RTOS (real-time operating system) and optimized for low power consumption, ensuring greater efficiency and prolonged life of the device. In addition, field tests were carried out to validate its performance, highlighting the implementation of emerging technologies such as Cat-M1 versus traditional options such as GSM and GPRS. This project promotes the use of LTE networks in IoT applications, overcoming coverage and energy consumption limitations, and establishes a solid foundation for future developments in the field of tracking and monitoring.

Keywords: *RTOS-based architecture, Embedded Firmware.*

Introducción

En la actualidad el avance tecnológico y científico, ha permitido el desarrollo de sistemas que contribuyen a elevar la calidad de vida, los cuales aportan bienestar a la sociedad al facilitar y proporcionar información relevante y pertinente para la toma de decisiones [1]. Entre estos avances en auge, destaca el concepto de IoT (Internet de las Cosas) el cual se refiere a la interconexión entre dispositivos físicos a través de internet [2], permitiéndoles recopilar y compartir datos, estos pueden incluir desde electrodomésticos, sensores industriales, vehículos hasta dispositivos médicos. La base del IoT yace en la operación remota de recolección de datos de diferentes tipos de aplicaciones, los cuales son enviados a internet por algún medio de comunicación, esto aplica a diversos campos como industrial, seguridad, agricultura, rastreo, salud y bienestar, entre otros [3].

Uno de los principales campos del IoT son las aplicaciones de rastreo, la cual consiste en conocer la posición global en la que se encuentra un objeto o persona. En la actualidad existe una creciente demanda de dispositivos de posicionamiento, rastreo y monitoreo, ya que estos brindan diferentes beneficios tales como la seguridad personal y de objetos que permiten mantener un registro de la ubicación de personas, mascotas, vehículos u objetos, contribuyendo a la seguridad, logística y rescate, beneficios de navegación y conexión ayudando a encontrar direcciones, rutas y ubicaciones específicas de manera eficiente, beneficios y eficiencia operativa a nivel empresarial facilitando el seguimiento de envíos y control de inventario.

El presente proyecto busca el desarrollo e implementación de un dispositivo de rastreo de personas y objetos utilizando nuevas tecnologías como NB-IoT, CAT-1 y CAT-M1 mediante el diseño y desarrollo del firmware.

1. Planteamiento del Problema

El IoT es un concepto en el que se involucran componentes, hardware y software con el propósito de monitorear de forma automática diferentes variables, ejemplos de ello son; temperatura, presión, corriente eléctrica, señales de pánico, posición Sistema de Posicionamiento Global (GPS), variables relacionadas con prestación de servicios públicos entre otras. El objetivo de los sistemas de IoT a nivel general es la obtención de información que permita tener procesos automatizados y eficientes, con beneficios como optimización de costos y recursos [4], [5]

Por su parte, la empresa caucana IoT Tech Solutions es pionera en país en el desarrollo y comercialización de dispositivos de monitoreo bajo tecnología Sigfox [6], estos cuentan con la capacidad de adquirir y transmitir variables asociadas a la prestación del servicio de telemedida en agua, gas entre otras, revisando su consumo, detección de alarmas o fallas en la prestación del servicio.

Actualmente, la empresa IoT Tech Solutions desea incursionar en el mercado con aplicaciones de IoT basadas en las redes LTE tal como CAT-M1, dentro de su línea de productos requiere el desarrollo de un dispositivo tracking orientado al proceso de rastreo de personas y objetos el cual pueda ser adaptado a diferentes aplicaciones como rastreo de vehículos, personas, animales entre otros para poder lograr este objetivo se requiere el diseño y desarrollo del firmware el cual es objeto de la propuesta de pasantía.

En el ámbito de las tecnologías de IoT, como LoRaWAN[7] o Sigfox, se plantea una consideración crucial relacionada con la infraestructura de red necesaria para su funcionamiento. Estas tecnologías requieren una red desplegada mediante torres de RF (Radio Frecuencia) para capturar las señales emitidas por los dispositivos. Si bien este enfoque garantiza una transmisión y recepción eficientes de datos, la dependencia de una infraestructura de red específica puede generar desafíos significativos, especialmente en términos de cobertura geográfica y costos asociados. Estudios como Cuantificación de la viabilidad económica y financiera de las tecnologías NB-IoT y LoRaWAN [8], nos muestran como el despliegue y mantenimiento de una infraestructura de red de este tipo puede resultar costosa para los proveedores de servicios de IoT, lo que a su vez puede impactar en el valor del servicio ofrecido al consumidor final. Esta situación plantea una limitación importante en la adopción masiva de estas tecnologías, ya que el costo adicional no lo vuelve factible para trabajar en una aplicación de rastreo.

Por otro lado, se considera que la tecnología Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM) ofrece una alternativa a esta limitación, ya que permite la captura de datos GPS y su transmisión a la nube de forma convencional. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el alto consumo energético asociado con el funcionamiento de la red GSM puede representar un obstáculo significativo, especialmente en aplicaciones que requieren dispositivos portátiles con una vida útil prolongada de batería. La necesidad de dispositivos portátiles que funcionen de manera eficiente durante largos periodos de tiempo presenta un desafío adicional en el diseño y desarrollo de soluciones de IoT para rastreo. La optimización del consumo de energía se convierte así en un factor crítico para tener en cuenta al seleccionar la tecnología adecuada para una aplicación específica.

Nuevas tecnologías como NB-IoT, CAT-1, CAT-M1, son una alternativa que podría presentar una solución a las limitaciones que se encuentran en las tecnologías tradicionales de posicionamiento global, en donde se utiliza GPS como receptor de posición y Servicio General de Radio por Paquetes (GPRS) para la comunicación con internet enviando los datos a la nube, se busca cambiar la arquitectura tradicional remplazando por una de las nuevas tecnologías lo que mejoraría la eficiencia energética la cual prolongaría la duración de las baterías y su vida útil sin requerir del despliegue de infraestructura de red.

2. Justificación

Las tecnologías tradicionales de comunicación, como el GSM y el GPRS, han sido fundamentales para la transmisión de datos en dispositivos móviles durante años. Sin embargo, con la llegada de NB-IoT, CAT-1 y CAT-M1, se abre un nuevo horizonte en términos de eficiencia y alcance al presentar una comunicación de bajo consumo y alta penetración, permitiendo una conexión más estable y confiable, especialmente en áreas remotas o con una cobertura deficiente. Su impacto en los diferentes sistemas de rastreo, como Global Positioning System (GPS), Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) y Global Navigation Satellite System (GNSS), es significativo, ya que brindan una comunicación más precisa y constante entre los dispositivos y los satélites, mejorando así la exactitud y la velocidad de los datos de ubicación. Esto resulta especialmente crucial en aplicaciones donde la precisión en el posicionamiento es crítica, como la navegación vehicular, el seguimiento de activos y la logística. NB-IoT, CAT-1 y CAT-M1 representan un avance significativo que fortalece y enriquece las capacidades para las aplicaciones de posicionamiento global, mejorando la experiencia del usuario y ampliando las posibilidades de aplicación en diversos sectores, además del desarrollo del prototipo el cual podrá ser comercializado por la empresa Iot Tech Solutions. Por todo esto, es importante que mediante el programa de ingeniería electrónica se busque promover y aplicar las nuevas tecnologías mencionadas anteriormente para el desarrollo de dispositivos que les permita a los futuros profesionales ampliar y adquirir más conocimientos en estas áreas.

En la pasantía propuesta se quiere lograr integrar los conceptos adquiridos en el programa de electrónica, acerca de las tecnologías mencionadas anteriormente junto con el internet de las cosas para el desarrollo firmware con aplicaciones embebidas [9].

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Desarrollar firmware para un dispositivo electrónico de monitoreo mediante posicionamiento global GNSS basado en tecnología CAT-M1 para la empresa IoT Tech Solutions.

3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar firmware para un sistema embebido de rastreo basado en tecnología CAT-M1 orientado al bajo consumo.
- Modelar una arquitectura de firmware para el sistema electrónico del dispositivo de posicionamiento global mediante una arquitectura basada en RTOS.
- Validar el firmware diseñado mediante el desarrollo de un prototipo electrónico y pruebas en campo.

4. Marco Teórico

En el presente apartado se busca la recopilación de información sobre algunos conceptos básicos necesarios para el desarrollo del proyecto propuesto en la pasantía. Conceptos como lo es la conceptualización sobre los sistemas de IoT basadas en redes LTE (CAT-1, CAT-M1, NB-IoT) orientados al proceso de rastreo de personas [10].

Un sistema de posicionamiento global es un método que permite estimar la ubicación con cierta precisión y monitorear activos, vehículos o personas en tiempo real utilizando tecnologías como el GPS o RFID (Identificación por Radiofrecuencia) estas pueden ser una unidad fija o portátil. El GPS funciona proporcionando información sobre la ubicación.

Un sistema de rastreo GPS utiliza la red Sistema GNSS. Esta red incorpora una gama de satélites que utilizan señales de microondas que se transmiten a dispositivos GPS para dar información sobre ubicación, velocidad, hora y dirección que son procesadas por un receptor. Por lo tanto, un sistema de rastreo GPS puede potencialmente proporcionar datos de navegación históricos en tiempo real. [11, Párr. 2]

La arquitectura general de un sistema de rastreo consta típicamente de los siguientes componentes:

1. **Dispositivos de Rastreo:** Son los dispositivos instalados en los objetos, vehículos o personas que se desean rastrear. Estos pueden estar equipados con tecnología GPS, RFID u otras tecnologías de localización. Su función es capturar la ubicación y en algunos casos, otra información relevante, como la velocidad o la dirección.
2. **Red de Comunicación:** Esta red facilita la transmisión de datos desde los dispositivos de rastreo hasta el sistema central. Puede ser una red celular, una red satelital, una red de área local (LAN) o una combinación de estas tecnologías, dependiendo de los requisitos de cobertura y ubicación geográfica.
3. **Sistema Central o Plataforma de Monitoreo:** Este componente es el núcleo del sistema de rastreo, donde se reciben, procesan y almacenan los datos de ubicación provenientes de los dispositivos de rastreo. La plataforma de monitoreo suele ser una aplicación basada en la nube que proporciona una interfaz para visualizar la ubicación en tiempo real de los activos rastreados y acceder a informes históricos.

4. **Base de Datos:** Almacena los datos recopilados por el sistema de rastreo, incluidos registros de ubicación, eventos y otra información relevante. La base de datos es crucial para mantener un registro histórico de los movimientos y actividades de los activos rastreados, lo que puede ser útil para análisis posteriores y generación de informes.

5. **Interfaz de Usuario:** Proporciona una manera para que los usuarios interactúen con el sistema de rastreo, visualicen la información de ubicación y realicen acciones como configurar alertas, generar informes y administrar dispositivos. La interfaz de usuario puede ser una aplicación web, una aplicación móvil o un software de escritorio, diseñado para ser intuitivo y fácil de usar.

En la figura 1 se ilustra la arquitectura y el funcionamiento mencionados anteriormente.

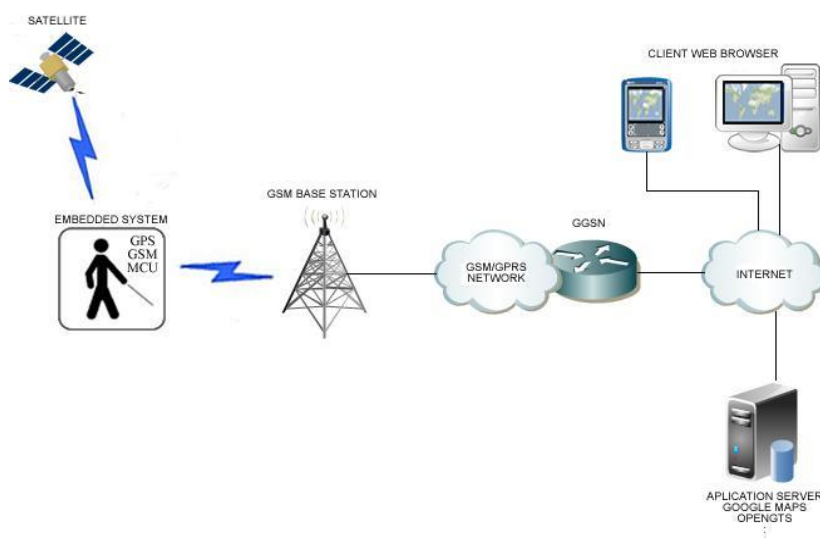


Fig. 1. Arquitectura general de un sistema de rastreo

Nota: fuente [12, p. 14]

4.1. Tecnologías de comunicación basadas en redes celulares LTE

Existen múltiples tecnologías que son basadas en redes celulares LTE, tales como CAT, CAT-1, CAT-M1, NB-IoT; sin embargo, las más utilizadas para aplicaciones de IoT son CAT-M1 y NB-IoT, las cuales se describen a continuación.

4.1.1. NB-IoT

Es una tecnología de comunicación de baja potencia diseñada para dispositivos IoT que requieren una conexión de datos de larga duración con bajos requisitos de ancho de banda. Utiliza una banda estrecha de espectro de radio para transmitir datos eficientemente, permitiendo una mayor cobertura y mejor penetración en interiores en comparación con tecnologías tradicionales de IoT como 2G, 3G o LTE. Creada por 3GPP como parte de la versión 13, NB-IoT, aunque integrada en el estándar LTE, puede considerarse como una nueva interfaz aérea, manteniéndose simple para reducir los costos del dispositivo y minimizar el consumo de batería al eliminar características de LTE, como las mediciones para monitorear la calidad del canal, la agregación de operadores. Además, utiliza las bandas de frecuencia autorizadas, las mismas que LTE, lo que contribuye a una mayor cobertura y facilita su despliegue. Sin embargo, estas ventajas se ven contrarrestadas por velocidades de datos más bajas, mayores retardos de transmisión y limitaciones en la capacidad de conexión, aspectos que pueden limitar su aplicabilidad en escenarios que demanden altas velocidades o baja latencia [13], [14].

4.1.2. Cat-M1

También conocida como LTE-M, es una tecnología de comunicaciones móviles diseñada específicamente para el IoT. A diferencia de las tecnologías tradicionales, Cat-M1 ofrece conexiones de baja potencia y velocidad de datos, pero con una mayor cobertura y mejor penetración en interiores. Esta tecnología surgió como una respuesta a la creciente demanda de conectividad para dispositivos IoT, que requieren una comunicación confiable y eficiente en una variedad de entornos y aplicaciones. El estándar Cat-M1 fue desarrollado por el 3GPP y desde entonces ha ganado una amplia aceptación en la industria debido a sus características mejoradas y su compatibilidad con las redes LTE existentes. Sus funciones son similares a las de NB-IoT y utiliza el mismo espectro que el LTE heredado y el espectro está entre 450 MHz y 3,5 GHz. Sin embargo, utiliza un ancho de banda de frecuencia más amplio de 1 MHz y, por lo tanto, proporciona una velocidad de datos más alta de hasta 1 Mbps. Según las especificaciones, la latencia de Cat-M1 es más corta que la de NB-IoT. Una ventaja de Cat-M1 sobre NB-IoT es que admite la movilidad, ya que puede manejar el traspaso entre diferentes celdas de la red [15], [16].

4.1.3. Cat-1

Representa una tecnología de comunicaciones móviles de banda ancha diseñada para impulsar la conectividad de datos de alta velocidad y baja latencia en dispositivos IoT y aplicaciones industriales. Utilizando la infraestructura de redes celulares existentes, como LTE, Cat-1 ofrece velocidades de datos más rápidas en comparación con tecnologías de IoT de baja potencia como NB-IoT y Cat-M1. Sin embargo, este beneficio viene acompañado de un consumo de energía más elevado. Desde su introducción, Cat-1 ha servido como un puente crucial entre las tecnologías de IoT de baja potencia y las conexiones de datos de alta velocidad requeridas por aplicaciones industriales y empresariales, contribuyendo así al avance y la expansión del Internet de las cosas [17], [18].

A continuación, en la Tabla I, se presenta a modo de resumen una comparativa entre las tecnologías de comunicación en aspectos como Tecnología de posicionamiento, Velocidad de transferencia, Ancho de banda, Consumo de energía y Aplicaciones móviles o fijas.

Tabla I.
Comparativa sobre tecnologías de comunicación

Tecnología de posicionamiento	Velocidad de transferencia	Ancho de banda	Consumo de energía	Aplicaciones móviles o fijas
GPRS	Baja (hasta 115 kbps)	Bajo (8kbps)	Medio	Móviles y fijas
CAT-M1	Media (hasta 1 Mbps)	Medio (500 kbps)	Bajo	Móviles
CAT-1	Alta (hasta 10 Mbps)	Alto (5 Mbps)	Medio	Móviles
NB-IoT	Baja (hasta 60 kbps)	Bajo (200 kHz)	Bajo	Fijas

4.1.4. Tecnologías para sistemas de rastreo

Existen múltiples las tecnologías para sistemas de rastreo, tales como GPS, GLONASS, GNSS, Galileo; sin embargo, las más utilizadas para aplicaciones de IoT son GPS, GLONASS, GNSS las cuales se describen a continuación:

4.1.4.1. GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

Es un sistema de localización, diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines militares para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo; operativo desde 1995, utiliza conjuntamente una red de ordenadores y una constelación de 24 satélites para determinar por triangulación, la altitud, longitud y latitud. [19, p. 2]

GPS ofrece una serie de ventajas significativas, incluyendo su precisión milimétrica, cobertura global y versatilidad en una variedad de aplicaciones civiles y militares. Sin embargo, también presenta desventajas importantes a considerar, como su dependencia de señales satelitales, costos de implementación, vulnerabilidad a interferencias y consumo de energía. A pesar de estas limitaciones, el GPS sigue siendo una herramienta importante que impulsa la innovación tecnológica y mejora la eficiencia en una variedad de sectores, aunque es relevante sopesar tanto sus beneficios como sus desafíos al considerar su uso en aplicaciones específicas [19], [20].

4.1.4.2. GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite). Es un sistema integrado por constelaciones de navegación por satélite, que emiten señales de microondas, las cuales son utilizadas por receptores como por ejemplo GPS para proporcionar información detallada sobre ubicación, velocidad, hora y dirección. Esta tecnología avanzada no solo facilita la navegación personal y profesional, sino que también impulsa aplicaciones innovadoras en áreas como la agricultura de precisión, la gestión de flotas y la exploración espacial. Además, el GNSS ofrece una cobertura global, permitiendo el acceso a la información de posición en cualquier lugar del mundo con visibilidad satelital. Esto se logra mediante la utilización de múltiples constelaciones de satélites, lo que garantiza una disponibilidad continua y una mayor precisión en la determinación de la ubicación. Sin embargo, el GNSS también puede enfrentar desafíos, como la vulnerabilidad a interferencias y la necesidad de una línea de visión clara con los satélites, lo que puede dificultar su uso en áreas urbanas densamente pobladas o en terrenos montañosos. A pesar de estos inconvenientes, el GNSS sigue siendo una herramienta invaluable en una variedad de aplicaciones, ofreciendo una precisión y fiabilidad sin igual en la determinación de la posición [21], [22].

4.1.4.3. Sistema Global de navegación por satélite (GLONASS). Desarrollado en la antigua Unión Soviética con fines militares, pero reservando un subconjunto de señales para

aplicaciones civiles, está actualmente bajo la responsabilidad de la Federación Rusa. Aunque ofrece beneficios como redundancia y señales más estables en ciertas áreas, la incertidumbre sobre su futuro ha limitado su adopción frente al GPS, más establecido y ampliamente utilizado. Sin embargo, para mejorar la precisión y disponibilidad del posicionamiento, se han creado receptores que combinan las señales de GPS y GLONASS, lo que proporciona una mayor precisión y fiabilidad, especialmente en entornos urbanos densos o con obstáculos naturales. Esta integración ha demostrado ser especialmente útil en aplicaciones de navegación terrestre, marítima y aérea, así como en agricultura de precisión, cartografía y topografía. Aunque GLONASS enfrenta desafíos en términos de adopción y confianza del mercado en comparación con el GPS, su combinación con este último en receptores ha mejorado significativamente la precisión y fiabilidad de los sistemas de navegación [19], [23].

4.1.5. *Protocolo de Comunicación MQTT*

Es un protocolo ligero de mensajería diseñado para conexiones de baja latencia y bajo ancho de banda, ideal para entornos de IoT o entornos de dispositivos de baja potencia. Fue desarrollado por IBM en 1999, y su simplicidad lo ha convertido en uno de los protocolos más populares para la comunicación entre dispositivos conectados. Funciona bajo un modelo de publicador/suscriptor, donde los dispositivos publican datos a un bróker central y otros dispositivos se suscriben a estos datos. En este caso, un dispositivo de rastreo podría enviar información de su ubicación GPS a una plataforma web utilizando MQTT.

MQTT se distingue frente a otros protocolos de comunicación en IoT por su bajo consumo de recursos, capacidad para funcionar en redes de baja calidad, y flexibilidad en la entrega de mensajes mediante niveles de calidad de servicio (QoS). A diferencia de HTTP, que requiere más recursos, MQTT es adecuado para dispositivos con limitaciones de memoria y energía, haciéndolo idóneo para aplicaciones críticas. Es compatible con múltiples lenguajes de programación, lo que facilita su adopción en una amplia gama de proyectos IoT.

Tabla II.
Comparativa de protocolos de comunicación

Característica	MQTT	HTTP	CoAP	Zigbee	AMQP	UDP
Consumo de recursos	Muy bajo	Alto	Moderado	Bajo	Alto	Bajo
Ancho de banda	Moderado	Alto	Moderado	Moderado	Alto	Moderado
Fiabilidad	Alta (QoS configurable)	Baja	Media	Media	Alta	Baja
Seguridad	TLS, OAuth, Certificados	TLS (más complejo)	Básica (DTLS)	Limitada	TLS	Limitada
Facilidad de implementación	Sencilla (soporte multiplataforma)	Compleja	Moderada	Moderada	Compleja	Sencilla
Aplicación típica	IoT (gran escala, baja energía)	Web (alta carga)	IoT (baja energía)	Redes pequeñas	Mensajería empresarial	Transmisión rápida
Escalabilidad	Alta	Media	Media	Limitada	Alta	Media

Beneficios de MQTT en aplicaciones de IoT.

- **Bajo consumo de recursos:** MQTT está diseñado para ser eficiente, ideal para dispositivos con recursos limitados como microcontroladores. Esto permite ahorrar energía y optimizar el rendimiento del hardware.
- **Optimización de ancho de banda:** Los mensajes de MQTT son ligeros y requieren poco ancho de banda, lo que lo hace perfecto para entornos con conexiones de red lentas o inestables, como redes móviles o rurales.
- **Alta escalabilidad:** El protocolo soporta la conexión de un número masivo de dispositivos sin afectar significativamente el rendimiento, lo que facilita su adopción en aplicaciones de IoT a gran escala.
- **Seguridad integrada:** Proporciona opciones de cifrado y autenticación que protegen la integridad y la privacidad de los datos transmitidos, cumpliendo con los estándares de seguridad más avanzados.

- ***Soporte multiplataforma:*** MQTT es compatible con diversos lenguajes de programación y plataformas, lo que facilita su integración en distintos sistemas y aplicaciones de IoT.

- ***Publicador:*** El publicador es un productor de mensajes que genera y envía información a través de un canal. En lugar de enviar mensajes directamente a destinatarios específicos, el publicador envía los datos a un intermediario (Bróker), lo que permite que cualquier suscriptor interesado reciba esa información sin una conexión directa entre el publicador y los consumidores.

- ***Suscriptor:*** El suscriptor es el receptor o consumidor de mensajes. Los suscriptores se registran en uno o más tópicos de interés a través del bróker. Cuando un mensaje nuevo es publicado en uno de esos tópicos, el bróker distribuye el mensaje a todos los suscriptores asociados. Esta separación permite a los suscriptores recibir solo la información que les interesa.

- ***Bróker:*** Es el intermediario encargado de gestionar las comunicaciones entre publicadores y suscriptores. Recibe los mensajes publicados y los distribuye a los suscriptores correspondientes en función de los tópicos. El bróker actúa como un sistema de enrutamiento eficiente, desacoplando la relación directa entre el publicador y el suscriptor, mejorando la escalabilidad y flexibilidad de los sistemas distribuidos.

- ***Tópico:*** Un tópico es una categoría o canal de comunicación donde se publican los mensajes. Funciona como un espacio de nombres que organiza y clasifica los mensajes para que los suscriptores puedan recibir solo aquellos que correspondan a los tópicos de su interés. Un publicador puede enviar mensajes a un tópico específico, y los suscriptores que hayan manifestado interés en ese tópico recibirán los mensajes correspondientes.

Se presenta en forma general la estructura de comunicación basada en el protocolo MQTT utilizado para intercambiar datos entre dispositivos mediante un broker. Un sensor de temperatura mide y publica los datos (por ejemplo, 28°C) en un tópico denominado "temperature". El bróker recibe esta información y la distribuye a todos los dispositivos suscritos, como una PC/Laptop y un móvil, que se actualizan en tiempo real con los datos enviados por el sensor. Este tipo de arquitectura es común en sistemas IoT, ya que permite una comunicación eficiente entre varios dispositivos mediante un intermediario centralizado.

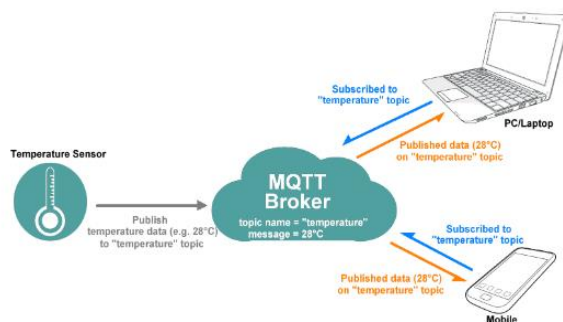


Fig. 2. Funcionamiento MQTT

Nota: fuente [24]

5. Diseño General del Sistema Electrónico

Para implementar el firmware propuesto en el presente trabajo es importante conocer la estructura del sistema electrónico a controlar. A continuación, se presenta en la figura 3, de forma general un diagrama en bloques del dispositivo electrónico. Y en la figura 4, la implementación del dispositivo PCB.

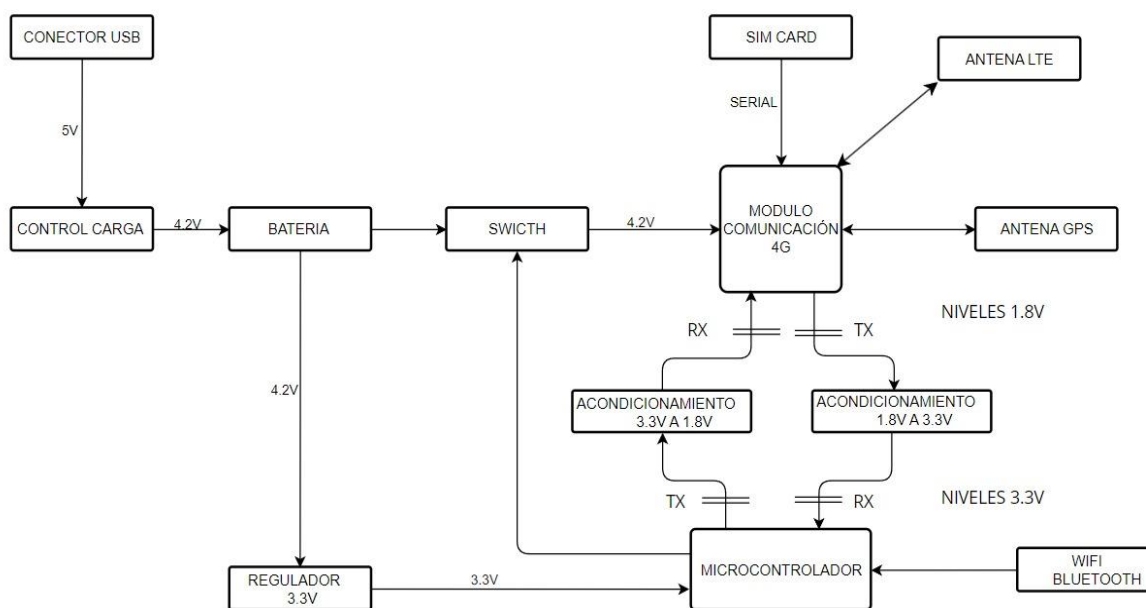


Fig. 3. Esquema General del Sistema Electrónico.



Fig. 4. Implementación del dispositivo en PCB

El diseñado firmware se considera para operar en un dispositivo de rastreo compuesto por un módulo de control que se comunica con un módem de comunicación 4G. Este módem ofrece dos opciones de comunicación: la primera es mediante un módulo 4G CAT-M1, que permite la transmisión de datos a una plataforma web y la segunda es a través del receptor GNSS, encargado de capturar datos de posición geográfica. Los componentes elegidos para este proyecto han sido seleccionados cuidadosamente por su idoneidad y capacidad para cumplir con los requerimientos del dispositivo de rastreo basado en tecnología GNSS y 4G. Cada uno de ellos desempeña un papel fundamental en el funcionamiento del sistema. En caso de que se requiera información a profundidad del dispositivo hardware, esta se encuentra en el documento de trabajo de grado del estudiante de ingeniería electrónica James Bedoya Muentes, quien fue el encargado dentro de la empresa IOT Solutions del desarrollo hardware.

Descripción de los Bloques

Conector USB. Este bloque permite la conexión del dispositivo a una fuente externa de energía a través de un cable USB. El conector USB es la entrada principal de carga para la batería interna del sistema.

Control de Carga. Gestiona el proceso de carga de la batería, asegurando que la fuente de energía conectada a través del puerto USB se almacene correctamente, evitando sobrecargas y prolongando la vida útil de la batería.

Switch de potencia. Este componente controla el flujo de energía desde la batería hacia el resto de los módulos del sistema, permitiendo encender o apagar el módulo de comunicación 4G optimizando el consumo energético.

Acondicionamiento 3.3V a 1.8V y 1.8V a 3.3V. Los módulos de comunicación de 4G a nivel lógico se comunican a través de una interfaz serial, estas interfaces operan en niveles de 1.8V. En el caso que se requiera una comunicación con niveles de 3.3V es necesario un acondicionamiento de señales para que los módulos puedan intercambiar información.

Regulador de 3.3V. Convierte la tensión de la batería a 3.3V, que es el nivel de operación requerido para alimentar tanto para la Unidad de control como los circuitos asociados. Asegura que los componentes operen dentro de sus rangos de voltaje especificados.

SIM Card. Autentica al dispositivo en la red celular, permitiendo la conexión segura y confiable a la red LTE. Almacena información única del usuario, configuraciones de red, y claves de cifrado que garantizan la privacidad y seguridad de los datos transmitidos.

Antena LTE. Esta antena se encarga de permitir la conexión RF del dispositivo a la red LTE, facilitando la transmisión de datos GPS a un servidor remoto o una plataforma en la nube.

Antena GPS. Responsable de la recepción de señales satelitales para la obtención de datos de geolocalización.

Antena ESP32-C3. Encargada de gestionar la comunicación inalámbrica a través de Wi-Fi y Bluetooth. Estas capacidades pueden ser empleadas en el futuro para tareas auxiliares, como la configuración y pruebas del dispositivo, entre otras funcionalidades.

Batería. Este es el bloque de alimentación encargado de proporcionar la energía necesaria para que el sistema funcione. Dependiendo de la configuración, puede ser una batería recargable de larga duración, diseñada para operar en condiciones exigentes y garantizar una autonomía suficiente para el dispositivo. Además, el controlador optimiza el uso de la energía, activando modos de bajo consumo cuando sea necesario para prolongar la vida útil de la batería.

Módulo de Comunicación 4G (SIM7080G). Este componente es el núcleo de las comunicaciones del dispositivo, encargado de transmitir datos, como la información GNSS, a

través de redes LTE hacia una plataforma web o servidor remoto. Su función principal es capturar y procesar datos de posicionamiento geográfico mediante la red de satélites GNSS, obteniendo coordenadas precisas para el seguimiento y rastreo en tiempo real. Además, soporta múltiples protocolos de comunicación, como HTTP, MQTT y TCP/IP, lo que lo convierte en un elemento importante para la transmisión en tiempo real. Este módulo interactúa con las antenas LTE y GPS, asegurando una conexión estable y eficiente para enviar datos de posicionamiento, monitorización de rutas y otras aplicaciones de localización.

Unidad de Control. Es el núcleo del sistema, se trata de un dispositivo programable encargado de ejecutar el firmware objeto del presente trabajo. Este componente gestiona todas las operaciones lógicas y de control dentro del dispositivo, incluyendo la comunicación con los diferentes módulos. Además, supervisa los estados del sistema, toma decisiones basadas en las entradas recibidas, y garantiza la correcta ejecución de las funciones programadas, como la adquisición de datos y la transmisión de información.

6. Diseño Firmware

En este capítulo se presenta el proceso desarrollado para generar el modelo firmware a implementar.

Para diseñar el firmware de forma sistemática se desarrolla en diferentes fases las cuales se explicarán de forma detallada a continuación.

Definición de requerimientos

En la tabla III, se presentan los requisitos funcionales del firmware. Cada requisito está descrito en detalle junto con su justificación, explicando la importancia y el propósito de cada función dentro del contexto del proyecto.

Tabla III.

Requisitos funcionales del firmware

Requerimiento	Descripción	Justificación
1. El firmware debe ser escrito en un sistema de código abierto	Escribir el firmware en un sistema de código abierto garantiza flexibilidad, accesibilidad y sostenibilidad en el desarrollo del proyecto.	Las plataformas de código abierto son accesibles, flexibles y tienen gran soporte de la comunidad.
2. El firmware debe ser capaz de controlar el dispositivo de rastreo para captar la posición GNSS	Implementar el control del módulo SIM7080G para obtener datos GNSS (latitud, longitud).	Esta es una de sus funciones principales del firmware y para ello ha sido diseñado. Este control asegura que el sistema pueda cumplir con su propósito de obtener y procesar información de ubicación.
3. El firmware debe ser capaz de transmitir el mensaje de posición por medio de protocolo MQTT a un servidor propietario de la empresa.	Configuración de la conectividad para enviar datos de posición y estado a través del protocolo MQTT el cual esta optimizado para aplicaciones de IoT	MQTT es eficiente en el uso de ancho de banda y energía, adecuado para IoT.
4. El firmware debe ser capaz de procesar mensajes descendentes.	Una función que permite cambiar comportamientos del módulo principalmente frecuencias de transmisión y algunas funciones especiales.	La capacidad del firmware para procesar mensajes descendentes garantiza la flexibilidad y adaptabilidad del sistema en entornos cambiantes como por ejemplo áreas

		con poca cobertura de red o interferencias.
5. El firmware debe ser robusto ante eventos de fallo	El firmware debe contemplar posibles eventos de fallo, de modo que se eviten posibles bloqueos o bugs en su ejecución.	La robustez es esencial para asegurar el funcionamiento continuo y confiable en entornos diversos.
6. Considerar optimización de batería	En esta fase el dispositivo debe tener gestión de consumo de batería ya que esta es un elemento clave importante para dispositivos basados en IoT	Se requiere un sistema portable que pueda operar durante tiempos prolongados

6.1. Arquitectura firmware

Para lograr el cumplimiento de los requisitos establecidos anteriormente, se propone una arquitectura modular basada en máquinas de estado finitas (FSM). Esta permite una operación robusta y adaptable, minimizando errores como bloqueos y fallos en la adquisición de datos, y reiniciando automáticamente en caso de que ocurran. La FSM está conformada por diferentes estados cuya interacción define el comportamiento general del sistema, como se ilustra en la figura 5. Para el caso específico del firmware a desarrollar los estados principales gestionan tanto la adquisición de datos de posicionamiento como su transmisión. Además, se desarrollan dos modelos: uno general y una sub-máquina de estados, ambos formando parte de un modelo general que define funcionalidades específicas del sistema.

El funcionamiento general del dispositivo de rastreo puede describirse en una secuencia de pasos organizados para garantizar su operatividad:

Paso 1. El dispositivo se energiza inicialmente mediante la activación de un botón físico, lo que inicia su funcionamiento y permite completar el primer ciclo operativo. Una vez finalizado este ciclo, el dispositivo se programará para encenderse automáticamente en intervalos de tiempo predeterminados

Paso 2. El controlador del dispositivo se encarga de activar el receptor GNSS integrado para obtener los datos de posición. Una vez recopilada esta información, el sistema avanza al siguiente paso, que consiste en el envío de los datos obtenidos.

Paso 3. Una vez obtenidos los datos GNSS, se debe estructurar una trama que contiene la información de ubicación y otros parámetros relevantes, la cual se almacena temporalmente en un buffer de información.

Paso 4. El dispositivo establece una conexión LTE utilizando el módem SIM7080G y transmite el contenido del buffer a un servidor remoto mediante el protocolo MQTT, garantizando una comunicación confiable y eficiente.

Paso 5. Finalmente, el sistema desactiva el módulo SIM7080G para optimizar el consumo energético, entrando en modo de reposo hasta que concluya el intervalo de tiempo predefinido para el inicio del siguiente ciclo operativo.

Para los pasos mencionados con anterioridad a nivel de modelo de máquinas de estados se presenta la siguiente imagen.

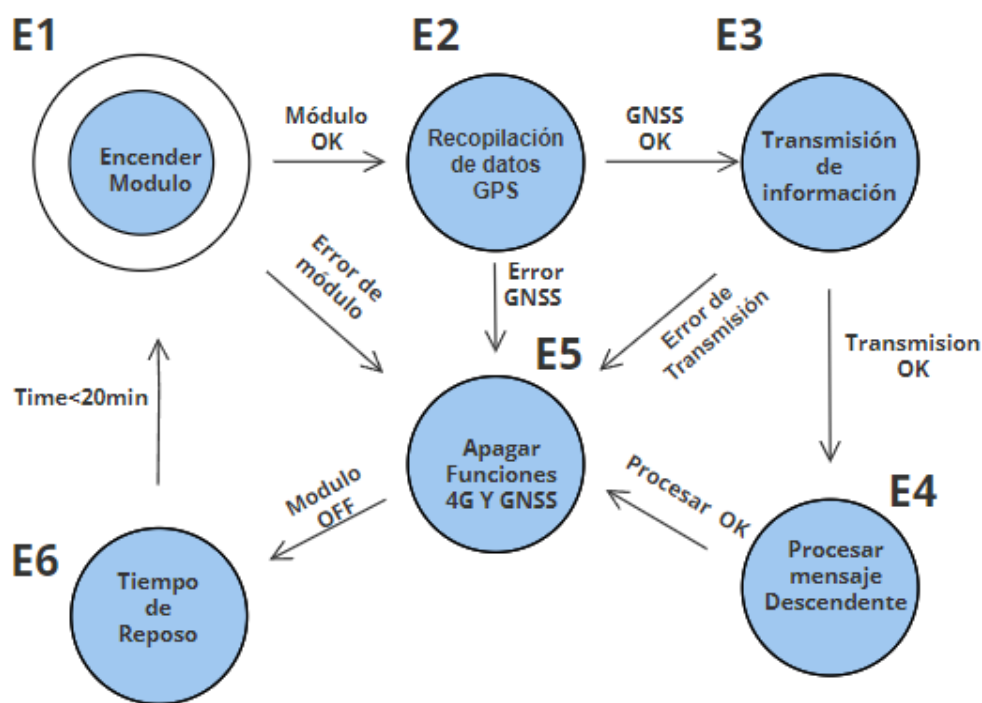


Fig. 5. Diagrama General.

6.1.1. Descripción de los estados y su transición

La arquitectura de la máquina propuesta consta de seis estados generales, cada uno responsable de ejecutar tareas específicas según los requisitos previamente definidos. A

continuación, se detallan en las tablas cada uno de estos estados, con una breve descripción de sus funciones principales y las transiciones entre ellos. Esto permite una clara comprensión del flujo operativo del sistema.

Tabla IV.

Descripción de los estados y su transición

Estado E1		Encender Módulo
Descripción	Este es el primer estado del sistema, donde se activa de forma física el dispositivo despertando el microcontrolador y este a su vez energiza al módulo SIM7080g.	
Transición de entrada	Son dos opciones que se tienen para alcanzar este estado, la primera mediante acción física de conexión de batería al dispositivo hardware se accede como estado inicial del proceso, en segundo lugar, mediante acción lógica cuando ha pasado el tiempo de reposo del sistema y el procesador del ESP32 se despierta.	
Transición de salida	Modulo enciende correctamente.	
Estado E2		Recolección de Datos GNSS
Descripción	Una vez que el módulo está encendido, el sistema pasa al estado de recolección de datos. Aquí, el dispositivo busca adquirir la información de ubicación a través del módulo GNSS integrado al módulo SIM7080G.	
Transición de entrada	En caso contrario se gestionará un error y se volverá a intentar la recolección de datos. Solo si el módulo responde con éxito al estado anterior.	
Transición de salida	Si se obtienen datos GNSS válidos, el sistema avanzará al siguiente estado. Si No se obtienen datos GNSS válidos, el sistema avanzará al estado apagar el módulo.	
Estado E3		Envío de trama de posición
Descripción	Si la recolección de datos GNSS es exitosa, el sistema procede a estructurar la trama con los datos obtenidos y transmitir la información a través del módulo 4G usando una conexión de datos por medio del protocolo MQTT.	
Transición de entrada	Si la recolección de datos GNSS es exitosa	
Transición de salida	Si el mensaje es enviado correctamente. Si se cumple el tiempo de espera y no se consigue enviar el mensaje saldrá del ciclo y se pagará el módulo.	
Estado E4		Procesar mensaje Descendente

máquinas permiten una gestión precisa de las funciones críticas del sistema, optimizando su comportamiento en situaciones específicas y mejorando la comunicación de datos.

La figura 6, presenta una sub-máquina de estados que modela el proceso de obtención de datos GNSS desde la activación del módulo SIM7080G hasta la validación de los datos recibidos. A continuación, se describen los pasos principales del funcionamiento:

Paso 1. El dispositivo inicia enviando comandos AT al módulo SIM7080G (estado E1). Se verifica la respuesta del módulo para confirmar su operatividad. Si no responde correctamente, se realizan hasta dos reintentos.

Paso 2. El sistema activa el receptor GNSS mediante comandos específicos (estado E2), habilitando la funcionalidad necesaria para la captura de datos de posición.

Paso 3. Se configura el módulo GNSS con parámetros iniciales requeridos, como la tasa de actualización y otros ajustes (estado E3).

Paso 4. Una vez configurado, se solicita información al módulo GNSS (estado E4) para obtener datos de posición como coordenadas, velocidad y hora.

Paso 5. Los datos de posición recibidos son validados (estado E5) para verificar que cumplen con el formato y si realmente se obtuvo un dato de posición válido. Si los datos son válidos, el sistema avanza; en caso contrario se reintenta y si no se obtiene un dato de posición válido se procede a apagar el dispositivo.

Paso 6. Si hay errores en el proceso de obtención o validación de datos, el sistema intenta adquirirlos mediante reintentos limitados (estado E6).

Paso 7. Si los problemas persisten tras los reintentos programados, se reinicia el módulo GNSS (estado E7) para intentar restaurar su funcionalidad.

Paso 8. En caso de no poder resolver el problema de comunicación después de los intentos permitidos, el sistema apaga las funciones de GNSS y LTE para conservar energía hasta un nuevo ciclo de intento.

Paso 9. Cuando los datos GNSS son validados como correctos, el sistema los prepara para su transmisión mediante la red LTE. La información se envía utilizando el protocolo MQTT.

Para los pasos mencionados con anterioridad a nivel de modelo de sub-máquinas de estados se presenta la siguiente imagen, se debe tener en cuenta que los dos estados de color azul que se muestran en la imagen pertenecen a el estado general.

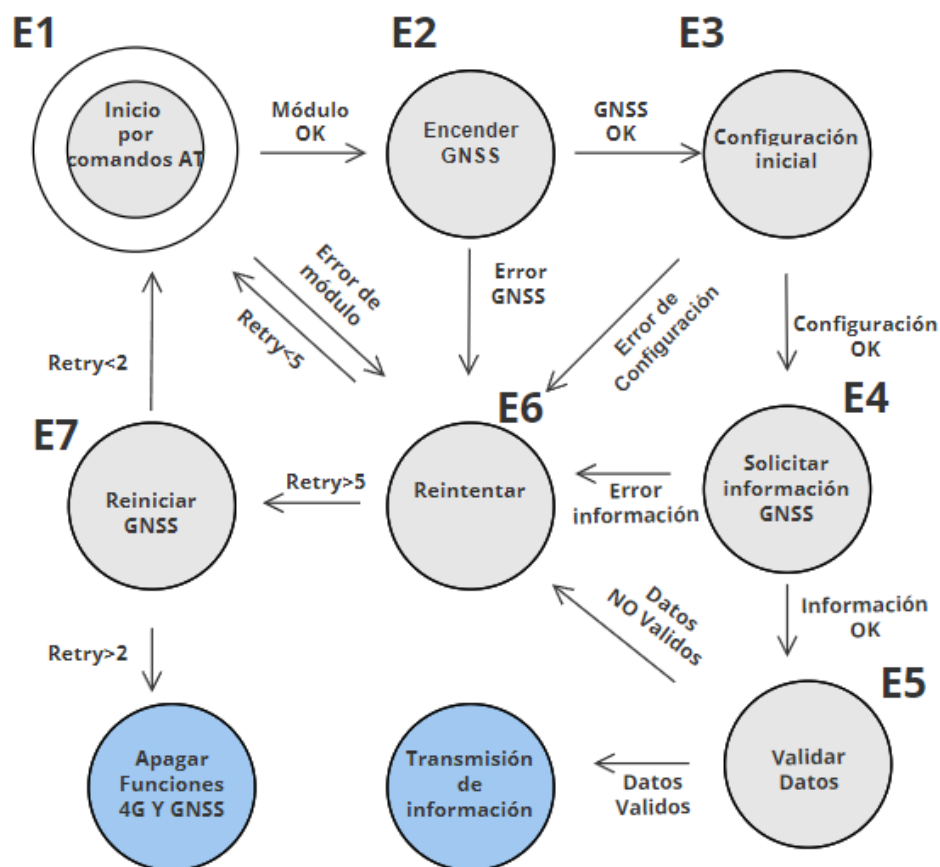


Fig. 6. Sub-máquina de estados de obtención de datos GNSS.

Tabla V.
Sub-máquina de estados

Estado E1		Inicio por comandos AT
Descripción	Este estado representa la inicialización del módulo mediante comandos AT	
Transición de entrada	Dispositivo este encendido	
Transición de salida	Si el módulo responde correctamente, avanza a "Encender GNSS"; si hay un error, realiza hasta 5 intentos antes de pasar a "Reiniciar GPS".	
Estado E2		Encender GNSS
Descripción	Se envía el comando AT+CGNSPWR=1 para encender el GNSS. El sistema espera una confirmación de encendido exitoso. Si el GNSS no responde correctamente, se realizan hasta 5 intentos antes de proceder a una corrección o reinicio.	

Transición de entrada	El dispositivo respondió correctamente a los comandos AT
Transición de salida	Si el módulo responde correctamente a los comandos AT que encienden los datos GNSS
Estado E3 Configuración Inicial	
Descripción	Se envía algunos comandos AT iniciales como por ejemplo el comando que permite la búsqueda de satélites de una forma rápida y así obtener la captura de datos GNSS
Transición de entrada	Llega desde "Encender GNSS" cuando el encendido es exitoso.
Transición de salida	Si la configuración es correcta, avanza al siguiente estado.
Estado E4 Solicitar información GPS	
Descripción	En este estado, se solicita la información de posición GNSS utilizando el comando AT+CGNSINF. Este comando devuelve datos como latitud, longitud, velocidad, y fecha. Si los datos se reciben correctamente, el sistema procede con su procesamiento.
Transición de entrada	Llega desde "Configuración Inicial" cuando la configuración fue exitosa.
Transición de salida	Si la información GPS es recibida correctamente (OK), avanza a "Validar Datos". Si los datos no son válidos o no se reciben, se pasa a "Reintentar".
Estado E5 Validar Datos	
Descripción	Se verifica la validez de los datos de posición recibidos desde el GNSS. El sistema analiza si la información cumple con una estructura definida Si los datos son válidos, se procede a armar la trama de datos.
Transición de entrada	Llega desde "Solicitar información GPS".
Transición de salida	Si los datos son válidos, avanza a "Enlace y armado de trama" el cual es un estado que pertenece al diseño general.
Estado E6 Reintentar	
Descripción	El sistema ingresa a este estado cuando una operación como "Encender GNSS", "Solicitar información GPS", o "Validar Datos" falla o no se tiene una respuesta exitosa. El sistema reintentará el proceso hasta un número máximo de intentos programados antes de proceder a apagar el módulo o reiniciarlo.
Transición de entrada	Llega desde cualquier estado que presenta fallas operativas.
Transición de salida	Si el reintento es exitoso, vuelve al estado anterior. Si no, pasa a "Apagar Módulo" después de los intentos fallidos.

Estado E7	Reiniciar GNSS
Descripción	Reinicia el modulo después de los intentos fallidos. Para evitar atascamientos en el funcionamiento del firmware y otros errores como una captura de datos GNSS fallida.
Transición de entrada	Llega después de terminar los reintentos sin éxito
Transición de salida	Tras el reinicio, el sistema intenta comenzar nuevamente desde "Inicio por comandos AT". Si el módulo llega por segunda vez a este estado se apagará.

La sub-máquina de estados representada en la figura 7, modela el proceso de envío de mensajes a través de la red LTE utilizando el módem SIM7080G. Este proceso abarca desde la activación del módulo hasta el envío exitoso de datos mediante el protocolo MQTT, a continuación, se describen los pasos principales:

Paso 1. El sistema inicia las funciones LTE enviando comandos AT al módulo SIM7080G (estado E1). Se verifica la respuesta del módulo para asegurar su correcto funcionamiento, con un máximo de tres reintentos permitidos.

Paso 2. Se detecta la presencia de la tarjeta SIM (estado E2). Si la SIM es detectada correctamente, el sistema avanza; de lo contrario, realiza hasta tres intentos antes de apagar el módulo.

Paso 3. Se verifica la calidad de la señal 4G (estado E3). El sistema espera un tiempo máximo de 30 segundos para recibir una señal válida. En caso de error, se apaga el módulo.

Paso 4. Una vez establecida la conexión 4G, se revisa el estado del servicio de red 4G (estado E4). Este paso asegura que el módulo esté correctamente registrado en la red antes de proceder al envío de datos.

Paso 5. Se envía un comando de ping al servidor MQTT para validar la conectividad (estado E5). Si el ping es exitoso, el sistema procede; en caso de error, se realizan reintentos antes de apagar el módulo.

Paso 6. Una vez verificada la conexión, se transmite el mensaje almacenado en el buffer (estado E6). Si el envío es exitoso, se registra el estado final; en caso contrario, se identifica como un error de transmisión.

Paso 7. En caso de errores persistentes en cualquier etapa, el sistema entra al estado de apagado de funciones GNSS y LTE (estado E7), optimizando el consumo energético del dispositivo.

Para los pasos mencionados con anterioridad a nivel de modelo de sub-maquinas de estados se presenta la siguiente imagen, se debe tener en cuenta que el estado de color azul que se muestran en la imagen pertenecen a el estado general.

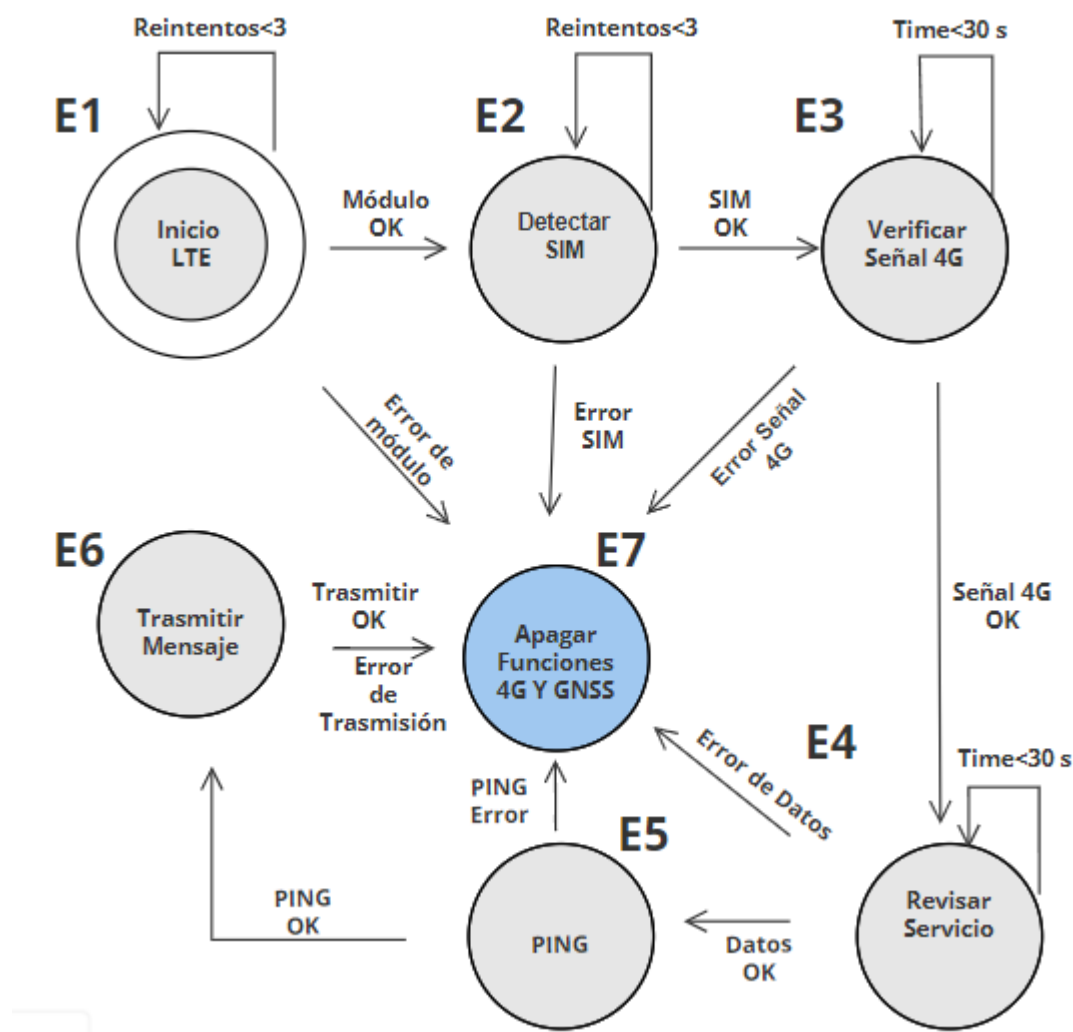


Fig. 7. Sub-máquina de estados de transición de mensaje.

Tabla VI.

Sub-máquina de estados de transición

Estado E1		Inicio por comandos AT
Descripción	El módulo inicia enviando el comando AT para verificar su estado básico. Si el módulo responde con OK, continúa con el proceso de inicialización.	
Transición de entrada	El estado se activa cuando se enciende el módulo LTE y se envía el comando AT. Se realiza hasta 3 intentos en caso de fallo.	
Transición de salida	Si el módulo responde con OK, pasa al estado de "Detectar SIM". Si no responde después de 3 intentos, transición a "Apagar Módulo".	
Estado E2		Detectar SIM
Descripción	¿El sistema envía el comando AT+ CPIN? para verificar si la tarjeta SIM está insertada y lista. Si responde READY, se confirma la detección de la SIM.	
Transición de entrada	Ingresa en este estado después de iniciar correctamente el módulo en "Inicio LTE".	
Transición de salida	Si la SIM responde con READY, avanza a "Revisar Señal". Si no se detecta la SIM, se realiza hasta 3 intentos antes de pasar a "Apagar Módulo".	
Estado E3		Verificar señal 4G
Descripción	Se ejecuta el comando AT+CSQ para verificar la intensidad de la señal. La respuesta devuelve el nivel de la señal, y si es adecuada, continúa con el flujo.	
Transición de entrada	Se accede a este estado después de confirmar la detección de la SIM.	
Transición de salida	Si la señal es adecuada, el sistema avanza a "Revisar Servicio". Si la señal está baja o ausente, se reintenta o se apaga el módulo.	
Estado E4		Revisar Servicio
Descripción	¿El sistema utiliza el comando AT+CREG? para verificar si el módulo está registrado en la red. Una respuesta válida confirma que el servicio está disponible para su uso.	
Transición de entrada	Transición desde "Revisar Señal" cuando la señal es adecuada.	
Transición de salida	Si el registro en la red es exitoso, pase a "PING". Si no hay registro en la red, el sistema reintenta o hace transición a "Apagar Módulo".	
Estado E5		PING
Descripción	Se utiliza el comando AT+PING=<IP> para realizar un ping a la red y comprobar la conectividad. Si el ping es exitoso, se confirma que la red está lista para la transmisión de datos.	
Transición de entrada	Este estado comienza tras confirmar que el servicio de red está disponible en "Revisar Servicio".	

Transición de salida	Si el ping es exitoso (responde con OK), el sistema avanza a "Transmitir Mensaje". Si falla, reintenta o hace transición a "Apagar Módulo".
----------------------	---

Estado E6	Envío de Mensaje
Descripción	En este estado, ya con la trama de datos definida y el tema correspondiente preparado, el sistema realiza la publicación del mensaje
Transición de entrada	Se accede tras un ping exitoso que valida la conectividad con la red.
Transición de salida	Si la transmisión de datos responde con OK, el ciclo de operación se completa. Si hay error en la transmisión, el sistema se reintenta o pasa a "Apagar Módulo".

Estado E7	Apagar Módulo
Descripción	El módulo se apaga para ahorrar energía al a ver terminado un ciclo de envío de mensajes o tras varios fallos en las etapas previas.
Transición de entrada	Se ingresa a este estado tras Múltiples fallos o tras completar el ciclo de transmisión de datos.
Transición de salida	Permanezca apagado hasta que se termine el tiempo ya establecido para que se reinicie el ciclo completo.

6.2. Diseño de trama de posición a enviar

En colaboración con el equipo de sistemas de IoT Tech Solutions, se define una estructura de trama que contiene los campos esenciales para implementar un sistema de rastreo funcional en una plataforma web. La trama fue diseñada para optimizar el transporte de información crítica como la identificación del dispositivo, su ubicación geográfica y la calidad de la señal.

Esta estructura garantiza la transmisión de los datos necesarios para la correcta operación y monitoreo del dispositivo, facilitando la interpretación y uso de la información en la plataforma destino.

6.2.1. Estructura de la trama

La trama está estructurada en formato ASCII y se compone de 5 campos principales y 10 campos auxiliares, los cuales están separados por punto y coma. A continuación, se describirá en detalle cada uno de estos campos, explicando su propósito y cómo contribuyen al envío de información mediante el sistema de comunicación. Esta estructura organizada facilita la interpretación y el procesamiento de los datos transmitidos.

Tabla VII.
Estructura de la trama

Campo	Nombre	Descripción	Longitud
1	imei	Identificador único del dispositivo, correspondiente al IMEI del módulo SIM7080G.	15 bits
2	rgps	Información de geolocalización obtenida del comando AT AT+CGNSINF (latitud, longitud).	130 bits
3	mRsrp	Potencia de referencia de la señal recibida, medida en dBm.	6 bits
4	mRssi	Intensidad de la señal recibida, medida en dBm.	6 bits
5	mBand	Banda LTE utilizada para la comunicación.	6 bits
6	aux1-aux10	Campos auxiliares reservados para información adicional o futura expansión del sistema.	6 bits

A continuación, se muestra un ejemplo de una trama generada:

356789012345678;3.415; -76.516;20;70;1;00;00;00;00;00;00;00;00.

Tabla VIII.
Ejemplo de una trama

Campo	Descripción
356789012345678	IMEI del dispositivo.
Lat:3.415;Lon:-76.516	Datos de posición geografía
20	RSRP (en dBm).
70	RSSI(en dBm).
1	Banda LTE activa
00	Campos auxiliares reservados, sin información adicional por el momento.

6.2.2. Plataforma de desarrollo de Firmware

Se selecciona Arduino IDE como la plataforma de desarrollo para el diseño del firmware, considerando su versatilidad y capacidad para adaptarse a los requerimientos específicos del sistema. Esta herramienta ofrece un entorno flexible que facilita el desarrollo y prueba de prototipos, permitiendo implementar y verificar de manera eficiente los estados y transiciones

definidos en el sistema. Además, su amplia compatibilidad con módulos y bibliotecas la convierte en una opción ideal para optimizar el proceso de diseño y despliegue del firmware [25].

6.2.3. Comunicación con el Módulo SIM7080G

Para comprender el funcionamiento del módem SIM7080G, se llevó a cabo un proceso de familiarización utilizando una tarjeta de desarrollo CatM Unit, que es un módulo de comunicación inalámbrica de modo dual basado en el SIM7080G. Este módulo es compatible con las tecnologías CAT-M y NB-IoT, lo que lo hace ideal para aplicaciones IoT que requieren conectividad confiable. Ofrece tasas de respuesta adaptativas, ajustando la velocidad de transmisión según las necesidades de la aplicación, y es compatible con múltiples protocolos, incluyendo MQTT, HTTP, y TCP/IP, lo que facilita su integración en diversos sistemas. Además, cuenta con una interfaz de antena externa SMA, que mejora la estabilidad de la señal, haciéndolo adecuado para aplicaciones como monitoreo remoto y transmisión de datos en tiempo real en entornos con baja cobertura [26].

A continuación, se presenta en la figura 8, una imagen que ilustra la tarjeta de desarrollo CatM Unit y los componentes que lo conforman como sus dos antenas LTE y GNSS y su fuente de poder.

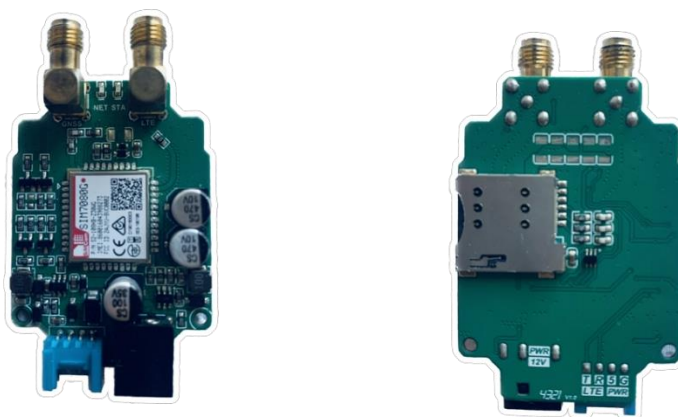


Fig. 8. Tarjeta de desarrollo CatM Unit
Nota: Fuente [27]

Tabla IX.

Características tarjeta de desarrollo CatM Unit

Característica	Descripción
Diseño Integrado	Comunicación y posicionamiento integrados con interfaces duales SMA para antenas LTE y GNSS.
Modos de operación	Cat-M y NB-IoT con cobertura global.
Velocidades de enlace	Cat-M: Enlace ascendente: 1119 Kbps, Enlace descendente: 589 Kbps. NB-IoT: Enlace ascendente: 150 Kbps, Enlace descendente: 136 Kbps.
Protocolos soportados	TCP, UDP, HTTP, HTTPS, TLS, DTLS, PING, LWM2M, COAP, MQTT y otros.
Certificaciones	A. Las especificaciones técnicas de los productos de la compañía son:
GNSS (Sistema de Navegación)	Compatible con GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo.
Ranura para tarjeta SIM	Ranura para tarjeta micro SIM.
Fuentes de alimentación	Entrada CC externa de 9-24 V (conector CC de 5,5/2,1 mm), circuito CC/CC integrado para convertir 9-24 V a 5 V. Alimentación externa de CC de 5 V a través del cable HY2.0-4P.
Interfaz de comunicación	UART (3,3 V TTL) con control mediante comandos AT.
Plataforma compatible	Compatible con Arduino IDE y UIFlow.

Se configuró un entorno de prueba conectando un computador a un ESP-32C3 programado como convertidor serial a través de un puerto USB, que a su vez estaba enlazado a la tarjeta de desarrollo, cabe recalcar que este microcontrolador fue escogido por sus características técnicas las cuales lo hacen adecuado para el desarrollo del dispositivo. Esta configuración permitió interactuar y conocer sus capacidades en un entorno controlado

La figura 9, presenta el diagrama de comunicación utilizado para la familiarización con el módulo SIM7080G. En este, se puede observar la estructura del sistema y los componentes que conforman este kit inicial, incluyendo el PC, el ESP32-C3, y el módulo SIM7080G. Este esquema permitió comprender el funcionamiento del módulo.

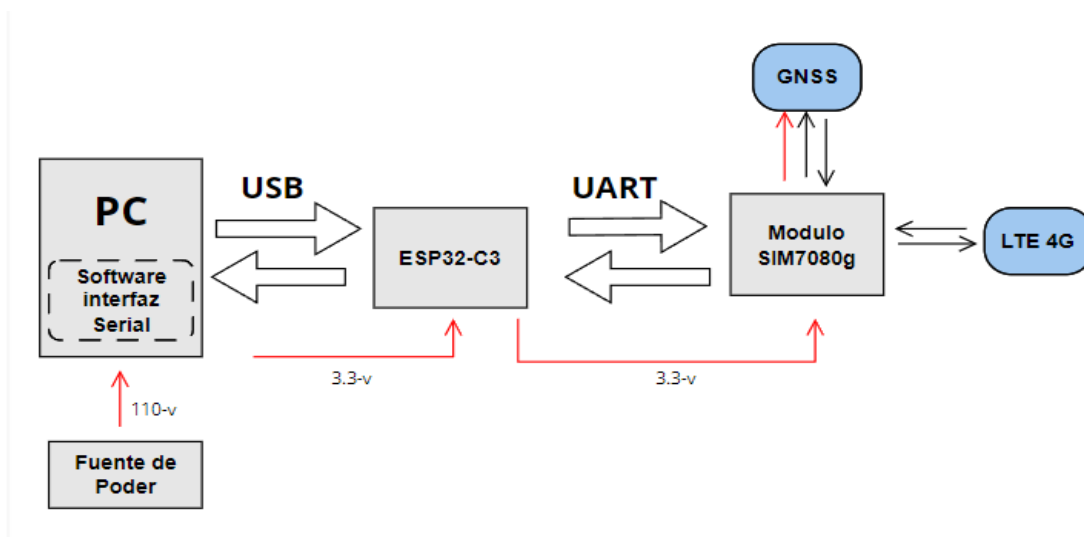


Fig. 9. Comunicación Dispositivo SIM7080G.

A continuación, se presenta en la figura 10, una imagen que ilustra el montaje de funcionamiento del módulo SIM7080G y los componentes que lo conforman, permitiendo un mayor entendimiento de su configuración.

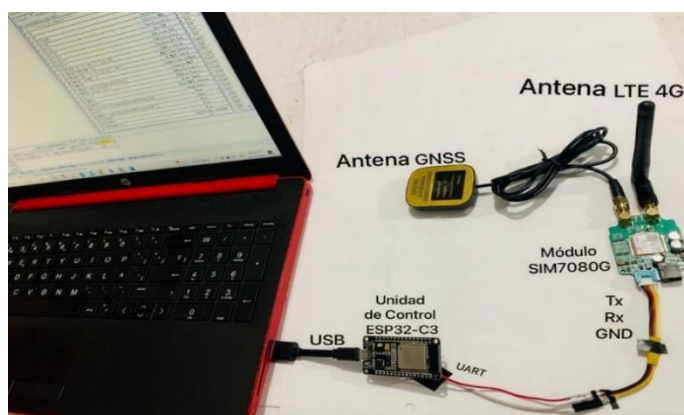


Fig. 10. Montaje para pruebas de funcionamiento del módulo SIM7080G

En la figura 11, se muestra un ejemplo del uso del software SSCOM, el cual permite la comunicación mediante comandos AT con el módulo SIM7080G. En la imagen se observan algunos de los comandos enviados y las respuestas recibidas por parte del módulo, como la

verificación de la señal LTE, la activación de los datos móviles y el establecimiento de la conexión a la red. Es importante destacar que SSCOM facilita esta interacción al ofrecer comandos preestablecidos por el usuario, simplificando el uso y optimizando la comunicación con el módulo 4G.

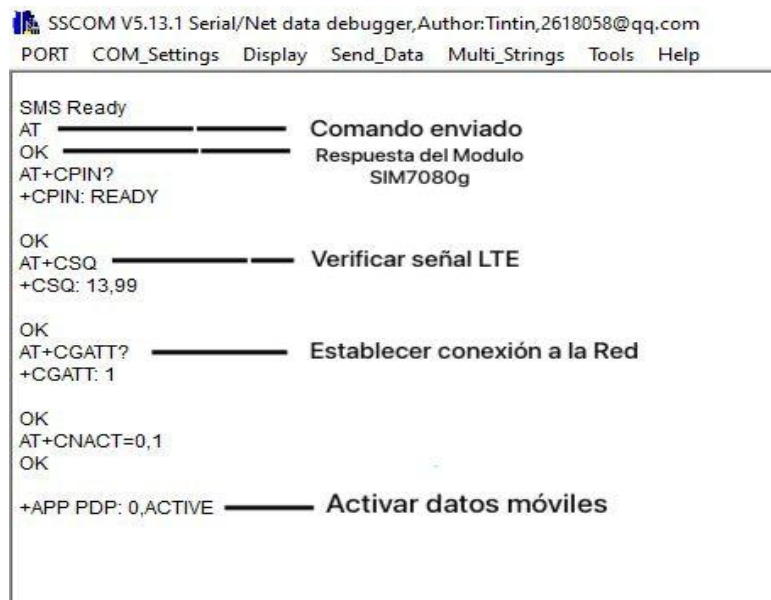


Fig. 11. Comunicación mediante comandos AT con el módulo SIM7080G
Nota: Fuente [28]

- **Software SSCOM:** Esta herramienta se utiliza para la comunicación con el módem SIM7080G mediante comandos AT. Actúa como un terminal que permite enviar y recibir datos entre el computador y el módulo, facilitando el diagnóstico y la configuración del dispositivo.
- **Computador:** Actúa como la interfaz principal de control y supervisión del sistema, permitiendo la ejecución del software necesario (SSCOM) y proporcionando la plataforma desde la cual se envían los comandos y se recibe la retroalimentación del módulo.
- **Convertidor Serial:** Para la comunicación entre el computador y la tarjeta de desarrollo, se empleó un ESP32 programado específicamente para funcionar como un convertidor serial. Este dispositivo permite traducir las señales de USB a TTL (Transistor-Transistor Logic), facilitando la interacción entre el módulo SIM7080G y el computador. Gracias a su configuración, el ESP32 actúa como un puente que interpreta y envía comandos AT.

- **Tarjeta de Desarrollo con el Módulo SIM7080G Integrado:** Esta placa de desarrollo contiene el módem SIM7080G y sus conexiones necesarias, facilitando el acceso a todas las funcionalidades del módulo para su evaluación y pruebas en el entorno de desarrollo.

- **Antena GNSS:** El módulo SIM7080G está equipado con una antena GNSS que permite la recepción de señales satelitales para la obtención de datos de posicionamiento precisos. Esto es clave para el rastreo y localización en aplicaciones de monitoreo en tiempo real.

- **Antena LTE:** Es un elemento pasivo diseñado para facilitar la recepción y transmisión de señales de radiofrecuencia en redes 4G. Aunque desempeña un papel fundamental en la conectividad física, es importante destacar que la conexión efectiva con servidores remotos o plataformas web depende de las capas lógicas del modelo de comunicación, como MQTT, TCP o UDP, que gestionan el intercambio de datos a nivel de red y aplicación. Comprender el modelo OSI de comunicaciones es esencial para contextualizar correctamente el rol de las antenas en el sistema, ya que su función se limita al manejo de señales, mientras que las capas superiores aseguran la transmisión y recepción de la información recopilada.

Mediante esta configuración, se estableció una sesión de comunicación serial con el módulo SIM7080G. Se enviaron diversos comandos AT para probar las funciones básicas del módulo, como la inicialización de la red celular, la obtención de datos GNSS, la verificación de la conectividad a través de la red LTE.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los comandos AT utilizados para interactuar con el módulo GNSS, junto con sus respuestas fundamentales para comprender el comportamiento del módulo en términos de activación, obtención de datos de ubicación y configuración de la salida de datos.

Tabla X.
Ejemplo de Comando AT

Comando AT	Descripción del comando	Respuesta típica	Significado de la respuesta
AT+CGPSPWR=1	Activa el módulo GPS.	OK	El GNSS ha sido activado y está listo para comenzar a recibir señales de satélites y obtener datos de posicionamiento.

AT+CGPSPWR=0	Desactiva el módulo GPS.	OK	El GNSS ha sido desactivado, lo que detiene la recepción de datos satelitales y reduce el consumo de energía.
AT+CGPSSTATUS?	Consulta el estado del GPS, como si ha fijado la posición o no.	+CGPSSTATUS: Location 3D Fix	El GNSS ha determinado con precisión la ubicación en 3D, lo que indica que tiene una señal satelital fuerte y estable.
AT+CGPSINFO	Solicita la información de ubicación GPS (latitud, longitud).	+CGPSINFO: 25.034,121.564,...	La respuesta contiene las coordenadas actuales del dispositivo (latitud, longitud) y posiblemente datos adicionales como la altitud.
AT+CGPSINFOCFG=1,31	Configura la salida de los datos GPS en formato NMEA (formato estándar de navegación).	OK	La salida de los datos GNSS ha sido configurada en formato NMEA, lo que permite integrarse fácilmente con sistemas de navegación.
AT+CGNSTST=1	Inicia la transmisión continua de datos GNSS en tiempo real.	OK	El dispositivo ha comenzado a transmitir los datos GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) continuamente, útil para rastreo en tiempo real.
AT+CGPSRST=1	Reinicia el módulo GPS, restableciendo la búsqueda de satélites.	OK	El módulo GNSS ha sido reiniciado, lo que permite resolver posibles problemas de conexión con los satélites o reiniciar el rastreo.

Nota: Fuente [28]

Para establecer una comunicación vía LTE, es necesario ejecutar una serie de comandos AT en una secuencia específica. Estos comandos son fundamentales para garantizar una conexión exitosa, ya que permiten configurar y verificar aspectos importantes de la comunicación. Entre ellos, se incluyen comandos para obtener información sobre la calidad de la señal de red, el estado del registro en la red, y la disponibilidad de datos móviles. A continuación, se presenta una lista detallada de los comandos AT utilizados en este proceso.

Tabla XI.
Ejemplo de Comando LTE

Comando AT	Descripción del comando	Respuesta típica	Significado de la respuesta
AT+CSQ	Consulta la calidad de la señal LTE.	+CSQ: 20,0	La calidad de la señal es buena. El valor 20 indica la intensidad de la señal (en una escala de 0 a 31), y 0 significa que no hay errores en la transmisión.
AT+CGATT?	Consulta si el módulo está registrado en la red LTE.	+CGATT: 1	El dispositivo está conectado y registrado en la red LTE (1 significa conectado; 0 significa no conectado).
AT+CREG?	Verifica el estado del registro en la red celular.	+CREG: 0,1	El módulo está registrado en la red celular. El primer número (0) indica que no se notifican cambios automáticamente, y el segundo (1) significa que está registrado en la red.
AT+COPS?	Consulta el operador de red al que está conectado el dispositivo.	+COPS: 0,0,"Carrier"	El dispositivo está conectado al operador de red especificado. "Carrier" indica el nombre del proveedor de servicios.
AT+CGDCONT=1,"IP","internet"	Configura el contexto PDP para la conexión de datos móviles.	OK	El contexto de datos se ha configurado correctamente, permitiendo que el dispositivo se conecte a Internet a través de la red celular.
AT+CPIN?	Verifica el estado del PIN de la tarjeta SIM.	+CPIN: READY	La tarjeta SIM está lista para ser utilizada (READY). Si la SIM requiere un PIN, se mostraría otro estado, como SIM PIN o SIM PUK.
AT+CMGF=1	Configura el formato de los mensajes SMS en modo texto.	OK	El comando ha sido aceptado, y los mensajes SMS ahora se enviarán en un formato de texto legible en lugar de formato PDU (datos codificados).

Nota: Fuente [29]

7. Desarrollo

El proceso de desarrollo del firmware para el dispositivo de monitoreo mediante posicionamiento global GNSS, basado en tecnología CAT-M1, se llevó a cabo de forma sistemática y estructurada, siguiendo una serie de fases que abarcan desde la implementación inicial hasta las pruebas de campo. Este apartado documenta detalladamente cada una de las etapas clave del desarrollo, destacando las técnicas empleadas, las herramientas utilizadas, y los ajustes realizados para optimizar el desempeño del sistema.

7.1. Herramientas empleadas

- Plataforma de desarrollo: Arduino IDE.
- Hardware: Módulo SIM7080G, placas de desarrollo compatibles.
- Protocolo de comunicación: MQTT, configurado para optimizar el uso de ancho de banda en aplicaciones IoT.
- Software auxiliar: Terminal de comandos y entornos de depuración.

7.2. Proceso de codificación

Para comenzar con la implementación del código, partiendo de una arquitectura modular basada en Máquinas de Estados Finitos, se utilizará la estructura Switch-case junto con los comandos de comunicación LTE y GNSS previamente trabajados con el módulo SIM7080G. El código se organizará en funciones, cada una diseñada para realizar tareas específicas, lo que permitirá estructurar y optimizar el desarrollo del firmware.

En el siguiente apartado se describirán las funciones del firmware, detallando sus entradas, salidas y el propósito de cada una. Estas funciones se clasificarán en funciones de alto nivel y funciones de bajo valor, según su complejidad y su rol dentro del código. Esta división modular no solo facilita la comprensión y el mantenimiento del sistema, sino que también asegura una mayor flexibilidad y escalabilidad, permitiendo realizar ajustes y mejoras de manera estructurada.

Tabla XII.
Funciones de Bajo Nivel

Nombre de la función	bool sendATcommand (char* ATcommand, char* expected_answer, unsigned int timeout);
Funcionamiento General	La función sendATcommand se encarga de enviar un comando AT a través de un puerto serial y esperar una respuesta específica del módulo, con un tiempo límite determinado. Esta función es esencial para la comunicación con módulos que utilizan comandos AT, como los módulos de comunicación LTE o GNSS, ya que permite verificar si el comando fue ejecutado correctamente.
Parámetros que recibe	- const char ATcommand: Comando AT que se enviará al módulo. - const char expected_answer: Respuesta esperada del módulo. - unsigned int timeout: Tiempo máximo para esperar la respuesta en milisegundos.
Parámetros que retorna	bool: Retorna true si se recibe la respuesta esperada dentro del tiempo límite, de lo contrario, false.
Nombre de la función	bool modem_GetIMEI (char* receiveBuffer);
Funcionamiento General	La función comienza limpiando el buffer de entrada serial y enviando el comando AT+GSN al módulo. Luego, utilice modem_WaitForMessage para esperar la respuesta del módulo. La función modem_WaitForMessage captura la respuesta en auxbuf, usando caracteres delimitadores específicos (0x0A como inicio y 0x0D como fin) y un tiempo de espera (timeout) de 500 ms. Si se recibe correctamente la respuesta, la función copia los primeros 15 caracteres de auxbuf en receiveBuffer, donde almacena el número IMEI. Finalmente, la función retorna true si el IMEI fue copiado con éxito, o false en caso contrario.
Parámetros que recibe	receiveBuffer: Un puntero a un arreglo de caracteres donde se almacenará el número IMEI obtenido.
Parámetros que retorna	La función retorna un valor booleano (true o false): True si la obtención del IMEI fue exitosa y se almacenó en receiveBuffer. False si no se pudo obtener el IMEI.

Tabla XIII.
Funciones de alto Nivel

Nombre de la función	bool modem_WaitForMessage (char* ModemResponse, char bsof, char beof, uint8_t lindex, unsigned int timeout);
Funcionamiento General	La función se encarga de leer una respuesta del módulo hasta encontrar caracteres específicos de inicio y fin, tomando solo el contenido entre esos delimitadores. Esta función es útil para extraer información específica de la respuesta del módulo, como datos de longitud y latitud, interpretando la información entre los caracteres de inicio y fin.
Parámetros que recibe	ModemResponse: Un arreglo de caracteres donde se almacenará la respuesta extraída del módulo. bsof: Carácter que indica el inicio de la respuesta. beof: Carácter que indica el final de la respuesta. lindex: Índice límite que define la cantidad máxima de caracteres para la respuesta. timeout: Tiempo máximo en milisegundos para esperar la respuesta.
Parámetros que retorna	La función retorna un valor booleano (true o false): true si se encuentra la respuesta delimitada dentro del tiempo de espera. false si no se obtiene la respuesta esperada antes de que expire el tiempo.

Nombre de la función	bool modem_GetSystemReport (int8_t & num_rsrp, int8_t & num_brssi, int8_t & num_band)
Funcionamiento General	Esta función se encarga de obtener información de la red móvil, como los valores de RSRP (potencia de referencia de señal), RSSI (indicador de intensidad de señal recibida), y el número de banda de operación (LTE). Primero, limpia el buffer de entrada del módem, envía el comando AT para obtener el estado de la red, y analiza la respuesta para extraer los datos relevantes. Apaga el receptor GNSS y verifica si el dispositivo está conectado en modo LTE CAT-M1 antes de extraer la información.
Parámetros que recibe	- int8_t & num_rsrp: Referencia para almacenar el valor absoluto del RSRP. - int8_t & num_brssi: Referencia para almacenar el valor absoluto del RSSI. - int8_t & num_band: Referencia para almacenar el número de la banda LTE detectada.
Parámetros que retorna	Retorna un valor booleano: - true: Indica que se obtuvieron los datos de la red exitosamente. - false: Indica que no se logró obtener los datos.

7.3. Pruebas

En el marco del desarrollo del dispositivo de rastreo y monitoreo, se han diseñado pruebas específicas para evaluar su desempeño en términos de precisión y eficiencia energética. Estas pruebas se estructuran en tres fases diferenciadas que permitirán validar los objetivos funcionales del sistema:

7.3.1. Fase 1: Verificación de recepción de trama de posición

Para iniciar esta prueba, se utiliza una secuencia de comandos AT que permitirá establecer comunicación con un dispositivo específico. Durante el experimento, se transmitirá manualmente un mensaje mediante el protocolo MQTT y los datos enviados y recibidos se visualizan con MQTT Box [30], una herramienta que actúa como cliente para verificar los datos de posición transmitidos al tópico. Este proceso también incluye el uso de SSCOM, que facilita la interacción manual con el módem para realizar la adquisición de tramas de posición. Posteriormente, los datos de longitud y latitud se graficarán en Google Maps para evaluar la precisión y calidad de los datos obtenidos. Este enfoque busca demostrar la efectividad del sistema y validar la consistencia de las posiciones registradas [31].

El funcionamiento general del sistema consiste en establecer comunicación con un módulo LTE utilizando comandos AT para gestionar la conexión a la red móvil y al protocolo MQTT, siguiendo los pasos detallados a continuación:

- **Encender el módulo y verificar la SIM:** Se comprueba que el módulo está operativo con el comando `AT` y que la SIM está lista para usarse con `AT+CPIN?`. Una respuesta de `+CPIN: READY` confirma el éxito.
- **Verificar la señal:** Se utiliza el comando `AT+CSQ` para evaluar la intensidad de la señal y asegurar que la calidad sea suficiente para la comunicación.
- **Establecer conexión de red:** Con `AT+CGATT?`, se verifica que el módulo esté adjunto a la red móvil. Una respuesta de `+CGATT: 1` indica que el módulo está conectado.
- **Habilitar datos móviles:** Se activa el contexto PDP mediante el comando `AT+CNACT=0,1`, permitiendo la transferencia de datos móviles. La respuesta esperada es `OK`.

- **Verificar el estado de la red:** El comando ``AT+CNACTION?`` confirma la asignación de una dirección IP y el estado activo de la conexión de datos, indicado por ``+APP PDP: 0,ACTIVE``.
- **Realizar un ping:** Se ejecuta el comando ``AT+SNPING4`` para evaluar la conectividad y latencia hacia un servidor remoto, verificando la respuesta satisfactoria del ping.
- **Configurar parámetros MQTT**
 - Se establecen los ajustes necesarios para la sesión MQTT:
 - `AT+SMCONF="KEEPTIME",600`` configura el tiempo de sesión.
 - `AT+SMCONF="URL","<servidor>`"` define el servidor MQTT.
 - `AT+SMCONF="CLEANSS",1`` limpia sesiones previas.
- **Establecer conexión MQTT:** Con el comando ``AT+SMCONN``, se conecta al bróker MQTT, habilitando el intercambio de datos.
- **Publicar y recibir datos:** Se suscribe a un tópico con ``AT+SMSUB`` y se publica información en él con ``AT+SMPUB``. Esto permite monitorear y verificar las tramas transmitidas y recibidas.
- **Finalizar sesión y apagar datos:** Finalmente, se cierra la conexión MQTT con ``AT+SMDISC`` y se desactiva el contexto PDP con ``AT+CNACTION=0,0``, liberando los recursos de red.

La figura 12, presenta la secuencia detallada, paso a paso, de los comandos AT necesarios para establecer comunicación con un módulo de red, habilitar los datos móviles y transmitir una trama utilizando el protocolo MQTT. En ella, se ilustra el flujo completo, desde la verificación inicial del módulo y la tarjeta SIM, la configuración de red y la activación de datos móviles, hasta la conexión con un servidor MQTT, la publicación de datos en un tópico y el cierre de la sesión. Este proceso también incluye pruebas de conectividad, como el envío de ping, y resalta las respuestas que confirman el éxito de cada etapa.

AT	_____	Encender módulo
OK		
AT+CPIN?	_____	Revisar SiM
+CPIN: READY		
OK		
AT+CSQ	_____	Verificar señal
+CSQ: 15,99		
OK		
AT+CGATT?	_____	Establecer conexión de Red
+CGATT: 1		
OK		
AT+CNACT=0,1	_____	Habilitar Datos móviles
OK		
+APP PDP: 0,ACTIVE		
AT+CNACT?		
+CNACT: 0,1,"100.70.223.185"	_____	Verificar estado de Red
+CNACT: 1,0,"0.0.0.0"		
+CNACT: 2,0,"0.0.0.0"		
+CNACT: 3,0,"0.0.0.0"		
OK		
AT+SNPING4="191.101.235.212",3,16,1000	_____	PING
+SNPING4: 1,191.101.235.212,558		
+SNPING4: 2,191.101.235.212,322		
+SNPING4: 3,191.101.235.212,228		
OK		
AT+SMCONF="KEEPTIME",600	_____	Tiempo de sesión MQTT
OK		
AT+SMCONF="URL","191.101.235.212","1883"	_____	Servidor IP MQTT
OK		
AT+SMCONF="CLEANSS",1	_____	Limpiar Sesión MQTT
OK		
AT+SMCONN	_____	Conexión MQTT
OK		
AT+SMCPUB="testgps",14,1,1		Suscripción al tópico
> 860016043988273;1,20241202201905.015,2.436942,-76.637519,-		
22.270,3.16,1,1,500,0,500,0,4,10006,4,10000,0,7b5704;00000000000000000000		Publicación al Tópico
		Trama a enviar
OK		
AT+SMDISC	_____	Cerrar sesión MQTT
OK		
AT+CNACT=0,0	_____	Apagar Datos
OK		
+APP PDP: 0,DEACTIVE		

Fig. 12. Secuencia detallada, paso a paso, de los comandos AT.

La figura 13, muestra la trama transmitida utilizando la aplicación MQTT Box (Aplicación que actúa como cliente MQTT y permite verificar la comunicación que se comunica dado y usando un Broquer MQTT del lado del servidor). En ella se observa la publicación de datos en el tópico denominado testgps, junto con información relevante como el mensaje enviado, la calidad de servicio (QoS), el identificador del mensaje (messageId), la longitud del mensaje y el contenido en formato Raw payload. Esto permite verificar y analizar la transmisión efectiva de la información entre el módulo y el servidor MQTT.

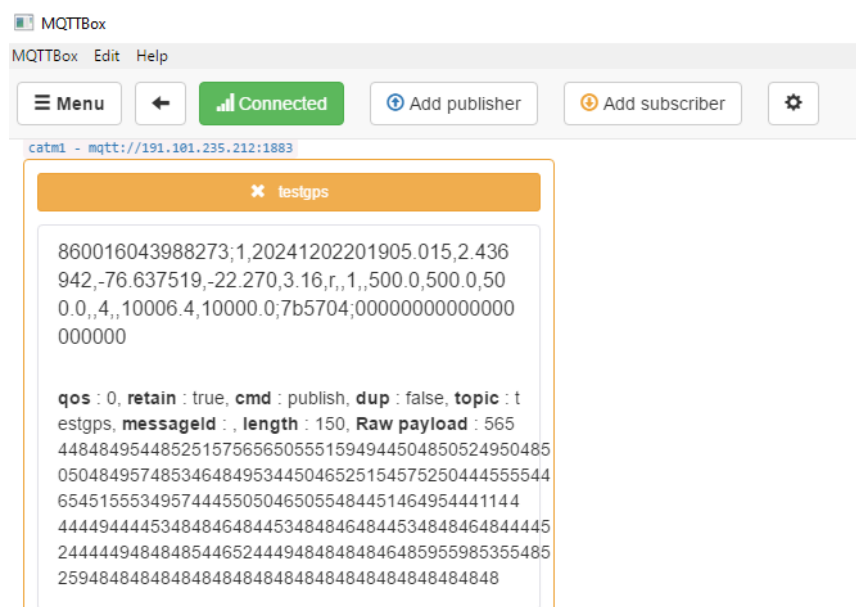


Fig. 13. Recepción de la trama en la aplicación MQTT Box.

La figura 14, muestra la gráfica de coordenadas que representa los datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo, específicamente longitud y latitud. En la gráfica, el punto rojo indica la posición capturada por el dispositivo, mientras que el punto azul corresponde a la posición de referencia medida con un celular. Ambas mediciones se realizaron en el mismo lugar para analizar el desfase entre las coordenadas obtenidas por el dispositivo y el punto de referencia. Este análisis permite evaluar la precisión del dispositivo de rastreo en la obtención de datos de ubicación.

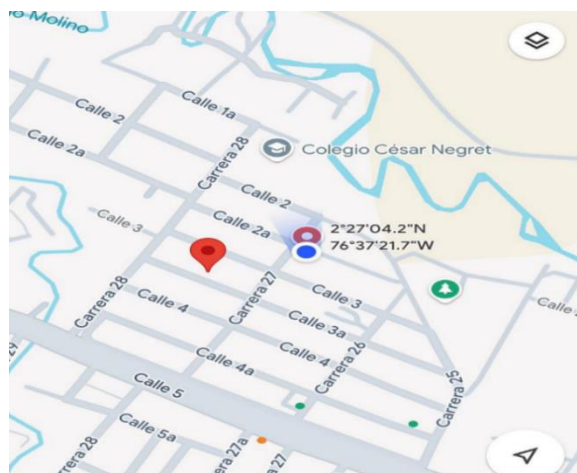


Fig. 14. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo.

Tabla XIV.

Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo.

Dispositivos de medida	Coordenadas
Dispositivo de Rastreo	2.450777, -76.623641
Punto de referencia	2.4511715, -76.6226968
Desface entre medidas	60 metros

7.3.2. Fase 2: Evaluación de Precisión Geográfica

El propósito de esta fase es medir la precisión del dispositivo en la obtención de datos de ubicación. Para ello, se realizarán pruebas en varios puntos estratégicos de la ciudad de Popayán, Cauca, comparando sus coordenadas con las registradas por un teléfono móvil de referencia. En cada punto se tomarán cinco muestras con ambos dispositivos, permitiendo calcular un promedio de efectividad y determinar el margen de error en las coordenadas reportadas. Esta evaluación busca validar el rendimiento del dispositivo en condiciones reales.

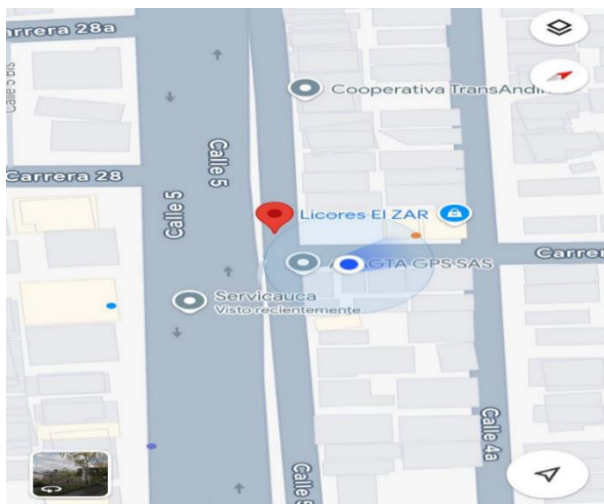


Fig. 15. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 1.

Tabla XV.

Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 1.

Muestra	Latitud	Longitud	Desface en metros
Punto de referencia	2.4492230	-76.6238480	0
1	2.4495952	-76.6241115	60m
2	2.4491520	-76.6240892	30m
3	2.4489835	-76.6236684	40m
4	2.4493195	-76.6237641	10m
Promedio metros de Desface			35m

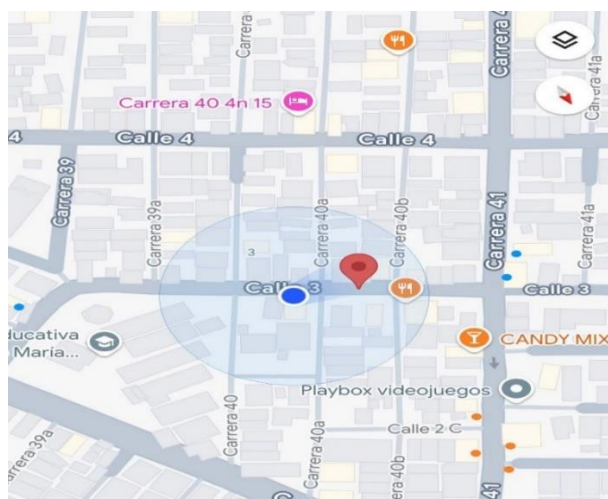


Fig. 16. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 2

Tabla XVI.

Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 2.

Muestra	Latitud	Longitud	Desface en metros
Punto de referencia	2.4550455	-76.6328151	0
1	2.4551508	-76.6330254	20m
2	2.4550659	-76.6329247	10m

3	2.4550245	-76.6327750	2m
4	2.4551289	-76.6328892	8m
Promedio metros de Desface			10m

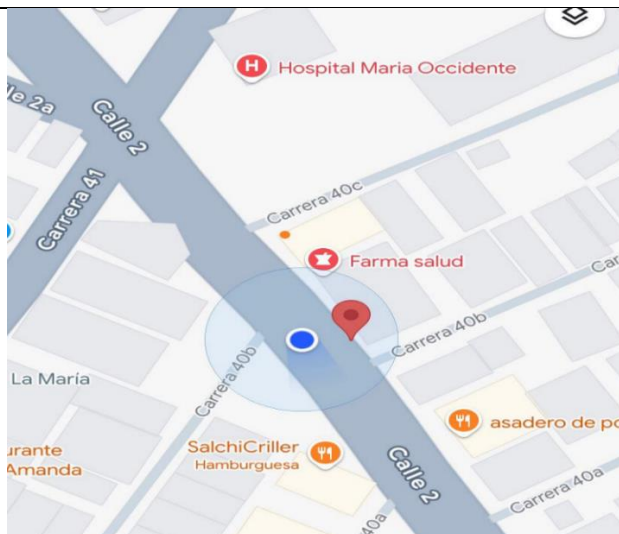


Fig. 17. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 3.

Tabla XVII.

Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 3.

Muestra	Latitud	Longitud	Desface en metros
Punto de referencia	2.4564195	-76.6324966	0
1	2.4566411	-76.6326600	30m
2	2.4563588	-76.6324680	10m
3	2.4564151	-76.6325425	10m
4	2.4563652	-76.6324141	15m
Promedio metros de Desface			16,25m

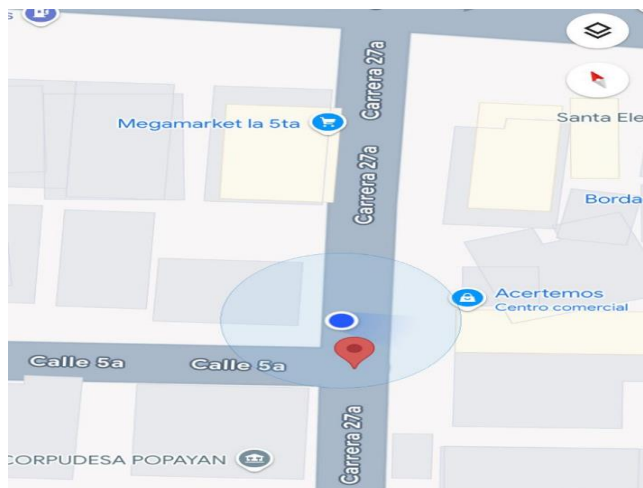


Fig. 18. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 4

Tabla XVIII.

Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 4.

Muestra	Latitud	Longitud	Desface en metros
Punto de referencia	2.4517259	-76.6302891	0
1	2.4516690	-76.6302375	8m
2	2.4517939	-76.6302415	10m
73	2.4517798	-76.6303840	13m
4	2.4516428	-76.6303116	7m
Promedio metros de Desface			9,5m

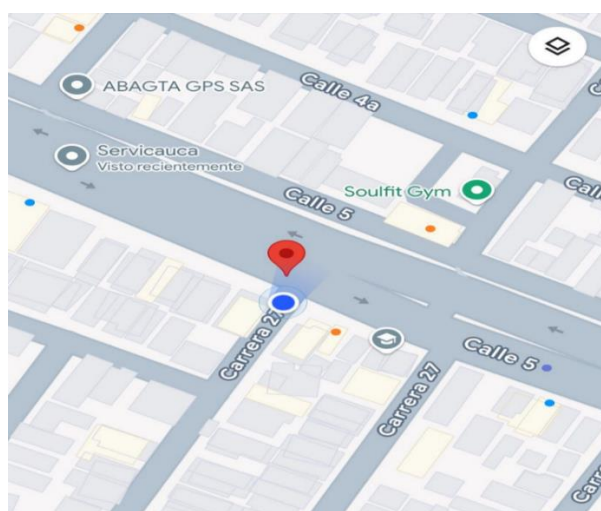


Fig. 19. Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 5

Tabla XIX.

Datos de posición obtenidos por el dispositivo de rastreo muestra 5

Muestra	Latitud	Longitud	Desface en metros
Punto de referencia	2.4482499	-76.6234884	0
1	2.4482379	-76.6234257	5m
2	2.4481722	76.6234200	10m
3	2.4482657	-76.6233888	9m
4	2.4482131	-76.6234139	7m
Promedio metros de Desface			7,75m

7.3.3. Fase 3: Verificación de Eficiencia Energética

En esta etapa, se evaluará los modos de operación del firmware y dispositivo hardware, para ello el dispositivo (NRF-PPK2) Nordic Semiconductor Power Profiler Kit II, el cual es un monitor de consumos de corriente especialmente diseñado para operar con dispositivos que funcionan con corriente continua y sus niveles de consumo son bajos en el orden de los mA, uA y hasta nA, en la figura 20, se muestra el dispositivo en mención. Mediante pruebas enfocadas en el cambio de estado del módulo a modo de reposo.



Fig. 20. Dispositivo Nordic Semiconductor NRF-PPK2

Para ello, se empleará el NRF-PPK2, una herramienta especializada en la medición de consumo en dispositivos de baja potencia, que permite registrar perfiles de consumo, visualizar variaciones en tiempo real y comparar valores en diferentes estados operativos.

- **Características del Dispositivo:**

- **Amplio rango de medición:** 100 nA – 1 A, ideal para evaluar consumo desde modos de bajo consumo hasta picos de alta corriente.
- **Alta resolución temporal:** Hasta 100 ksp/s (kilosamples por segundo) para capturar variaciones rápidas de corriente.
- **Modos de operación:**
 - **Source Mode:** Suministra hasta **1 A** con voltajes de **0.8V a 5V**.
 - **Ampere Meter Mode:** Mide el consumo de un dispositivo externo alimentado de forma independiente.

A continuación, se presenta el diagrama de conexión entre el módulo **Tracker**, el **Nordic Semiconductor Power Profiler Kit II (NRF-PPK2)** y la **PC**. Este diagrama ilustra cómo se interconectan estos dispositivos para llevar a cabo las mediciones de consumo de energía y monitorear el comportamiento del sistema en tiempo real.

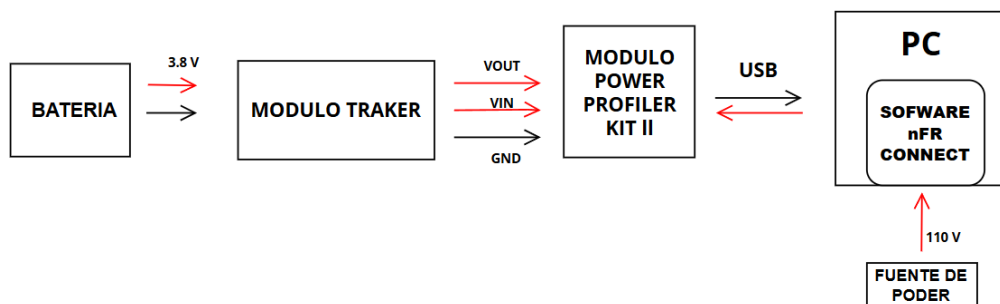


Fig 21. Conexión power Profiler y Módulo Tracker, Fuente Propia.

Las siguientes figuras 22,23,24. Muestra el consumo energético del dispositivo, destacando sus transiciones entre diferentes modos de operación. Inicialmente, se presenta el estado activo del dispositivo, donde el consumo de energía es más elevado debido a su funcionamiento normal. Posteriormente, se ilustra el proceso de cambio al modo de bajo consumo, en el cual se reduce el uso de batería para optimizar la autonomía.

Luego, se muestra el proceso inverso, en el que el dispositivo transita del modo de reposo al modo activo, incrementando nuevamente su demanda de energía para retomar su operatividad completa. Finalmente, se presenta el estado activo después del cambio, reflejando el consumo de batería en su funcionamiento normal tras la transición.

Este análisis visual permite comprender la eficiencia del dispositivo en la gestión de su energía, asegurando un equilibrio entre rendimiento y autonomía para un uso más prolongado sin interrupciones.

Modulo se Despierta y Busca Señal.

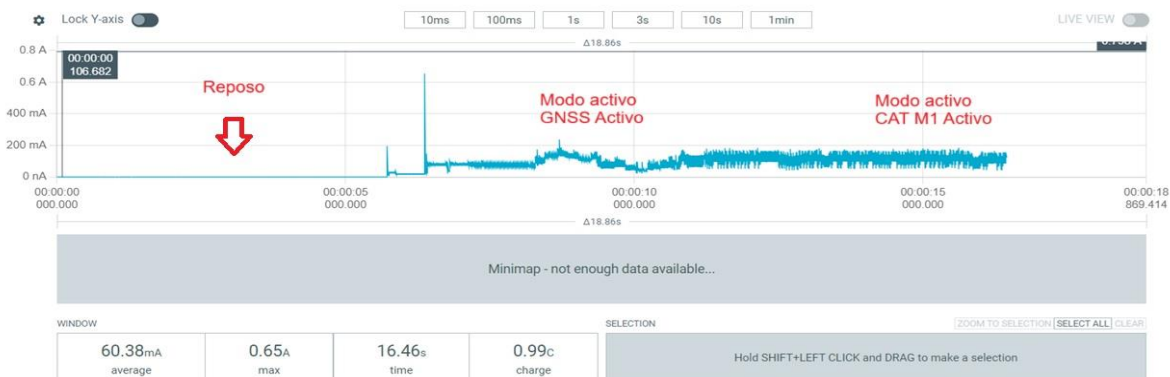


Fig. 22. Funcionamiento Normal de Activación.

Bajo Consumo.

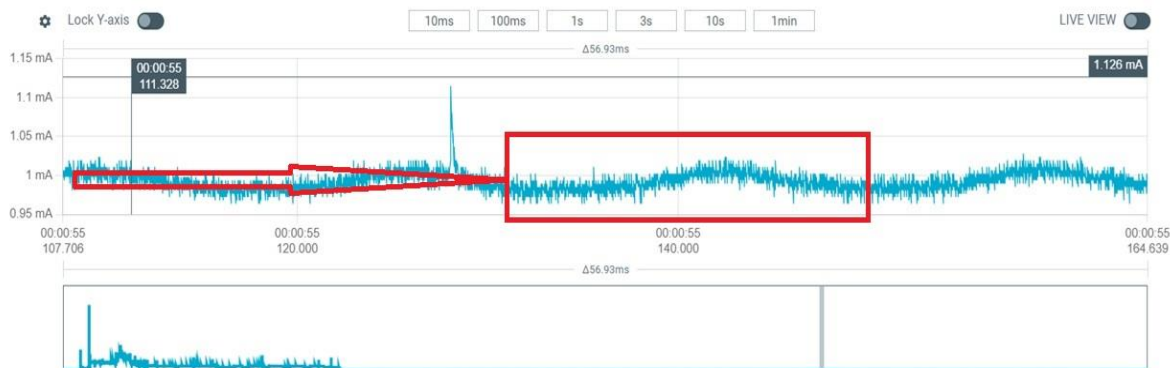


Fig. 23. Bajo Consumo del Dispositivo.

Cambio de Activo a Bajo Consumo.



Fig. 24. Cambio de Modo Activo a Bajo Consumo.

Conclusiones

Optimización de la conectividad IoT en aplicaciones de rastreo: El desarrollo de un firmware para control de un dispositivo de rastreo basado en tecnología Cat-M1, el cual ofrece una alternativa eficiente en comparación a las redes tradicionales de datos basadas en 3G o en 4G, priorizando el bajo consumo energético y una conexión estable, lo que permite una mejora sustancial en la operatividad de dispositivos de rastreo en tiempo real en diversas aplicaciones.

Integración de tecnologías avanzadas para posicionamiento preciso: El uso del protocolo MQTT en comparación a otros protocolos orientados a datos como TCP, UDP, permite el transporte de datos desde dispositivos finales de IoT hacia un servidor remoto de forma eficiente optimizando tiempo de conexión con baja latencia.

Diseño modular para escalabilidad y robustez del sistema: La implementación de una arquitectura basada en máquinas de estado finito (FSM) permite gestionar eficientemente el comportamiento del dispositivo ejecutando sus diferentes funcionalidades, adicionalmente garantiza la operación continua y capacidad de atención a eventos de fallos, lo que asegura la adaptabilidad y robustez del firmware en distintos escenarios de uso.

Firmware integrado para producto final: El desarrollo de un firmware específico, alineado con el hardware propio de la empresa, permitió la creación de un dispositivo funcional y comercializable.

Trabajos futuros

- Agregar al firmware una función para mejorar el promedio de la posición detectada a través de filtros o promedio de múltiples capturas de información.
- El firmware incorporará un módulo de configuración importante. Este módulo permitirá configurar los parámetros básicos de funcionamiento del dispositivo, como la dirección IP, la frecuencia de transmisión (Tx), la dirección del servidor (host) y la activación de determinadas alarmas.

Referencias

- [1] A. Ochoa Duarte, L. D. Cangrejo Aljure, y T. Delgado, «Alternativa Open Source en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire», *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 12, n.º 1, pp. 189-204, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://rcci.uci.cu/?journal=rcci&page=article&op=view&path%5B%5D=1706>
- [2] Oracle Colombia, «¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?» [En línea]. Disponible en: <https://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot/>
- [3] S. B. Sepúlveda Mora, J. A. Castro Correa, B. Medina Delgado, D. Guevara Ibarra, y O. A. López-Bustamente, «Sistema de Geolocalización de Vehículos a través de la red GSM/GPRS y tecnología Arduino», *Revista EIA*, vol. 16, n.º 31, pp. 145-157, ene. 2019, doi: 10.24050/reia.v16i31.1269.
- [4] ServiceNow, «¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?» [En línea]. Disponible en: <https://www.servicenow.com/es/products/field-service-management/what-is-iot.html>
- [5] Vy Le, «Gain Valuable Insights into the IoT and Big Data Combination», Orient Software. [En línea]. Disponible en: <https://www.orientsoftware.com/blog/iot-and-big-data/>
- [6] IoT TECH SOLUTIONS, «Tech Solutions SAS». [En línea]. Disponible en: <https://iotttsolutions.com/>
- [7] AlaiSecure - Colombia, «Redes IoT: Sigfox vs. LoRA». [En línea]. Disponible en: <https://alaisecure.co/blog/redes-iot-sigfox-vs-lora/>
- [8] B. Koelmel *et al.*, «Quantifying the Economic and Financial Viability of NB-IoT and LoRaWAN Technologies: A Comprehensive Life Cycle Cost Analysis Using Pragmatic Computational Tools», *FinTech*, vol. 2, n.º 3, pp. 510-526, jul. 2023, doi: 10.3390/fintech2030029.
- [9] P. A. García, «Sistemas embebidos de tiempo real con aplicaciones en bioingeniería», Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, 2019. doi: 10.35537/10915/74734.
- [10] Efor, «Tecnologías de comunicación para IoT», [En línea]. Disponible en: <https://www.efor.es/sites/default/files/tecnologias-de-comunicacion-para-iot.pdf>

- [11] TOPFLYtech, «Cómo funciona un sistema de seguimiento GPS». [En línea]. Disponible en: <https://www.topflytech.com/es/como-funciona-un-sistema-de-seguimiento-gps/>
- [12] J. L. Rubio-Tamayo, C. Solon Guimarães, R. Ventura Henriques, y M. Gértrudix, «Robótica y UX para la Mejora de las Interacciones en el Espacio Urbano: Desarrollo y Perfeccionamiento de un Bastón Electrónico para Invidentes», en *4 Congreso Internacional Ciudades Creativas*, Madrid, 2016.
- [13] R. S. Sinha, Y. Wei, y S.-H. Hwang, «A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT», *ICT Express*, vol. 3, n.º 1, pp. 14-21, mar. 2017, doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004.
- [14] B. Martinez, F. Adelantado, A. Bartoli, y X. Vilajosana, «Exploring the Performance Boundaries of NB-IoT», *IEEE Internet Things J*, vol. 6, n.º 3, pp. 5702-5712, jun. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2904799.
- [15] S.-Y. Wang, J.-E. Chang, H. Fan, y Y.-H. Sun, «Comparing the Performance of NB-IoT, LTE Cat-M1, Sigfox, and LoRa for IoT End Devices Moving at High Speeds in the Air», *J Signal Process Syst*, vol. 94, n.º 1, pp. 81-99, ene. 2022, doi: 10.1007/s11265-021-01660-4.
- [16] M. Mikulasek *et al.*, «NB-IoT vs LTE Cat M1: Demystifying Performance Differences under Varying Radio Conditions», en *2022 14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, IEEE, oct. 2022, pp. 133-138. doi: 10.1109/ICUMT57764.2022.9943485.
- [17] Soracom, «What is Cat M1?» [En línea]. Disponible en: <https://www.soracom.io/iot-definitions/what-is-cat-m1/>
- [18] Wireless Logic, «¿Qué es CAT-1?» [En línea]. Disponible en: <https://www.wirelesslogic.com/es/que-es-el-cat-1/>
- [19] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, L. García, D. Guinea, y F. Sandoval, «Sistema de Posicionamiento Global (GPS): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro», *Mundo Electrónico*, n.º 306, pp. 54-59, 2000.

- [20] F. Villegas, «Relatividad y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS)», *Revista de Investigación de Física*, vol. 23, n.º 1, pp. 44-47, may 2021, doi: 10.15381/rif.v23i1.20289.
- [21] G. Johnston, A. Riddell, y G. Hausler, «The International GNSS Service», en *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 967-982. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_33.
- [22] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, y E. Wasle, *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Vienna: Springer, 2008. doi: 10.1007/978-3-211-73017-1.
- [23] N. Ivanov y V. Salischev, «The GLONASS System – An Overview», *The Journal of Navigation*, vol. 45, n.º 2, pp. 175-182, 1992, doi: 10.1017/S0373463300010675.
- [24] Firtec, «Que es MQTT». [En línea]. Disponible en: <https://www.firtec.com.ar/cms/53-que-es-mqtt>
- [25] Arduino, «IDE de Arduino 2.3.4». [En línea]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/software>
- [26] m5stack, «Unit CatM GNSS». [En línea]. Disponible en: https://docs.m5stack.com/en/unit/catm_gnss
- [27] AliExpress, «M5Stack Official SIM7080G CAT-M/NB-IoT+GNSS Unit with Telec Antenna». [En línea]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/1005004533208760.html>
- [28] SIMCom Wireless Solutions, «SIM7070_SIM7080_SIM7090 Series_MQTT(S)_Application Note_V1.03», 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.simcom.com/technical_files.html
- [29] SIMCom Wireless Solutions, *SIM7070_SIM7080_SIM7090 Series_AT Command Manual_V1.04*. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.simcom.com/technical_files.html
- [30] Microsoft Store, «App MQTTBox». [En línea]. Disponible en: <https://apps.microsoft.com/detail/9nblggh55jzg?hl=es-ES&gl=CO>
- [31] Softonic, «MQTTBox para Windows». [En línea]. Disponible en: <https://mqttbox.softonic.com/>