UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Diseño e Implementación de un Sistema de Telemetría para la Optimización de la Estrategia de Competencia en un Prototipo de Vehículo Eléctrico de Alta Eficiencia

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

HAROLD JOSUA GONZÁLEZ ALBÁN
LISSETH PAMELA GUAZHAMBO MARCA

Director:

PhD. Daniel Esteban Iturralde Piedra

CUENCA, ECUADOR

2026

DEDICATORIA

A mis padres, Diana Albán y Holger González, quienes sentaron los pilares de la persona en la cual me he convertido hoy; gracias a sus enseñanzas, fueron forjando una mejor versión de mí cada día.
A mis hermanos, Kenji y Bella, cuya presencia en mi vida genera una gran motivación para esforzarme y demostrarles que con trabajo duro y dedicación, se puede alcanzar todo lo que se propongan.
A mis abuelitos, quienes son parte fundamental en mi vida, ya que me han enseñado a confiar en mí y me han mostrado el significado del amor incondicional.
A mis tíos, Gina y Juan, que siempre han sido como unos segundos padres para mí, guiando mi camino con sus enseñanzas y cuidándome con un amor inigualable.
A todos mis primos, en especial a Josselyn, quien siempre se ha preocupado por mí, ha sido mi confidente en muchas ocasiones y a quien profeso una gran admiración.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a toda mi familia por su apoyo incondicional en este camino; sobre todo, por la confianza que depositan en mí día a día y por creer que puedo lograr grandes metas si me lo propongo.

De todo corazón, agradezco a quienes me acompañaron durante estos cinco años; ya que tuve la fortuna de conocer personas maravillosas que hoy puedo llamar amigos.

A mis docentes, quienes contribuyeron a mi formación no solo con los conocimientos impartidos en las aulas, sino también con sus enseñanzas y valores, despertando en mí un profundo amor por mi carrera y por todo lo que esta representa.

A mi compañera de tesis, quien mejor que nadie comprende la dedicación y el esfuerzo que hemos puesto en este proceso.

Finalmente, agradezco a todas las personas que han sido parte de esta etapa, ya que sin su amor y cariño nada de esto habría sido posible.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia por estar siempre para mí y enseñarme a ser la persona en la que me he convertido. De manera muy especial, a mi madre, Patricia Marca, por ser mi apoyo incondicional y quien más ha creído en mí. Gracias por acompañarme en este proceso con tanta paciencia y cariño. Siempre llevaré conmigo, y con mucho orgullo, todo lo que me has entregado: valores, fuerza y amor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia por estar siempre para mí apoyándome y por su amor incondicional. A mis abuelitos, por ser unos segundos padres para mí, en especial a mi abuelita gracias por esas palabras que muchas veces me levantaron. A mis primos, gracias por ser mi refugio de alegría y por escucharme siempre que lo necesité. A mi pareja, gracias por tus palabras de aliento en los momentos de estrés, por tu apoyo y por estar siempre ahí para mí, celebrando cada pequeño avance. A los amigos que me regaló esta etapa, gracias por el apoyo mutuo y por todos los momentos compartidos. A mi compañero de tesis, gracias por tu responsabilidad y dedicación. Este trabajo es el reflejo de nuestro esfuerzo conjunto. Finalmente, agradezco a mis docentes por guiarme y darme los conocimientos necesarios para llegar hasta aquí.

Diseño e Implementación de un Sistema de Telemetría para la Optimización de la Estrategia de Competencia en un Prototipo de Vehículo Eléctrico de Alta Eficiencia

En este documento se presenta el diseño e implementación de un sistema de telemetría en tiempo real para un prototipo de vehículo eléctrico de alta eficiencia, orientado a ser una herramienta para optimizar la estrategia de competencia. Este presenta una arquitectura de red híbrida: por una parte, integra un bus CAN para la adquisición de datos dinámicos y energéticos de forma determinista y robusta, en conjunto con un enlace serial (UART) que acopla el nodo central a toda la red de sensores. Asimismo, la información recopilada se gestiona mediante un esquema de doble bucle: por un lado, se provee una interfaz gráfica en cabina para facilitar la autogestión del piloto; y por otro, a través de un enlace LTE se envía la información hacia un dashboard en la nube. Esta estructura proporciona los datos necesarios para maximizar el rendimiento energético, optimizar el desempeño en el circuito y detectar posibles fallos de manera preventiva.

Palabras clave: Telemetría, Vehículos Eléctricos, Bus CAN, Internet de las Cosas (IoT), Optimización de Estrategia

Design and Implementation of a Telemetry System for the Optimization of Competition Strategy in a High-Efficiency Electric Vehicle Prototype

This document presents the design and implementation of a real-time telemetry system for a high-efficiency electric vehicle prototype, intended as a tool to optimize competition strategy. The system features a hybrid network architecture: it integrates a CAN bus for the deterministic and robust acquisition of dynamic and energy data, combined with a serial link (UART) that couples the central node to the entire sensor network. Furthermore, the collected information is managed through a dual-loop scheme: on the one hand, an in-cabin graphical interface is provided to facilitate the driver's self-management; on the other hand, the data is transmitted via an LTE link to a cloud-based dashboard. This structure provides the necessary data to maximize energy performance, optimize track performance, and proactively detect potential faults.

Keywords: Telemetry, Electric Vehicles, CAN Bus, Internet of Things (IoT), Strategy Optimization

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria i

Agradecimientos i

Dedicatoria ii

Agradecimientos iii

Resumen iv

Abstract v

Ìndice de Contenidos vi

Índice de Figuras vii

Índice de Tablas viii

I Introducción 1

II Estado del Arte 1

III Descripción del sistema 2
- III-A Protocolo CAN . . . 3
- III-B Conectividad inalámbrica . . . 4
- III-C Implementación de la red CAN y enlace de datos híbrido . . . 4
  - III-C1 Nodo 1 (Unidad de Medición Inercial o IMU) . . . 6
  - III-C2 Nodo 2 (GPS) . . . 6
  - III-C3 Nodo 3 (variables del entorno y puente de datos) . . . 6
  - III-C4 Nodo 4 (ECU) . . . 7
  - III-C5 Nodo 5 (Interfaz gráfica y gestión IoT) . . . 8

IV Pruebas y Resultados 9
- IV-A Validación de la capa física y comunicación (bus CAN) . . . 9
- IV-B Latencia del sistema . . . 10
- IV-C Tasa de pérdida de paquetes . . . 10
- IV-D Interfaz gráfica dentro del vehículo . . . 11
- IV-E Dashboard del centro de control . . . 12
- IV-F Respaldo de datos local y gestión en dashboard . . . 12

V Conclusiones 12

Referencias 14

ÍNDICE DE FIGURAS

1 Diagrama de bloques del sistema de telemetría . . . 3
2 Formato de la Trama CAN [1] . . . 3
3 Topología Física . . . 5
4 Diagrama de flujo del nodo 1 . . . 6
5 Diagrama de flujo del nodo 2 . . . 6
6 Diagrama de flujo del nodo 3 lectura de las variables del entorno . . . 7
7 Diagrama de flujo del nodo 3 para guardar datos en la SD . . . 7
8 Diagrama de flujo del nodo 3 como puente de datos . . . 8
9 Diagrama de flujo del nodo 5 . . . 9
10 Forma de onda en la transmisión de un bit recesivo (no hay datos) . . . 9
11 Forma de onda en la transmisión de un bit dominante (hay datos) . . . 9
12 Mensajes CAN del nodo GPS . . . 9
13 Mensajes CAN del nodo IMU . . . 10
14 Latencia de transmisión de los datos desde el nodo IMU . . . 10
15 Latencia de transmisión de los datos desde el nodo GPS . . . 10
16 Latencia de transmisión de la comunicación UART . . . 10
17 Latencia de transmisión del enlace LTE . . . 11
18 Tasa de pérdida de la transmisión . . . 11
19 Interfaz gráfica para el piloto . . . 11
20 Datos del dashboard . . . 12
21 Trazado de pista por GPS y gráficas de comparación . . . 13

Índice de Tablas

I ID de las variables del sistema de telemetría 4
II Comparación entre LoRa, Wi-Fi y LTE [2], [3], [4] 4
III Especificaciones técnicas del router industrial [5] 4

Diseño e Implementación de un Sistema de Telemetría para la Optimización de la Estrategia de Competencia en un Prototipo de Vehículo Eléctrico de Alta Eficiencia

Harold Josua González Albán
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
harold.gonzalez@es.uazuay.edu.ec

Lisseth Pamela Guazhambo Marca
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
lisseth.guazhambo@es.uzuay.edu.ec

***Resumen*—En este documento se presenta el diseño e implementación de un sistema de telemetría en tiempo real para un prototipo de vehículo eléctrico de alta eficiencia, orientado a ser una herramienta para optimizar la estrategia de competencia. Este presenta una arquitectura de red híbrida: por una parte, integra un bus CAN para la adquisición de datos dinámicos y energéticos de forma determinista y robusta, en conjunto con un enlace serial (UART) que acopla el nodo central a toda la red de sensores. Asimismo, la información recopilada se gestiona mediante un esquema de doble bucle: por un lado, se provee una interfaz gráfica en cabina para facilitar la autogestión del piloto; y por otro, a través de un enlace LTE se envía la información hacia un dashboard en la nube. Esta estructura proporciona los datos necesarios para maximizar el rendimiento energético, optimizar el desempeño en el circuito y detectar posibles fallos de manera preventiva.**

***Palabras clave*—Telemetría, Vehículos Eléctricos, Bus CAN, Internet de las Cosas (IoT), Optimización de Estrategia**

I. Introducción

En las competencias de eficiencia energética para vehículos eléctricos surgen desafíos que no solo se centran en la sustitución de los motores de combustión, sino también en el desarrollo de nuevas tecnologías para la optimización de la eficiencia energética. Donde se busca maximizar la distancia recorrida con la mínima cantidad de energía, ya que cada decisión de diseño y cada estrategia de conducción tienen un impacto crítico en el resultado final [6].

Por lo cual, los equipos que participan en estas competencias enfrentan diversos desafíos como la falta de visibilidad del comportamiento dinámico y el estado energético del vehículo en tiempo real durante las pruebas y la carrera. Ya que al no contar con un flujo constante de datos, el piloto y el equipo de soporte operan con información limitada, provocando que basen sus decisiones en suposiciones y análisis postcarrera. Por lo tanto, en [7] destacan la importancia de considerar parámetros como el consumo instantáneo de corriente, el voltaje de la batería bajo carga, la velocidad del vehículo y la temperatura, ya que son variables que cambian constantemente y determinan el rendimiento durante la competencia.

Así mismo, la ausencia de dicho sistema que capture, transmita y visualice esta información en tiempo real genera una brecha crítica entre el diseño teórico del vehículo y su desempeño práctico. Esto impide la optimización de la estrategia de carrera, la detección temprana de posibles fallos y la validación empírica de las mejoras de ingeniería implementadas en el prototipo.

Por lo tanto, el sistema de telemetría propuesto es una respuesta para monitorear en tiempo real el estado dinámico y energético del vehículo. Ya que integra la ECU y varios sensores mediante un Bus de Red de Área de Controlador (CAN) y un microcontrolador central. Este sistema permite el flujo de información hacia el piloto para ajustar su conducción mediante una interfaz a bordo, a la vez que transmite datos inalámbricamente al centro de monitoreo para la toma de decisiones estratégicas y la detección temprana de fallos. Así, el sistema optimiza la gestión energética y la fiabilidad operativa durante la competencia.

II. Estado del Arte

En esta sección se presenta el estado del arte, donde los artículos revisados muestran distintos enfoques. En este sentido, los artículos iniciales se centran en establecer canales de comunicación robustos, mientras que los desarrollos más recientes se orientan hacia arquitecturas complejas y especializadas de alta competición y eficiencia energética.

Siguiendo esta línea, los primeros desarrollos en este campo se enfocan en la implementación de sistemas de monitoreo útiles para el piloto, tal es el caso del artículo de [8] donde se propone un sistema de telemetría basado en un microcontrolador. Dicho sistema usa tecnología GPRS (Servicio General de Paquetes vía Radio) a través de un módulo de comunicación que genera un servidor de datos de Protocolo de Control de Transmisión (TCP) con una dirección de Protocolo de Internet (IP) dinámica para la transmisión al centro de control. Además, el piloto puede visualizar la información clave del vehículo

mediante una aplicación intuitiva que actúa como cliente del canal de comunicación TCP/IP.

De forma complementaria, en [9] realizan la propuesta de un sistema que se basa en un microordenador para recolectar datos relevantes mediante un sensor de interrupción magnética y un medidor de consumo eléctrico. Esta información se muestra directamente en una Pantalla de Cristal Líquido (LCD), la cual permite al piloto monitorear datos cruciales para la eficiencia energética del vehículo.

Un avance significativo en términos de complejidad se presenta en [10], quienes implementan un sistema de telemetría para vehículos eléctricos remotos que se basa en una Matriz de Puertas Lógicas Programables en Campo (FPGA). En este sistema se integra un Convertidor Analógico-Digital (ADC) con sensores de inclinación, aceleración y electrocardiograma (ECG), donde se multiplexan y codifican los datos con Nivel de No Retorno a Cero (NRZ-L) en un flujo de Multiplexación por División de Tiempo (TDM). La comunicación se realiza de forma híbrida, combinando un enlace de Frecuencia Ultra Alta (UHF) con Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK) para datos y voz, junto con un módem 3G/LTE que publica los datos en la nube mediante el protocolo de Transporte de Telemetría de Colas de Mensajes (MQTT). En el centro de control, otro FPGA se encarga de demultiplexar la señal de radiofrecuencia (RF), reconstruir las mediciones , el audio, y entregarlos a una tableta a través de un Bus Universal en Serie (USB) para un monitoreo integral.

En el ámbito de las competiciones de eficiencia energética, como la Shell Eco-marathon, se impulsa el desarrollo de sistemas de telemetría altamente especializados. Por lo tanto, la tesis de [11] desarrolla un sistema para un prototipo de dicha competición, integrando sensores de velocidad, corriente, tensión, temperatura y geolocalización con microcontroladores. La transmisión de los datos en tiempo real a la base externa se implementa mediante el protocolo MQTT. Adicionalmente, diseñan interfaces de visualización tanto para el piloto como para el equipo externo, permitiendo la optimización del rendimiento y la seguridad.

De igual modo, en [12] proponen un sistema de bajo consumo de un vehículo experimental para la misma competición. En donde, para la comunicación interna se utiliza un bus CAN, mientras que la transmisión inalámbrica se realiza mediante un módulo de radio en la banda de 868 MHz. La Unidad de Control del Vehículo (VCU) actúa como el núcleo del sistema, ya que supervisa la propulsión e incorpora diferentes modos de conducción. Una característica destacada de este sistema es la inclusión de una estación meteorológica móvil para registrar la velocidad y dirección del viento en tiempo real, la cual resultó en información clave para la estrategia de conducción. Además, combina la optimización de algoritmos en MATLAB con la monitorización y visualización en tiempo real a través de LabVIEW.

En el ámbito de las competencias de alta performance como la Formula Student, los sistemas de telemetría se enfocan principalmente en la adquisición y análisis detallado de diferentes parámetros operativos. En este contexto, en [7] realizan el diseño e implementación de un sistema estructurado en dos módulos principales: un registrador de datos (datalogger) basado en un microordenador que integra múltiples sensores y una unidad de transmisión que utiliza el protocolo MQTT sobre una red 4G. La información de los sensores y el estado de la batería se obtienen mediante un bus CAN, en el caso de la pérdida de conexión inalámbrica, los datos también se almacenan localmente en una tarjeta SD y se presentan en una interfaz gráfica desarrollada en Python.

En una línea similar, en [13] presentan un sistema que se compone de tres nodos principales: una placa sensora personalizada que extrae datos del bus CAN y sensores adicionales, un teléfono inteligente en el volante para la visualización y comunicación del piloto, y una aplicación web para el monitoreo estratégico desde el pit-wall. La comunicación se realiza mediante MQTT para la transmisión remota y HTTP para el análisis posterior a la carrera. La aplicación móvil adapta su interfaz según el tipo de vehículo y guarda los datos localmente para subirlos automáticamente a la nube, mientras que la interfaz web permite cargar mapas de estrategia y visualizar gráficas dinámicas.

Finalmente, los desarrollos más recientes apuntan hacia arquitecturas de bajo consumo y alta eficiencia en la gestión de datos. Un ejemplo es el trabajo de [14], que realizan un sistema de telemetría de bajo consumo para vehículos solares eléctricos, estructurado en subsistemas de adquisición, transmisión y gestión. Un microcontrolador recopila datos de las Unidades de Control Electrónico (ECUs) a través de la red CAN. Posteriormente, un módulo LTE encapsula los datos en tramas TCP cifradas con TLS y los envía a un servidor remoto. En el servidor, un microordenador gestiona la recepción, validación y almacenamiento en una base de datos de series temporales, utilizando un entorno Docker para la gestión de servicios de red y visualización.

III. Descripción del sistema

En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques de la arquitectura del sistema de telemetría. Este diseño responde a la necesidad crítica de monitorizar en tiempo real el estado dinámico y energético del vehículo durante la competencia. Para realizarlo, el sistema integra la ECU y otros sensores (temperatura, velocidad, posicionamiento GPS, etc.) utilizando el protocolo de bus CAN para la comunicación, lo cual garantiza la fiabilidad en la transmisión de los datos. Dentro de la arquitectura consta un microcontrolador principal que funciona como un cerebro central y es el encargado de recopilar y preprocesar las variables del sistema para transformarlas en información útil para la optimización de la estrategia de carrera.

En el sistema de monitoreo se implementa una arquitectura de información de doble bucle. A bordo, una interfaz visual proporciona al piloto acceso en tiempo real a parámetros críticos como la velocidad, la temperatura, el estado de la batería, entre otros, respaldando estos datos en una memoria SD local ante posibles fallos de comunicación inalámbrica. De manera concurrente, el microcontrolador

Fig. 1: Diagrama de bloques del sistema de telemetría

transmite inalámbricamente la telemetría de forma continua a la estación de monitoreo externo para su respectivo análisis.

Este enfoque integral resulta fundamental para el desempeño del prototipo. Por un lado, la retroalimentación inmediata permite al piloto optimizar el uso de energía, mientras que los datos que se transmiten permiten dotar al equipo técnico de herramientas precisas para gestionar la estrategia de carrera y garantizar la seguridad operativa al detectar anomalías en etapas tempranas antes de que afecte a todo el desempeño del vehículo.

Así pues, como se mencionó anteriormente, la red de comunicación del vehículo eléctrico se implementó utilizando el protocolo CAN, el cual se basa en el estándar ISO 11898-2 (High-Speed CAN). Este protocolo cuenta con una arquitectura determinista y una alta robustez frente a interferencias electromagnéticas (EMI) que los componentes de potencia pueden generar, asegurando que la información no se pierda o sea errónea [15], [16].

A. Protocolo CAN

El bus CAN es un protocolo de comunicación serial tipo multimaestro basado en mensajes; fue desarrollado por la compañía Robert Bosch GmbH para aplicaciones automotrices. Su funcionamiento se basa en dos capas del modelo OSI: la capa física (ISO 11898-2) se encarga de definir los niveles de tensión y el medio de transmisión, y la capa de enlace de datos (ISO 11898-1) es responsable del encapsulamiento de las tramas, el arbitraje del bus y los mecanismos de detección de errores. Su arquitectura descentralizada permite que cada nodo o ECU reciba simultáneamente todos los mensajes del bus [17].

La capa física del bus CAN utiliza una línea diferencial compuesta por dos señales: CAN High (CAN_H) y CAN Low (CAN_L). Esta configuración es importante en el ámbito automotriz para mitigar las EMI producidas por los componentes de potencia. Esto se logra con el principio de rechazo de modo común donde cualquier transitorio inducido afecta a ambos conductores de manera uniforme, manteniendo constante la diferencia de potencial ($V_{diff} = V_H - V_L$) sin afectar la información [15].

En la norma ISO 11898-2, se definen dos estados lógicos en el bus:

- Estado Dominante (0 lógico): Existe una diferencia de potencial significativa ($V_{diff} \approx 2V$) [16].
- Estado Recesivo (1 lógico): Ambas líneas presentan un voltaje similar ($V_{diff} \approx 0V$) [16].

Con esta diferenciación se garantiza una interpretación precisa de los bits incluso ante fluctuaciones en el sistema.

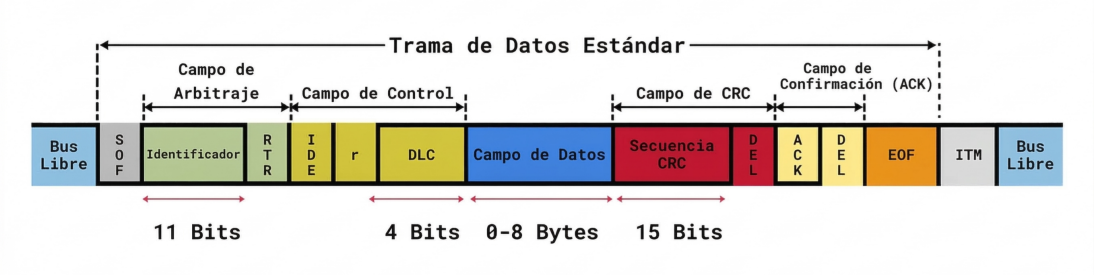

Fig. 2: Formato de la Trama CAN [1]

Adicionalmente, se utilizan cables de par trenzado junto con resistencias de 120Ω en los extremos del bus, para optimizar la cancelación de ruido y contribuir a mantener la integridad de los datos [16].

Para la transmisión de los datos de telemetría del vehículo a través del bus CAN se utilizó la trama estándar definida en el protocolo CAN 2.0A que se muestra en la Figura 2. Esta estructura consta de los campos necesarios para la sincronización, el control del acceso al bus y la transmisión de la información entre los distintos nodos de la red.

A continuación, se describen los campos que componen la trama:

1) **Inicio de la trama (Start of Frame o SOF):** Es un bit dominante (0 lógico) que sincroniza los nodos del bus [15].
2) **Campo de arbitraje (Arbitration Field):**
   - **Identificador (11 bits):** Define la prioridad del mensaje; en caso de colisión, el mensaje con el ID numéricamente menor prevalece mediante un proceso de arbitraje no destructivo bit a bit [15].
   - **Solicitud de transmisión remota (RTR):** Bit que define el tipo de trama; permite diferenciar entre una trama de datos (dominante) y una trama remota (recesiva) para solicitar información de otro nodo [15].
3) **Campo de control (Control Field):**
   - **Extensión del identificador (IDE):** Sirve para distinguir entre tramas estándar (11 bits) o extendidas (29 bits).
   - **bit reservado (r):** Es un bit de control reservado para futuras expansiones del protocolo. Este bit debe transmitirse siempre en estado dominante (0 lógico) [15].
   - **Código de longitud de datos (DLC):** 4 bits que especifican la longitud de los bytes de datos que se van a transmitir (de 0 a 8 bytes) [15].
4) **Campo de Datos (Data Field):** De 0 a 8 bytes que contienen los datos de carga útil que se desea transmitir entre nodos [15].
5) **Campo CRC (CRC Field):** 15 bits de redundancia cíclica (CRC) para la detección de errores de transmisión [15].
6) **Campo de reconocimiento o ACK (Acknowledge Field) :** Bit de confirmación que asegura que al menos un nodo ha recibido la trama correctamente [15].
7) **Fin de la trama o EOF:** consta de siete bits recesivos que marcan el final de la trama [15].

Una vez descrita la estructura de la trama, esta se empleó en el sistema de telemetría para organizar y transmitir la información proveniente de los distintos nodos del vehículo. El mapeo entre los identificadores CAN y las variables enviadas por cada nodo se presenta en la Tabla I.

TABLA I: ID DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA

ID	Subsistema	Campo de datos Bytes 0-3	Campo de datos Bytes 4-7
0x10	IMU (Acel)	Eje X (a_x)	Eje Y (a_y)
0x11	IMU (Acel)	Eje Z (a_z)	Relleno (0.0)
0x20	IMU	Roll ($roll$)	Pitch ($pitch$)
0x21	IMU	Yaw (yaw)	Relleno (0.0)
0x30	GPS (Pos)	Lat (lat)	Lng (lng)
0x31	GPS	Vel (vel)	Relleno (0.0)
0x50	ECU	Corr (I)	Volt (V)
0x51	ECU	Bat (bat)	Relleno (0.0)

B. Conectividad inalámbrica

Aunque existen diversas alternativas de comunicación inalámbrica en el vehículo, estas presentan diferencias significativas en su desempeño, como se detalla en la Tabla II. Tras analizar dichas características, se determinó que la tecnología LTE es la opción más adecuada, debido a su amplio alcance de cobertura, elevada tasa de transferencia y baja latencia, lo que proporciona la robustez necesaria para la adquisición y transmisión de datos en tiempo real.

TABLA II: COMPARACIÓN ENTRE LORA, WI-FI Y LTE [2], [3], [4]

Característica	LoRa	Wi-Fi	LTE
Alcance	3 - 20 km	30 - 100 m	5 - 30 km
tasa de transferencia	0.3 - 50 kbps	100 Mbps - 9.6 Gbps	5 - 100+ Mbps
Consumo	Ultra bajo	Medio / Alto	Alto
Latencia	Alta (segundos)	Muy baja (<10 ms)	Baja (20 - 50 ms)

Bajo este criterio, se integró un router industrial que incorpora una interfaz para una tarjeta SIM vinculada a un módulo de comunicación celular LTE. Esta arquitectura permite que el dispositivo actúe como un nodo de red autónomo, garantizando la movilidad del prototipo a lo largo de todo el circuito y eliminando las restricciones de cobertura de las redes locales, así como las limitaciones de la alta latencia propias de tecnologías como LoRa. Las especificaciones técnicas del dispositivo seleccionado se resumen en la Tabla III.

TABLA III: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ROUTER INDUSTRIAL [5]

Parámetro	Descripción / Valor
Módulo Móvil	4G (LTE Cat 4), 3G, 2G
Ranura SIM	1 x ranura SIM interna
Wi-Fi	IEEE 802.11b/g/n, Access Point (AP)
Ethernet	1 x WAN (10/100 Mbps), 1 x LAN (10/100 Mbps)
Rango de Alimentación	9 - 30 VDC
Consumo de Energía	$<$ 6.5 W
Temperatura de Operación	-40 °C a 75 °C
Grado de Protección	IP30

C. Implementación de la red CAN y enlace de datos híbrido

La infraestructura de comunicaciones del sistema de telemetría se basa en una topología de bus lineal bajo el

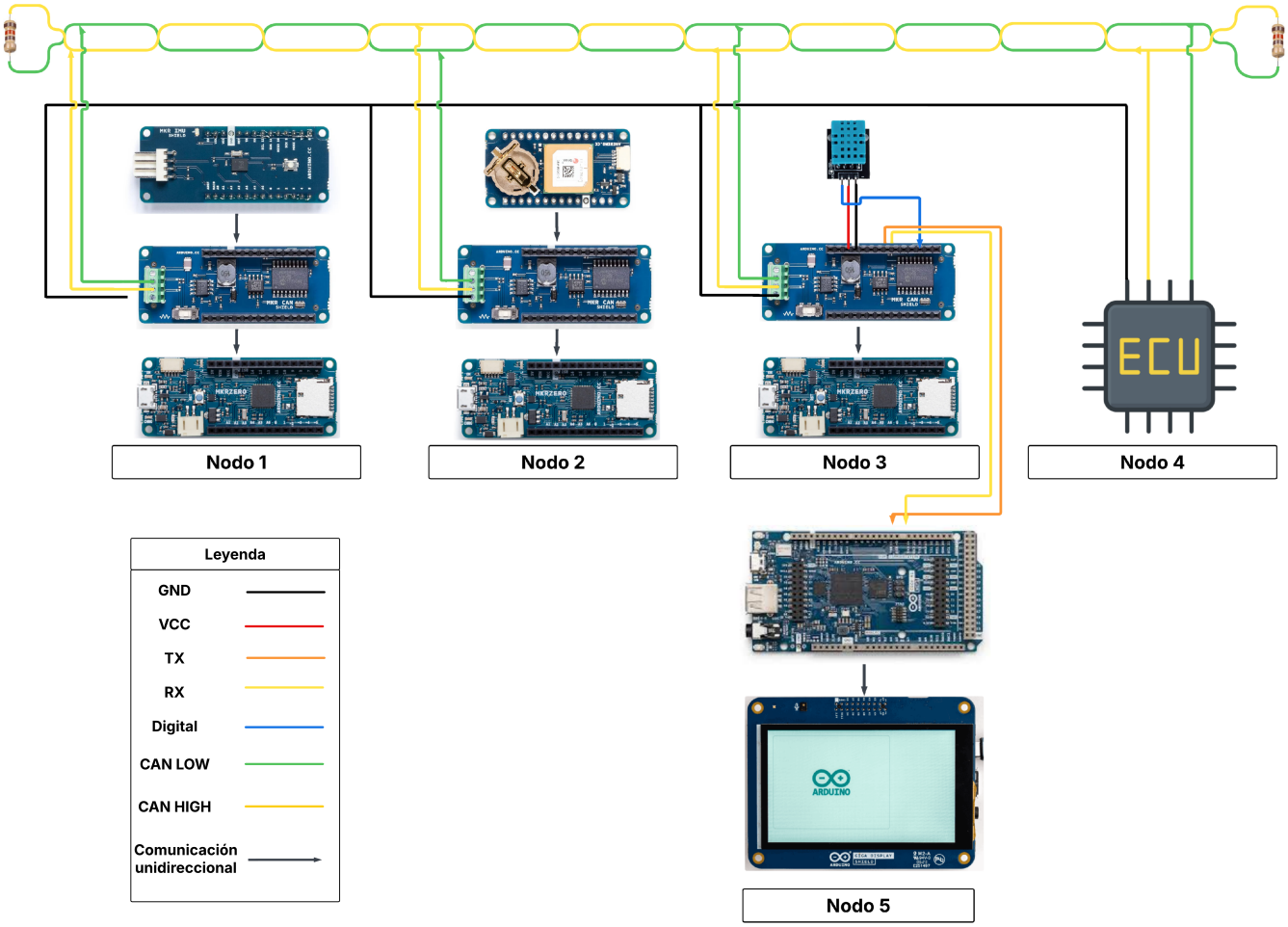

Fig. 3: Topología Física

estándar ISO 11898. Esta red permite un intercambio de datos determinista y robusto frente al ruido electromagnético de los componentes de potencia. Sin embargo, debido a restricciones técnicas en la interfaz física de la unidad central, se implementó una arquitectura de enlace híbrida: el bus CAN interconecta los nodos de adquisición y control (Nodos 1 al 4) a una velocidad de $500kbps$, mientras que la transferencia de información hacia la unidad de procesamiento central (Nodo 5) se realiza mediante un enlace serial asíncrono (UART) desde el Nodo 3 a una velocidad de $250kbps$, dicha infraestructura se puede visualizar en el diagrama de la topología física presente en la Figura 3.

Para la implementación de los Nodos 1, 2 y 3, se utilizaron sistemas embebidos de arquitectura modular basados en microcontroladores de 32 bits. La interfaz de comunicación con el bus se realiza mediante transceptores CAN de alta velocidad que garantizan la integridad de los niveles lógicos diferenciales. En estos nodos se integran periféricos de instrumentación avanzados (sensores), tales como una unidad de medición inercial (IMU) de seis grados de libertad, un módulo de posicionamiento global (GPS) de alta frecuencia y transductores de variables termoambientales. Estos elementos permiten una captura síncrona de la dinámica vehicular y las condiciones de operación del sistema.

El Nodo 4 es la interfaz de comunicación con la ECU del vehículo. A través de este nodo, se extraen parámetros como el voltaje, la corriente instantánea y el nivel de carga de la batería.

Por su parte, el Nodo 5 representa la unidad de procesamiento central y pasarela de telemetría. Este nodo utiliza un sistema embebido de alto rendimiento que gestiona de manera eficiente el procesamiento de los datos recibidos y las funciones de comunicación inalámbrica. Su función principal consiste en centralizar y decodificar el flujo de información proveniente de la red, gestionar la interfaz de visualización en tiempo real para el piloto y retransmitir la información hacia la estación de monitoreo remoto de forma continua.

Para asegurar la integridad de la señal y mitigar los efectos de la reflexión de onda en las líneas de transmisión, se incorporaron resistencias de terminación de 120 Ω en los nodos extremos del bus. Esta configuración resulta en una impedancia equivalente de 60 Ω al encontrarse ambas

resistencias en paralelo, cumpliendo con la adaptación de impedancia necesaria para la impedancia característica del cable de par trenzado. Dicha adaptación es fundamental para operar de manera confiable a tasas de transferencia altas, ya que permite la descarga de la capacitancia del bus para retornar rápidamente al estado recesivo y asegura un margen de ruido adecuado según los estándares industriales [15], [17].

1) Nodo 1 (Unidad de Medición Inercial o IMU): Este nodo de adquisición tiene la función de registrar el estado inercial del vehículo, midiendo la aceleración lineal y la velocidad angular en los tres ejes espaciales (x, y, z). Sin embargo, estos datos puros resultan complejos de interpretar de forma directa, por lo que se procesan matemáticamente para calcular los ángulos absolutos de orientación espacial, roll (alabeo), que describe la inclinación lateral, el pitch (cabeceo), que mide la inclinación longitudinal y el yaw (guiñada), que registra la rotación sobre el eje vertical, siendo esta información de vital importancia para el análisis postcarrera y posibles mejoras.

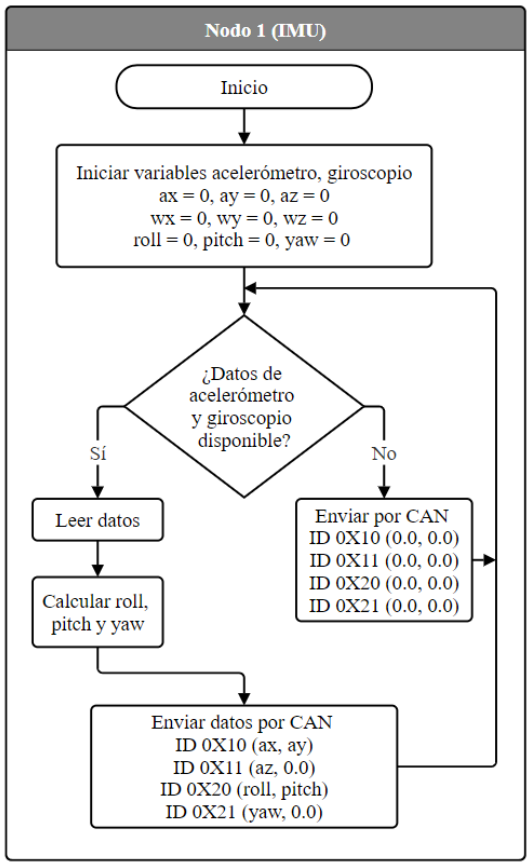

Fig. 4: Diagrama de flujo del nodo 1

El diagrama de flujo de la Figura 4 detalla la lógica de control de este nodo. Al iniciar el firmware se establece las variables inerciales en cero para eliminar cualquier valor residual en la memoria, posteriormente ingresa a un ciclo de evaluación continuo, donde el microcontrolador interroga si existen datos del acelerómetro y del giroscopio; al confirmar la disponibilidad de estos datos, la información se extrae para realizar el calculo de los ángulos de orientación, después se encapsulan dentro de la carga útil y se transmiten a la red CAN utilizando los identificadores `0x10`, `0x11`, `0x20` y `0x21`.

En cuanto al empaquetamiento de los datos para optimizar el uso de recursos en el bus, se aprovecha la capacidad de 8 bytes de la trama para empaquetar dos variables de 4 bytes por cada identificador (ID). En los casos donde solo se requiere transmitir un único valor, los 4 bytes restantes se completan con ceros. Esta lógica de empaquetamiento se implementa tanto en este nodo como en el Nodo 2.

2) Nodo 2 (GPS): Este nodo tiene un módulo GPS para la adquisición continua de coordenadas geoespaciales (latitud y longitud) y datos cinemáticos (velocidad) del vehículo en la pista.

La Figura 5 presenta el diagrama de flujo con la lógica de control de este nodo. Debido a que la señal de GPS es propensa a sufrir interferencias o pérdidas temporales de cobertura, el algoritmo incluye una etapa de validación donde continuamente verifica que existan datos. Una vez que hay datos disponibles, se procesa la información para empaquetarla y enviarla por el bus CAN utilizando los identificadores `0x30` y `0x31`.

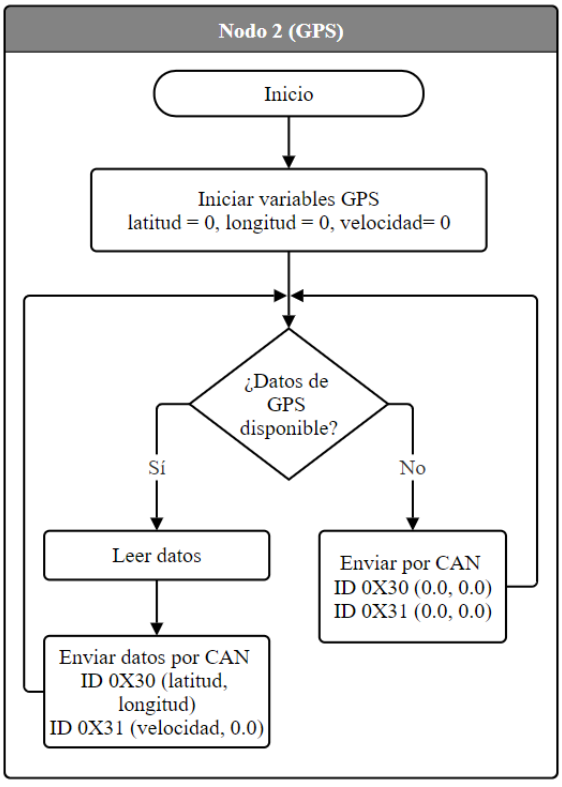

Fig. 5: Diagrama de flujo del nodo 2

3) Nodo 3 (variables del entorno y puente de datos): Este nodo cumple con diversas funciones en la arquitectura del sistema. Por un lado, mantiene su rol de instrumentación ambiental mediante un transductor digital de temperatura y humedad relativa. Por otro lado, actúa como puente de comunicación entre la red CAN y la unidad central de telemetría. Y

además, funciona como un respaldo de información al integrar una memoria SD que comienza a grabar la información al pulsar un botón que puede ser local o virtual dentro del dashboard.

Debido a la naturaleza multifuncional del nodo, la lógica se segmentó en tres diagramas de flujo para facilitar su comprensión. En la Figura 6, se observa el proceso de adquisición: el microcontrolador inicializa las variables de entorno y procede a la lectura del sensor. Posteriormente, se implementa una etapa de validación; si los datos son íntegros (no nulos), se transmiten mediante el protocolo UART. De lo contrario, el sistema reintenta la lectura, manteniendo el flujo dentro de un bucle de control hasta obtener una medición válida.

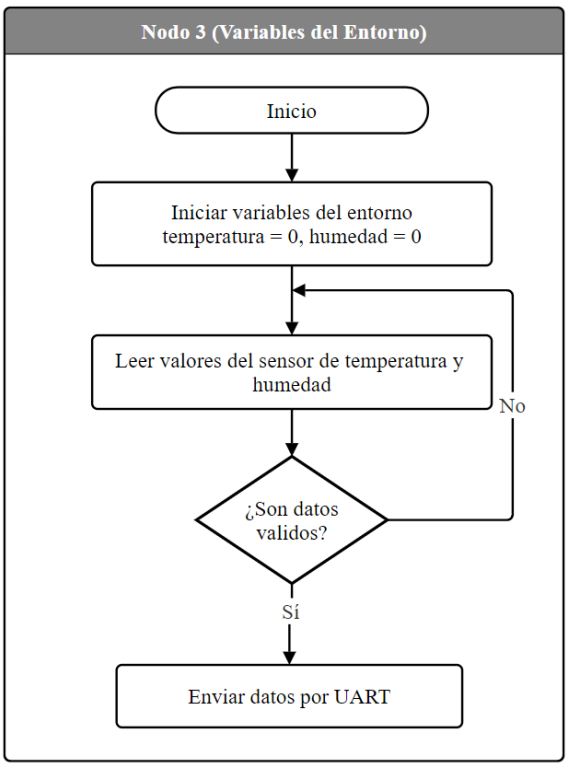

Fig. 6: Diagrama de flujo del nodo 3 lectura de las variables del entorno

Cuando el nodo funciona como respaldo de información, se sigue la lógica presente en la Figura 7, donde desde el dispositivo receptor de información se envía un comando (1 o 0) dependiendo del estado del botón físico o virtual. Cuando llega un 1 se comprueba si existe un archivo abierto, caso contrario crea un nuevo archivo y comienza a guardar la información cada que pasa un tiempo determinado, en caso de que ya esté abierto un archivo, sigue guardando la información en el mismo. Al momento en que recibe un 0, deja de guardar información, cierra el archivo y lo guarda en formato csv. Este ciclo se repite constantemente.

Por último, para la etapa en la que el nodo funciona como puente de datos, se implementó la lógica mostrada en la Figura 8. Donde inicialmente, se configuran e inicializan las variables destinadas a almacenar la información recibida de los diferentes nodos. Posteriormente, el sistema ingresa en un bucle en el que se verifica constantemente la disponibilidad de paquetes en el bus CAN. Cuando se detecta la llegada de un paquete, se verifica su identificador (ID) y, en función de este, la información recibida se asigna a la variable correspondiente para su posterior envío mediante el protocolo UART. En caso de no existir paquetes disponibles, el sistema mantiene el ciclo de espera hasta recibir nueva información.

En cuanto a la transmisión de información mediante el protocolo UART, se implementó una estructura de trama binaria que permite organizar y sincronizar correctamente los datos enviados. Inicialmente, se transmiten dos bytes de cabecera (`0xAA` y `0xBB`), los cuales funcionan como indicadores de inicio de trama y facilitan su detección en el dispositivo receptor. Después, las variables medidas y procesadas se envían de forma secuencial. Finalmente, se añaden dos bytes de terminación (`0x0D` y `0x0A`), utilizados como delimitadores de fin de trama para garantizar una correcta identificación de cada paquete recibido.

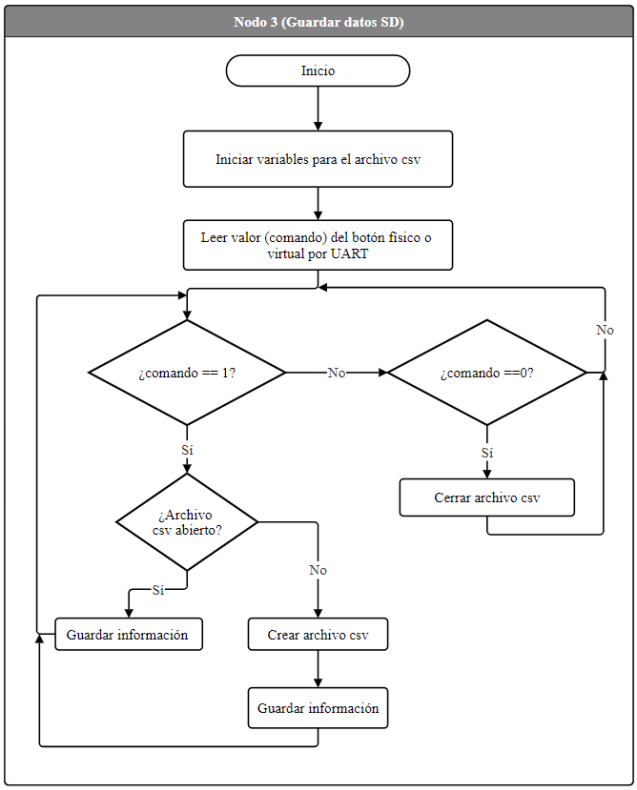

Fig. 7: Diagrama de flujo del nodo 3 para guardar datos en la SD

4) Nodo 4 (ECU): Este nodo está asociado a la ECU del vehículo, desde la cual se obtiene información relevante del sistema. El hardware de este nodo se encarga de adquirir variables eléctricas como el voltaje directo en los bornes de la batería, la corriente instantánea y el porcentaje de carga de la batería.

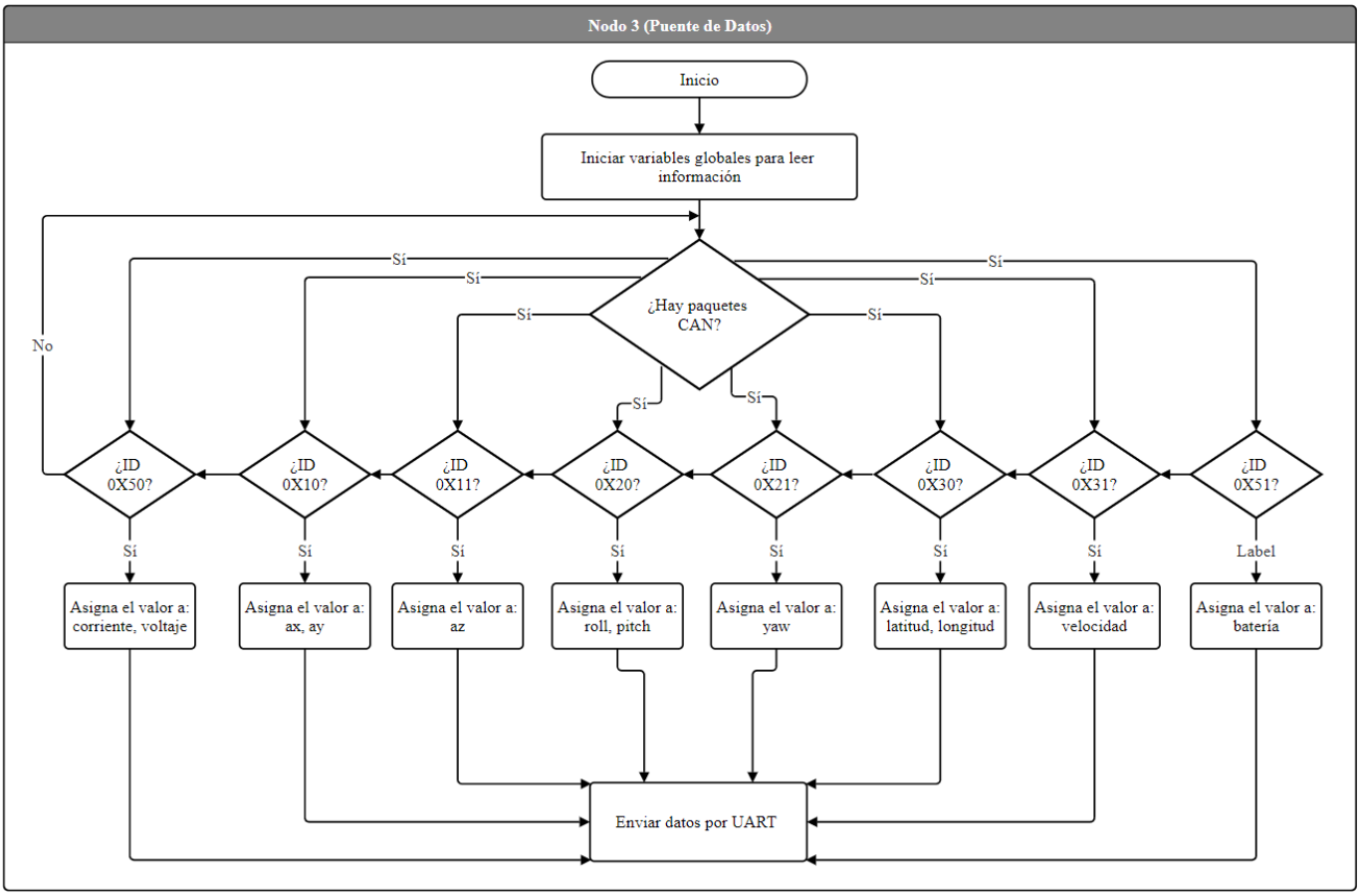

Fig. 8: Diagrama de flujo del nodo 3 como puente de datos

El microcontrolador adquiere de forma continua estas variables y las empaqueta para su transmisión a través del bus CAN.

5) Nodo 5 (Interfaz gráfica y gestión IoT): Su propósito principal es servir como nodo central de procesamiento, cuya tarea es centralizar la información de la red vehicular, mostrarla en una interfaz gráfica y retransmitirla hacia el dashboard del centro de control para guardar la información en la Nube, tal como se muestra en la Figura 9. El dispositivo sobresale por su facultad de ejecución de procesos en paralelo, permitiendo la gestión de datos locales y externos de forma simultánea con una respuesta determinista.

A diferencia de los nodos periféricos, esta unidad no se encuentra conectada físicamente al bus CAN, sino que recibe la información ya procesada desde el Nodo 3 a través de un enlace serial de alta velocidad. El comportamiento técnico de este nodo se divide de la siguiente manera:

- **Gestión y decodificación de datos:** El sistema monitorea el puerto de comunicación en busca de tramas específicas. Al momento en que detecta los bytes de inicio y de fin de la trama, se encarga de desempaquetar los valores y traducirlos a variables físicas para usarlas posteriormente.
- **Interfaz gráfica:** La unidad gestiona una pantalla de alta resolución que funciona como el panel de instrumentos del vehículo. Utilizando librerías de gráficos avanzados, el nodo renderiza en tiempo real indicadores críticos (velocímetro, nivel de batería y temperaturas). Para facilitar la interpretación rápida por parte del piloto, se ha implementado una lógica de alertas por colores: los indicadores cambian dinámicamente de verde (estado seguro) a naranja o rojo cuando las variables superan los umbrales de seguridad predefinidos.
- **Sincronización inteligente con la nube (IoT):** Para transmitir los datos hacia la plataforma (nube) del centro de control y debido a que el vehículo puede atravesar zonas con baja cobertura, se implementó un algoritmo que funciona como un escudo de reconexión. Este mecanismo protege la integridad del sistema: cuando se recupera la señal tras una caída, el nodo ignora cualquier comando antiguo proveniente de la nube durante 3 segundos, obligando a la plataforma externa a sincronizarse con el estado físico real y actual del vehículo. Esto evita, por ejemplo, que una orden de ”detener grabación” enviada minutos atrás detenga el registro actual por error.

Finalmente, este nodo permite al usuario gestionar el inicio y fin del almacenamiento de datos en todo el sistema, enviando comandos (0 o 1) de retroalimentación hacia el nodo 3 de la red para coordinar la grabación de manera síncrona.

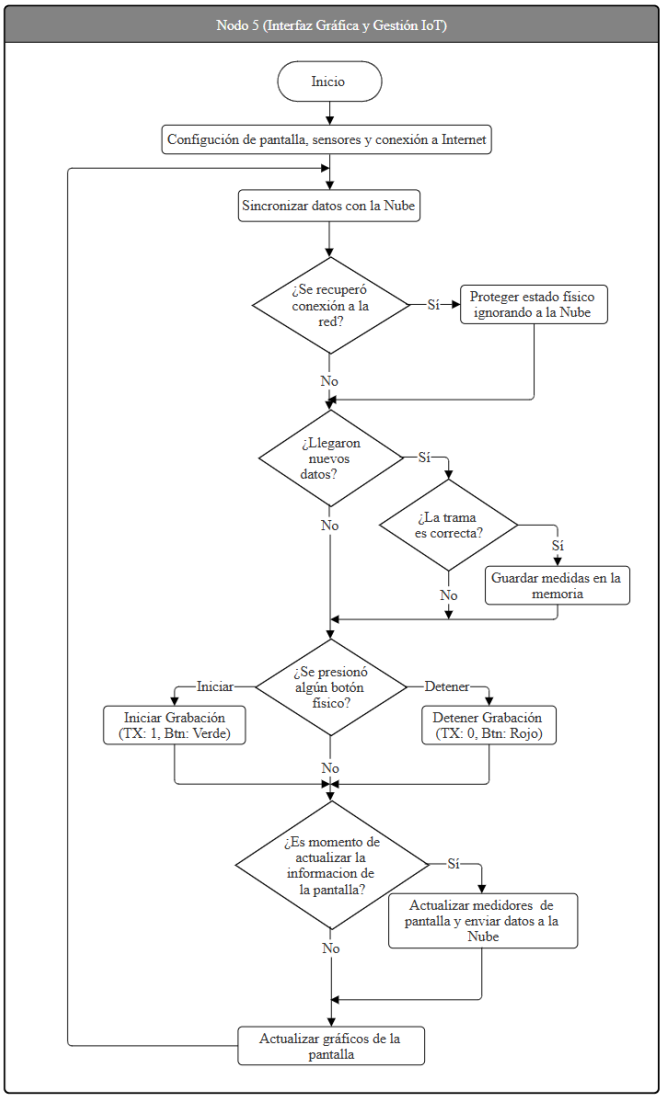

Fig. 9: Diagrama de flujo del nodo 5

IV. Pruebas y Resultados

A. *Validación de la capa física y comunicación (bus CAN)*

En esta subsección se describe el proceso de verificación y validación de la comunicación implementada en el sistema mediante el protocolo CAN.

Para la primera prueba, se utilizó un osciloscopio digital para visualizar las formas de onda de las señales CAN_H y CAN_L, el sistema fue expuesto a una fuente de EMI para comprobar su robustez. Como se observa en la Figura 10, cuando se envía un bit recesivo (no se transmiten datos), ambas líneas presentan un voltaje cercano a 2.5 V, lo que garantiza que el voltaje diferencial sea 0 V. Por otro lado, en la Figura 11, durante la transmisión de un bit dominante (transmisión de datos) se aprecia que la señal CAN_H asciende a un valor cercano a 3.3 V, mientras que CAN_L disminuye hasta los 1.6 V, manteniendo el nivel de voltaje diferencial cercano a los 2 V característicos del protocolo.

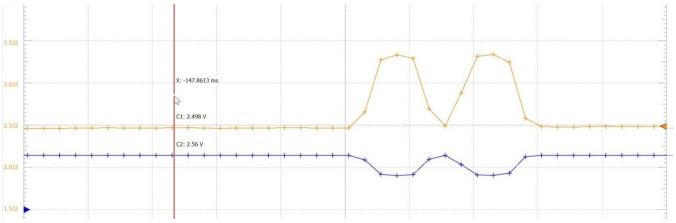

Fig. 10: Forma de onda en la transmisión de un bit recesivo (no hay datos)

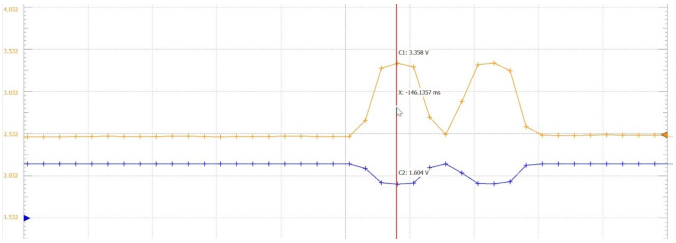

Fig. 11: Forma de onda en la transmisión de un bit dominante (hay datos)

Finalmente, para comprobar que los mensajes transmitidos por el bus sean consistentes y cumplan con la estructura del protocolo CAN 2.0A, se utilizó un adaptador USB2CAN conectado al computador y al bus, junto con el software Savvy-CAN. Estas herramientas permitieron visualizar en tiempo real los mensajes transmitidos en el bus, observando el ID, la longitud y los datos en formato hexadecimal de cada mensaje.

La Figura 12 corresponde a los datos enviados por el nodo con el GPS. Como se mencionó anteriormente, este nodo utiliza los ID `0x30` y `0x31`, los cuales también se pueden observar en la captura de datos. Además, se visualiza que la trama contiene 8 bytes y, en el caso del ID `0x31`, que solo se están utilizando 4 bytes para enviar la información de la velocidad, los 4 bytes restantes están rellenados con ceros.

De igual manera ocurre con el nodo de la IMU en la Figura 13. En este caso se observan los identificadores `0x10` y `0x11` para los datos del acelerómetro, y `0x20` y `0x21` para los datos de los ángulos de orientación. Del mismo modo, la trama de datos es de 8 bytes y, cuando solo se transmite un término en 4 bytes, los bytes restantes se completan con ceros.

ID	Ext	RTR	Dir	Bus	Len	ASCII	
0x031	0	0	Rx	0	8	%y.>....	25 79 2E 3E 00 00 00 00
0x030	0	0	Rx	0	8	o.:.....	6F DA 3A C0 E2 00 9E C2
0x031	0	0	Rx	0	8	%y.>....	25 79 2E 3E 00 00 00 00
0x030	0	0	Rx	0	8	}.:.....	7D DA 3A C0 E2 00 9E C2
0x031	0	0	Rx	0	8	...>....	C2 F8 C9 3E 00 00 00 00
0x030	0	0	Rx	0	8	}.:.....	7D DA 3A C0 E2 00 9E C2

Fig. 12: Mensajes CAN del nodo GPS

0x010	0	0	Rx	0	8	d....d..	64 97 F8 BF 05 64 DF BE
0x011	0	0	Rx	0	8	...?....	B9 AA 98 3F 00 00 00 00
0x020	0	0	Rx	0	8	LYi..R-A	4C 59 69 C2 AF 52 2D 41
0x021	0	0	Rx	0	8	..]B....	FA F0 5D 42 00 00 00 00

Fig. 13: Mensajes CAN del nodo IMU

B. Latencia del sistema

En esta subsección se presentan los resultados de las pruebas de latencia realizadas para los protocolos de comunicación CAN y UART, con el fin de determinar el retardo temporal en la transmisión de datos del sistema.

Para la medición de la latencia en el bus CAN, se configuraron identificadores (ID) específicos en el Nodo 3. El procedimiento consistió en medir el tiempo transcurrido desde que un nodo periférico transmite un mensaje de confirmación hasta que recibe la respuesta correspondiente del Nodo 3. Una vez obtenido el tiempo total, se divide entre dos para estimar la latencia de subida del mensaje.

La validación se ejecutó en condiciones de laboratorio estáticas exponiendo al sistema a una fuente de EMI. Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo continuos de 20 minutos.

En el nodo con la IMU al aplicar la prueba se recolectaron varias mediciones de latencia durante la operación continua del sistema. Una vez obtenidos los datos, se determinó que el tiempo de subida promedio para la comunicación del nodo es de 0.29 ms. En la Figura 14 se presenta el diagrama de dispersión de la latencia para cada paquete transmitido por el nodo.

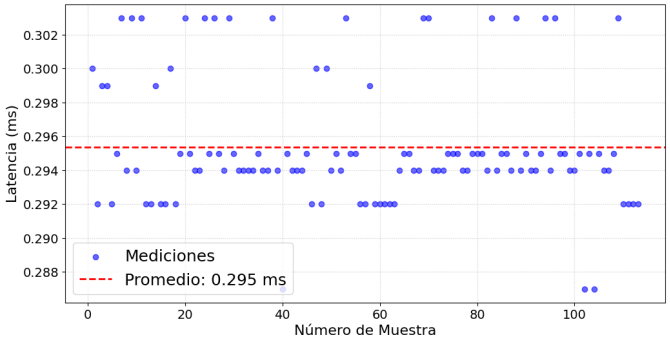

Fig. 14: Latencia de transmisión de los datos desde el nodo IMU

Por otro lado, al aplicar la misma prueba al nodo del GPS, se obtuvo un tiempo de subida promedio de 0.36 ms, ligeramente superior al registrado en el nodo de la IMU. Este comportamiento se atribuye al tiempo de procesamiento adicional requerido por el módulo GPS para actualizar los datos de posicionamiento global. La gráfica de dispersión de los datos obtenidos se puede visualizar en la Figura 15.

Por otro lado, para realizar la medición de la latencia en la comunicación UART, se empleó una metodología de eco de tramas entre el nodo 5 y el nodo 3. El procedimiento consistió

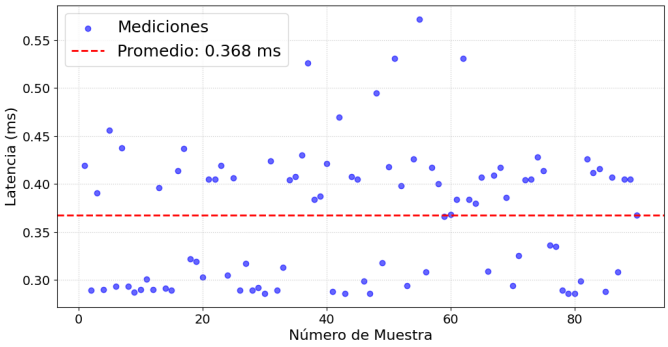

Fig. 15: Latencia de transmisión de los datos desde el nodo GPS

en el envío de una cadena de datos desde el nodo 3 hacia el dispositivo destino, el cual, al detectar el fin de trama, retransmitió inmediatamente una respuesta de confirmación. Este ciclo permitió registrar el tiempo total de subida y descarga, que al ser dividido entre dos, proporcionó la latencia unidireccional del enlace.

Tras el análisis de las mediciones recolectadas, se obtuvo un tiempo de subida promedio de 67.33 ms. Este dato se obtuvo con los valores presentes en la Figura 16, donde los datos se encuentran en un gráfico de dispersión del tiempo de latencia de cada paquete.

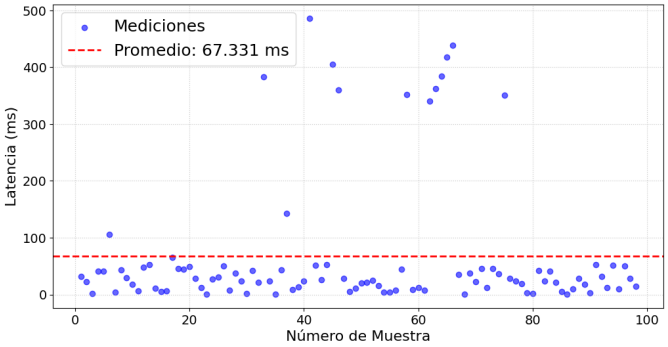

Fig. 16: Latencia de transmisión de la comunicación UART

Finalmente, el último medio de comunicación encargado de transmitir los datos desde la unidad central de procesamiento hacia la nube y, posteriormente, al dashboard de visualización, es una red celular LTE. La evaluación de este enlace se llevó a cabo mediante una prueba de ping dirigida a los servidores de la plataforma, en la cual se obtuvo como resultado una latencia promedio de 128.675 ms, tal como se ilustra en la Figura 17.

C. Tasa de pérdida de paquetes

La fiabilidad en la transmisión de datos es un parámetro crítico para garantizar la monitorización segura del vehículo eléctrico de competición. Por consiguiente, para cuantificar la integridad de los enlaces de comunicación bajo condiciones reales de carga, se evaluó la tasa de pérdida de paquetes (PLR) para la red interna de sensores, el enlace de visualización

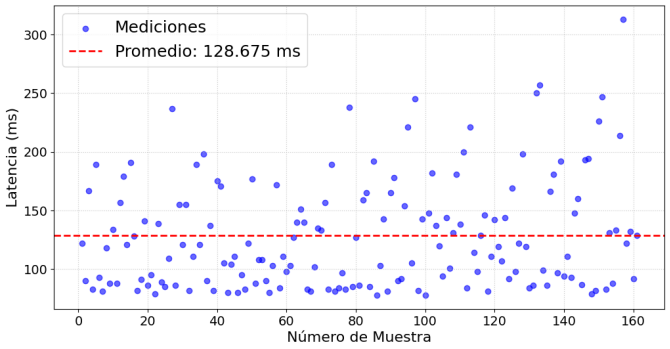

Fig. 17: Latencia de transmisión del enlace LTE

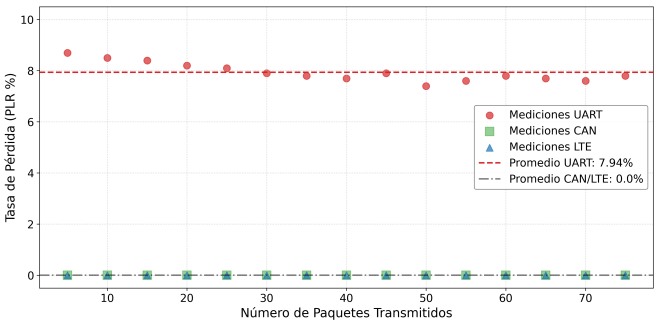

Fig. 18: Tasa de pérdida de la transmisión

y la transmisión inalámbrica por LTE. Esta evaluación se llevó a cabo mediante el desarrollo de un algoritmo de diagnóstico concurrente basado en un esquema Ping-Pong, donde los nodos emisores inyectaron tramas de prueba específicas que fueron retransmitidas instantáneamente por los nodos receptores. Mediante la implementación de contadores de envío y recepción, el microcontrolador calculó esta métrica en ventanas continuas de cinco segundos, determinando el porcentaje a través de la siguiente expresión:

$$PLR = \left(\frac{N_{enviados} - N_{recibidos}}{N_{enviados}} \right) \times 100$$

Las pruebas realizadas entre la unidad central de recolección y los nodos periféricos del bus CAN registraron un PLR del 0.0 %, como se muestra en la Figura 18, lo cual demuestra la excepcional fiabilidad de este estándar dentro de entornos hostiles. De igual manera, se observó un PLR del 0.0 % en el enlace inalámbrico a través de la red móvil LTE.

En contraste, el enlace asíncrono UART, responsable de enviar las tramas de 48 bytes a la interfaz de visualización, evidenció un comportamiento diferente al estabilizar su PLR en un rango del 7.6 % al 8.7 %, como se puede observar en la Figura 18. Esta diferencia radica en que la naturaleza del protocolo serie puro no contempla mecanismos nativos de confirmación de recepción ni control de flujo por hardware, de modo que las omisiones registradas obedecen a episodios puntuales de saturación en los buffers de recepción. Estos desbordamientos de memoria se originan fundamentalmente durante los lapsos en que la pantalla procesa rutinas gráficas de alta exigencia computacional o cuando el microcontrolador central se encuentra retenido por operaciones bloqueantes de escritura en el almacenamiento externo.

D. Interfaz gráfica dentro del vehículo

Para el piloto se implementó una interfaz gráfica en una pantalla de 480×800 píxeles, diseñada para mostrar únicamente la información de mayor relevancia operativa. Esta jerarquización de datos responde, en primer lugar, a las dimensiones del panel y, en segundo lugar, a que el resto de las variables son procesadas con fines de análisis posterior en el centro de control.

Como se ilustra en la Figura 19, las variables presentadas están relacionadas para permitir una gestión energética integral. La velocidad es fundamental para cumplir con la estrategia de carrera; sin embargo, para su control preciso se requiere monitorear las revoluciones por minuto (RPM). Estas variables permiten al piloto identificar el punto de operación donde el motor entrega el par motor necesario con el mayor índice de eficiencia.

Fig. 19: Interfaz gráfica para el piloto

Asimismo, la pantalla muestra la temperatura de la cabina para monitorear el nivel de calor al que está expuesto el piloto. Esta información es importante para evitar problemas de agotamiento y proteger su seguridad a lo largo de la competencia. La interfaz también integra la potencia instantánea y el nivel de la batería. El monitoreo de la potencia permite detectar picos de consumo durante aceleraciones bruscas, permitiendo al piloto ajustar su conducción para reducir el consumo energético en tiempo real. Finalmente, la pantalla incorpora indicadores de estado, los cuales notifican de manera clara al piloto el inicio y la detención de la grabación local de datos, garantizando la confirmación visual de la captura de telemetría a bordo.

En complemento a lo anterior, el diseño de la interfaz gráfica se desarrolló con el objetivo de lograr un diseño intuitivo y de rápida interpretación visual de los datos. Para ello, se utilizó una paleta de colores de alto contraste y se diseñaron indicadores dinámicos que alteran su colorimetría en función

de los umbrales operativos de las variables críticas, tal como se muestra en la Figura 19.

La lógica de estos indicadores se estructuró de la siguiente manera: para el caso del estado de la batería, el indicador se muestra en color verde cuando opera a capacidad óptima, transita a color naranja al descender al 50 %, y cambia a rojo cuando el nivel de energía alcanza un estado crítico. De igual manera, el indicador de velocidad inicia en color verde para rangos de marcha seguros, cambia a naranja en velocidades elevadas y advierte con color rojo cuando el vehículo entra en rangos de velocidad que comprometen la seguridad del piloto o los límites dinámicos del vehículo.

E. Dashboard del centro de control

Para la implementación del dashboard, se empleó un sistema en la nube que permite visualizar todas las variables transmitidas por el Nodo 5, tal como se observa en la Figura 20. Este entorno no solo replica la información mostrada en la interfaz local del piloto, sino que incorpora métricas adicionales de alto valor para el análisis de datos y el desarrollo de la estrategia de carrera.

Entre estas adiciones destacan los ángulos de orientación espacial de la IMU, los cuales son parámetros críticos para evaluar la estabilidad dinámica y el comportamiento del chasis. Adicionalmente, se integran datos del estado del sistema de almacenamiento de energía (batería HV), monitorizando el consumo de corriente instantánea y la caída de voltaje. Esta recolección permite generar gráficas comparativas de voltaje, corriente y potencia, así como diagramas que correlacionan la aceleración transversal y longitudinal con la velocidad del vehículo.

Finalmente, la plataforma integra una herramienta de mapeo GPS para generar el trazado virtual de la pista como se indica en la Figura 21. Al superponer estos datos de geolocalización con el estado general de la telemetría, es posible analizar el comportamiento específico del vehículo en cada sector del circuito.

F. Respaldo de datos local y gestión en dashboard

Como se detalló en secciones previas, el sistema integra un mecanismo de respaldo de información diseñado para garantizar la integridad de los datos ante interrupciones en la conectividad inalámbrica. La escritura de datos en la memoria SD se inicia mediante una señal de activación de un botón físico o de un comando digital desde la interfaz de control. Este método de redundancia local asegura que no existan brechas en la telemetría durante la operación del vehículo.

Complementariamente, el dashboard basado en la nube centraliza la información transmitida y ofrece herramientas de gestión de datos históricos. Esta plataforma permite la consulta y descarga de registros filtrados por intervalos de tiempo específicos, facilitando el análisis postcarrera de las variables críticas del prototipo.

V. Conclusiones

La implementación del bus CAN en el sistema de telemetría demostró una alta eficiencia y estabilidad operativa, fundamentales para la integridad de la información. El análisis mediante el osciloscopio confirmó que las formas de onda de las señales CAN_H y CAN_L se ajustan a los niveles de voltaje diferencial establecidos por el estándar para los estados dominante y recesivo. Esto asegura que el envío de datos es altamente confiable, el acoplamiento de impedancias en la red está correcto, la capa física es la establecida por el protocolo y el sistema no muestra reflexiones o ruido electromagnético que pueda corromper la información.

Complementariamente, la validación realizada con el software SavvyCAN permitió corroborar la integridad de la capa de enlace de datos. Se confirmó que las tramas transmitidas cumplen con la estructura del protocolo CAN 2.0A, manteniendo una arquitectura de 8 bytes de carga útil. Esto garantiza

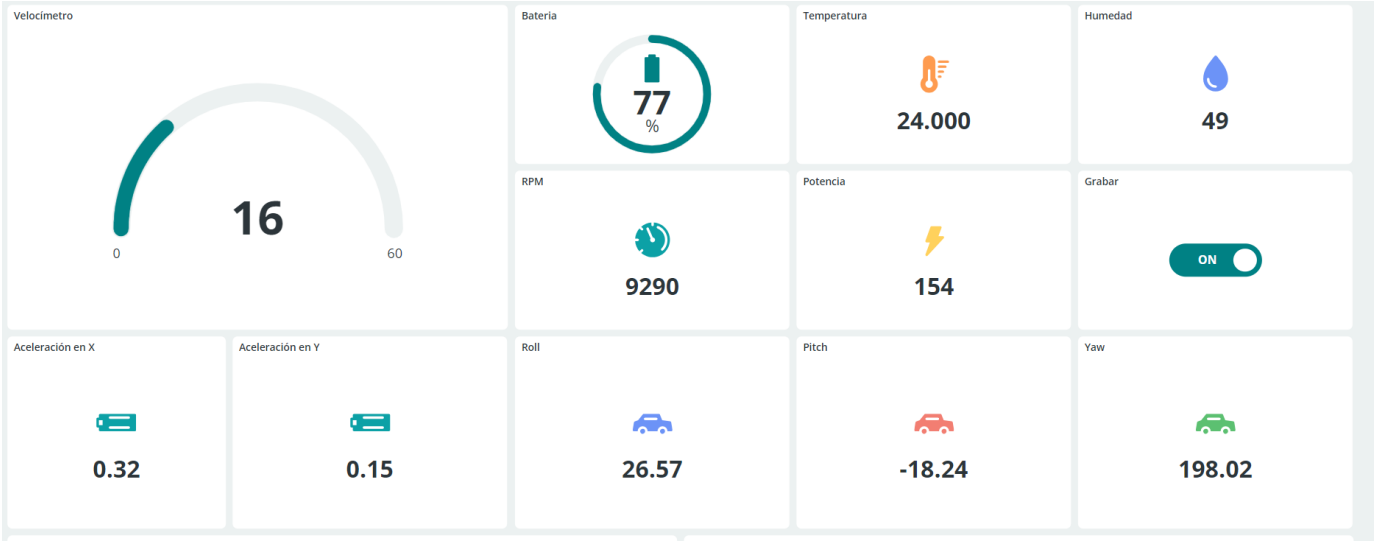

Fig. 20: Datos del dashboard

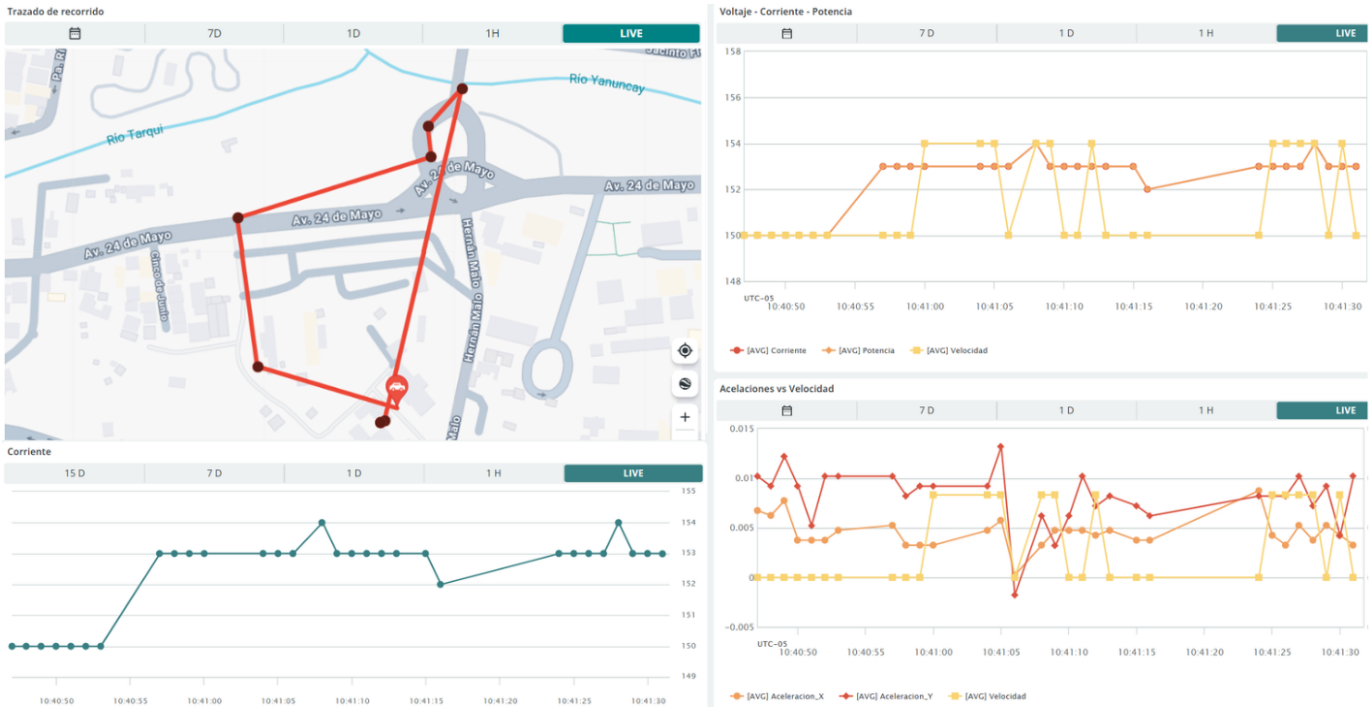

Fig. 21: Trazado de pista por GPS y gráficas de comparación

la interoperabilidad entre los diferentes nodos del vehículo y optimiza el ancho de banda disponible, permitiendo una monitorización en tiempo real y sin retardos críticos en la red.

La evaluación de la latencia de la red confirmó la alta eficiencia de la arquitectura de comunicación híbrida implementada. El bus CAN demostró una buena capacidad para la adquisición de datos en tiempo real, registrando latencias promedio menores a un milisegundo. Por su parte, el enlace de comunicación UART entre el nodo de procesamiento (nodo 5) y el nodo 3 operó con una latencia promedio ligeramente superior (alrededor de 67 ms), manteniéndose por debajo de un segundo. Considerando que el nodo 5 ejecuta toda la lógica de decodificación, renderizado gráfico y sincronización IoT, este tiempo de respuesta resulta sumamente ágil, asegurando una actualización fluida de la información visual sin introducir retardos perceptibles.

En cuanto a la integridad de las comunicaciones, el bus CAN demostró una alta confiabilidad al no perder ningún paquete de los nodos periféricos. A diferencia del enlace UART que evidenció una PLR de entre 7.6 % y 8.7 %, atribuible a su naturaleza de transmisión no diferencial. Sin embargo, operar con este margen de pérdida resulta aceptable, dado que la alta frecuencia de actualización asegura que cualquier paquete descartado sea reemplazado inmediatamente por información actualizada por la trama subsecuente; de este modo, se preserva la continuidad visual en la estación de monitoreo y se garantiza la precisión de los datos requerida para la toma de decisiones estratégicas en tiempo real.

Respecto a la transmisión inalámbrica de la información mediante el enlace LTE, el sistema alcanzó un desempeño óptimo al registrar una latencia de 120 milisegundos y un PLR del 0 %. Esto garantiza que el centro de control reciba la información de forma íntegra y en tiempo real. Tanto la interfaz gráfica diseñada para el piloto como el dashboard del centro de control cuentan con la información necesaria para la gestión del vehículo. Además, el sistema asegura un correcto respaldo de los registros, tanto de manera local como en la nube, garantizando su disponibilidad para el análisis técnico postcarrera.

En conclusión, se ha desarrollado un sistema de telemetría robusto. La latencia total del sistema de extremo a extremo resulta menor a un segundo, un valor prácticamente despreciable en este contexto operativo, lo que confirma una monitorización efectiva en tiempo real. Aunque la topología de red no se implementó en su totalidad bajo el estándar CAN, la arquitectura híbrida no presenta pérdidas de información representativas que afecten el desempeño, gracias a la alta frecuencia de muestreo del sistema.

Como recomendación para futuras investigaciones e iteraciones del prototipo, se propone migrar el microcontrolador del nodo central hacia una arquitectura nativamente compatible con transceptores CAN del mercado. Esto permitirá unificar toda la red del vehículo bajo un único protocolo diferencial, mitigando por completo la ligera tasa de pérdida de paquetes presente en la actual comunicación UART y elevando la fiabilidad general del sistema.

Además, se propone escalar la validación del sistema a un entorno dinámico. Con el fin de realizar pruebas más exigentes en condiciones reales de pista con el vehículo en movimiento,

lo cual permitirá someter el bus CAN y los enlaces de comunicación a vibraciones, interferencias electromagnéticas del motor y zonas de sombra de cobertura, fortaleciendo la confiabilidad del prototipo.

REFERENCIAS

[1] ARDUINO. Controller area network (can) bus. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/learn/communication/can/

[2] f. given i=H, given=Harald. Lte explained: What is lte, how lte works, and why lte still matters. [Online]. Available: https://es.digi.com/blog/post/what-is-lte#Speed

[3] f. given i=R, given=Rubén. Qué es lora, cómo funciona y características principales. [Online]. Available: https://www.vencoel.com/que-es-lora-como-funciona-y-caracteristicas-principales/

[4] G. Hardesty. (2026, Feb.) WiFi: Una guía completa: estándares 802.11 y componentes clave. https://www.data-alliance.net/es/wifi-una-gu%C3%ADa-completa-est%C3%A1ndares-80211-y-componentes-clave?srsltid=AfmBOoq2JTk90EfcgSMsZR0fy95yCdpAtt-cYD70vD-m64Na9v7iAcNM. Accessed: 2026-4-23.

[5] Teltonika Networks, *RUT240 Datasheet*, Teltonika Networks UAB, K. Barsausko st. 66, LT-51436 Kaunas, Lithuania, jan 2023, v10. [Online]. Available: https://teltonika-networks.com

[6] Imperial Eco-Marathon Team, "Imperial Eco-Marathon: Data & Telemetry award report," Imperial College London, Tech. Rep. GB0007002, 2025. [Online]. Available: https://www.shellecomarathon.com/2025-programme/regional-europe-and-africa/_jcr_content/root/main/section_1633744779_c/call_to_action_1681610291/links/item0.stream/1750936361591/fc99fff653b2c6edded3718213e0f27aacc33364/sem-2025-eu-data-and-telemetry-gb0007002.pdf

[7] R. M. Mundige, S. A. Joseph, C. Badachi, A. Sharma, and A. Jha, "Development of Telemetry System for Electric Vehicle," in *2023 7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*. Roorkee, India: IEEE, Oct. 2023, pp. 1–6. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/10455470/

[8] A. G. Calderon, G. G. Ruiz, and A. C. G. Bohorquez, "GPRS telemetry system for high-efficiency electric competition vehicles," in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*. Barcelona, Spain: IEEE, Nov. 2013, pp. 1–7. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/6914788/

[9] G. Hristov, P. Zahariev, S. Borisov, and D. Kyuchukova, "An educational system for real-time monitoring and evaluation of the parameters of electric vehicles," in *2016 15th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*. Istanbul, Turkey: IEEE, Sep. 2016, pp. 1–5. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/7760757/

[10] B. Losper, B. Groenewald, and V. Balyan, "Remote electrical vehicle communication system," in *2017 Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*. Shimla: IEEE, Dec. 2017, pp. 1–4. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/8313735/

[11] J. V. A. Miotto, "UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA," 2023.

[12] Pusztai Zoltan, Kecskemeti Istvan, and Friedler Ferenc, "Optimized Eco-Driving with Real-Time Telemetry in a Lightweight Electric Vehicle," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 114, pp. 877–882, Dec. 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.3303/CET24114147

[13] M. De Carlo, E. Simeone, L. Radano, and M. Carello, "A telemetry-driven architecture for the development of data-intensive race strategies," in *2024 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)*. Victoria, Seychelles: IEEE, Feb. 2024, pp. 1–6. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/10467558/

[14] M. Vorobiov, R. Nemeth, A. Polycarpou, and D. D. Micu, "Low-Power Cellular Telemetry Solution for Electric Vehicles," in *2025 34th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEEIE)*. Cluj-Napoca, Romania: IEEE, Jun. 2025, pp. 1–5. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11136472/

[15] CSS Electronics, *CAN Bus the ultimate guide]*, CSS Electronics, 2023. [Online]. Available: https://www.csselectronics.com/

[16] *Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 2: High-speed medium access unit*, International Organization for Standardization Std. ISO 11 898-2:2016, 2016.

[17] Robert Bosch GmbH, *CAN Specification Version 2.0*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Alemania, 1991, documentación técnica original.