

Proyecto LoRa Tracker GPS: Estimación de Tiempos de Llegada de Trenes

Ricardo Sanchez Calderón*, Marco Umaña Vallejos * y Marco Alfaro Bolaños*

*Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 30101 Cartago, Costa Rica, {rsanchez, marcoan, marcoil}@estudiantec.cr

Resumen—Este trabajo explora el uso del Automatic Packet Reporting System (APRS) como tecnología de comunicación digital en el contexto regulado del espectro radioeléctrico en Costa Rica. Se analiza su funcionamiento tradicional con el protocolo AX.25 y la transición hacia el uso de LoRa, una tecnología de modulación eficiente en entornos de bajo consumo y largo alcance. Además, se plantea un posible caso de uso para un tracker LoRa, considerando las particularidades geográficas y normativas del país.

Palabras Clave—APRS, LoRa, AX.25, IoT, espectro radioeléctrico, PNAF, comunicaciones inalámbricas, Costa Rica.

I. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del espectro radioeléctrico es un componente esencial para el desarrollo y la estabilidad de las comunicaciones inalámbricas modernas. En Costa Rica, esta gestión está regulada por el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF), el cual define la asignación de bandas según su finalidad, garantizando un entorno ordenado y libre de interferencias para los distintos servicios que dependen de esta tecnología [1].

Dentro de este contexto regulado, surgen múltiples sistemas que aprovechan los avances en la transmisión de datos. Entre ellos, el Automatic Packet Reporting System (APRS) destaca como un método eficaz de comunicación digital entre estaciones de radioaficionados, sensores y otros dispositivos distribuidos. Esta tecnología no solo facilita el intercambio de información en tiempo real, sino que también permite su integración con Internet mediante APRS-IS, ampliando significativamente su alcance y funcionalidad.

El APRS opera sobre distintos protocolos, siendo el AX.25 uno de los más tradicionales. Sin embargo, en los últimos años ha ganado terreno el uso de LoRa, una tecnología de modulación que se adapta perfectamente a entornos de bajo consumo y largo alcance, características especialmente valoradas en aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT). Su adopción en este tipo de proyectos ha demostrado ser una solución eficiente para la recolección de datos y monitoreo remoto en zonas de difícil acceso o con infraestructura limitada.

En este documento se examinan los aspectos técnicos y operativos de APRS, la evolución de sus protocolos de comunicación, y el papel que juega la normativa nacional en el despliegue adecuado de estas tecnologías inalámbricas en el país. Además se explora un posible uso para un tracker LoRa en Costa Rica.

II. ESTADO DEL ARTE

II-A. ¿Qué es APRS?

El *Automatic Packet Reporting System (APRS)* es un sistema de comunicación digital en tiempo real diseñado para facilitar el intercambio bidireccional de información entre múltiples nodos de una red compartida. Este mecanismo permite que los dispositivos APRS capturen y difundan datos relevantes dentro de su entorno, lo cual posibilita una interacción dinámica entre estaciones móviles, fijas, sensores y otros dispositivos integrados en la red [2].

Los datos generados por los dispositivos APRS se transmiten a través de frecuencias compartidas y suelen ser retransmitidos localmente por repetidores (*digipeater*s), lo que amplía su cobertura. Posteriormente, esa información puede ser re- dirigida hacia Internet mediante *puertas de enlace (IGates)*, que actúan como receptores conectados en línea. Estos IGates inyectan los datos al sistema *APRS-IS (Internet Service)*, permitiendo que los usuarios alrededor del mundo puedan acceder a la información a través de diversas plataformas [3]. Este tipo de red es ampliamente utilizado en aplicaciones como geolocalización con GPS, monitoreo remoto, telemetría y transmisión de datos en redes de área local (LAN).

II-A1. Protocolos de comunicación utilizados en APRS: APRS es compatible con una variedad de protocolos de comunicación [4], cuya elección dependerá del tipo de aplicación y del entorno en el que se implemente. A continuación, se describen los principales:

- AX.25

Basado en el protocolo X.25 pero adaptado para su uso en radioaficionados, AX.25 es el más común en sistemas APRS. Este protocolo permite la transmisión de datos mediante *Packet Radio* y suele operar en enlaces de *VHF* utilizando módems AFSK a una velocidad de 1200 bps. En el caso específico de Costa Rica, una frecuencia habitual es *144.390 MHz* [1].

- APRS-IS

Este componente extiende las capacidades del APRS al integrarlo con Internet. Emplea el protocolo *TCP/IP* para establecer comunicación entre estaciones APRS, IGates y servidores remotos, permitiendo así el acceso global a los datos transmitidos en la red local [4].

- LoRa

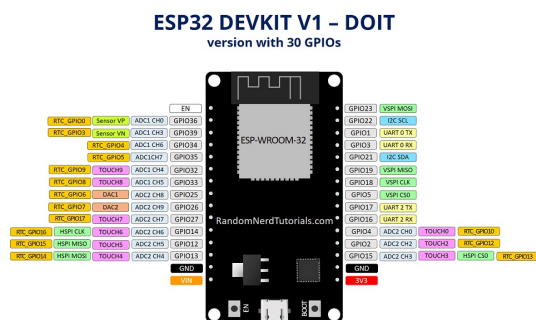
LoRa (Long Range) es una tecnología de modulación

II-B. Aplicaciones y ventajas de LoRa

- **Agricultura y sistemas de riego**, donde permite automatizar decisiones a distancia con mínima supervisión.
- **Ciudades inteligentes**, como en el seguimiento del transporte público, control de calidad del aire o sistemas de seguridad distribuidos.
- **Supervisión de infraestructura**, incluyendo puentes, edificios y sistemas de generación solar, como paneles fotovoltaicos.

III. HARDWARE UTILIZADO

Otra ventaja significativa del ESP32 es su conectividad inalámbrica integrada, ya que incluye tanto WiFi como Bluetooth. Aunque en este proyecto se utiliza principalmente LoRa



El ESP32 también posee capacidades de bajo consumo energético, esenciales en dispositivos que operan durante largos periodos sin acceso continuo a una fuente de energía confiable, como un tren en movimiento. Puede entrar en modos de suspensión profunda (deep sleep) cuando no se están transmitiendo datos, conservando la batería del sistema.

En conclusión, el ESP32 DOIT se considera una opción óptima y no sobredimensionada para el sistema planteado, ya que ofrece:

- Capacidad de procesamiento suficiente.
- Comunicaciones inalámbricas integradas (WiFi, Bluetooth).
- Interfaces compatibles con los módulos necesarios (GPS y LoRa).
- Bajo consumo energético..
- Comunidad activa, amplia documentación y soporte en plataformas como PlatformIO y Arduino IDE.

IV. CONEXIÓN DEL DISPOSITIVO TRACKER

El del dispositivo se realiza por medio of Visual Studio Code, utilizando la extensión PlataformIO, una vez se tiene el código descargado del repositorio se procede a realizar ciertos cambios importantes para la configuración del dispositivo como lo son los callsign y encender algunos leds del tracker para estar seguros de cuando está transmitiendo información. También verificamos que la versión de firmware seleccionada sea la correcta para nuestro dispositivo y cargamos el programa por medio de cable USB.

Una vez que el programa termine de cargar, la pantalla del LoRa cambiará y mostrará la información importante de nuestro callsign.

En las figuras 2 y 3 se presenta el dispositivo tracker conectado y transmitiendo información.



Fig. 2. Tracker funcionando correctamente con el debido nombre

V. USO FINAL

El uso que se quiere dar para este proyecto es la implementación de un sistema de estimación de llegada a las estaciones para los trenes de Cartago - San José utilizando la tecnología LoRa para realizar el trackeo de los trenes y enviar datos de geolocalización en tiempo real, de manera el dispositivo de los

APRS station TI01E7-7 - show graphs	
Last status:	Día de la prueba: 2024.08.21
Location:	9°51.30' N 83°54.45' W - locator EJ89BU15CE - show map 1.6 km Southeast bearing 142° from Cartago, Cartago, Costa Rica [?] 5.0 km West bearing 292° from Paraiso, Cartago, Costa Rica 21.1 km Southeast bearing 114° from San José, San José, Costa Rica 97.0 km West bearing 261° from Puerto Limón, Limón, Costa Rica
Last position:	2025-05-07 12:05:45 CST (10h25m ago) 2025-05-07 12:05:45 CST local time at Cartago, Costa Rica [?]
Altitude:	1099 m
Speed:	7 km/h
Device:	Ricardo, CA2RXU: ESP32 LoRa Tracker (tracker)
Last path:	TI01E7-7>APLRT1 via WIDE1-1,qR,TI3WTI-10 Good path!
Positions stored:	2

Fig. 3. Prueba de conexión en la página web con el debido nombre

trenes, usando GPS y la localización, pueda calcular el tiempo estimado de llegada del tren a la parada correspondiente.

VI. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El dispositivo instalado en los trenes y estaciones captura las coordenadas GPS en tiempo real, las cuales son procesadas para calcular la distancia hasta las paradas seleccionadas. En base a la velocidad promedio del tren, se logra estimar el tiempo de llegada y esa información es actualizada en las pantallas ubicadas en las paradas del tren.

EL cálculo de los tiempos de llegada se realizará por medio de un script de python el cual mediante un estimado de la velocidad constante del tren y las coordenadas de cada parada se calculan las distancias y el tiempo estimado de llegada.

Para este proyecto es necesario utilizar iGates, en caso de que no se encuentre conexión a los iGates disponibles en la estación del tren, trackers para las coordenadas y finalmente ESP32 para obtener los datos del servidor y enviarlos al display.

VII. TRAMAS DE DATOS A UTILIZAR

Los datos a utilizar son las coordenadas del tracker de cada estación, mediante el script ya se calcula la distancia y el tiempo de llegada aproximado.

VIII. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

VIII-A. Diagrama de primer nivel

A continuación, en la figura 4 se muestra el diagrama de primer nivel del sistema:



Fig. 4. Diagrama de primer nivel del sistema

En este diagrama se muestran las entradas al sistema, el cual sería la información del usuario y la señal GPS, de manera que con esto se generan los paquetes APRS y se da la transmisión por medio de la conexión de red APRS. En la salida se muestra que el sistema envía los datos de la red y recibe la información transmitida.

VIII-B. Diagrama de segundo nivel

En este diagrama se describe con mayor detalle los procesos clave del sistema, como la captura de datos GPS, la estructuración y codificación de los paquetes APRS y la transmisión de los datos mediante LoRa.

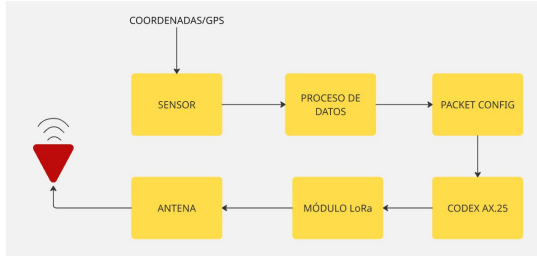


Fig. 5. Diagrama de segundo nivel del sistema

VIII-C. Diagrama de tercer nivel

Este nivel se enfoca en los pasos específicos para cada función, como lo son la captura de datos GPS, el procesamiento de los datos y la transmisión.

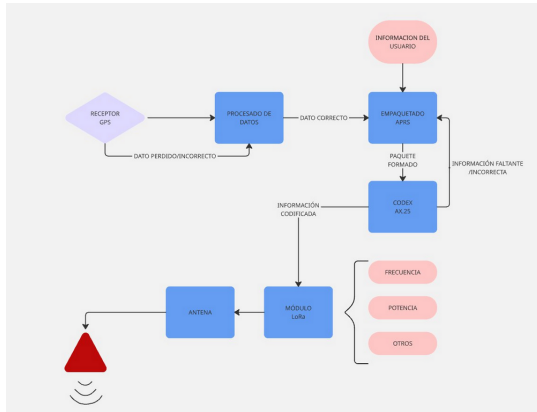


Fig. 6. Diagrama de tercer nivel del sistema

VIII-D. Diagrama de cuarto nivel

En el diagrama de cuarto nivel, se describen los procesos internos con mayor detalle, estos procesos están más relacionados con el manejo del microcontrolador ESP32. Estos detalles son por ejemplo los ciclos de lectura, el cálculo de las distancias de las paradas del tren e incluso la estimación de los tiempos de llegada. También en este diagrama se incluyen las interrupciones.

VIII-E. Diagrama de quinto nivel

En este nivel se alcanza un mayor nivel de detalle como se denota en la Fig.8, representando el flujo interno de procesamiento dentro del microcontrolador. Se abordan etapas como la adquisición de las coordenadas GPS, el cálculo de las distancias y tiempos de llegada estimados, así como la posterior preparación y transmisión de los paquetes de datos

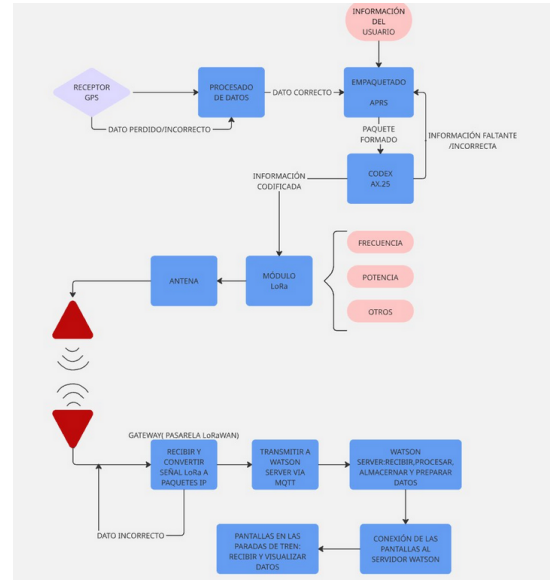


Fig. 7. Diagrama de cuarto nivel del sistema

mediante el protocolo LoRa. Asimismo, se consideran aspectos específicos de operación como la ejecución de tareas bajo un sistema operativo en tiempo real (RTOS), el manejo de los buffers de datos intermedios y las estrategias de optimización energética para maximizar la autonomía del sistema.

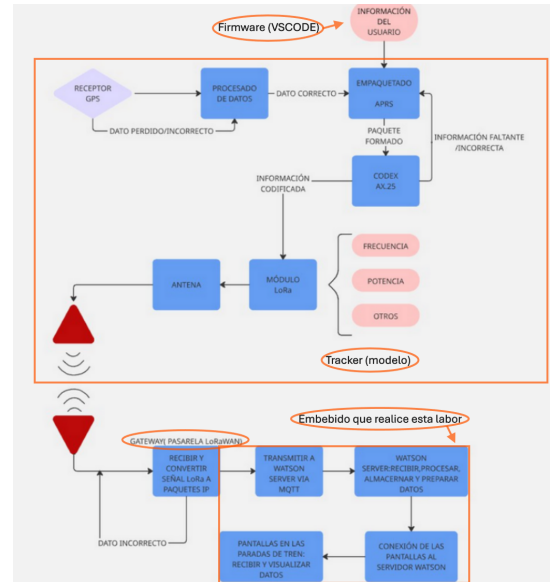


Fig. 8. Diagrama de quinto nivel

IX. DIAGRAMA DE FLUJO

En la figura 9 se presenta el diagrama de flujo donde se presenta a detalle el flujo de trabajo que tendrá el dispositivo.

X. PRESUPUESTO

A continuación, en la figura 10 se presenta el presupuesto con los dispositivos que se van a utilizar en el proyecto.

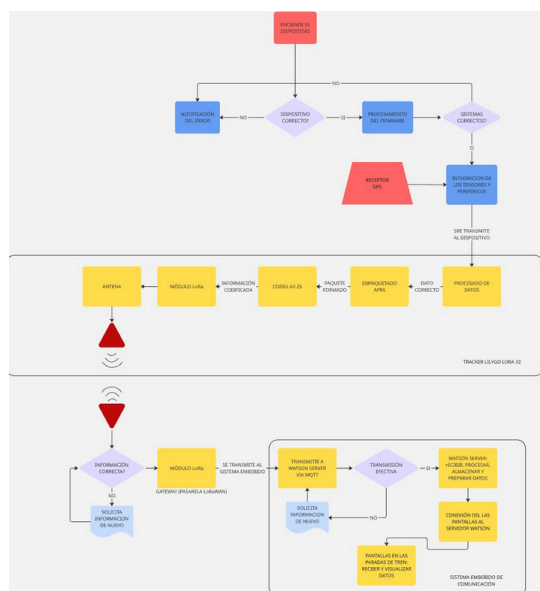


Fig. 9. Diagrama de flujo del sistema

Elemento	Cantidad	Costo Unitario (CRC)	Subtotal (CRC)
Sistema de registro (tracker)	10	47700	477000
Sistema de conexión GPS-APRS iGate	10	68900	689000
Display touch interactivo	10	42400	424000
Módulo ESP32	10	6400	64000
Case para protección (IP65)	10	10600	106000
Cable USB tipo C	10	2650	26500
TOTAL	-	-	1,786,500

Fig. 10. Presupuesto para el proyecto

XI. CRONOGRAMA

En la figura 11 se presenta el cronograma a seguir para el desarrollo de este proyecto

Semana	Actividad
1-2	Investigación y análisis de viabilidad técnica y de cobertura LoRa
3-4	Adquisición de equipos y pruebas individuales de módulos LoRa + GPS
5-6	Instalación y pruebas de los gateways LoRa a lo largo de la ruta
7-8	Desarrollo de la plataforma de visualización
9-10	Integración del sistema y pruebas en campo con trenes
11	Ajustes, recolección de datos, validación de métricas
12	Elaboración de informe final y presentación del proyecto

Fig. 11. Cronograma del proyecto

XII. CONCLUSIONES

- El presente trabajo plantea un diseño preliminar para un sistema de estimación de llegada de trenes utilizando tecnologías de comunicación como APRS y LoRa, en conjunto con módulos GPS y microcontroladores ESP32.
- A partir del análisis realizado, se evidencia la viabilidad teórica de implementar este sistema en el contexto fe-

roviario de Costa Rica, aprovechando las capacidades de bajo consumo energético, largo alcance y flexibilidad de integración que ofrece la tecnología LoRa, así como la disponibilidad de hardware accesible y ampliamente documentado.

- Aunque el sistema aún no ha sido construido ni sometido a pruebas prácticas, el diseño propuesto contempla los principales aspectos técnicos y operativos necesarios para su implementación, incluyendo la estructura de hardware, la arquitectura de software y los flujos de comunicación de datos. Este trabajo sirve como base conceptual sólida para futuras etapas de desarrollo, validación experimental y eventual despliegue en campo.
- Se proyecta que, de implementarse, el sistema podría contribuir de forma significativa a mejorar la información en tiempo real disponible para los usuarios del sistema ferroviario, optimizando la planificación de viajes y la eficiencia operativa de los servicios de transporte.

XIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas de campo prolongadas para validar la precisión de las estimaciones de llegada en diferentes condiciones de operación en función del clima, la cobertura y la velocidad variable del tren
- Es aconsejable implementar mecanismos de redundancia en la comunicación de datos, ya sea mediante el uso de múltiples iGates o almacenamiento local temporal en el dispositivo.
- Se sugiere explorar la integración del sistema con aplicaciones móviles o plataformas web para brindar acceso en tiempo real a los usuarios.
- Se recomienda documentar exhaustivamente la configuración del hardware y software, así como capacitar al personal encargado de la operación y mantenimiento del sistema.

REFERENCIAS

- [1] “Plan nacional para la seguridad, nutrición y erradicación del hambre,” 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC177242/>
- [2] Santa Barbara Amateur Radio Club, *Automatic Packet Reporting System – APRS*, Std., 2024. [Online]. Available: <https://www.sbarc.org/aprs/>
- [3] Ham Radio Prep, *Beginner’s Guide to Using APRS for Ham Radio*, Std., 2024. [Online]. Available: <https://hamradioprep.com/aprs-for-ham-radio/>
- [4] Themodernham, *Modern Introduction to Packet Radio, AX25, APRS and TCP/IP*, Std., 2024. [Online]. Available: <https://themodernham.com/modern-introduction-to-packet-radio-ax25-aprs-and-tcp-ip/>
- [5] Isle of Avalon Amateur Radio Club, *What are LoRa and LoRaWAN?*, Std. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>
- [6] —, *LoRa-APRS as used in SOTA*, Std. [Online]. Available: <https://www.avalonarc.org.uk/2024/07-30-aprs-lora.html/>