.UBAfiuba
FACULTAD DE INGENIERÍA

Modernización de contadores de tránsito con comunicación bidireccional

Ing. Diego Aníbal Vázquez

Carrera de Especialización en Internet de las Cosas

Director: Ing. Rogelio Diego González

Jurados:

Jurado 1 (pertenencia)
Jurado 2 (pertenencia)
Jurado 3 (pertenencia)

Ciudad de Buenos Aires, Marzo de 2026

Resumen

Esta memoria describe el desarrollo e implementación de un sistema para el registro de eventos de tránsito y la transmisión segura de datos. El diseño asegura la disponibilidad de la información incluso ante interrupciones en la conexión a Internet. El sistema fortalece el monitoreo de las rutas nacionales mediante comunicación bidireccional. Permite realizar diagnósticos remotos, actualizar parámetros, incrementar la precisión y consistencia de los datos y optimizar el trabajo del personal técnico y del equipamiento de monitoreo. Para su realización se aplicaron conocimientos de IoT, transmisión segura de datos y control de sistemas remotos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes han sido un pilar fundamental en cada etapa de mi vida.

Índice general

Índice de figuras

Índice de tablas

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se presenta el marco de referencia y la justificación del trabajo Modernización de contadores de tránsito con comunicación bidireccional. Se expone el contexto que motivó su desarrollo, los problemas detectados en la infraestructura actual, una revisión del estado del arte, la propuesta de valor y el alcance del prototipo planteado.

1.1. Motivación

Este trabajo propone la modernización de los contadores de tránsito instalados en rutas nacionales mediante la renovación de su arquitectura de comunicaciones.

1.1.1. Contexto actual

Actualmente, los equipos registran el paso de vehículos y transmiten eventos al servidor central a través de enlaces GPRS tercerizados. No obstante, no admiten la recepción de comandos ni la obtención de diagnósticos remotos. Esta limitación reduce la capacidad operativa, incrementa los costos de mantenimiento y demora la resolución de fallas, debido a que todo ajuste o reparación requiere una intervención presencial [**asiain2021lora**] , [**micko2023iot**].

1.1.2. Limitaciones del desarrollo previo

La propuesta se origina a partir del desarrollo de un contador de tránsito destinado a registrar y transmitir información en campo. Sin embargo, la conexión remota de este dispositivo presenta limitaciones en cuanto a su capacidad de transmisión de datos y carece de mecanismos de control remoto, lo que dificulta tanto la supervisión del funcionamiento como la actualización de sus parámetros. Frente a estas restricciones, surge la necesidad de modernizar el sistema mediante la incorporación de una comunicación bidireccional confiable [**peruzzi2022lorawan**], [**micko2023iot**].

El análisis del sistema vigente permitió identificar las siguientes limitaciones que motivan el rediseño:

- Comunicación unidireccional. Los contadores envían datos al servidor, pero no existe un canal para enviar configuraciones, consultas y comandos desde el servidor hacia los equipos. Esta limitación impide realizar diagnósticos remotos y ejecutar acciones correctivas sin presencia física.

- Dependencia de proveedores GPRS tercerizados. La dependencia de servicios contratados genera costos recurrentes y limita el control sobre la calidad y disponibilidad de la conectividad.
- Imposibilidad de actualización remota. Cualquier modificación de parámetros o ajustes de operación requiere intervención en el sitio. Esto incrementa tiempos de mantenimiento, costos logísticos y complica la aplicación rápida de mejoras.
- Falta de telemetría y diagnóstico preventivo. No se dispone de métricas sistemáticas sobre el estado operativo de los equipos (batería, temperatura, errores de hardware o comunicación).
- Riesgo de pérdida de datos ante conectividad intermitente. La ausencia de mecanismos de encolamiento persistente y de políticas claras de reenvío eleva la probabilidad de pérdida o duplicación de eventos cuando la red es inestable.

Estas deficiencias afectan la calidad del servicio de monitoreo, reducen la eficiencia operativa y constituyen los requisitos funcionales que orientan el diseño del prototipo.

1.1.3. Impacto esperado

La modernización permite reducir los desplazamientos de personal técnico y acortar los tiempos de resolución de incidentes con la consiguiente disminución de costos logísticos. La incorporación de telemetría facilita la planificación de intervenciones preventivas en lugar de responder exclusivamente a fallas, lo que optimiza la disponibilidad del servicio y la calidad de los datos recolectados. Además, la adopción de protocolos estandarizados y componentes de código abierto promueve la escalabilidad y la replicabilidad de la solución en distintos tramos de la red vial [**miovision**] ,[**sensys**] ,[**metrocount**].

1.1.4. Diseño conceptual

La propuesta separa de forma explícita el transporte de mensajes (broker MQTT) de los servicios de aplicación (API REST, almacenamiento y frontend). Esta separación facilita la interoperabilidad con plataformas institucionales existentes y habilita opciones de despliegue flexibles: uso de brokers externos, instalación de brokers locales o modelos híbridos según políticas institucionales y condiciones de conectividad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Modernizar los contadores de tránsito en rutas nacionales mediante la renovación de su arquitectura de comunicaciones para habilitar comunicación bidireccional confiable, control remoto y telemetría de estado.

1.2.2. Objetivos específicos

- Garantizar la entrega de eventos aun con conectividad intermitente.

- Implementar mecanismos de encolado y reintento que eviten duplicaciones y pérdidas de información.
- Habilitar la ejecución remota de comandos y la actualización de parámetros desde un servidor central, con confirmación explícita del estado del equipo.
- Disminuir la dependencia de enlaces tercerizados mediante una arquitectura configurable.
- Permitir la modificación remota de parámetros operativos y la carga de ajustes sin desplazamientos.
- Incorporar telemetría de estado (batería, temperatura y códigos de error) para mantenimiento preventivo.
- Validar la viabilidad técnica y la robustez operativa del sistema

1.3. Estado del arte y propuesta de valor

En el mercado existen soluciones comerciales [**exemys**], [**digiRemoteManager**], que ofrecen gestión remota y comunicación bidireccional para dispositivos de campo. Dichas soluciones suelen incluir plataformas propietarias con soporte técnico, servicios administrados y herramientas de análisis avanzadas. Estas alternativas, sin embargo, presentan costos elevados de adquisición y mantenimiento, así como dependencias tecnológicas que restringen la posibilidad de adaptación a condiciones locales específicas.

En el ámbito académico y técnico también se han documentado diversas experiencias orientadas a la gestión remota de infraestructuras distribuidas mediante protocolos de mensajería ligera como MQTT o tecnologías de comunicación celular [**monitoringVehicles2023**], [**iotSmartTraffic2021**]. Estos trabajos resaltan la eficiencia de los modelos de publicación y suscripción, especialmente en entornos con restricciones de conectividad, pero en muchos casos se centran en aplicaciones industriales que difieren de las condiciones propias de las rutas nacionales [**iopMQTTSystem2023**].

Además, se han desarrollado plataformas de monitoreo basadas en API REST y bases de datos relacionales, que permiten la integración con interfaces web para la visualización y control [**openRemoteSolution**]. Estas experiencias muestran la tendencia hacia arquitecturas abiertas y modulares, aunque su adopción práctica suele estar ligada a contextos con mayor disponibilidad de infraestructura y recursos.

En síntesis, el estado del arte revela que existen soluciones maduras para la gestión remota y la comunicación bidireccional de dispositivos, pero que dichas alternativas presentan limitaciones en términos de costo, flexibilidad o adecuación a escenarios con conectividad intermitente. Esta situación abre una oportunidad para explorar enfoques adaptados a las necesidades específicas del entorno vial argentino.

En conclusión, si bien el estado del arte muestra un abanico de soluciones maduras orientadas a la gestión remota y a la comunicación bidireccional, la mayoría de ellas se ve condicionada por altos costos, rigidez tecnológica o requerimientos de infraestructura poco compatibles con entornos de conectividad limitada. Estas

restricciones ponen en evidencia un vacío que habilita la exploración de alternativas adaptadas a las particularidades del ámbito vial en Argentina.

1.4. Alcance

El trabajo desarrolla un prototipo funcional destinado a validar las hipótesis técnicas y operativas. El alcance comprende los siguientes objetivos y límites:

- Rediseño de comunicaciones: implementación de un modelo bidireccional y seguro entre los dispositivos de conteo y el servidor central, basado en MQTT sobre GPRS y con autenticación por credenciales.
- Gestión de mensajes en el dispositivo: encolamiento en memoria RAM con política FIFO, control de reintentos ante fallos de conexión y lógica de descarte cuando la cola alcance su límite definido.
- Backend y persistencia: desarrollo de una API REST que se suscriba al broker MQTT, procese los eventos y almacene los registros en una base de datos relacional para consulta histórica.
- Interfaz web básica: panel de visualización en tiempo real de eventos de tránsito y módulo para envío de comandos y verificación de estado de los dispositivos.
- Funciones de telemetría: reporte de nivel de batería, temperatura y códigos de error para facilitar el diagnóstico remoto.

El alcance técnico incluye la adaptación de un contador existente para comunicarse bidireccionalmente por GPRS, que emplee MQTT como protocolo de mensajería ligera y confiable. Asimismo, comprende el desarrollo de un backend que reciba, procese y persista los eventos en una base de datos relacional. Además, una interfaz web básica que permita la visualización en tiempo real y el envío de comandos hacia los dispositivos. Se priorizan las funciones que validen la cadena completa: adquisición de eventos desde el sistema de detección, encolamiento local con política FIFO, reenvío seguro cuando haya conectividad, recepción y ejecución de comandos y verificación del estado del dispositivo tras cada acción.

La figura 1.1 muestra el diagrama en bloques del sistema. El dispositivo de conteo envía datos por GPRS a un broker MQTT, el servidor central los procesa y almacena en una base de datos, mientras que una API REST permite su consulta y la ejecución de comandos desde una interfaz web.

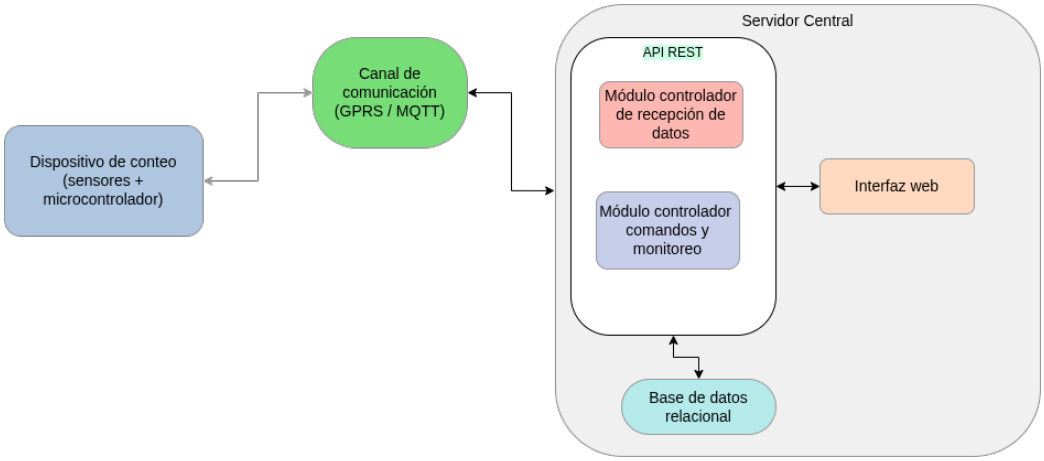

FIGURA 1.1. Diagrama en bloques del sistema.

Capítulo 2

Introducción Específica

En este capítulo se detallan los aspectos técnicos específicos que constituyen la base del trabajo. En primer lugar, se describen los protocolos de comunicación que se emplean y la función de cada uno de ellos en la transmisión de datos. Luego, se presentan los componentes de hardware que utiliza el prototipo. A continuación, se analizan las tecnologías de software que integran la solución, la herramienta de control de versiones adoptada para el desarrollo colaborativo y la gestión del código fuente.

2.1. Protocolos de comunicación

El diseño de un sistema de conteo de tránsito con comunicación bidireccional demanda la incorporación de protocolos que aseguren confiabilidad y eficiencia en el intercambio de datos. En este trabajo se integran tres tecnologías principales: RS-232, MQTT y API REST, cada una con un rol específico.

- RS-232: es un estándar de comunicación serial utilizado tradicionalmente en sistemas embebidos. Permite la transmisión de datos punto a punto entre el contador de tránsito y el microcontrolador ESP32-C3 [**esp32c3**]. Su simplicidad lo hace adecuado para distancias cortas y ambientes donde la interferencia es controlada. Aunque se trata de un protocolo clásico, su adopción garantiza compatibilidad con dispositivos que aún dependen de interfaces seriales [**analogRS232**], [**tiRS232**].
- MQTT: este protocolo de mensajería ligera se emplea tanto para la transmisión de eventos de tránsito desde los dispositivos hacia el servidor central como para la recepción de comandos en sentido inverso. MQTT opera sobre TCP/IP [**comerTCPIP**] y emplea un modelo de publicación/suscripción a través de un broker, lo que facilita la escalabilidad y la integración de múltiples dispositivos. Además, permite implementar mecanismos de calidad de servicio (QoS) que reducen la probabilidad de pérdida de datos en condiciones de conectividad inestable, lo que resulta crucial para el escenario de rutas nacionales [**mqttSpec**].
- API REST: constituye la interfaz de comunicación entre el backend y los clientes web. Su inclusión en el proyecto posibilita la consulta y el envío de información de manera estructurada, mediante operaciones estándar (GET, POST, PUT, DELETE). La API REST asegura la interoperabilidad con diferentes plataformas y brinda flexibilidad para desarrollar aplicaciones adicionales que utilicen los datos recolectados [**ibmRest**], [**microsoftApiDesign**] .

La combinación de estos protocolos permite cubrir distintos niveles de la arquitectura: comunicación local (RS-232), comunicación de dispositivos con el servidor (MQTT) y comunicación entre el servidor y las aplicaciones de usuario (API REST). De esta forma, se garantiza un flujo de datos seguro, confiable y bidireccional.

2.2. Componentes de hardware utilizados

El prototipo se implementa con un conjunto de componentes de hardware seleccionados por su disponibilidad, costo y adecuación al entorno de operación.

- Contador de tránsito: dispositivo de campo que se encarga de detectar el paso de vehículos, clasificarlos y generar eventos para su posterior transmisión. También, tiene la capacidad de recibir comandos.
- ESP32-C3: microcontrolador de bajo consumo que actúa como unidad de procesamiento y comunicación. Integra conectividad y capacidad de comunicación serial, lo que lo hace adecuado para la interacción con el contador y con el módulo GPRS [**esp32c3IDF**].
- Módulo GPRS SIM800L: permite la conexión de los dispositivos a la red celular, asegurando la transmisión de datos al servidor central mediante MQTT. Se eligió por su bajo costo, disponibilidad en el mercado y facilidad de integración con el ESP32-C3.
- Servidor central: responsable de recibir los datos transmitidos, almacenarlos en una base de datos y responder a las solicitudes de los usuarios.
- PC con navegador web: constituye el medio de interacción del usuario final con el sistema, a través de la interfaz desarrollada.

La integración de estos componentes asegura que el sistema pueda operar en condiciones reales y que cumpla con los requisitos.

2.3. Tecnologías de software aplicadas

El desarrollo del prototipo se sustenta en tecnologías de software abiertas y estandarizadas, seleccionadas por su solidez, disponibilidad y capacidad de integración.

- MQTT con Eclipse Mosquitto. La mensajería ligera y bidireccional se implementa mediante el protocolo MQTT, operando sobre el broker Eclipse Mosquitto [**mosquitto**]. Este software es ampliamente utilizado en entornos de Internet de las Cosas (IoT).
- API REST con Node.js y Express. El backend se desarrolla en Node.js [**nodejs**], un entorno de ejecución orientado a aplicaciones de red no bloqueantes, y se estructura con Express [**expressjs**], un framework ligero que facilita la creación de servicios RESTful.
- Base de datos relacional MySQL. La persistencia de los datos se implementa en MySQL [**mysql**], un sistema gestor de bases de datos relacionales ampliamente adoptado. En ella se almacenan de manera estructurada tanto los eventos de tránsito como los estados reportados por los equipos.

- Interfaz web con Ionic y Angular . Para la interacción con el usuario final se diseñó una aplicación accesible desde cualquier navegador, construida con Ionic [**ionic**] y Angular [**angular**]. La primera aporta componentes visuales responsivos que aseguran usabilidad tanto en entornos de escritorio como en dispositivos móviles.
- Firmware para ESP32-C3 con ESP-IDF. El microcontrolador ejecuta un firmware desarrollado en C/C++, el cual utiliza el framework oficial de ESP-IDF [**espidf**], el framework oficial de Espressif. Este entorno proporciona bibliotecas optimizadas. El firmware controla la captura de datos desde el contador mediante RS-232, gestiona la comunicación con el módulo SIM800L mediante comandos AT y establece la conexión con el broker Mosquitto a través de MQTT.

2.4. Software de control de versiones

Para la gestión del código fuente se empleó GitHub [**github**], una plataforma que se basa en el sistema de control de versiones Git. Esta herramienta permitió almacenar el repositorio central de manera segura, registrar el historial de cambios y garantizar la trazabilidad de cada modificación realizada durante la etapa de desarrollo del prototipo.

El repositorio incluye el firmware del ESP32-C3, el backend en Node.js con Express y la interfaz web desarrollada con Ionic y Angular. Esto facilita mantener el código organizado, con la posibilidad de crear ramas independientes para implementar nuevas funciones y, posteriormente, integrarlas al código principal mediante pull requests, lo que permite revisar y validar los cambios antes de su incorporación definitiva.

Asimismo, se emplean issues para documentar incidencias, planificar tareas y realizar el seguimiento de los avances. Esta práctica favorece la organización del trabajo y permite mantener un registro claro de los problemas detectados y las decisiones adoptadas.

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se describe la arquitectura global del prototipo, se detalla cada módulo hardware y software que lo compone, y se documentan las decisiones de implementación, los criterios de diseño y las pruebas preliminares realizadas. Se explican los flujos de datos entre el dispositivo de campo, el broker MQTT, el backend (API REST), la interfaz web, se resumen las consideraciones para el despliegue y el monitoreo post-implantación.

3.1. Arquitectura del sistema

La arquitectura propuesta separa de forma explícita el dispositivo de campo (contador + ESP32-C3 + SIM800L), el transporte de mensajes (broker MQTT) y los servicios de aplicación (API REST, persistencia y frontend). Esta separación facilita la interoperabilidad y permite desplegar la solución de forma local, remota o híbrida según las políticas institucionales

3.1.1. Flujo de datos

- Detección: el contador detecta un paso y envía una trama por RS-232 al ESP32-C3.
- Preprocesado en nodo: el firmware valida la trama, añade sello temporal y metadatos, y encola el evento en memoria (FIFO).
- Transmisión: cuando la conexión GPRS está disponible, el nodo publica el evento en el tópico MQTT `devices/id/events`.
- Ingesta y persistencia: el broker Mosquitto entrega el mensaje al suscriptor backend, el servicio valida el payload y persiste el registro en la base de datos MySQL.
- Visualización/Control: la interfaz web consulta la API REST para datos históricos y recibe notificaciones en tiempo real.
- Emisión de comandos (desde UI): el operador genera un comando en la interfaz, la UI envía `POST /api/devices/id/comm` al backend, que crea un `cmd_id` único y publica en `devices/id/comm`.
- Recepción en nodo y entrega al contador: el ESP32-C3, suscrito a `devices/id/comm`, recibe el comando, valida `cmd_id` y lo envía al contador por RS-232, se aplica un timeout configurable por comando.

- Ejecución y ack: el contador ejecuta la orden y responde por RS-232, el firmware publica el ack/resultado en `devices/id/status` con `cmd_id` y `status` (`ok`, `failed`, `timeout`, `value`).
- Actualización en backend y UI: el suscriptor MQTT del backend recibe el ack, actualiza la tabla `comm` (campo `status`, `ack_ts`) y notifica a la UI para que el operador vea el resultado.

3.1.2. Descripción ampliada de bloques y responsabilidades

- Bloque Dispositivo de campo: el nodo de campo integra el contador existente (salida RS-232), un microcontrolador ESP32-C3 y un módem GPRS SIM800L. El firmware, desarrollado sobre `ESP-IDF`, realiza las siguientes funciones: lectura continua de la trama serial, parsing tolerante a ruido, preprocesado (validación, normalización de campos y asignación de sello temporal UTC), encolamiento FIFO de eventos, gestión de reintentos y publicación MQTT cuando hay conectividad. Además, el nodo se suscribe a los tópicos de comandos y publica telemetría y acks. En el nodo se implementa persistencia mínima (registro de comandos pendientes y últimas N tramas) para recuperación tras reinicio.
- Bloque Transporte (broker MQTT): el broker actúa como bus de mensajes desacoplado. Se recomienda emplear Eclipse Mosquitto en la etapa inicial y evaluar brokers gestionados para despliegues a mayor escala. El broker gestiona autenticación por credenciales, control de tópicos y cifrado. Se emplean tópicos jerárquicos por dispositivo para facilitar filtrado y autorización:
  - `devices/{id}/events`
  - `devices/{id}/comm`
  - `devices/{id}/status`
- Bloque Servidor central: el servidor central reúne dos responsabilidades principales:
  - Componente suscriptor MQTT que valida, transforma y enruta mensajes hacia la lógica de negocio y la persistencia.
  - API REST que expone servicios de consulta, gestión y emisión de comandos. Esta separación permite que consumidores adicionales (por ejemplo, módulos analíticos) se suscriban al broker sin impactar la disponibilidad de la API. La persistencia se implementa en MySQL con un esquema relacional que soporta consultas por rango temporal, índices para rendimiento y auditoría de comandos.
- Bloque Cliente/Visualización: la interfaz web consume la API REST para consultas históricas y para recibir eventos en tiempo real. Se eligió Ionic + Angular por su compatibilidad con entornos de escritorio y móviles y por facilitar un despliegue unificado. Las funciones principales del cliente son: visualización de eventos en tiempo real, consulta histórica filtrada, envío de comandos remotos con seguimiento de estado y panel de telemetría para mantenimiento preventivo.

La figura 3.1 muestra el diagrama de arquitectura del sistema y el flujo de datos. El dispositivo de campo (contador + ESP32-C3 + SIM800L), broker MQTT (Mosquitto), servidor central (API REST en Node.js/Express + lógica de suscripción MQTT) y cliente/visualización (interfaz web en Ionic/Angular).

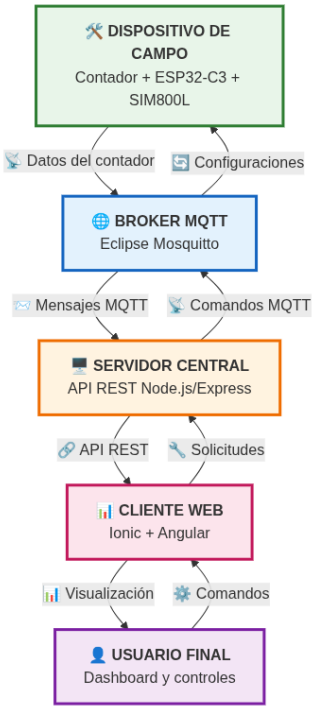

FIGURA 3.1. Diagrama de arquitectura del sistema y el flujo de datos.

3.1.3. Decisiones de diseño clave

- Separación broker/aplicación: permite cambiar broker o desplegar uno local sin tocar la lógica de negocio.
- MQTT para mensajería ligera porque minimiza overhead en GPRS y facilita pub/sub.
- API REST en Node.js/Express para exponer endpoints transaccionales y de gestión, centralizando autenticación y control de accesos.

3.2. Detalle de módulos de hardware

La implementación del prototipo requiere integrar componentes de hardware que permitan adaptar el sistema de detección de tránsito existente a un modelo de comunicación bidireccional. En esta sección se describen los módulos seleccionados, sus funciones principales, las interfaces involucradas y las consideraciones de integración.

3.2.1. ESP32-C3 (unidad de control)

El ESP32-C3 constituye el núcleo de procesamiento del nodo de campo. Se trata de un microcontrolador de bajo consumo con conectividad, elegido principalmente por su capacidad de cómputo, su soporte de entornos de desarrollo abiertos y la disponibilidad de bibliotecas optimizadas para protocolos de comunicación.

- Rol en la arquitectura: coordina la recepción de eventos desde el contador a través de RS-232, gestiona el encolamiento FIFO, controla la comunicación con el módem SIM800L mediante comandos AT y actúa como cliente MQTT.
- Entorno de desarrollo: el firmware se desarrolló sobre ESP-IDF, el framework oficial de Espressif, que permite gestionar tareas concurrentes mediante FreeRTOS y facilita la integración de librerías de red y drivers UART.
- Ventajas técnicas: bajo costo, consumo reducido, capacidad de ejecutar varias tareas en paralelo y soporte nativo para criptografía y seguridad en comunicaciones.
- Consideraciones de diseño: se provee una correcta disipación térmica y estabilidad de la alimentación, especialmente durante la transmisión de datos.

3.2.2. Módulo GPRS SIM800L

El módulo SIM800L implementa la conectividad celular GPRS, que permite la transmisión bidireccional de datos entre dispositivos remotos y servidor centralizado.

- Funciones principales: establecimiento de sesiones TCP/IP sobre GPRS, controlado por el ESP32-C3 mediante comandos AT. Soporta publicación y suscripción MQTT a través de sockets TCP persistentes.
- Integración con ESP32-C3: la comunicación entre ambos se realiza mediante UART secundaria. El firmware implementa comandos de inicialización, registro en red, apertura de contexto y gestión de reconexiones.
- Aspectos críticos: el SIM800L presenta picos de consumo que pueden superar los 2 A durante la transmisión, se dispone de una fuente con suficiente margen y filtros adecuados para evitar reinicios inesperados.
- Limitaciones: ancho de banda reducido (máximo teórico de 85,6 kbps en GPRS), lo que refuerza la decisión de emplear MQTT por su bajo overhead.

3.2.3. Contador de tránsito y comunicación RS-232

El sistema de conteo existente genera tramas con información de los eventos de paso de vehículos acumulados en un intervalo de tiempo (por defecto 1 hora). La comunicación con el ESP32-C3 se establece mediante interfaz RS-232, estándar ampliamente utilizado para transmisión serial de datos.

- Formato de trama: el equipo incluye identificador de Dipositivo, timestamp local, valores de clasificación tránsito por carril.
- Adaptación eléctrica: se utiliza un conversor de niveles (MAX232) para adaptar las señales RS-232 al rango TTL del microcontrolador.

- Ventaja: la reutilización de la interfaz serial del contador evita modificar el sistema de detección existente, reduciendo costos de integración.

En la Figura 3.4 se observa el contador de tránsito. Este dispositivo constituye la base del sistema de detección de eventos y se mantiene sin modificaciones en su lógica interna.

FIGURA 3.2. Fotografia contador de tránsito DTEC [1].

3.2.4. Alimentación y montaje

El nodo debe operar de manera confiable en condiciones de campo, por lo que la alimentación y el encapsulado son aspectos críticos.

- Fuente de alimentación: se empleó una fuente principal con batería interna recargable, diseñada para cubrir los picos de consumo del módulo SIM800L. La batería se recarga mediante un panel solar, lo que proporciona autonomía. Para estabilizar la entrega de energía se incorporó un módulo regulador de tensión que garantiza el nivel adecuado de voltaje para el módem. El circuito se complementó con capacitores dimensionados para absorber los picos de tensión del SIM800L durante la transmisión de datos, evitando caídas de voltaje que puedan reiniciar el sistema.
- Carcasa y Gabinete: tanto el contador como el módulo de comunicación remota (ESP32-C3 y SIM800L) cuentan con su propia carcasa de protección y,

[1]Imagen tomada de http://transito.vialidad.gob.ar/

adicionalmente, ambos se alojan en un gabinete cerrado con protección ambiental, diseñado para resistir humedad, polvo y vibraciones características de los entornos viales. El uso de un gabinete metálico contribuye también a la disipación térmica y a la reducción de interferencias electromagnéticas, que asegura la confiabilidad del sistema en condiciones de intemperie.

En la Figura 3.3 se observa el contador de tránsito instalado en campo, junto con su gabinete de protección y la batería interna que asegura autonomía energética. El conjunto se encuentra montado al costado de la ruta, en condiciones reales de operación, lo que permite apreciar el encapsulado diseñado para resistir las exigencias ambientales del entorno vial.

FIGURA 3.3. Fotografia contador de tránsito DTEC instalado en campo [2].

[2]Imagen tomada de http://transito.vialidad.gob.ar/

3.3. Desarrollo del backend

El backend constituye el núcleo lógico del sistema, encargado de articular la comunicación entre los dispositivos de campo, la base de datos y la interfaz de usuario. Su diseño se basó en principios de modularidad, escalabilidad y seguridad, empleando un conjunto de tecnologías ampliamente utilizadas en entornos de Internet de las Cosas (IoT).

3.3.1. Arquitectura y tecnologías

El servicio fue implementado en Node.js con el framework Express, lo que permitió organizar la aplicación en controladores, rutas y middlewares. Para la interacción con la base de datos relacional se adoptó Sequelize, un ORM que facilita la definición de modelos y garantiza independencia frente a cambios en la capa de persistencia.

La comunicación con los dispositivos se realiza mediante suscripción a tópicos MQTT en el broker Eclipse Mosquitto.

Cada vez que un dispositivo publica un evento en `devices/{id}/events`, el backend lo recibe, valida el payload y lo persiste en MySQL.

En el caso de comandos, el backend publica en el tópico correspondiente (`devices/{id}/comm`) y actualiza su estado en la base de datos conforme recibe las confirmaciones (`devices/{id}/status`).

ara el despliegue y la integración continua se empleó Docker Compose, lo que permite levantar simultáneamente el backend, la base de datos y el broker MQTT en contenedores aislados.

El sistema de registro se implementó con Winston y Morgan, integrados para disponer de trazabilidad tanto de las solicitudes HTTP como de la interacción con MQTT.

3.3.2. Funcionalidades principales

- Gestión de dispositivos: alta, baja, modificación y consulta.
- Gestión de eventos: almacenamiento de detecciones y consultas filtradas por dispositivo o rango temporal.
- Gestión de comandos: emisión de órdenes a un dispositivo, persistencia de la orden con identificador único (cmd_id) y actualización según respuesta.
- Estado de dispositivos: consulta de parámetros como nivel de batería, temperatura o conectividad.
- Autenticación y autorización: control de acceso mediante tokens JWT.

3.3.3. Organización en controladores

La lógica de negocio del backend se organiza en controladores, cada uno asociado a un recurso del sistema. Esto asegura separación de responsabilidades, facilita el mantenimiento y permite la escalabilidad de la aplicación.

- DevicesController: gestiona las operaciones CRUD sobre los dispositivos de campo, además de registrar los eventos recibidos vía MQTT y asociarlos a un dispositivo específico.
- EventsController: encapsula la lógica de ingesta de eventos de tránsito, validación de payloads y persistencia en la base de datos.
- CommandsController: administra la emisión y seguimiento de comandos remotos, generando un `cmd_id` único y actualizando el estado conforme se reciben los `ack`.
- StatusController: centraliza la recepción de estados y telemetría (batería, conectividad), garantizando que la base de datos refleje la situación en tiempo real.
- UserController: implementa el ciclo de vida de usuarios y la autenticación mediante JWT, así como la validación de permisos en cada endpoint.

3.3.4. Mapa de endpoints

TABLA 3.1. Endpoints REST principales expuestos por el backend, junto con el controlador que implementa su lógica

Endpoint	Controlador	Descripción
GET /devices	DevicesController	Lista todos los dispositivos registrados
GET /devices/{id}	DevicesController	Devuelve información de un dispositivo específico
POST /devices	DevicesController	Alta de un nuevo dispositivo
PATCH /devices/{id}	DevicesController	Actualización de atributos de un dispositivo
DELETE /devices/{id}	DevicesController	Eliminación de un dispositivo
GET /events/device/{id}	EventsController	Consultar eventos por dispositivo
GET /events/range	EventsController	Consultar eventos por rango temporal
POST /commands	CommandsController	Crear un comando remoto y publicarlo en MQTT
GET /commands/{id}	CommandsController	Consultar estado de un comando (pendiente, ok, failed, timeout, value)
GET /status/{device_id}	StatusController	Consultar estado operativo y telemetría del dispositivo
POST /usuario/login	UserController	Autenticación de usuario, devuelve token JWT
POST /usuario	UserController	Alta de usuario
GET /usuario	UserController	Listar usuarios registrados
DELETE /usuario/{id}	UserController	Eliminar usuario

3.3.5. Seguridad y extensibilidad

Además de la autenticación mediante JWT, todos los endpoints aplican validaciones y sanitización de parámetros de entrada y salida. El sistema de logging, implementado con Winston y Morgan, garantiza trazabilidad de las operaciones

tanto en la capa HTTP como en la mensajería MQTT. La arquitectura modular basada en controladores permite extender el backend con nuevos recursos o funcionalidades sin afectar la lógica ya implementada.

3.4. Desarrollo del frontend

El frontend del sistema se diseñó como una Single Page Application (SPA) se desarrolla en Ionic con Angular y TypeScript. El objetivo es proporcionar una interfaz moderna e intuitiva, accesible desde navegador, que permita al operador autenticarse, supervisar en tiempo real los eventos captados por los contadores de tránsito, consultar históricos almacenados en la base de datos y emitir comandos remotos hacia los nodos de campo.

3.4.1. Arquitectura y tecnologías

El cliente web se estructura en componentes reutilizables de Ionic, lo que facilita la navegación y asegura un diseño responsivo tanto en entornos de escritorio como móviles. La comunicación con el backend se realiza mediante peticiones HTTP a la API REST, y en casos donde se requiere actualización en tiempo real se emplea un canal de notificación basado en WebSocket.

Las tecnologías principales aportan ventajas concretas:

- Ionic: conjunto de componentes UI listos para usar que permiten construir pantallas consistentes y adaptables.
- Angular: organización de la aplicación en módulos y servicios, favoreciendo la escalabilidad.
- TypeScript: tipado estático para mejorar la robustez del código y prevenir errores en tiempo de compilación.
- JWT: integración con el backend para autenticar todas las operaciones posteriores al login.

3.4.2. Funcionalidades principales

El frontend integra las siguientes funciones clave:

- Login de usuario: ingreso con credenciales, validación contra la API y obtención de un token JWT.
- Listado de dispositivos: muestra todos los contadores registrados, junto con información de ubicación y estado básico.
- Detalle de dispositivo: despliega datos específicos de un contador y últimas tramas recibidas.
- Panel de mediciones: permite visualizar los eventos de tránsito procesados, con actualización dinámica cuando el dispositivo transmite nuevas tramas.
- Historial de eventos: consulta de registros almacenados en la base de datos, filtrados por dispositivo y rango temporal.

- Envío de comandos: panel que habilita la emisión de órdenes remotas al nodo de campo reset de contador, cambio de parámetros, obtención de parámetros), verificando el acuse de recibo y mostrando el resultado al usuario (`ok`, `failed`, `timeout`, `value`).

3.4.3. Integración con el backend

Todas las operaciones del frontend se apoyan en los endpoints REST definidos en el backend (ver Sección 3.1). Cada petición incluye en sus cabeceras el token JWT obtenido en el login, lo que garantiza que sólo usuarios autorizados puedan acceder a datos sensibles o emitir comandos. El backend devuelve respuestas en formato JSON, que son interpretadas y representadas en la interfaz en tiempo real, que asegura consistencia entre la vista del operador y el estado real de los dispositivos.

3.4.4. Resumen

El desarrollo del frontend consolidó una interfaz web moderna, accesible y segura que permite a los operadores interactuar con los dispositivos de campo de manera eficiente. El sistema ofrece no sólo la visualización de eventos de tránsito en tiempo real y la consulta de históricos, sino también el envío de comandos con acuse de recibo. De esta forma, la interfaz completa el ciclo de comunicación bidireccional con los nodos, que se convierte en la herramienta central para la supervisión y el control remoto del prototipo.

3.5. Despliegue del sistema

El despliegue del sistema comprende la puesta en marcha coordinada de los distintos servicios que componen la arquitectura: el broker MQTT, la API REST, la base de datos relacional y la interfaz web. El objetivo es trasladar el prototipo desde un entorno de desarrollo hacia un entorno productivo, que asegura escalabilidad, confiabilidad y capacidad de monitoreo post-implantación.

3.5.1. Entorno productivo y configuración

Para simplificar la orquestación se emplea Docker Compose, lo que permite instanciar todos los servicios en contenedores aislados pero comunicados entre sí. Cada componente cumple un rol específico:

- Broker MQTT (Eclipse Mosquitto): configurado como servicio de mensajería central. Se habilitan credenciales de acceso, control de tópicos por dispositivo y soporte de cifrado TLS en despliegues productivos. Su rol es recibir eventos desde los nodos de campo y distribuirlos a los suscriptores autorizados (API REST u otros consumidores).
- API REST (Node.js/Express): implementada como contenedor independiente, integra lógica de negocio y suscripción al broker MQTT. De esta forma, cada evento recibido es validado, transformado y almacenado en la base de datos. La API expone endpoints para:
  - Gestión de dispositivos y usuarios.
  - Consulta de eventos por rango temporal o por dispositivo.

- Emisión y seguimiento de comandos remotos.
- Acceso al estado operativo y telemetría de cada nodo.

Todos los endpoints están protegidos mediante autenticación con tokens JWT.

- Base de datos relacional (MySQL): instancia dedicada a persistencia de información. Su esquema incluye tablas de dispositivos, eventos, comandos y usuarios. Se definen índices para optimizar consultas históricas y se configuran respaldos automáticos diarios.
- Interfaz web (Ionic/Angular): desplegada como servicio accesible en navegador. Consume la API REST para mostrar eventos en tiempo real, ejecutar comandos y consultar históricos.

3.5.2. Monitoreo post-implantación

Una vez desplegado el sistema, resulta fundamental contar con mecanismos de monitoreo que permitan evaluar su correcto funcionamiento en campo:

- Logs centralizados: tanto el backend como el broker MQTT registran eventos en archivos y consola. Se integra con Grafana para correlacionar métricas.
- Alertas y métricas: mediante Grafana es posible recolectar indicadores de CPU, memoria y estado de contenedores. También se pueden graficar métricas de tráfico MQTT (mensajes publicados, latencias, pérdidas).
- Supervisión de dispositivos: la API REST expone endpoints que informan conectividad y parámetros básicos (nivel de batería, último evento recibido). Estos datos se representan en la interfaz web como panel de salud del sistema.
- Respaldo y recuperación: la base de datos implementa backups automáticos y permite restauraciones parciales. Esto garantiza que el historial de eventos no se pierda ante fallas de hardware o corrupción de datos.

3.5.3. Resumen

El despliegue integra en un único entorno los componentes críticos del sistema: broker MQTT, API REST, base de datos y frontend web. La contenedorización mediante Docker Compose simplifica la instalación y favorece la portabilidad hacia distintas plataformas (servidores locales, nubes públicas o entornos híbridos). El monitoreo continuo, junto con la gestión de logs y respaldos, asegura que la solución pueda mantenerse operativa de manera confiable en el tiempo, facilitando su escalado y la detección temprana de fallos.

3.6. Nodos y Sensores

En este capítulo se detalla el hardware de los nodos de campo que constituyen la base del sistema de detección de tránsito. Cada nodo combina un microcontrolador **ESP32-C3** con interfaces de comunicación estándar, lo que permite procesar eventos localmente y establecer un vínculo bidireccional con el servidor central.

De esta manera, se logra una solución flexible, escalable y compatible con la infraestructura vial existente.

3.6.1. Arquitectura del nodo

La arquitectura de cada nodo se diseñó con el objetivo de reutilizar los contadores de tránsito actualmente desplegados en rutas nacionales, minimizando modificaciones en el equipamiento existente. Para ello, se emplea una interfaz RS-232 que conecta directamente al contador con el microcontrolador. Dado que el ESP32-C3 opera con niveles de señal TTL, se incorporó un conversor MAX232, encargado de realizar la adaptación de niveles eléctricos y asegurar la robustez de la comunicación.

- Contador de tránsito modelo DTEC: dispositivo comercial encargado de detectar el paso de vehículos y generar tramas de datos con la información del evento.

  En la Figura 3.4 se observa el contador de tránsito. Este dispositivo constituye la base del sistema de detección.

FIGURA 3.4. Contador de tránsito DTEC [3].

[3]Imagen tomada de http://transito.vialidad.gob.ar/

- Módulo de adaptación RS-232/TTL (MAX232): circuito de conversión de niveles eléctricos que asegura compatibilidad entre la interfaz serial del contador (RS-232) y el microcontrolador (niveles TTL). En la Figura 3.5 se observa el Módulo de adaptación RS-232/TTL (MAX232).

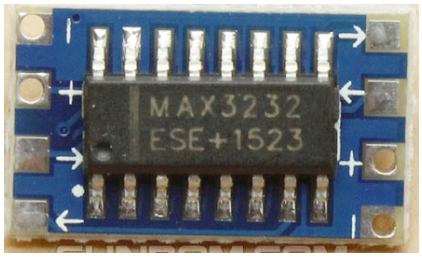

FIGURA 3.5. Módulo RS-232/TTL [4].

- ESP32-C3: microcontrolador que ejecuta el firmware desarrollado sobre ESP-IDF. Sus funciones incluyen el preprocesamiento de eventos, el encolamiento FIFO, la suscripción a comandos remotos y la gestión integral de la comunicación con el servidor. En la Figura 3.6 se muestra el Microntrolador utilizado en campo.

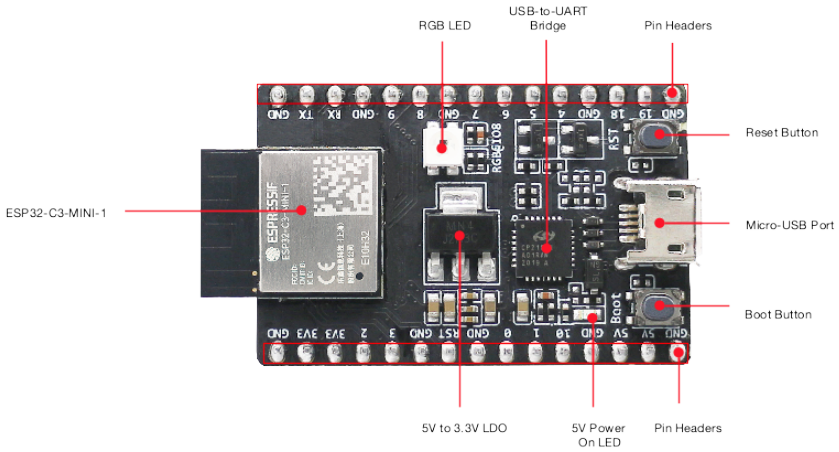

FIGURA 3.6. Microcontrolador ESP32-C3 utilizado en los nodos de campo [5].

- Módulo de comunicación GPRS (SIM800L): interfaz de conectividad celular que publica eventos en el broker MQTT, recibe comandos desde el servidor y retransmite respuestas o estados del nodo.

  En la Figura 3.7 se aprecia el módulo SIM800L que implementa la conectividad celular GPRS.

[4]Imagen tomada de https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/73074/MAXIM/MAX232.html

[5]Imagen tomada de https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.0/esp32c3/hw-reference/esp32c3/user-guide-devkitm-1.html

[6]Imagen tomada de https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1741389/SIMCOM/SIM800L.html

FIGURA 3.7. Módulo SIM800L [6].

3.6.2. Firmware y comunicación

El firmware fue desarrollado sobre el framework ESP-IDF, lo que asegura soporte nativo para el hardware del ESP32-C3 y flexibilidad en la gestión de tareas concurrentes. Las principales funciones implementadas son:

- Lectura continua de tramas seriales provenientes del contador, con validación y tolerancia a ruido.
- Preprocesado de eventos: normalización de campos, inclusión de sello temporal UTC y metadatos de identificación del nodo.
- Encolamiento FIFO: los eventos son almacenados temporalmente para garantizar el orden de transmisión incluso ante fallos de conectividad.
- Publicación MQTT: envío de eventos hacia el broker en tópicos específicos por dispositivo.
- Suscripción a comandos remotos: recepción de órdenes desde el backend, ejecución local y publicación de resultado.
- Telemetría: envío periódico de parámetros de estado (nivel de batería, conectividad, temperatura).

3.6.3. Integración con la infraestructura existente

Una de las principales ventajas de este diseño es que no requiere modificaciones internas en el contador de tránsito. El nodo recibe los pulsos de detección mediante la interfaz RS-232, que preserva la integridad del equipo original.

El ESP32-C3 no se limita a reenviar datos, sino que añade valor al sistema al realizar un preprocesado local: filtra tramas, agrupa eventos en función de ventanas de tiempo y asegura la transmisión con políticas de reintento. Asimismo, la conexión con el servidor central mediante MQTT garantiza interoperabilidad con aplicaciones externas y facilita la escalabilidad del sistema.

En este contexto, los nodos de campo cumplen un doble rol: por un lado, son captadores de datos provenientes de los sensores de tránsito y por otro, actúan como puntos de control remoto, capaces de ejecutar comandos enviados desde

la plataforma central. Esta dualidad refuerza la flexibilidad del sistema y lo hace adaptable a distintas políticas de gestión vial.

3.7. Comunicación del sistema

La comunicación constituye un componente esencial en la arquitectura propuesta, ya que habilita el intercambio bidireccional de información entre los nodos de campo y el servidor central. El diseño combina interfaces cableadas locales y protocolos de mensajería ligera sobre redes celulares, que asegura confiabilidad aun en entornos con conectividad limitada.

3.7.1. Esquema general

Cada nodo de campo conecta el contador de tránsito DTEC mediante la interfaz RS-232, que garantiza compatibilidad con el equipamiento existente. El microcontrolador ESP32-C3 recibe las tramas seriales a través de un módulo MAX232, las procesa y las transmite mediante el módulo SIM800L que utiliza conectividad GPRS. Sobre esta capa de transporte celular se implementa el protocolo MQTT, lo que permite estructurar la comunicación en un modelo de publicación/suscripción ligero y eficiente.

De esta manera, el flujo de datos se organiza en dos canales principales:

- Canal de eventos: envío de detecciones desde el nodo hacia el broker MQTT en el tópico `devices/{device_id}/events`.
- Canal de control: recepción de comandos desde el servidor (`devices/{device_id}/comman` y envío de confirmaciones o estados (`devices/{device_id}/status`).

3.7.2. Flujo de datos

El proceso de comunicación en operación sigue las siguientes etapas:

- Detección local: el contador registra un evento de paso y acumula, en el periodo indicado envía una trama al ESP32-C3 vía RS-232.
- Preprocesamiento: el firmware valida la trama, añade sello temporal y metadatos, y encola el evento en memoria.
- Transmisión GPRS/MQTT: cuando existe conectividad, el nodo publica el evento en el tópico correspondiente.
- Ingesta y persistencia: el broker Mosquitto distribuye el mensaje al backend, que valida el contenido y lo almacena en la base de datos MySQL.
- Visualización y control: la interfaz web accede a los eventos mediante la API REST y recibe actualizaciones en tiempo real.
- Comandos remotos: el operador envía una orden desde la interfaz, el backend la publica en el broker y el nodo la ejecuta, respondiendo con un mensaje de estado o ack.

3.7.3. Aspectos técnicos

El diseño incorpora distintas medidas para asegurar la calidad de la comunicación:

- MQTT sobre GPRS: se seleccionó este protocolo por su bajo consumo de ancho de banda, adecuado para escenarios con conectividad intermitente.
- RS-232 local: la comunicación serial entre el contador y el microcontrolador garantiza compatibilidad con equipos instalados, con bajo costo y alta robustez en campo.
- Autenticación y seguridad: los clientes MQTT se autentican mediante credenciales, y en producción se prevé el uso de cifrado para proteger la integridad de los mensajes.
- Persistencia y reintentos: el firmware implementa colas FIFO y retransmisión automática para evitar pérdida de eventos en caso de fallas de red.
- Integración con API REST: la capa de aplicación expone endpoints que permiten consultar datos históricos, emitir comandos y gestionar dispositivos, complementando la mensajería en tiempo real.

En síntesis, el sistema de comunicación integra tecnologías maduras y abiertas que aseguran interoperabilidad, escalabilidad y confiabilidad en condiciones de campo. El empleo combinado de RS-232, GPRS y MQTT posibilita modernizar la infraestructura existente sin reemplazar los contadores de tránsito, a la vez que habilita la gestión remota de dispositivos en escenarios distribuidos.

Capítulo 4

Ensayos y Resultados

En este capítulo se presentan en detalle los ensayos realizados sobre el sistema desarrollado, con el propósito de validar su funcionamiento en condiciones representativas de uso real. Los ensayos se organizaron en diferentes niveles: banco de pruebas en laboratorio, validación de la API REST, pruebas unitarias e integración de componentes, pruebas del frontend, prueba final de integración end-to-end y una comparación con soluciones comerciales y académicas.

4.1. Metodología de pruebas

Para garantizar la reproducibilidad de los resultados, se definió una metodología estructurada que abarcó:

- **Diseño de escenarios de prueba**: cada caso fue descrito en términos de entradas, condiciones ambientales (conectividad, ruido eléctrico, interrupciones), criterios de éxito y métricas a evaluar.
- **Instrumentación**: se utilizaron herramientas como *Postman* para la API REST, *Wireshark* para el análisis de tráfico MQTT, *Mosquitto_sub/pub* para validación manual de tópicos y *Lighthouse* para pruebas de frontend.
- **Registro**: se configuró el backend con `Winston` y `Morgan` para guardar trazas en disco y en consola. Adicionalmente, se recolectaron métricas con scripts Python que midieron tiempos de respuesta y pérdidas de mensajes.
- **Criterios de aceptación**: se establecieron como condiciones mínimas de validación: (i) latencia promedio menor a 500 ms en API REST, (ii) pérdida de eventos inferior al 0.1 % en escenarios de conectividad intermitente, (iii) tiempo de recuperación ante desconexión GPRS menor a 30 segundos.

4.2. Banco de pruebas

El banco de pruebas se diseñó para simular condiciones reales de operación de los contadores de tránsito, incluyendo conectividad GPRS intermitente y generación de eventos artificiales.

Los objetivos principales fueron:

- Validar la correcta recepción de tramas RS-232 desde el contador.
- Evaluar el desempeño del firmware en el manejo de colas FIFO en memoria.
- Verificar la transmisión y reintento de eventos a través del protocolo MQTT.

- Confirmar la recepción de comandos desde el servidor y la emisión de respuestas de tipo *acknowledge*.

Durante las pruebas se generaron tramas simuladas de detección y se forzaron desconexiones en el enlace GPRS. Se verificó que el firmware almacenaba los eventos en cola y los publicaba correctamente al restablecerse la conexión. También se probaron diferentes niveles de QoS en MQTT para medir la confiabilidad del envío.

Los resultados mostraron que el sistema pudo mantener la integridad de los eventos y ejecutar comandos remotos de forma confiable, incluso bajo condiciones adversas.

4.3. Pruebas de la API REST

Las pruebas de la API REST se centraron en la validación de los endpoints implementados. Se emplearon colecciones de *Postman* que automatizaron las consultas, con aserciones sobre códigos de estado y estructura de respuestas.

Ejemplo de request y response para creación de dispositivo:

```
POST /devices
{
  "nombre": "Nodo Ruta 9",
  "ubicacion": "Peaje km 255",
  "tipo": "contador"
}

Response 201:
{
  "message": "Dispositivo creado exitosamente",
  "id": 5
}
```

Se verificaron:

- Operaciones CRUD sobre dispositivos y eventos.
- Autenticación y autorización mediante tokens JWT.
- Integración con el broker MQTT para el envío de comandos y registro de respuestas.
- Manejo de errores ante parámetros inválidos o solicitudes no autorizadas.

Los resultados confirmaron que la API respondió en tiempos adecuados, con latencias promedio menores a 200 ms en pruebas locales y 350 ms en escenarios con GPRS.

4.4. Pruebas de componentes

Se realizaron pruebas unitarias e integración sobre cada módulo del sistema:

- **Firmware**: validación del parsing de tramas RS-232, manejo de colas FIFO y reconexión GPRS.

- **API REST**: validación de controladores, middlewares y sanitización de datos.
- **Interfaz web**: verificación de consultas REST, visualización en tiempo real y envío de comandos.
- **Broker MQTT**: simulación de desconexiones para validar reintentos y niveles de QoS.
- **Manejo de errores**: pruebas forzadas de pérdida de conectividad y respuestas inválidas.

4.5. Pruebas del frontend

El frontend fue evaluado en términos de compatibilidad, rendimiento y usabilidad. Se verificó el funcionamiento en navegadores modernos (Chrome, Firefox, Edge) y en dispositivos móviles.

Las métricas incluyeron:

- Tiempo de carga inicial (medido con Lighthouse).
- Latencia en consultas a la API.
- Velocidad de actualización de gráficos en tiempo real.

4.6. Prueba final de integración

La prueba final consistió en validar el flujo completo: desde la detección de un vehículo en el contador hasta la visualización del evento en la interfaz web y la emisión de un comando remoto.

Los tiempos de ida y vuelta de un comando (round-trip) estuvieron entre 3 y 5 segundos en condiciones de red estables, aumentando a 12 segundos con conectividad intermitente.

4.7. Comparación con otras soluciones

Finalmente, se realizó una comparación entre la solución desarrollada y otras alternativas comerciales y académicas, considerando criterios como costo, flexibilidad, escalabilidad y adecuación a entornos con conectividad limitada.