

Sistema de Posicionamiento y Monitoreo de Embarcaciones Pesqueras Artesanales en Costa Rica mediante LoRa APRS y Módulo T-Beam hacia un iGate

Joham Gabriel Mora Castrillo

Tecnológico de Costa Rica

Estudiante, Ingeniería Electrónica

johammoracastrillo@estudiantec.cr

Natalia Hernández López

Tecnológico de Costa Rica

Estudiante, Ingeniería Electrónica

natihl1600@estudiantec.cr

Josué Marín Vargas

Tecnológico de Costa Rica

Estudiante, Ingeniería Electrónica

josue.mv@estudiantec.cr

Abstract—This project proposes the implementation of a communication network based on APRS technology using iGates and Trackers in the Gulf of Papagayo. The system aims to enhance the safety and location tracking of small vessels by enabling real-time monitoring and emergency signaling. The Tracker device, designed as a waterproof floating buoy with an emergency button, utilizes low-power components to ensure reliability and ease of deployment. The integration with digital platforms allows authorities to respond promptly to distress signals, improving maritime safety. The scalable nature of the system also offers potential for expansion to other coastal areas with similar needs.

Index Terms—APRS, iGate, Tracker, maritime safety, emergency communication, real-time monitoring, coastal surveillance, low-power devices.

I Introducción

La seguridad en la navegación costera es un aspecto fundamental para la protección de vidas humanas y recursos económicos, especialmente para embarcaciones pequeñas que a menudo carecen de sistemas avanzados de comunicación y localización. En el Golfo de Papagayo, la ausencia de una red eficiente para el monitoreo y auxilio en caso de emergencia representa un riesgo significativo para los pescadores artesanales y navegantes recreativos.

Este proyecto propone la implementación de una red de comunicación basada en la tecnología APRS (Automatic Packet Reporting System), que permitirá la transmisión y recepción de información en tiempo real a través de dispositivos denominados iGates y Trackers. La solución contempla el diseño de un Tracker integrado en una boya flotante, resistente al agua y equipado con un botón de emergencia, que enviará señales de auxilio en caso de necesidad.

El sistema propuesto no solo facilita la localización precisa de las embarcaciones, sino que también optimiza la respuesta de los equipos de rescate, contribuyendo así a mejorar la seguridad marítima en la región. Además, la

utilización de componentes de bajo consumo energético y la integración con plataformas digitales permiten una solución eficiente y escalable, adaptable a otras zonas costeras del país.

II Aplicación del proyecto

El presente proyecto está enfocado en apoyar a los pesqueros locales, quienes comúnmente operan embarcaciones pequeñas que, por limitaciones económicas y de espacio, no pueden incorporar equipos sofisticados de radiofrecuencia o sistemas de comunicación satelital. Se propone la implementación de un sistema de comunicación basado en APRS (Automatic Packet Reporting System) en zonas costeras, específicamente adaptado para ser instalado en este tipo de embarcaciones.

El sistema permite la transmisión en tiempo real de coordenadas GPS sin depender de redes móviles o conexión a internet, lo cual lo hace especialmente útil en zonas alejadas o de cobertura limitada. Esta solución tecnológica de bajo costo busca brindar a los pescadores una herramienta accesible para el monitoreo y la seguridad en sus operaciones diarias.

Como se observa en la figura 1, en la actualidad no existen embarcaciones en Costa Rica que utilicen el sistema APRS. Esta es una necesidad que podría ser atendida mediante la implementación de una solución de bajo costo, beneficiando directamente a los pescadores locales.

El sistema proporcionaría seguridad adicional en caso de emergencia, ya que permitiría conocer las coordenadas exactas de las embarcaciones, lo que facilitaría una respuesta rápida y eficiente ante cualquier incidente. Además de brindar protección y monitoreo a zonas restringidas de estas prácticas.

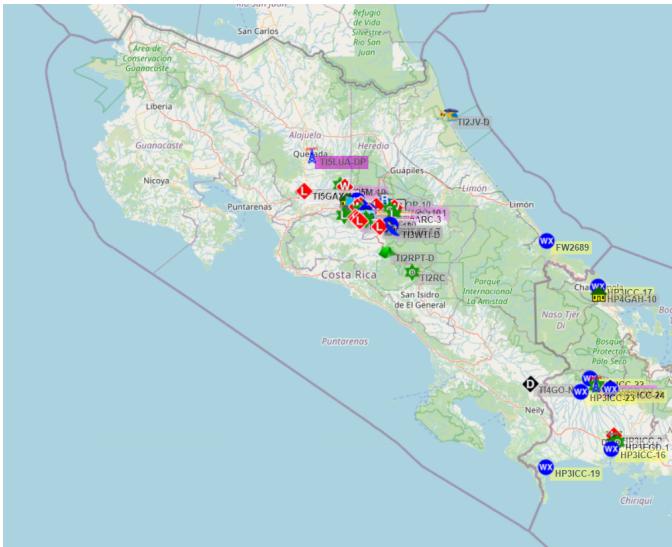


Figure 1: Mapa de Costa Rica - Vista desde el sistema de monitoreo APRS.

III Objetivo general

Diseñar un sistema de comunicación de bajo costo, bajo consumo energético y alta confiabilidad, basado en tecnología APRS, que permita mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y la trazabilidad de las actividades pesqueras realizadas por embarcaciones pequeñas en comunidades costeras, con un enfoque en la adaptabilidad al entorno marítimo y a las restricciones técnicas y económicas de los usuarios.

IV Impacto, Alcance y Beneficios del Proyecto

- Seguimiento en tiempo real de las embarcaciones pesqueras, incluso en zonas sin cobertura móvil.
- Generación de alertas si una embarcación ingresa a zonas restringidas o no autorizadas para la pesca.
- Registro y análisis de trayectorias que permitan optimizar las rutas y mejorar la planificación de las faenas pesqueras.
- Comunicación básica en alta mar mediante mensajes breves, útil en emergencias o para reportes operativos.
- Fomento de la seguridad marítima y la modernización tecnológica en comunidades pesqueras con recursos limitados.

V Marco Teórico

V-A APRS

El Automatic Packet Reporting System (APRS) es un sistema de comunicaciones basado en radiofrecuencia que permite la transmisión de datos en tiempo real. Se utiliza principalmente en la comunidad de radioaficionados para compartir información como ubicación, mensajes cortos, telemetría y datos meteorológicos.

V-B ¿Para qué sirve? (Aplicaciones)

APRS tiene diversas aplicaciones, entre ellas:

- Rastreo de vehículos y personas en tiempo real.
- Monitoreo y reporte de condiciones meteorológicas.
- Envío de mensajes cortos sin necesidad de Internet.
- Coordinación en situaciones de emergencia y rescate.
- Integración con redes digitales mediante APRS-IS.

V-C ¿Qué protocolos de comunicación utiliza?

APRS (Automatic Packet Reporting System) utiliza principalmente el protocolo AX.25, que es un estándar de comunicaciones para la transmisión de datos en paquetes en la radioafición. AX.25 es un protocolo de enlace de datos basado en la conmutación de paquetes, utilizado para la transmisión de información a través de redes de radio. Este protocolo fue diseñado para permitir que las estaciones de radioaficionados intercambien datos de manera eficiente y confiable, incluso en condiciones de baja calidad de señal. AX.25 define cómo los datos deben ser encapsulados, dirigidos y transmitidos en las redes de radio.

Además, APRS puede utilizar TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), un conjunto de protocolos de comunicación utilizados para la interconexión de dispositivos a través de redes, como Internet. TCP/IP permite la transmisión de datos de manera confiable y garantiza que los paquetes de información lleguen a su destino, facilitando la integración de APRS con sistemas basados en Internet.

V-D ¿En cuáles bandas de frecuencia opera?

Las bandas de frecuencia para APRS varían según la región:

- 144.390 MHz en VHF (frecuencia estándar en Norteamérica).
- 145.825 MHz para comunicación satelital.
- Otras frecuencias en HF y UHF dependiendo de las regulaciones locales.

Frecuencia	Siglas	Rango de Frecuencia
VLF	Very Low Frequency (Frecuencia Muy Baja)	3 Hz - 30 Hz
LF	Low Frequency (Frecuencia Baja)	30 Hz - 300 Hz
MF	Medium Frequency (Frecuencia Media)	300 Hz - 3 kHz
HF	High Frequency (Frecuencia Alta)	3 kHz - 30 MHz
VHF	Very High Frequency (Frecuencia Muy Alta)	30 MHz - 300 MHz
UHF	Ultra High Frequency (Frecuencia Ultra Alta)	300 MHz - 3 GHz
SHF	Super High Frequency (Frecuencia Super Alta)	3 GHz - 30 GHz
EHF	Extremely High Frequency (Frecuencia Extremadamente Alta)	30 GHz - 300 GHz
THF	Tremendously High Frequency (Frecuencia Tremendamente Alta)	300 GHz - 3 THz

Table I: Bandas de frecuencia y sus siglas.

V-E Componentes clave (dispositivos que componen una red APRS)

Los elementos principales de una red APRS incluyen:

- Transceptor de radio VHF/UHF/HF.
- TNC (Terminal Node Controller) o software para modulación y demodulación de paquetes.
- GPS para proporcionar datos de ubicación.
- Computadora o microcontrolador para procesar y enviar datos.
- Servidores APRS-IS para la integración con redes digitales.

V-F LoRa

LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo energético que utiliza modulación de espectro ensanchado para permitir la transmisión de datos a largas distancias con mínima interferencia.

V-G Frecuencias que utiliza

Las frecuencias asignadas para LoRa dependen de la región:

- 433 MHz (Europa, China).
- 868 MHz (Europa).
- 915 MHz (América del Norte y Australia).

V-H Aplicaciones

LoRa se utiliza en diversas aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), como:

- Monitoreo y control de cultivos en agricultura inteligente.
- Medidores inteligentes para agua, gas y electricidad.
- Rastreo de activos y logística.
- Redes de sensores ambientales.
- Seguridad y monitoreo industrial.

V-I Disponibilidad de módulos basados en ESP32 con chips LoRa en el mercado

Existen múltiples módulos ESP32 con LoRa integrados, tales como:

- Heltec WiFi LoRa 32.
- TTGO LoRa32.
- RA-02 LoRa module con ESP32.

Estos módulos permiten la comunicación LoRa junto con capacidades de procesamiento y conectividad WiFi/Bluetooth mediante el ESP32.

V-J Diferencias entre LoRa y APRS

A continuación se presentan las diferencias entre LoRa y APRS, dos tecnologías utilizadas en comunicaciones de largo alcance.

Característica	LoRa
Tecnología de transmisión	Modulación LoRa (Long Range)
Frecuencia de operación	Generalmente en bandas ISM (Sub 1 GHz)*
Alcance	Hasta 15-20 km en áreas rurales y hasta 5 km en entornos urbanos
Velocidad de transmisión	Baja (hasta 27 kbps)
Uso principal	Internet de las Cosas (IoT), sensores remotos, redes privadas
Requiere licencia	No requiere licencia en bandas ISM
Conexión a Internet	Puede conectarse a Internet a través de gateways LoRaWAN
Costo de implementación	Bajo, por la simplicidad de la tecnología
Redes públicas/privadas	LoRaWAN permite redes privadas y públicas

Table II: Características de LoRa.

Característica	APRS
Tecnología de transmisión	Modulación de paquetes AX.25
Frecuencia de operación	Principalmente en VHF (144.390 MHz)
Alcance	Generalmente limitado a unos pocos cientos de km
Velocidad de transmisión	Baja (hasta 1.2 kbps)
Uso principal	Seguimiento de estaciones, informes de datos, radioaficionados
Requiere licencia	Requiere licencia de radioaficionado
Conexión a Internet	Puede conectarse a Internet, generalmente a través de gateways APRS
Costo de implementación	Bajo, debido a la infraestructura de radioaficionados
Redes públicas/privadas	Generalmente es una red pública para radioaficionados

Table III: Características de APRS.

*ISM significa Industrial, Scientific, and Medical (Industrial, Científica y Médica). Es un conjunto de bandas de

frecuencia que están reservadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas, pero que también se pueden utilizar para otras aplicaciones, como las comunicaciones de corto alcance.

V-K Legislación Costarricense - Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias del PNAF

El Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF), regulado por el Decreto N° 44010-MICITT y publicado en el Alcance N°99 de la Gaceta N°95 del 30 de mayo de 2023, define las bandas de frecuencia asignadas para distintos servicios de telecomunicaciones, incluyendo LoRa y APRS.

V-L Permisos requeridos para operar un sistema LoRa/APRS

En Costa Rica, la operación de sistemas de radiofrecuencia requiere cumplir con las normativas del MICITT. Para sistemas APRS, los operadores deben contar con una licencia de radioaficionado válida. En cuanto a LoRa, su uso depende de la banda de frecuencia y si está clasificada como de uso libre o requiere autorización específica.

V-M Clases de Emisión

Las clases de emisión describen el tipo de modulación y el contenido de la señal transmitida. Para APRS y LoRa, se utilizan las siguientes clases:

- APRS: F2D (datos en modulación de frecuencia).
- LoRa: G1D (datos en modulación de espectro ensanchado).

V-N Bandas de Frecuencias en las que operan LoRa/APRS

Las bandas de frecuencia permitidas en Costa Rica para estos sistemas son:

- APRS: 144-148 MHz (144.390 MHz para VHF, 145.825 MHz para satélite).
- LoRa: 915-921 MHz para aplicaciones IoT de baja potencia.

V-O PIRE permitida para cada banda

La Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima permitida según el PNAF es:

- APRS en VHF: hasta 50 watts.
- LoRa en 915-921 MHz: hasta 1 watt.

Es importante verificar siempre la regulación vigente y ajustar la potencia de transmisión conforme a las normativas del MICITT.

V-P Problemática en Costa Rica

Costa Rica, al ser un país con una extensa zona costera y una fuerte dependencia de las actividades pesqueras artesanales y turísticas, enfrenta un problema recurrente en materia de seguridad y localización de embarcaciones. A pesar de los avances tecnológicos, muchas embarcaciones pequeñas que operan en zonas como el Golfo de Papagayo carecen de sistemas efectivos de rastreo y comunicación, lo que representa un riesgo significativo para la integridad física de

los tripulantes, especialmente en condiciones meteorológicas adversas o en caso de emergencias marítimas.

Actualmente, las embarcaciones más pequeñas —frecuentes en la pesca artesanal— no cuentan con dispositivos de localización en tiempo real ni con mecanismos eficientes para emitir señales de auxilio. Esto dificulta enormemente las labores de rescate por parte de los guardacostas, quienes muchas veces deben basarse en reportes inexactos o tardíos para ubicar una embarcación en peligro. Esta falta de comunicación efectiva se traduce en una pérdida crítica de tiempo que puede comprometer la vida de los pescadores o turistas a bordo.

Además, el país no cuenta con una infraestructura nacional estandarizada para la recolección y transmisión de datos de localización desde el mar hacia la costa, lo que deja amplias zonas sin cobertura y con limitada capacidad de monitoreo. El uso de tecnologías tradicionales de comunicación en alta mar, como radios VHF, aunque útil, no permite una trazabilidad en tiempo real ni un almacenamiento digital accesible desde plataformas modernas.

La implementación de una red basada en iGates y Trackers utilizando tecnología APRS representa una oportunidad para mitigar esta problemática, ofreciendo un sistema de comunicación y geolocalización que es escalable, económico y eficiente, y que puede ser adaptado a distintas regiones del país con condiciones geográficas similares.

VI Metodología

A. Propuesta de funcionamiento

Se propone la instalación de una serie de dispositivos iGate a lo largo de las costas del país, con el objetivo de ofrecer una cobertura amplia que permita a cualquier dispositivo Tracker en el mar comunicarse y reportarse de manera efectiva. La zona de cobertura propuesta se muestra en el área en amarillo de la figura 2, sin embargo, para demostrar la funcionalidad que el proyecto es escalable a nivel nacional, primeramente se implementará en el golfo de Papagayo, visto en la figura 3, la zona, abarca un área aproximada de 693 km^2 .

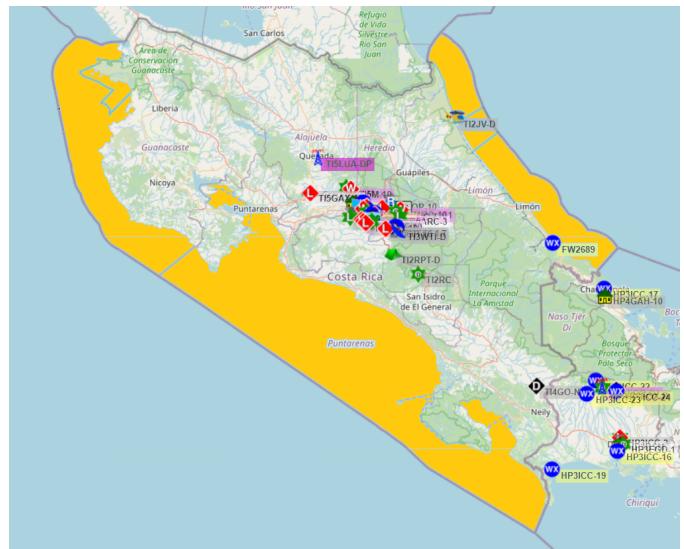


Figure 2: Mapa de Costa Rica - zona de cobertura propuesta.



Figure 3: Zona de cobertura inicial propuesta - Golfo de Papagayo, Costa Rica.

Un bosquejo de la situación que se plantea se observa en la figura 4.



Figure 4: Escenario posible del sistema implementado.

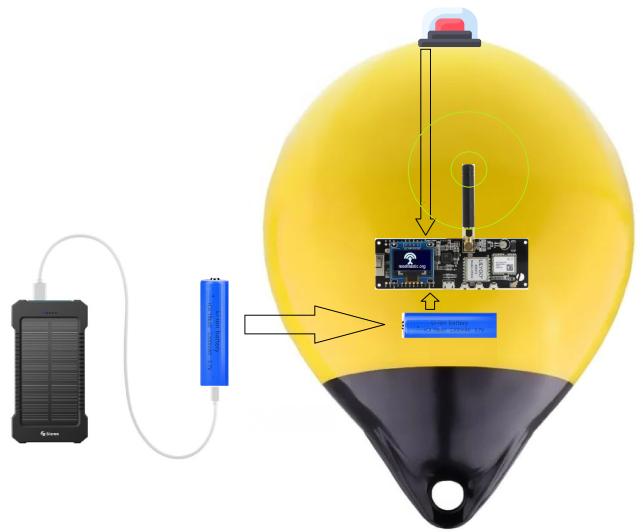


Figure 5: Imagen representativa del prototipo.

El objetivo es establecer una comunicación desde las embarcaciones de los pescadores al centro de control (un dispositivo iGate) más cercano, para el envío de los datos de posición, además el dispositivo contrará con un botón de emergencia, el cual al ser presionado, envía una señal de auxilio, para que las autoridades locales de guarda costas puedan acudir al rescate.

Cada embarcación tendrá un Tracker correspondiente para transmitir su ubicación en tiempo real, el receptor (un dispositivo iGate), será el centro de control, transmitiendo las señales entrantes al servidor de la página web de APRS.fi.

En casos extremos, como el hundimiento o volcamiento de la embarcación, el producto final propuesto consiste en que el rastreador esté ubicado dentro de una carcasa tipo boyo, a prueba de agua, de modo que flote y se pueda presionar el botón de emergencia para alertar que se necesita ayuda urgente.

Un primer prototipo, representado como imagen del producto final, puede apreciarse en la Figura 5.

Cantidad de dispositivos a utilizar

El **Golfo de Papagayo**, ubicado en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, es una zona marítima semicerrada con una extensión aproximada de entre **600 y 800 km²**. La distancia entre sus extremos, desde *Matapalo* hasta el *Parque Nacional Santa Rosa*, es de aproximadamente **40 km**.

Cobertura APRS estimada

En condiciones ideales sobre el mar, una antena VHF ubicada a 20 metros de altura puede alcanzar una cobertura radial de hasta **30–40 km** debido a la ausencia de obstáculos.

El área de cobertura de un iGate puede aproximarse con la fórmula del área de un círculo:

$$A = \pi r^2 \approx \pi \cdot (30)^2 \approx 2827 \text{ km}^2$$

Por lo tanto, con una buena ubicación, **un solo iGate** podría cubrir completamente el golfo. Sin embargo, para mejorar la fiabilidad y evitar zonas de sombra, se recomienda una configuración con mayor redundancia.

Recomendación de despliegue

iGates (Receptores APRS)

Se recomienda instalar al menos **dos iGates**:

- **iGate 1:** En la zona de *Punta Castilla*, preferiblemente en una elevación.
- **iGate 2:** En el sector norte, cerca del *Parque Nacional Santa Rosa*.

Estos dos puntos en tierra firme cubren gran parte del golfo. Para una cobertura completa y redundante, se puede considerar un **tercer iGate opcional** instalado en *Playa Santo Tomás*.

Colocando los tres dispositivos en las zonas propuestas y calculando su alcance, tomando como valor conservador un alcance de 20 km para cada uno, en la Figura 6 se observan las zonas de cobertura.

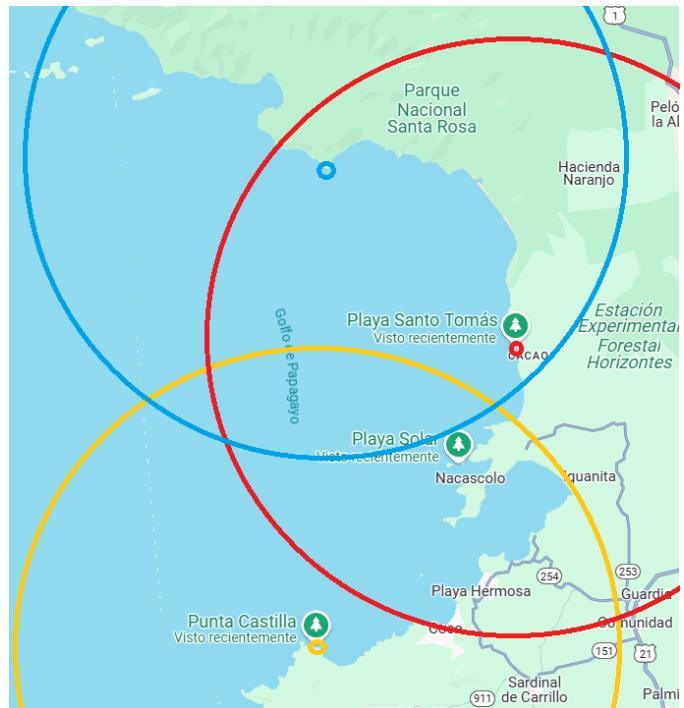


Figure 6: Imagen representativa del prototipo.

Trackers (Emisores APRS)

Se requiere **un tracker por cada embarcación o activo** que se desea rastrear. Estos dispositivos transmiten por radio VHF su ubicación, la cual es recibida por los iGates y retransmitida a internet mediante APRS-IS.

Recomendaciones técnicas

- Uso de **antenas VHF omnidireccionales** (por ejemplo, tipo colineal como la Diamond X50) a una altura de al menos 10–20 metros.
- **iGate:** Raspberry Pi con radio VHF y TNC (como TNC-Pi o módulos como el Mobilinkd).
- Transmisión en la frecuencia **144.390 MHz** (estándar para APRS en América).
- Visualización de datos mediante plataformas como aprs.fi.

B. Listado de requerimientos mínimos

Para desplegar este proyecto, al menos en la zona inicial correspondiente al Golfo de Papagayo, se estima que se requieren los siguientes materiales:

Concepto	Unidades
Módulo Tracker t-beam-axp21p1-v1.2	1
Módulo Tracker iGate TTGO T-Beam o Heltec LoRa 32 V2	3
Boya flotante	1
Botón aprueba de agua	1
Cables	1 m
Estaño	20 g
Termocontraíble	1 m
Pegamento contra agua	1
Batería de Litio 18650	1
Estructura diseñada en 3D (para soporte del Tracker)	100 g
Cargador de baterías solar	1

Table IV: Requerimientos mínimos del proyecto.

Cabe destacar que inicialmente para ir probando la cobertura de la zona se utilizará sólo 1 dispositivo Tracker, sin embargo la idea es que luego cada embarcación tenga 1 dispositivo.

Especificaciones técnicas del TTGO T-Beam AXP21P1 V1.2 (LoRa APRS)

Componente	Especificación
Procesador	ESP32-D0WDQ6-V3
Arquitectura	Xtensa LX6, Dual Core, 32-bit
Frecuencia	Hasta 240 MHz
RAM	520 KB SRAM
Flash	4 MB
Módulo LoRa	SX1276 (433 MHz)
Módulo GPS	u-blox NEO-6M o NEO-M8N
Control de energía	AXP192 (gestión de batería y carga)
Conectividad	WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth BLE
Antenas	SMA (LoRa), u.FL (GPS)

Table V: Especificaciones del módulo TTGO T-Beam V1.2

Justificación de la elección del TTGO T-Beam AXP21P1 V1.2

El módulo TTGO T-Beam AXP21P1 V1.2 es una solución altamente integrada que combina un microcontrolador ESP32 con conectividad WiFi y Bluetooth, un módulo LoRa SX1276 y un receptor GPS u-blox, todo en una sola placa. Esta integración lo convierte en una plataforma ideal para sistemas APRS basados en LoRa, especialmente en aplicaciones de rastreo y monitoreo remoto en entornos aislados como el Golfo de Papagayo.

En este proyecto se ha optado por operar en la banda de **433 MHz**, que ofrece buena propagación en espacios abiertos como el mar y permite enlaces de comunicación de largo alcance con baja potencia, lo cual es crítico para boyas flotantes alimentadas por batería. El módulo LoRa SX1276 es compatible con esta frecuencia, permitiendo transmitir tramas APRS LoRa a varios kilómetros de distancia sin necesidad de infraestructura de radio tradicional.

El procesador ESP32-D0WDQ6-V3 proporciona potencia de cómputo suficiente para manejar el GPS, codificar paquetes APRS, controlar el módulo LoRa y mantener conectividad WiFi o Bluetooth, lo cual resulta útil para tareas de configuración y para funciones de iGate. Su bajo consumo energético y su controlador de energía AXP192 permiten implementar

nodos completamente autónomos usando baterías recargables, como las de litio tipo 18650.

Debido a estas características —alta integración, bajo consumo, soporte para 433 MHz, y flexibilidad operativa— el TTGO T-Beam AXP21P1 V1.2 es una de las mejores opciones para el diseño de trackers e iGates flotantes en aplicaciones marítimas APRS-LoRa.

C. Diagrama de bloques del sistema

1) Diagrama de primer nivel

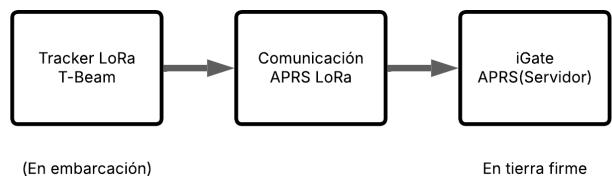


Figure 7: Diagrama primer nivel.

2) Diagrama de segundo nivel



Figure 8: Diagrama de segundo nivel.

3) Diagrama de tercer nivel

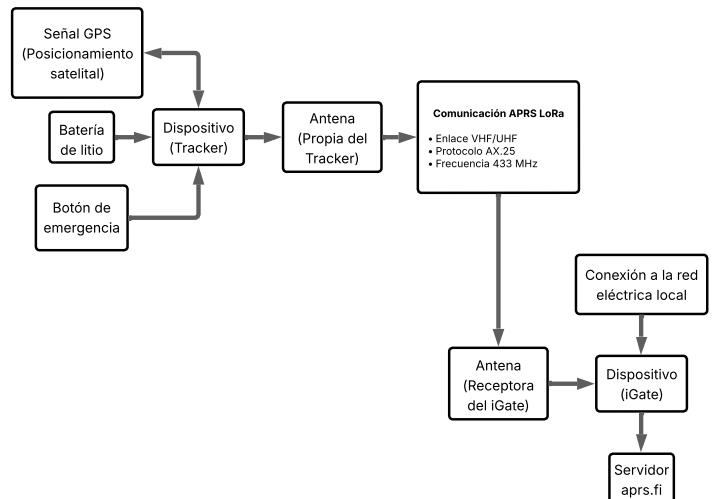


Figure 9: Diagrama de tercer nivel.

4) Diagrama de cuarto nivel

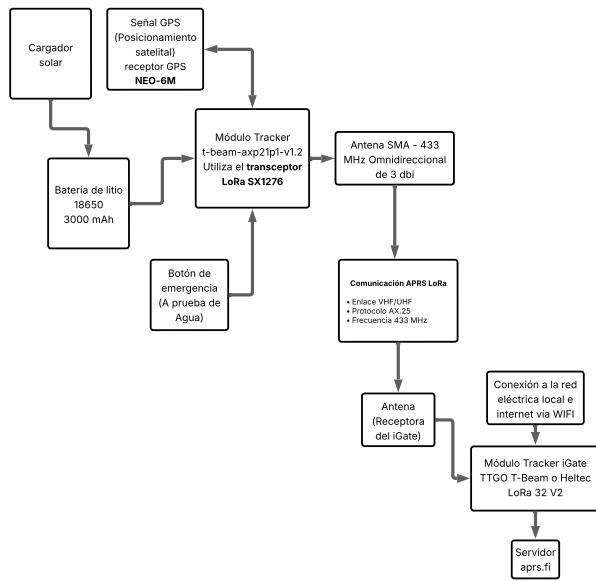


Figure 10: Diagrama de cuarto nivel.

5) Diagrama de quinto nivel

En el apéndice C, se encuentran los diagramas de quinto nivel del dispositivo.

Máquina de estados del sistema.

En la siguiente figura se muestra la máquina de estados que describe el comportamiento del sistema.

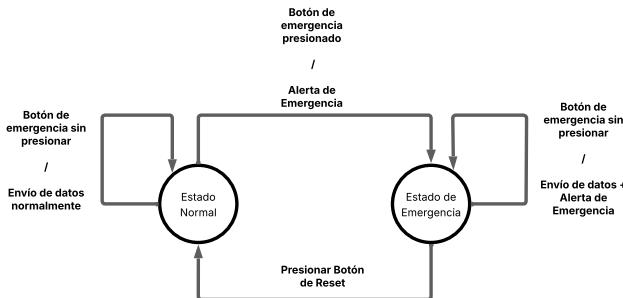
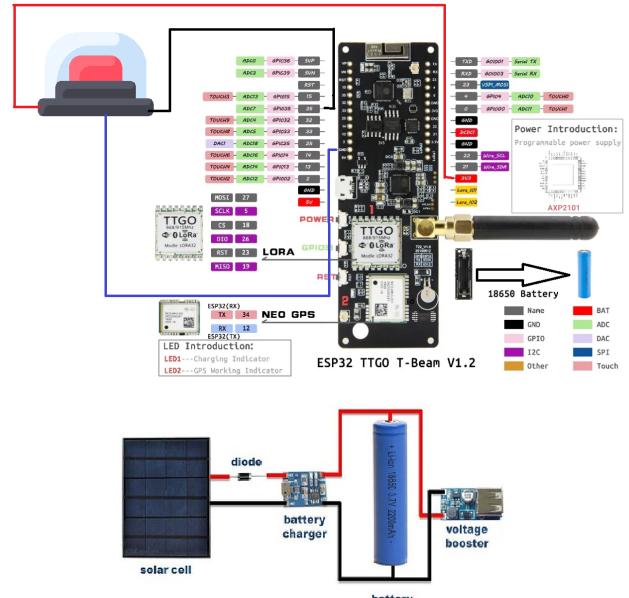


Figure 11: Máquina de estados del sistema.

D. Implementación en Hardware.

En la figura 12 se muestra el esquema de conexiones a nivel de hardware del proyecto. A través del pin 35 del dispositivo se realiza la lectura de una señal analógica. Si dicha lectura es de 0 V, se interpreta que el botón de emergencia no ha sido presionado, por lo que el tracker únicamente transmite datos de ubicación. En cambio, si el valor leído en el pin 35 es cercano a 3.3 V, esto indica que el botón de emergencia ha sido activado. En tal caso, el tracker no solo envía las coordenadas actuales, sino también un mensaje de alerta con el texto "Ayuda", lo

que implica que se ha producido una emergencia a bordo de la embarcación y se requiere la intervención inmediata de las autoridades locales de guardacostas en la ubicación reportada.



E. Pseudo-programación para el control del sistema.

Flujo general del sistema

Inicio

- **Configuración:**

- Inicializar comunicaciones (GPS, LoRa, WiFi, Bluetooth)
- Configurar periféricos (pantalla, botones, joystick, teclado)
- Configurar pin 35 como entrada para emergencias
- Cargar configuración del beacon y otros parámetros

- **Bucle Principal:**

- Mientras el tracker esté encendido:
 - * Obtener beacon actual y validararlo
 - * Actualizar estado de la batería y smart beacon
 - * Si pin 35 está en BAJO (emergencia):
 - Activar estado de emergencia
 - Enviar alerta a LoRa y/o Bluetooth
 - Encender luz de emergencia (si está configurada)
 - * Si Bluetooth está activo y conectado:
 - Enviar datos a dispositivo móvil (BLE o clásico)
 - Gestionar LEDs y notificaciones (flash, etc.)
 - Validar y eliminar rastreadores escuchados si es necesario
 - * Si GPS está activo:
 - Obtener y validar datos de GPS
 - Si datos válidos:
 - Calcular distancia, dirección y enviar beacon
 - Si GPS no está disponible:
 - Gestionar batería sin GPS
 - * Si GPS no está activo:
 - Despertar GPS si es necesario
 - Actualizar información de pantalla periódicamente

- **Fin**

F. Tramas de datos que se utilizarán con el dispositivo.

VII Tramas de datos necesarios

En un dispositivo de comunicación como el empleado en el proyecto, las tramas de datos son cruciales para la transmisión de información. Este documento describe la estructura de las tramas utilizadas para la comunicación a través de LoRa, así como la funcionalidad del botón de emergencia conectado al pin 35 de la placa.

Estructura de trama LoRa

Las tramas LoRa suelen estar formadas por varios campos de datos que se transmiten entre el dispositivo y otros nodos o estaciones base. La estructura básica de una trama LoRa típica podría ser la siguiente:

- **Beacon ID (5B):** Identificador único del dispositivo. (La longitud del Beacon ID depende de la implementación específica de LoRa. Generalmente, puede ser más grande o más pequeño, dependiendo del sistema.)
- **Message Type (1B):** Tipo de mensaje, que puede ser:
 - 0x01: Actualización de beacon.
 - 0x02: Alerta de emergencia.
- **GPS Data (10B):** Coordenadas de latitud y longitud del dispositivo. (El tamaño de los datos GPS puede variar dependiendo de la precisión utilizada. En este caso, se asume 10 bytes para latitud y longitud en formato estándar de 32 bits.)
- **Timestamp (4B):** Marca de tiempo en formato de 32 bits (tiempo Unix). (Para una representación de tiempo más precisa a largo plazo, se podría considerar un formato de 64 bits.)
- **Battery State (1B):** Estado de la batería del dispositivo (OK, bajo voltaje, etc.).
- **Emergency Flag (1B):** Indica si la alerta de emergencia está activada (0x01 para activo).

Envío de Alerta con Botón de Emergencia

Esta trama de datos emplea el formato LoRa, pero cambia el tipo de información que se envía. Cuando se presiona el **botón de emergencia** (pin 35), el dispositivo cambia el Message Type a 0x02 para indicar que se trata de una **alerta de emergencia**. Además, se activa el **Emergency Flag** y se incluye la ubicación GPS actual.

- **Message Type:** 0x02 (Alerta de emergencia).
- **Emergency Flag:** 0x01 (Activo).
- **Priority:** Se puede agregar un campo opcional para indicar la prioridad de la emergencia (0x03 para alta prioridad). (Incluir un campo de prioridad es útil para distinguir entre distintos tipos de alertas, asegurando una atención más rápida a las situaciones críticas.)

Ejemplo de Trama de Emergencia

Aquí hay un ejemplo de cómo se vería una trama de emergencia en formato tabular.

Beacon ID	12345
Msg Type	0x02 (E. Alert)
GPS Data	37.7749,-122.4194
Timestamp	1627221573
Bat. State	0x01 (OK)
Emerg Flag	0x01 (Active)
Priority	0x03 (High)

Consideraciones sobre la Trama LoRa

- Las tramas LoRa deben ser compactas para asegurar una transmisión eficiente, ya que la tecnología LoRa tiene un límite de tamaño de paquete. (El límite de tamaño del paquete LoRa puede variar dependiendo del entorno y la configuración, pero generalmente es de entre 50 y 250 bytes.)
- Se deben utilizar técnicas de codificación y compresión si los datos son demasiado grandes. (LoRa no ofrece compresión nativa, pero es posible implementarla a nivel de aplicación si se necesita.)
- La trama debe incluir un **CRC** (Cyclic Redundancy Check) para verificar la integridad de los datos transmitidos. (El CRC es esencial para garantizar que los datos recibidos no hayan sido alterados por errores en la transmisión.)
- La prioridad en las emergencias podría ser útil para distinguir entre distintos tipos de alertas y garantizar una atención más rápida a las situaciones críticas.

G. Programación de los dispositivos

A continuación, se presenta la metodología que se implementó para programar el dispositivo para que cumpla con las funciones propuestas.

Para la implementación del botón de emergencia, se utilizó el pin 32 del microcontrolador como entrada digital. Este pin fue seleccionado debido a que posee una resistencia de *pull-up* interna, lo cual elimina la necesidad de agregar una resistencia física externa; únicamente se requiere el botón conectado entre el pin y tierra. Cuando el botón es presionado, se detecta un nivel lógico bajo (0), lo cual inicia el proceso de envío de la alerta.

Para habilitar esta funcionalidad, se realizaron modificaciones en el archivo `LoRa_APRS_Tracker.cpp`.

Mediante la instrucción `#define ALERT_BUTTON_PIN` 32, se definió el pin asociado al botón de alerta.

En la función `setup()`, se añadió la configuración inicial del pin, como se muestra en el Listado:

```
pinMode(ALERT_BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
logger.log(logging::LoggerLevel::LOGGER_LEVEL_INFO,
"Main", "Botón de alerta configurado en GPIO32 con pull-up interno"
);
```

En esta configuración, el aspecto más relevante es la declaración del pin como entrada con resistencia interna activada mediante `INPUT_PULLUP`.

En la función `loop()`, se realiza una lectura continua del estado del botón. Cuando se detecta un nivel lógico bajo y no se ha enviado aún una alerta, se genera y transmite un paquete de emergencia. La lectura del botón se almacena en

la variable `btn`, la cual es evaluada mediante una estructura `if`. Si la condición se cumple, se construye una cadena de texto `em`, la cual se transmite con la instrucción:

```
LoRa_Utils::sendNewPacket(em);
```

Si el botón no está presionado y previamente se había enviado una alerta, se reinicia la bandera que permite futuros envíos. Finalmente, se muestra un mensaje de confirmación en la pantalla. El código completo correspondiente a esta lógica se presenta en el Listado ?? y en la siguiente imagen se ilustra la salida mostrada en pantalla durante el evento de alerta.

```
// ===== ZONA DE ALERTA: Variables de estado =====
static bool alertSent = false;
static uint32_t alertUntil = 0;
// =====

// == ZONA DE ALERTA: Lectura del botón y envío de paquete ==
bool btn = digitalRead(ALERT_BUTTON_PIN);
if (btn == LOW && !alertSent) {
    alertSent = true;
    // Construir y enviar paquete APRS de emergencia
    String em = String(currentBeacon->callsign)
        + ">APZTRK;!EMERGENCY ALERT!";
    LoRa_Utils::sendNewPacket(em);
    // Mostrar alerta en pantalla y fijar duración
    alertUntil = millis() + 1000;
} else if (btn == HIGH && alertSent) {
    // Al soltar el botón, permitir nuevo envío
    alertSent = false;
}
// =====
// == ZONA DE ALERTA: Mostrar alerta en pantalla ==
if (millis() < alertUntil) {
    displayShow("", "", "¡ALERTA APRS!",
        "Enviado a red APRS", "", "");
    // Salir del loop para que no se ejecute la lógica normal
    mientras dure la alerta
    return;
}
// =====
```

Para evitar que un mismo archivo de encabezado sea procesado múltiples veces (lo cual podría generar errores de redefinición), se utilizan las denominadas *include guards*. Estas consisten en directivas de preprocesador como las mostradas en el Listado:

```
#ifndef HEADER_H           % Si HEADER_H no está definido...
#define HEADER_H            % ...entonces lo definimos

// Declaraciones públicas:
void funcion();
int sumar(int a, int b);

#endif // HEADER_H
```



VIII Análisis de resultados

La implementación de una red basada en iGates y Trackers utilizando tecnología APRS en el Golfo de Papagayo demuestra ser una solución viable para la problemática de seguridad y localización de embarcaciones pequeñas en Costa Rica. La estimación de cobertura radial para un iGate ubicado a 20 metros de altura, con un alcance aproximado de 30 km, sugiere que incluso un solo dispositivo podría cubrir gran parte de la zona, lo cual se corrobora con el cálculo del área de cobertura, que supera ampliamente la extensión del golfo. Sin embargo, la recomendación de instalar al menos dos iGates en puntos estratégicos mejora la confiabilidad y reduce posibles zonas de sombra, asegurando una comunicación continua y efectiva.

El prototipo presentado, consistente en un Tracker integrado dentro de una boyta flotante con botón de emergencia a prueba de agua, responde adecuadamente a la necesidad de ofrecer un sistema de auxilio accesible y funcional incluso en situaciones críticas como el hundimiento o volcamiento de la embarcación. La selección del módulo TTGO T-Beam AXP21P1 V1.2 como base del dispositivo garantiza un equilibrio entre alcance, autonomía y capacidad de procesamiento, esencial para aplicaciones marítimas que requieren bajo consumo energético y comunicación de largo alcance.

Los resultados indican que la infraestructura propuesta es escalable y puede extenderse a otras zonas costeras del país con características similares, facilitando la modernización de los sistemas de monitoreo y rescate en embarcaciones artesanales. Además, la utilización de plataformas digitales como APRS.fi permite la visualización y almacenamiento en tiempo real de las posiciones, lo cual representa un avance significativo respecto a los métodos tradicionales basados en comunicaciones analógicas.

Finalmente, la propuesta técnica, que incluye antenas VHF omnidireccionales, transmisiones en la frecuencia estándar de APRS (144.390 MHz), y dispositivos de bajo costo y fácil instalación, garantiza que el sistema pueda ser adoptado

de forma práctica por comunidades pesqueras y autoridades locales. Se espera que la implementación piloto en el Golfo de Papagayo sirva como modelo para futuras ampliaciones, contribuyendo a mejorar la seguridad marítima y reducir los tiempos de respuesta en emergencias, salvando vidas y protegiendo los recursos económicos ligados a la actividad pesquera y turística en Costa Rica.

IX Conclusiones

La propuesta de implementar una red de comunicación basada en tecnología APRS mediante iGates y Trackers en el Golfo de Papagayo demuestra ser una alternativa efectiva para mejorar la seguridad y la localización de embarcaciones pequeñas. La capacidad de cobertura estimada y la facilidad de instalación de los dispositivos sugieren que este sistema puede cubrir amplias áreas costeras con una infraestructura relativamente sencilla y económica.

El diseño del Tracker, incorporado en una boyta flotante resistente al agua y con botón de emergencia, garantiza que las embarcaciones puedan enviar señales de auxilio en situaciones críticas, facilitando la pronta atención por parte de las autoridades y equipos de rescate. La selección de componentes accesibles y de bajo consumo energético, como el módulo TTGO T-Beam, contribuye a la viabilidad técnica y económica del proyecto.

Además, la integración con plataformas digitales de monitoreo en tiempo real permite un seguimiento constante y efectivo de las embarcaciones, superando limitaciones de los métodos tradicionales y promoviendo una mayor seguridad para los usuarios. La escalabilidad del sistema abre posibilidades para su implementación en otras zonas marítimas del país con necesidades similares.

En resumen, este trabajo sienta las bases para la modernización de los sistemas de auxilio y vigilancia en embarcaciones artesanales, contribuyendo a la protección de vidas humanas y recursos económicos, y fomentando un entorno marítimo más seguro y conectado en Costa Rica.

References

- [1] Radioaficionados.mx, “Aprs (automatic packet reporting system),” 2025. [Online]. Available: <https://radioaficionados.mx/aprs-automatic-packet-reporting-system/>.
- [2] R. C. Capitol, “Guía aprs,” 2025. [Online]. Available: <https://www.radioclubcapitol.es/formacion/aprs/guia-aprs>.
- [3] Innovadidactic, *Lora y lorawan con arduinoblocks y esp32*, 2025. [Online]. Available: https://docs.innovadidactic.com/_media/es/lora_y_lorawan_con_arduino_blocks_y_esp32_steamakers.pdf.

- [4] T. y. T. d. C. R. Ministerio de Ciencia, *Decreto n° 44010-micitt*, 2023. [Online]. Available: <https://www.micitt.go.cr>.
- [5] LilyGO, *Ttgo t-beam v1.2 datasheet and documentation*, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGO-T-Beam>.
- [6] u-blox, *Neo-6/neo-m8 series gnss modules data sheet*, 2024. [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en/product/neo-6-series>.
- [7] S. Corporation, *Sx1276/77/78/79 - lora modem technical datasheet*, 2024. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276>.
- [8] R. Guzman, *Loraaprstracker*, 2023. [Online]. Available: https://github.com/richonguzman/LoRa_APRS_Tracker.

Appendix A
Costos estimados del proyecto (Zona de cobertura Golfo de Papagayo)

Concepto	(€) Costo unitario	Unidades	(€) Costo total
Horas Ingeniero	37,700	24	904,800
Módulo Tracker t-beam-axp21p1-v1.2	25,000	1	25,000
Módulo Tracker iGate TTGO T-Beam o Heltec LoRa 32 V2	25,000	3	75,000
Boya flotante	5,000	1	5,000
Botón aprueba de agua	3,000	1	3,000
Cables	1,200	1 m	1,200
Estaño	125	20 g	2,500
Termocontráible	500	1 m	500
Pegamento contra agua	2,000	1	2,000
Batería de Litio 18650	3,000	1	3,000
Estructura diseñada en 3D (para soporte del Tracker)	150	100 g	15,000
Cargador de baterías solar	8,000	1	8,000
Alquiler de lancha para recorrer la zona de cobertura*	10,000	3 días	30,000
TOTAL			1,074,800

Table VI: Costos estimados del proyecto.

*El precio puede variar, sin embargo esta es una tarifa cómoda que normalmente cobraría un pescador local por los viajes cortos en las zonas de cobertura.

Appendix B
Registro de horas de trabajo

Fecha	Nombre	Descripción	Horas dedicadas
2025-03-12	Josué	Investigación sobre tecnologías APRS y cobertura VHF	4
2025-03-14	Natalia	Diseño preliminar del sistema iGate y Tracker	5
2025-04-17	Joham	Modelado de zona de cobertura en el Golfo de Papagayo.	5
2025-04-20	Josué	Pruebas iniciales del módulo TTGO T-Beam	6
2025-04-23	Joham	Diseño del soporte 3D para boyas y Tracker	4
2025-04-25	Natalia	Ánalisis de ubicación óptima para iGates en el golfo	5
2025-04-28	Josué	Integración de botón de emergencia con Tracker	3
2025-05-06	Natalia	Revisión de materiales y componentes del sistema	3
2025-05-07	Joham	Investigación de precios de los componentes	4
2025-05-08	Josué	Programación inicial del microcontrolador para detectar el botón de emergencia	4
2025-05-10	Natalia	Verificación de compatibilidad eléctrica entre componentes	2
2025-05-12	Joham	Cotización y contacto con proveedores de sensores y GPS	3
2025-05-13	Josué	Ensamblaje de prototipo del sistema con botón y módulo GPS	5
2025-05-18	Natalia	Pruebas de funcionamiento del prototipo	4
2025-05-23	Joham	Documentación de pruebas y recopilación de resultados	2
2025-05-25	Josué	Documentación de pruebas y recopilación de resultados	3
2025-05-30	Natalia	Diseño del esquema eléctrico del sistema final	3
2025-06-05	Joham	Elaboración de presupuesto final del sistema	3
2025-06-05	Josué	Documentación final	4
2025-06-05	Natalia	Se finaliza la documentación del proyecto	4
		TOTAL a la fecha	76

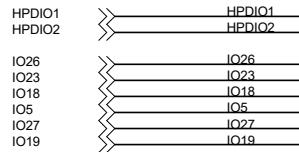
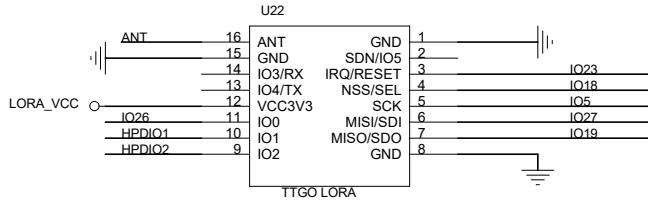
Table VII: Resumen de actividades del proyecto y horas dedicadas.

Appendix C
Diagramas de quinto nivel del dispositivo.

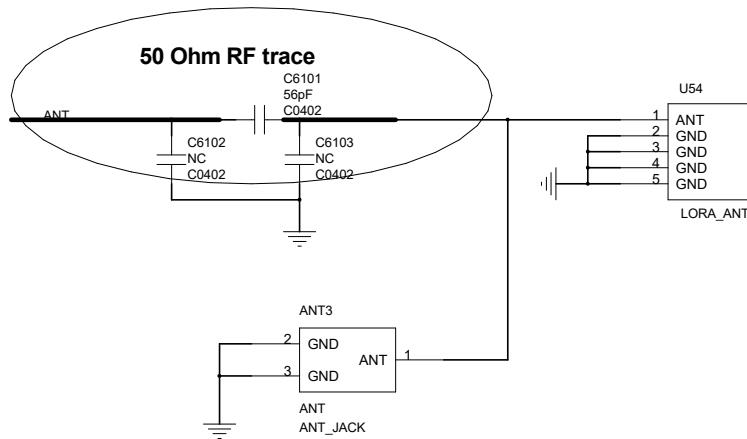
5 4 3 2 1

D

D



IO23=IRQ/RESET
 IO18=NSS/SEL
 IO5=SCK
 IO27=MOSI/SDI
 IO19=MISO/SDO
 IO26=D10/IO0



Title: T22_GPS_V1.1换成AXP2101

Size: C Document Number: TTGO LORA

Rev: V07

Date: Thursday, December 19, 2019

Sheet: 2

1 of 5

5 4 3 2 1

A

A

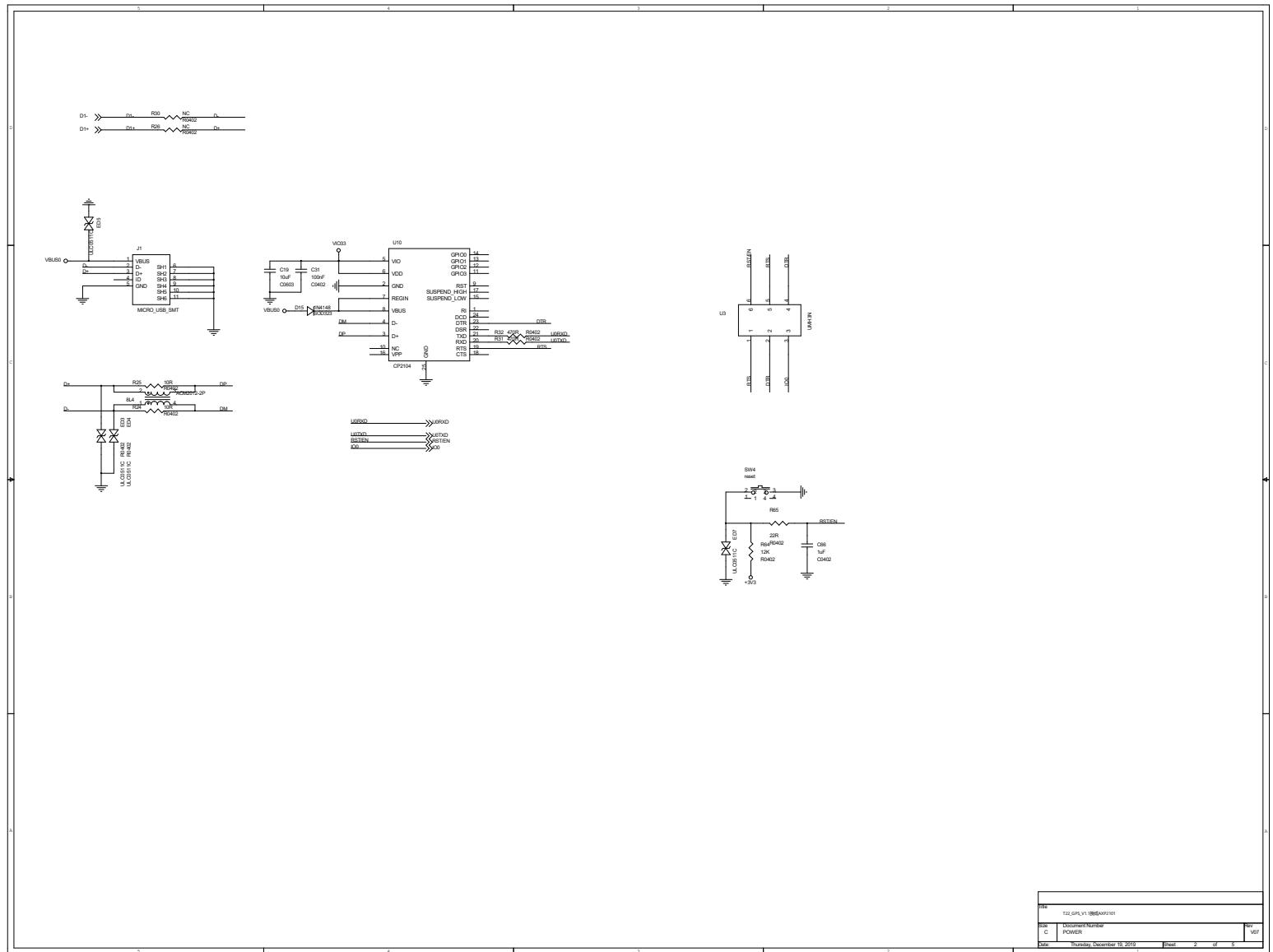
B

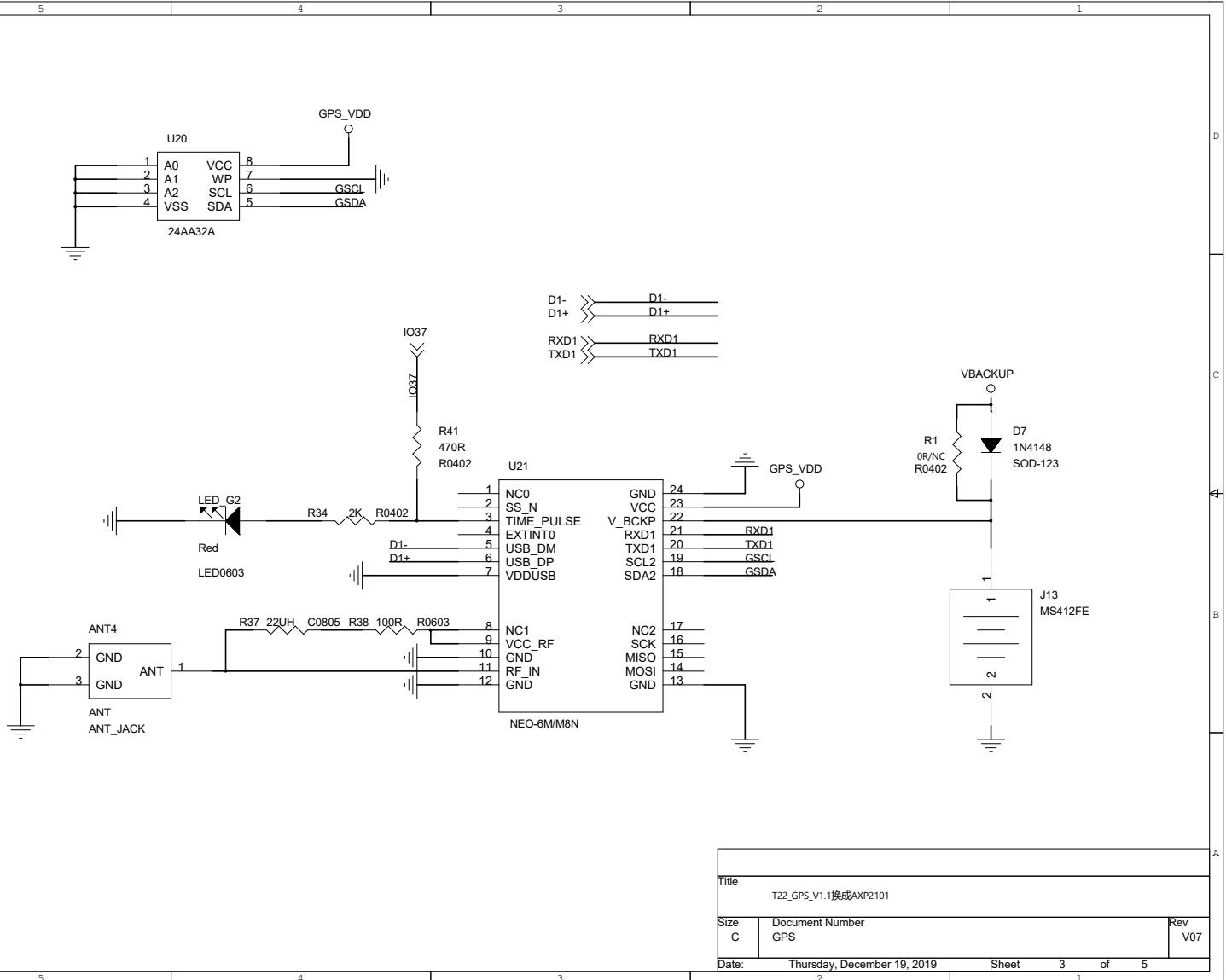
B

C

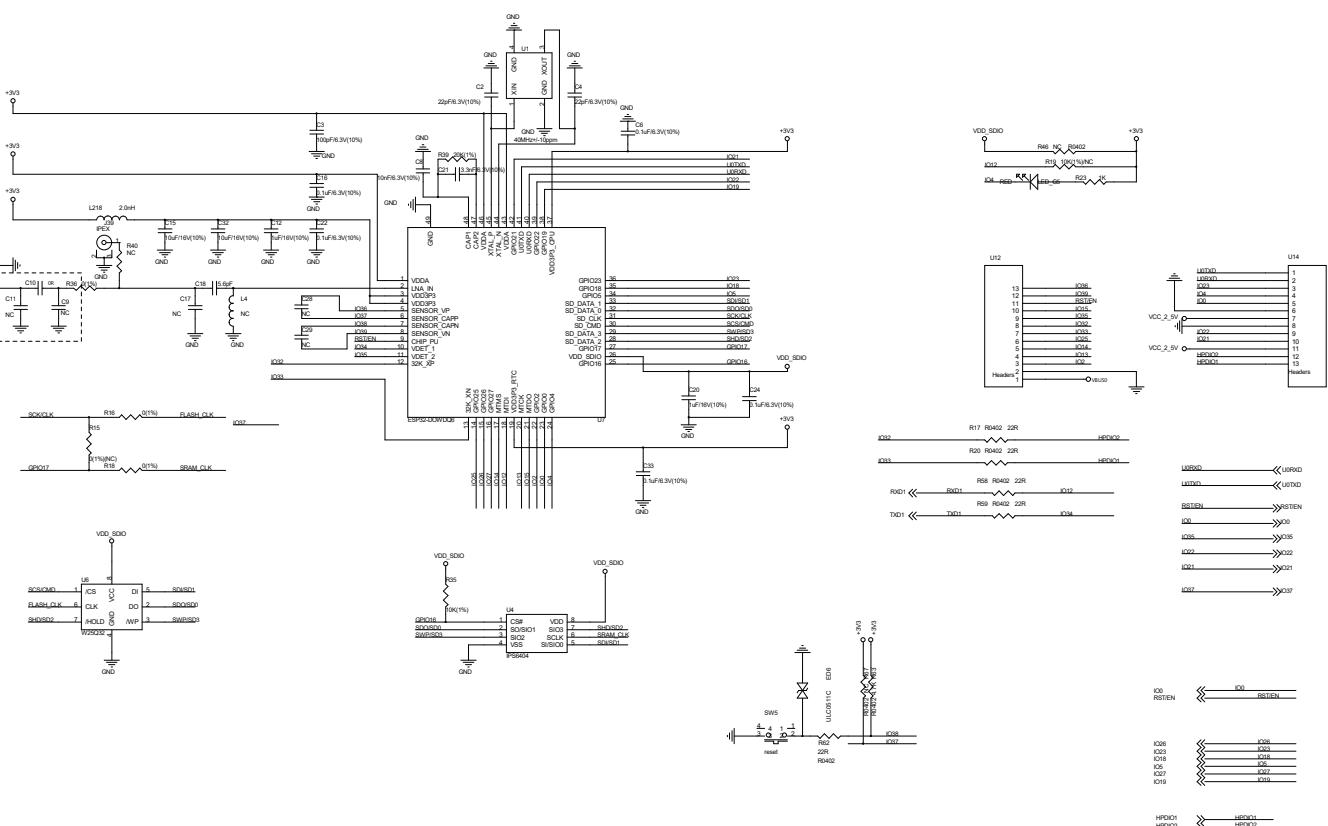
C

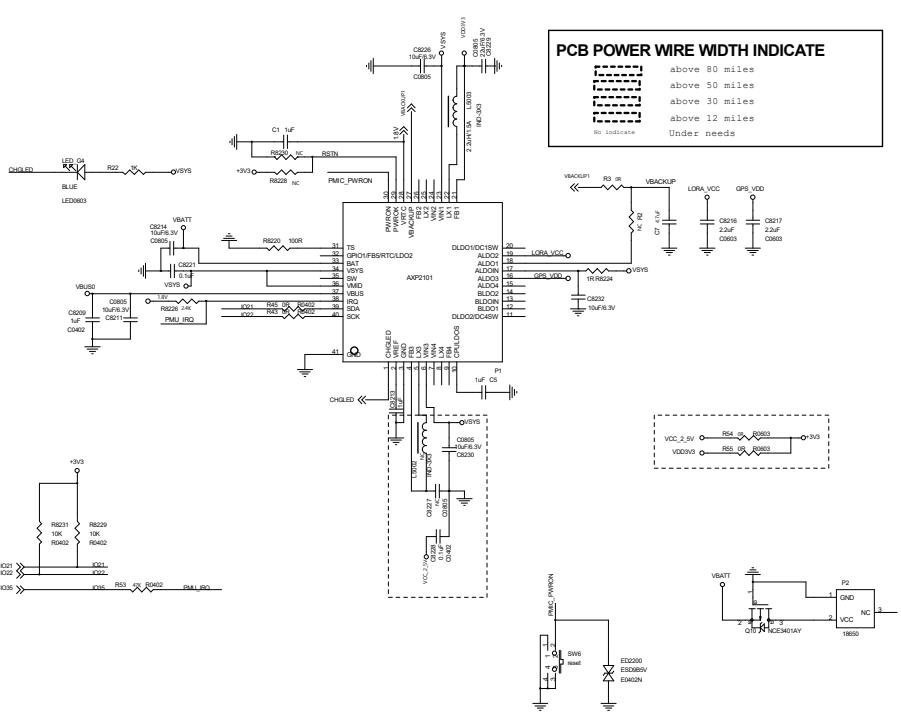
D





ESP32 Module:with 1.8V Flash & SRAM
The operating voltage for signals marked in blue is 1.8V.





T22_GPS_V1.18M&AXP2101
88
Date: Thursday, December 19, 2019 Sheet 5 of 5