



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:

Esp. Ing. Martín Aníbal Lachesci (FIUBA)
Esp. Ing. Emiliano Rodríguez Mora (FIUBA)
Esp. Ing. Martín Duarte (FIUBA)

Ciudad de Buenos Aires, diciembre de 2025



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, diciembre de 2025

Índice general

Resumen	1
1. Introducción general	
1.1. Motivación	1
1.1.1. Contexto actual	1
1.1.2. Limitaciones del desarrollo previo	1
1.1.3. Impacto esperado	2
1.1.4. Diseño conceptual	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Estado del arte y propuesta de valor	3
1.4. Alcance	3
2. Introducción específica	5
2.1. Protocolos y comunicación	5
2.2. Componentes de hardware utilizados	6
2.3. Tecnologías de software aplicadas	8
2.4. Software de control de versiones	10
3. Diseño e implementación	11
3.1. Arquitectura del sistema	11
3.1.1. Flujo de datos	12
3.2. Arquitectura del nodo	14
3.3. Desarrollo del backend	16
3.3.1. Arquitectura y tecnologías	16
3.3.2. Funcionalidades principales	17
3.3.3. Organización en controladores	18
3.3.4. Mapa de endpoints	18
3.3.5. Seguridad y extensibilidad	19
3.4. Desarrollo del frontend	20
3.4.1. Arquitectura y tecnologías	20
3.4.2. Funcionalidades principales	20
3.4.3. Integración con el backend	21
3.5. Despliegue del sistema	21
3.5.1. Entorno productivo e integración continua	21
3.5.2. Monitoreo post-implantación	22
3.6. Integración con la infraestructura existente	22
4. Ensayos y resultados	23
4.1. Banco de pruebas	23
4.1.1. Diseño del entorno de pruebas	23
4.1.2. Metodología experimental	24

Índice general

Resumen	1
1. Introducción general	1
1.1. Motivación	1
1.1.1. Contexto actual	1
1.1.2. Limitaciones del desarrollo previo	1
1.1.3. Impacto esperado	2
1.1.4. Diseño conceptual	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Estado del arte y propuesta de valor	3
1.4. Alcance	3
2. Introducción específica	5
2.1. Protocolos y comunicación	5
2.2. Componentes de hardware utilizados	6
2.3. Tecnologías de software aplicadas	8
2.4. Software de control de versiones	10
3. Diseño e implementación	11
3.1. Arquitectura del sistema	11
3.1.1. Flujo de datos	12
3.2. Arquitectura del nodo	14
3.3. Desarrollo del backend	16
3.3.1. Arquitectura y tecnologías	16
3.3.2. Funcionalidades principales	17
3.3.3. Organización en controladores	18
3.3.4. Mapa de endpoints	18
3.3.5. Seguridad y extensibilidad	19
3.4. Desarrollo del frontend	21
3.4.1. Arquitectura y tecnologías	21
3.4.2. Funcionalidades principales	21
3.4.3. Integración con el backend	22
3.5. Despliegue del sistema	23
3.5.1. Entorno productivo e integración continua	23
3.5.2. Monitoreo post-implantación	24
3.6. Integración con la infraestructura existente	24
4. Ensayos y resultados	25
4.1. Banco de pruebas	25
4.1.1. Diseño del entorno de pruebas	25
4.1.2. Metodología experimental	26

4.1.3. Resultados y observaciones	25
4.2. Pruebas de la API REST	26
4.2.1. Objetivos y alcance	26
4.2.2. Metodología de prueba	26
4.2.3. Resultados obtenidos	27
Medición	27
Comando	28
Respuesta	29
4.3. Pruebas de componentes	30
4.3.1. Enfoque general	30
4.3.2. Resultados por componente	31
4.4. Pruebas del frontend	32
4.4.1. Objetivos	32
4.4.2. Metodología	33
4.4.3. Resultados y observaciones	37
4.5. Prueba final de integración	38
4.5.1. Metodología de la prueba	38
4.5.2. Resultados obtenidos	43
4.6. Comparación con otras soluciones	44
5. Conclusiones	47
5.1. Resultados y metas	47
5.2. Trabajo futuro	48
Bibliografía	49

4.1.3. Resultados y observaciones	26
4.2. Pruebas de la API REST	27
4.2.1. Objetivos y alcance	27
4.2.2. Metodología de prueba	27
4.2.3. Resultados obtenidos	28
4.3. Pruebas de componentes	29
4.3.1. Enfoque general	29
4.3.2. Resultados por componente	30
4.4. Pruebas del frontend	30
4.4.1. Objetivos	30
4.4.2. Metodología	31
4.4.3. Resultados y observaciones	35
4.5. Prueba final de integración	36
4.5.1. Metodología de la prueba	36
4.5.2. Resultados obtenidos	37
4.6. Comparación con otras soluciones	38
5. Conclusiones	41
5.1. Resultados y metas	41
5.2. Trabajo futuro	42

Bibliografía**43**

Índice de figuras

1.1. Diagrama en bloques del sistema.	4
2.1. Contador de tránsito DTEC ¹ .	6
2.2. Módulo RS-232/TTL ² .	7
2.3. Microcontrolador ESP32-C3 utilizado en los nodos de campo ³ .	7
2.4. Módulo SIM800L ⁴ .	8
3.1. Diagrama de arquitectura del sistema y el flujo de datos.	12
3.2. Diagrama de secuencia del flujo de datos.	13
3.3. Diagrama de conexión entre los módulos del sistema.	15
3.4. Fotografía contador de tránsito DTEC instalado en campo ⁵ .	16
3.5. Diagrama de flujo de información del Backend.	17
3.6. Diagrama con la disposición de los controladores y flujo de dependencias.	18
3.7. Diagrama de estructura de los componentes por pantalla.	20
3.8. Diagrama de flujo de comunicación con el backend.	21
4.1. Fotografía banco de pruebas.	24
4.2. Registros de detecciones vehiculares almacenados en la base de datos MySQL.	25
4.3. Intercambio de mensajes entre el backend y el nodo de campo mediante MQTT.	25
4.4. Solicitud POST /api/medicion con todos los campos completos.	27
4.5. Solicitud POST /api/medicion con campos faltantes.	28
4.6. Solicitud POST /api/comando exitosa.	28
4.7. Solicitud POST /api/comando con error por datos incompletos.	29
4.8. Solicitud POST /api/respuesta exitosa.	29
4.9. Solicitud POST /api/respuesta con error de validación.	29
4.10. Interacción entre el nodo de campo (ESP32-C3 + SIM800L) y el backend.	32
4.11. Pantalla de inicio de sesión del frontend.	34
4.12. Panel principal con visualización del listado de dispositivos.	34
4.13. Panel de visualización del dispositivo.	35
4.14. Panel de visualización del dispositivo: preparación para la ejecución de un comando y su ejecución.	36
4.15. Panel de visualización del dispositivo: ejecución de un comando.	36
4.16. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y la respuesta pendiente.	36
4.17. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y su respuesta.	36
4.18. Panel de visualización del historial de mediciones.	37
4.19. Publicación de una medición por parte del módulo ESP32-C3 y recepción en el backend.	39

Índice de figuras

1.1. Diagrama en bloques del sistema.	4
2.1. Contador de tránsito DTEC ¹ .	6
2.2. Módulo RS-232/TTL ² .	7
2.3. Microcontrolador ESP32-C3 utilizado en los nodos de campo ³ .	7
2.4. Módulo SIM800L ⁴ .	8
3.1. Diagrama de arquitectura del sistema y el flujo de datos.	12
3.2. Diagrama de secuencia del flujo de datos.	14
3.3. Diagrama de conexión entre los módulos del sistema.	15
3.4. Fotografía contador de tránsito DTEC instalado en campo ⁵ .	16
3.5. Diagrama de flujo de información del Backend.	17
3.6. Diagrama con la disposición de los controladores y flujo de dependencias.	19
3.7. Diagrama de estructura de los componentes por pantalla.	22
3.8. Diagrama de flujo de comunicación con el backend.	23
4.1. Fotografía banco de pruebas.	26
4.2. Pantalla de inicio de sesión del frontend.	32
4.3. Panel principal con visualización del listado de dispositivos.	32
4.4. Panel de visualización del dispositivo: datos generales.	33
4.5. Panel de visualización del dispositivo: preparación para la ejecución de un comando.	33
4.6. Panel de visualización del dispositivo: ejecución de un comando.	34
4.7. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y la respuesta pendiente.	34
4.8. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y su respuesta.	35
4.9. Panel de visualización del historial de mediciones.	35
4.10. Fotografía pruebas finales de integración.	37

VIII

4.20. Visualización de la medición recibida en la interfaz web del sistema.	40
4.21. Generación de un comando desde la interfaz web.	40
4.22. Visualización consola del módulo ESP32-C3 que registra la recepción del comando.	41
4.23. Intercambio de mensajes entre el ESP32-C3 y el backend durante la recepción y procesamiento de una respuesta.	42
4.24. Visualización de la respuesta del dispositivo en la interfaz web tras el procesamiento exitoso en el backend.	43

Índice de tablas

3.1. Endpoints REST principales	19
4.1. Resultados de pruebas de endpoints REST	30
4.2. Comparación de la solución propuesta	45

Índice de tablas

3.1. Endpoints REST principales	20
4.1. Resultados de pruebas de endpoints REST	29
4.2. Comparación de la solución propuesta	39

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se describe la arquitectura global del prototipo, se detalla cada módulo de hardware y software que lo compone, y se documentan las decisiones de implementación y los criterios de diseño. 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.

El sistema se organiza en cinco bloques con funciones definidas que aseguran un flujo de datos confiable, eficiente y seguro durante la captura, transmisión, procesamiento y visualización de eventos, que garantiza trazabilidad, persistencia y control remoto. A continuación, se describen los bloques y sus responsabilidades.

- Dispositivo de campo: integra el contador (RS-232), un ESP32-C3 y un módem SIM800L. El firmware, basado en [ESP-IDF](#), lee y parsea tramas, [valida](#) y normaliza campos, agrega sello UTC, encola eventos y publica [mensajes](#) mediante MQTT. Gestiona reinicios, comandos y telemetría, y mantiene una [persistencia](#) mínima (últimas tramas y comandos pendientes) para [recuperación](#) tras reinicio.
- Transporte (broker MQTT): funciona como bus de mensajes desacoplado. Se sugiere usar Eclipse Mosquitto en la etapa inicial y considerar brokers gestionados para escalar. Implementa autenticación, control de tópicos y cifrado. Se emplean tópicos jerárquicos por dispositivo para facilitar filtrado y autorización:
 - dispositivo/{id}/medicion
 - dispositivo/{id}/comando
 - dispositivo/{id}/respuesta
- Servidor central: el servidor central reúne dos responsabilidades principales:

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se describe la arquitectura global del prototipo, se detalla cada módulo de hardware y software que lo compone, y se documentan las decisiones de implementación y los criterios de diseño. 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.

El sistema se organiza en cinco bloques con funciones definidas que aseguran un flujo de datos confiable, eficiente y seguro durante la captura, transmisión, procesamiento y visualización de eventos, garantizando trazabilidad, persistencia y control remoto.

- Dispositivo de campo: integra el contador (RS-232), un ESP32-C3 y un módem SIM800L. El firmware, basado en [ESP-IDF](#), lee y parsea tramas, [valida](#) y normaliza campos, agrega sello UTC, encola eventos y publica [mensajes](#) por MQTT. Gestiona reinicios, comandos y telemetría, y mantiene una [persistencia](#) mínima (últimas tramas y comandos pendientes) para [recuperación](#) tras reinicio.
- Transporte (broker MQTT): funciona como bus de mensajes desacoplado. Se sugiere usar Eclipse Mosquitto en la etapa inicial y considerar brokers gestionados para escalar. Implementa autenticación, control de tópicos y cifrado. Se emplean tópicos jerárquicos por dispositivo para facilitar filtrado y autorización:
 - dispositivo/{id}/medicion
 - dispositivo/{id}/comando
 - dispositivo/{id}/respuesta
- Servidor central: el servidor central reúne dos responsabilidades principales:

3.1. Arquitectura del sistema

13

- Detección: el contador detecta un paso, acumula y en determinado intervalo 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 las mediciones en el tópico MQTT dispositivo/id/medicion.
- 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 /app/comando al backend, que crea un comm_id único y publica en dispositivo/id/comando.
- Recepción nodo/Entrega al contador: el ESP32-C3 en dispositivo/id/comando 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 dispositivo/id/respuesta 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 respuesta (campo valor, ack_ts) y notifica a la UI para que el operador vea el resultado.

La figura 3.2 muestra el diagrama de secuencia del flujo de datos.

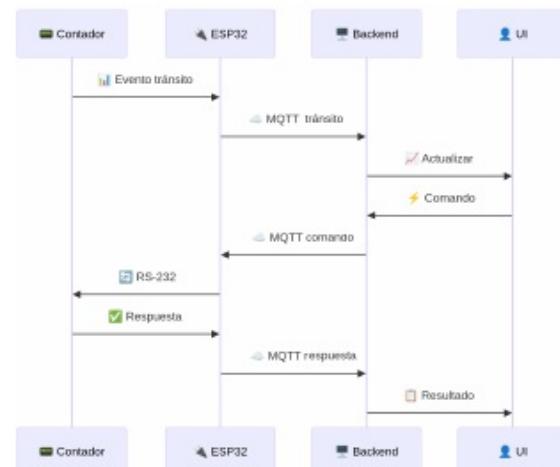


FIGURA 3.2. Diagrama de secuencia del flujo de datos.

3.1. Arquitectura del sistema

13

- Detección: el contador detecta un paso, acumula y en determinado intervalo 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 las mediciones en el tópico MQTT dispositivo/id/medicion.
- 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 /app/comando al backend, que crea un comm_id único y publica en dispositivo/id/comando.
- Recepción nodo/Entrega al contador: el ESP32-C3 en dispositivo/id/comando 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 dispositivo/id/respuesta 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 respuesta (campo valor, ack_ts) y notifica a la UI para que el operador vea el resultado.

3.2. Arquitectura del nodo

La arquitectura de cada nodo se diseñó con el objetivo de reutilizar los contadores de tránsito actualmente desplegados en las rutas nacionales. Cada nodo integra varios módulos que permiten la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos de tránsito:

- Contador de tránsito modelo DTEC: dispositivo encargado de detectar el paso de vehículos y generar tramas de datos con la información del evento.
- 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).
- 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.
- 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.
- Alimentación y montaje: para garantizar el funcionamiento continuo del nodo en entornos de campo, se deben considerar dos aspectos fundamentales:
 - Fuente de alimentación: se implementó un sistema de energía basado en una batería interna recargable, específicamente dimensionada para cubrir los picos de consumo del módulo SIM800L durante las transmisiones de datos. La autonomía del sistema está garantizada mediante un panel solar que mantiene la carga de la batería de forma continua.

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, evitando caídas de voltaje que puedan reiniciar el sistema.

La figura 3.3 se presenta el diagrama de conexión entre los módulos del sistema, detallando las líneas de comunicación serie RS232, la interfaz UART entre el microcontrolador y el módem GSM, así como la distribución de la alimentación eléctrica y los circuitos de estabilización de potencia.

La figura 3.2 muestra el diagrama de secuencia del flujo de datos.

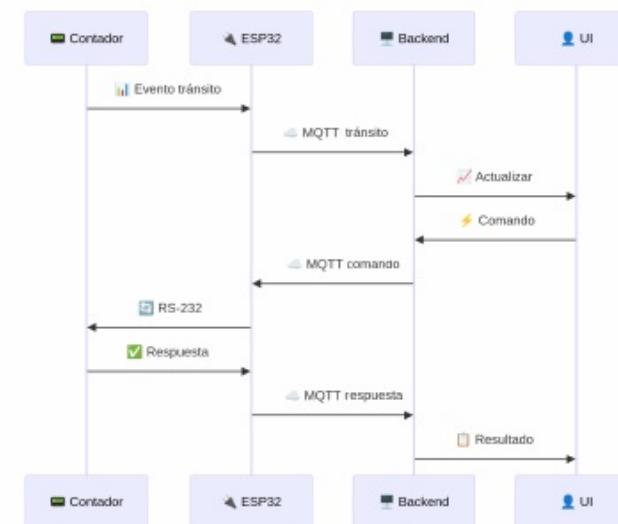


FIGURA 3.2. Diagrama de secuencia del flujo de datos.

3.2. Arquitectura del nodo

La arquitectura de cada nodo se diseñó con el objetivo de reutilizar los contadores de tránsito actualmente desplegados en las rutas nacionales. Cada nodo integra varios módulos que permiten la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos de tránsito:

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

3.2. Arquitectura del nodo

15

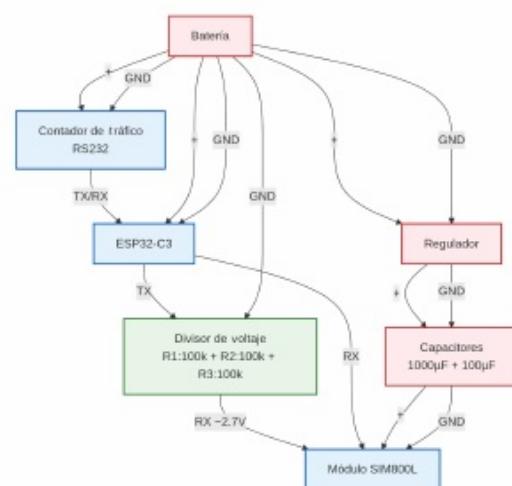


FIGURA 3.3. Diagrama de conexión entre los módulos del sistema.

- Carcasa y gabinete: tanto el contador como el módulo de comunicación remota (ESP32-C3 y SIM800L) cuentan con su propia carcasa de protección y, adicionalmente, ambos se alojan en un gabinete metálico estandarizado ya existente en la infraestructura vial, diseñado para resistir humedad, polvo y vibraciones. Esta solución aprovecha la protección ambiental, disipación térmica y blindaje electromagnético del gabinete original, que garantiza la confiabilidad del sistema en condiciones de intemperie.

En la figura 3.4 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.

3.2. Arquitectura del nodo

15

- Alimentación y montaje: para garantizar el funcionamiento continuo del nodo en entornos de campo, se deben considerar dos aspectos fundamentales:

- Fuente de alimentación: se implementó un sistema de energía basado en una batería interna recargable, específicamente dimensionada para cubrir los picos de consumo del módulo SIM800L durante las transmisiones de datos. La autonomía del sistema está garantizada mediante un panel solar que mantiene la carga de la batería de forma continua.

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, evitando caídas de voltaje que puedan reiniciar el sistema.

La figura 3.3 se presenta el diagrama de conexión entre los módulos del sistema, detallando las líneas de comunicación serie RS232, la interfaz UART entre el microcontrolador y el módem GSM, así como la distribución de la alimentación eléctrica y los circuitos de estabilización de potencia.

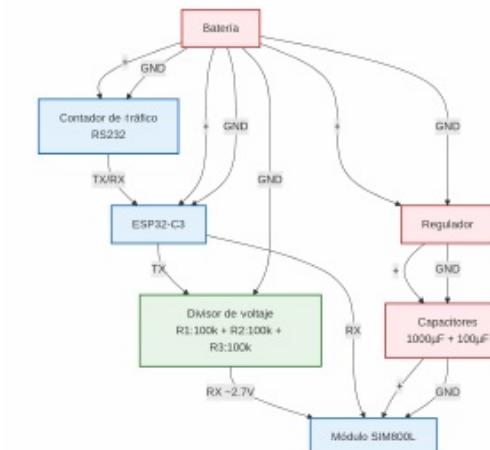


FIGURA 3.3. Diagrama de conexión entre los módulos del sistema.

- Carcasa y gabinete: tanto el contador como el módulo de comunicación remota (ESP32-C3 y SIM800L) cuentan con su propia carcasa de protección y, adicionalmente, ambos se alojan en un gabinete metálico estandarizado ya existente en la infraestructura vial, diseñado para resistir humedad, polvo y vibraciones. Esta solución aprovecha la protección ambiental, disipación térmica y blindaje electromagnético del



FIGURA 3.4. Fotografía contador de tránsito DTEC instalado en campo¹.

3.3. Desarrollo del backend

El backend es el núcleo lógico del sistema, encargado de integrar dispositivos, base de datos e interfaz. Su diseño prioriza la modularidad, escalabilidad y seguridad, con tecnologías comunes en entornos IoT.

3.3.1. Arquitectura y tecnologías

El servicio se implementó en Node.js con Express, organizando la aplicación en controladores, rutas y middlewares, y usando Sequelize [27], un ORM [35] que facilita los modelos y asegura independencia de la persistencia. La comunicación con los dispositivos se realiza mediante tópicos MQTT en Eclipse Mosquitto. Las mediciones se publican en el tópico dispositivo/id/medicion, mientras que el backend se encarga de validarlas y almacenarlas en MySQL. Por su parte, los comandos y respuestas se gestionan mediante los tópicos

¹Imagen tomada de <http://transito.vialidad.gob.ar/>

gabinete original, que garantiza la confiabilidad del sistema en condiciones de intemperie.

En la figura 3.4 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 3.4. Fotografía contador de tránsito DTEC instalado en campo¹.

3.3. Desarrollo del backend

El backend es el núcleo lógico del sistema, encargado de integrar dispositivos, base de datos e interfaz. Su diseño prioriza la modularidad, escalabilidad y seguridad, con tecnologías comunes en entornos IoT.

¹Imagen tomada de <http://transito.vialidad.gob.ar/>

3.3. Desarrollo del backend

17

dispositivo/id/comando y dispositivo/id/respuesta, respectivamente. El despliegue del sistema se realiza con Docker Compose [32], que permite ejecutar el backend, base de datos y el broker [17] en contenedores independientes. Además, el registro y la trazabilidad se gestionan con Winston [28] y Morgan [29], lo que garantiza un monitoreo completo del sistema. En la figura 3.5 se observa el diagrama de flujo de información del backend.

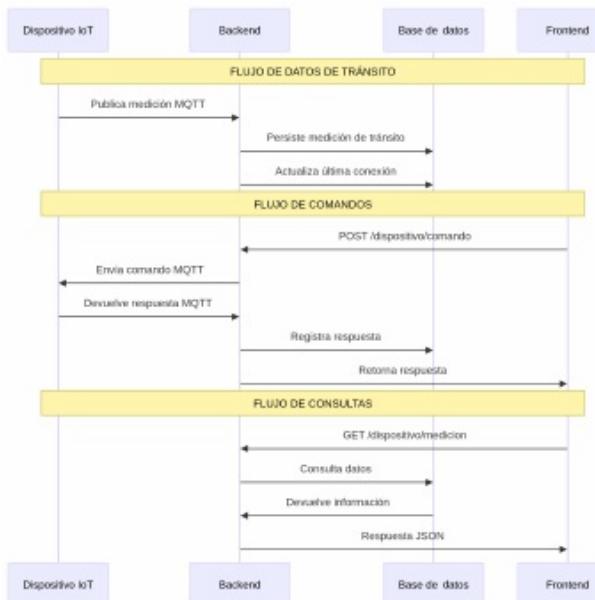


FIGURA 3.5. Diagrama de flujo de información del Backend.

3.3.2. Funcionalidades principales

El sistema cuenta con varias funcionalidades esenciales que permiten gestionar de manera eficiente los dispositivos, los eventos generados por ellos, los comandos enviados y la seguridad de acceso. Estas funcionalidades se detallan a continuación:

- 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. Desarrollo del backend

17

3.3.1. Arquitectura y tecnologías

El servicio se implementó en Node.js con Express, organizando la aplicación en controladores, rutas y middlewares, y usando Sequelize [27], un ORM [35] que facilita los modelos y asegura independencia de la persistencia.

La comunicación con los dispositivos se realiza mediante tópicos MQTT en Eclipse Mosquitto.

Las mediciones se publican en tópico dispositivo/id/medición, mientras que el backend se encarga de validarlas y almacenarlas en MySQL. Por su parte, los comandos y respuestas se gestionan mediante los tópicos dispositivo/id/comando y dispositivo/id/respuesta, respectivamente. El despliegue del sistema se realiza con Docker Compose [32], que permite ejecutar backend, base de datos y broker [17] en contenedores independientes. Además, el registro y la trazabilidad se gestionan con Winston [28] y Morgan [29], lo que garantiza un monitoreo completo del sistema.

En la figura 3.5 se observa el diagrama de flujo de información del backend.

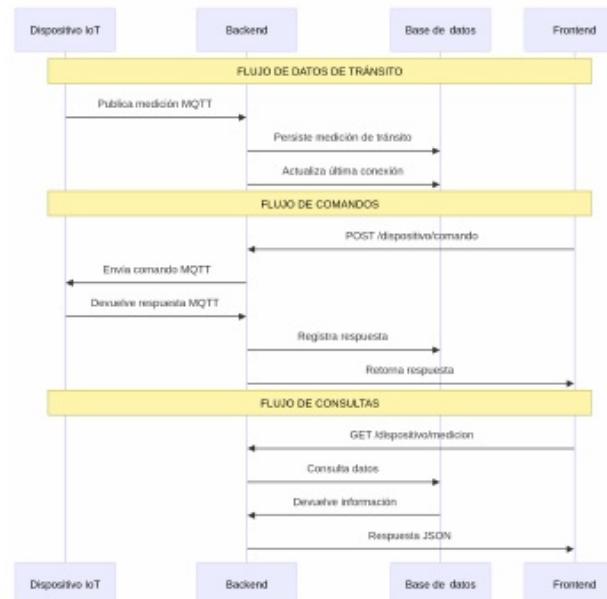


FIGURA 3.5. Diagrama de flujo de información del Backend.

3.3.3. Organización en controladores

La lógica de negocio del backend se organiza en controladores, cada uno asociado a un recurso del sistema, lo que favorece la separación de responsabilidades, el mantenimiento y la escalabilidad. Los principales controladores son:

- DispositivoController: gestiona las operaciones CRUD sobre los dispositivos de campo, además de registrar los eventos recibidos vía MQTT y asociarlos a un dispositivo específico.
- MedicionController: encapsula la lógica de ingesta de eventos de tránsito, validación de payloads y persistencia en la base de datos.
- ComandoController: administra la emisión y seguimiento de comandos remotos, generando un `cmd_id` único.
- RespuestaController: centraliza la recepción de estados y telemetría (batería, conectividad), en respuesta al comando que se envía, esto garantiza que la base de datos refleje la situación en tiempo real.
- UserController: implementa el ciclo de vida de usuarios y la autenticación mediante JWT[36], así como la validación de permisos en cada endpoint.

En la figura 3.6 se observa el diagrama con la disposición de los controladores y flujo de dependencias.

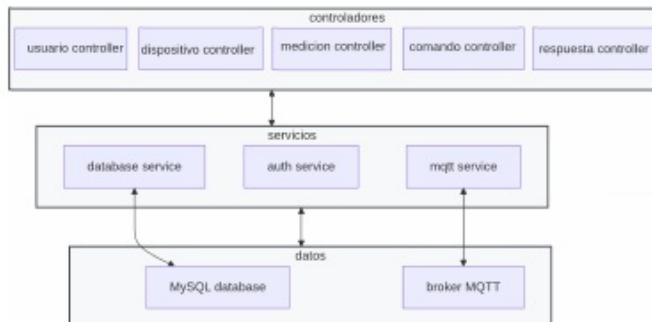


FIGURA 3.6. Diagrama con la disposición de los controladores y flujo de dependencias.

3.3.4. Mapa de endpoints

El backend expone una serie de endpoints REST que conforman la interfaz principal de comunicación con los servicios de aplicación y los dispositivos de campo. En la tabla 3.1 se presentan los endpoints generales.

3.3.2. Funcionalidades principales

El sistema cuenta con varias funcionalidades esenciales que permiten gestionar de manera eficiente los dispositivos, los eventos generados por ellos, los comandos enviados y la seguridad de acceso. Estas funcionalidades se detallan a continuación:

- 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, lo que favorece la separación de responsabilidades, el mantenimiento y la escalabilidad. Los principales controladores son:

- DispositivoController: gestiona las operaciones CRUD sobre los dispositivos de campo, además de registrar los eventos recibidos vía MQTT y asociarlos a un dispositivo específico.
- MedicionController: encapsula la lógica de ingesta de eventos de tránsito, validación de payloads y persistencia en la base de datos.
- ComandoController: administra la emisión y seguimiento de comandos remotos, generando un `cmd_id` único.
- RespuestaController: centraliza la recepción de estados y telemetría (batería, conectividad), en respuesta al comando que se envía, esto garantiza que la base de datos refleje la situación en tiempo real.
- UserController: implementa el ciclo de vida de usuarios y la autenticación mediante JWT[36], así como la validación de permisos en cada endpoint.

En la figura 3.6 se observa el diagrama con la disposición de los controladores y flujo de dependencias.

3.3. Desarrollo del backend

19

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

Endpoint	Controlador	Descripción
GET /dispositivo	DispositivoController	Lista todos los dispositivos registrados
GET /dispositivo/{id}	DispositivoController	Devuelve información de un dispositivo específico
POST /dispositivo	DispositivoController	Alta de un nuevo dispositivo
PATCH /dispositivo/{id}	DispositivoController	Actualización de atributos de un dispositivo
DELETE /dispositivo/{id}	DispositivoController	Eliminación de un dispositivo
POST /medicion	MedicionController	Crea mediciones de un dispositivo
GET /medicion/dispositivo/{id}	MedicionController	Consultar mediciones por dispositivo
GET /medicion/range	MedicionController	Consultar mediciones por rango temporal
POST /comando	ComandoController	Crear un comando remoto y publicarlo en MQTT
GET /comando/{id}	ComandoController	Consultar un comando
GET /respuesta/{id}	RespuestaController	Consultar respuesta de un comando
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.

3.3. Desarrollo del backend

19

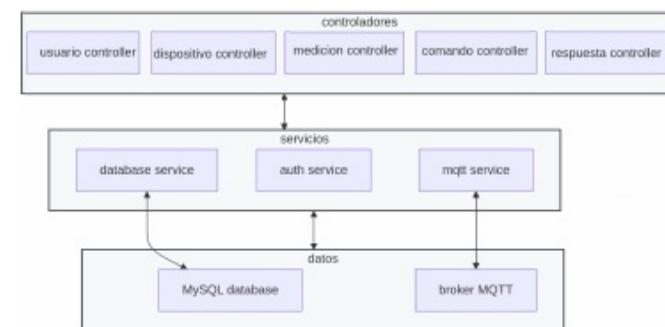


FIGURA 3.6. Diagrama con la disposición de los controladores y flujo de dependencias.

3.3.4. Mapa de endpoints

El backend expone una serie de endpoints REST que conforman la interfaz principal de comunicación con los servicios de aplicación y los dispositivos de campo. En la tabla 3.1 se presentan los endpoints generales.

3.4. Desarrollo del frontend

El frontend, desarrollado como *Single Page Application* en Ionic con Angular y TypeScript, ofrece una interfaz moderna y responsive que permite autenticación, supervisión en tiempo real, consulta de históricos y envío de comandos a los nodos.

3.4.1. Arquitectura y tecnologías

La aplicación se compone de módulos reutilizables de Ionic, optimizados para escritorio y móviles. La comunicación con el backend se realiza mediante API REST y, para actualizaciones en tiempo real, a través de WebSocket.

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: permite emitir órdenes remotas al nodo (reset, cambio u obtención de parámetros, etc.). El sistema verifica el acuse de recibo y muestra el resultado (ok, failed, timeout o value).

En la figura 3.7 se observa la estructura de los componentes por pantalla.

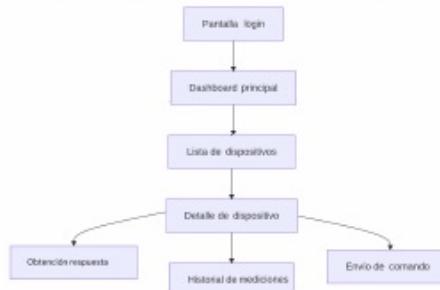


FIGURA 3.7. Diagrama de estructura de los componentes por pantalla.

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

Endpoint	Controlador	Descripción
GET /dispositivo	DispositivoController	Lista todos los dispositivos registrados
GET /dispositivo/{id}	DispositivoController	Devuelve información de un dispositivo específico
POST /dispositivo	DispositivoController	Alta de un nuevo dispositivo
PATCH /dispositivo/{id}	DispositivoController	Actualización de atributos de un dispositivo
DELETE /dispositivo/{id}	DispositivoController	Eliminación de un dispositivo
POST /medicion	MedicionController	Crea mediciones de un dispositivo
GET /medicion/dispositivo/{id}	MedicionController	Consultar mediciones por dispositivo
GET /medicion/range	MedicionController	Consultar mediciones por rango temporal
POST /comando	ComandoController	Crear un comando remoto y publicarlo en MQTT
GET /comando/{id}	ComandoController	Consultar un comando
GET /respuesta/{id}	RespuestaController	Consultar respuesta de un comando
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.

3.5. Despliegue del sistema

21

3.4.3. Integración con el backend

El frontend utiliza los endpoints REST del backend (ver Sección 3.1), enviando en cada petición el token JWT obtenido en el login para asegurar el acceso autorizado. Las respuestas JSON se interpretan en tiempo real, manteniendo la interfaz sincronizada con el estado de los dispositivos. En la figura 3.8 se observa el diagrama de flujo de comunicación con el backend.

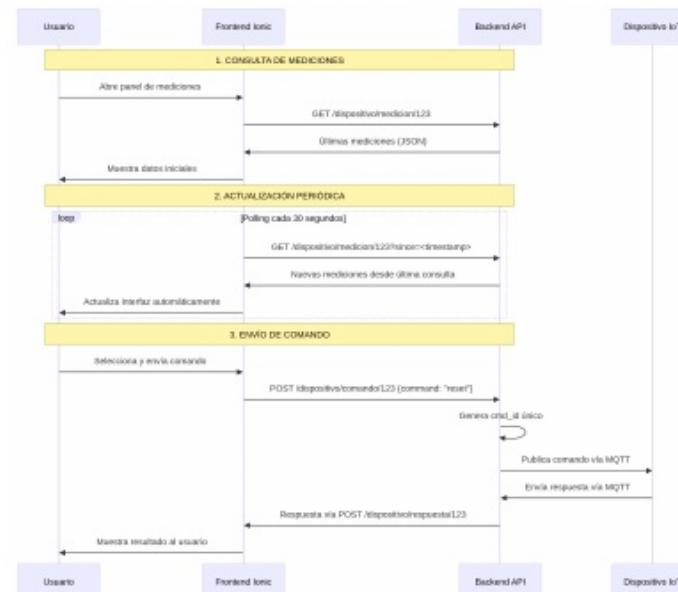


FIGURA 3.8. Diagrama de flujo de comunicación con el backend.

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 e integración continua

El entorno productivo se implementa bajo un esquema de *cloud on-premise*, es decir, una nube privada alojada en los servidores locales de Vialidad Nacional. Este enfoque combina las ventajas de la virtualización y la gestión centralizada propias del entorno *cloud*, con el control, la seguridad y la independencia de un despliegue local.

3.4. Desarrollo del frontend

21

3.4. Desarrollo del frontend

El frontend, desarrollado como *Single Page Application* en Ionic con Angular y TypeScript, ofrece una interfaz moderna y responsive que permite autenticación, supervisión en tiempo real, consulta de históricos y envío de comandos a los nodos.

3.4.1. Arquitectura y tecnologías

La aplicación se compone de módulos reutilizables de Ionic, optimizados para escritorio y móviles. La comunicación con el backend se realiza mediante API REST y, para actualizaciones en tiempo real, a través de WebSocket.

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: permite emitir órdenes remotas al nodo (reset, cambio u obtención de parámetros, etc.). El sistema verifica el acuse de recibo y muestra el resultado (ok, failed, timeout o value).

En la figura 3.7 se observa la estructura de los componentes por pantalla.

Para la orquestación se emplea Docker Compose, que permite instanciar todos los servicios (broker MQTT, API REST, base de datos y aplicación web) en contenedores aislados pero comunicados entre sí. De esta forma, el sistema puede escalar, actualizarse y mantenerse de manera unificada, preservando la trazabilidad y la integridad de los datos.

La integración continua (CI) automatiza la construcción, prueba y despliegue del sistema. Cada actualización del repositorio genera nuevas imágenes Docker, ejecuta validaciones automáticas y despliega los servicios en el entorno *on-premise*, que garantiza coherencia entre versiones y reduciendo errores manuales.

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.

3.6. 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.

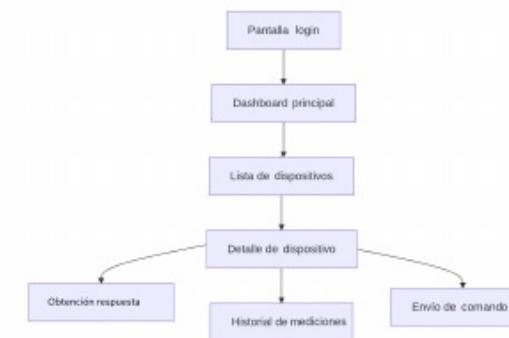


FIGURA 3.7. Diagrama de estructura de los componentes por pantalla.

3.4.3. Integración con el backend

El frontend utiliza los endpoints REST del backend (ver Sección 3.1), enviando en cada petición el token JWT obtenido en el login para asegurar el acceso autorizado. Las respuestas JSON se interpretan en tiempo real, manteniendo la interfaz sincronizada con el estado de los dispositivos.

En la figura 3.8 se observa el diagrama de flujo de comunicación con el backend.

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. Banco de pruebas

El banco de pruebas se diseñó con el propósito de reproducir las condiciones reales de operación del sistema de detección de tránsito. De este modo, se garantizó la validez de los resultados dentro de un entorno controlado. El montaje permitió evaluar la robustez del firmware, la estabilidad de las comunicaciones y la capacidad del backend para procesar eventos en distintos escenarios de conectividad. El objetivo principal consistió en analizar el comportamiento integral del sistema ante situaciones representativas de campo, que incluyeron la pérdida temporal del enlace GPRS, el almacenamiento local de eventos y la recuperación automática una vez restablecida la conexión.

4.1.1. Diseño del entorno de pruebas

El banco se compuso de los siguientes elementos principales:

- Contador de tránsito DTEC: configurado para generar tramas de detección simuladas con distintos intervalos de paso vehicular.
- Nodo de campo (ESP32-C3 + SIM800L): encargado de recibir las tramas RS-232, almacenarlas temporalmente y transmitirlas mediante MQTT al servidor central.
- Servidor de backend: implementado en Node.js/Express, con base de datos MySQL y broker Eclipse Mosquitto, desplegado mediante Docker Compose.
- Interfaz web de monitoreo: utilizada para visualizar en tiempo real los eventos recibidos y el estado de los dispositivos.

La figura 4.1 se muestra el banco de pruebas utilizado.

3.5. Despliegue del sistema

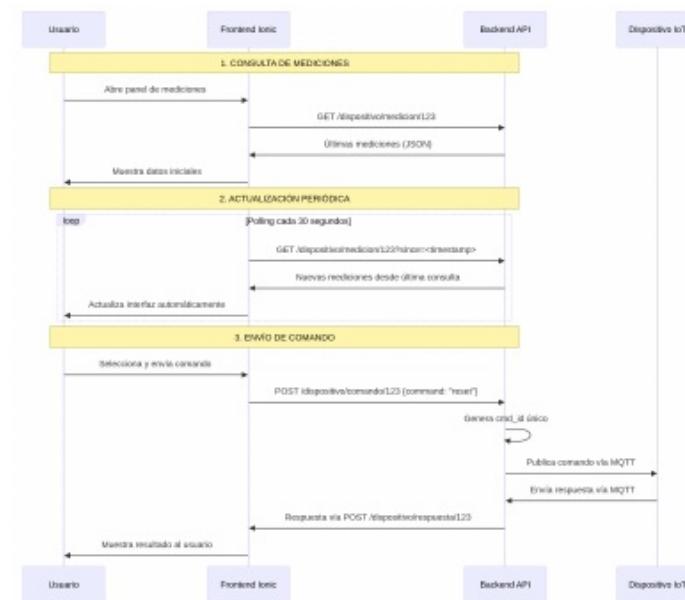


FIGURA 3.8. Diagrama de flujo de comunicación con el backend.

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 e integración continua

El entorno productivo se implementa bajo un esquema de *cloud on-premise*, es decir, una nube privada alojada en los servidores locales de Vialidad Nacional. Este enfoque combina las ventajas de la virtualización y la gestión centralizada propias del entorno *cloud*, con el control, la seguridad y la independencia de un despliegue local.

Para la orquestación se emplea Docker Compose, que permite instanciar todos los servicios (broker MQTT, API REST, base de datos y aplicación web) en contenedores aislados pero comunicados entre sí. De esta forma, el sistema puede escalar, actualizarse y mantenerse de manera unificada, preservando la trazabilidad y la integridad de los datos.

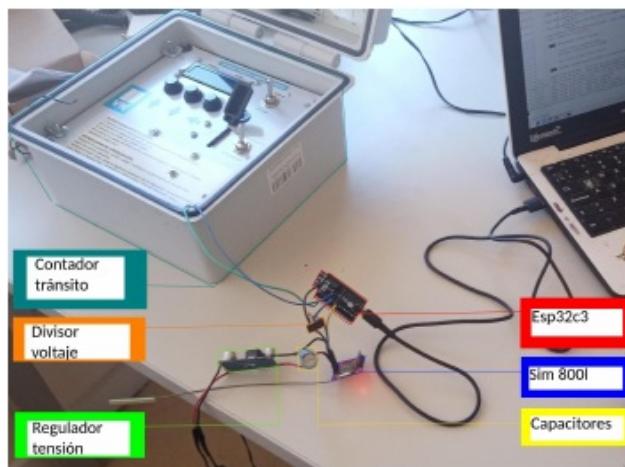


FIGURA 4.1. Fotografía banco de pruebas.

El montaje permitió reproducir tres escenarios de prueba diferenciados:

1. Conectividad estable: transmisión continua sin pérdidas de enlace.
2. Conectividad intermitente: cortes GPRS aleatorios con verificación de la persistencia de los datos en la cola interna del nodo.
3. Modo desconectado prolongado: interrupción total de red durante intervalos extensos, lo que permitió evaluar la capacidad del firmware para conservar eventos en memoria y transmitirlos al restablecer la conexión.

4.1.2. Metodología experimental

Las pruebas se realizaron mediante la generación de tramas seriales controladas que representaban detecciones vehiculares. Se empleó un módulo de simulación que envió secuencias de tramas RS-232 al ESP32-C3. Durante cada ensayo se registraron los tiempos de procesamiento y la cantidad de eventos almacenados en la cola FIFO.

Para simular la pérdida de conectividad, se interrumpió manualmente el enlace GPRS del módulo SIM800L. Se verificó que los mensajes no enviados quedaran en cola local y que, una vez restablecida la conexión, los eventos se publicaran correctamente en los tópicos MQTT correspondientes:

- dispositivo/{id}/medicion
- dispositivo/{id}/respuesta

El backend registró la llegada de los eventos en la base de datos MySQL y comprobó su integridad, marcas de tiempo y ausencia de duplicaciones.

La integración continua (CI) automatiza la construcción, prueba y despliegue del sistema. Cada actualización del repositorio genera nuevas imágenes Docker, ejecuta validaciones automáticas y despliega los servicios en el entorno *on-premise*, que garantiza coherencia entre versiones y reduciendo errores manuales.

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.

3.6. 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.

4.1. Banco de pruebas

25

4.1.3. Resultados y observaciones

Los resultados experimentales demostraron que el sistema fue capaz de:

- Mantener la integridad de los datos en escenarios de conectividad inestable.
- Asegurar la entrega de eventos por medio de la cola FIFO implementada en el firmware.
- Ejecutar comandos remotos y recibir respuestas de forma confiable.
- Reanudar la transmisión después de cortes de red sin pérdida de información.

Se presentan a continuación ejemplos representativos de los resultados obtenidos durante la prueba. En la figura 4.2 se muestra la tabla `Medicion` en phpMyAdmin, con los registros almacenados en la base de datos MySQL. Cada uno es una detección vehicular procesada por el sistema, con su fecha, valor, carril y clasificación. Esto evidencia que el backend recibió y registró correctamente las mediciones enviadas por el nodo, incluso tras interrupciones de red.

medicionId	fecha	valor	carril	clasificacionId	dispositivoId	createdAt
328896	2025-10-15 17:00:00	33	2	1	1	2025-11-06 12:01:54
328897	2025-10-15 17:05:00	14	1	2	1	2025-11-06 12:02:11
328898	2025-10-15 17:10:00	38	2	2	1	2025-11-06 12:03:00
328899	2025-10-15 17:15:00	31	1	1	1	2025-11-06 12:03:51
328900	2025-10-15 17:15:00	31	1	1	1	2025-11-06 12:03:57
328901	2025-10-15 17:20:00	24	1	2	1	2025-11-06 12:05:48
328902	2025-10-15 17:25:00	17	2	2	1	2025-11-06 12:05:58
328903	2025-10-15 17:30:00	39	2	1	1	2025-11-06 12:06:21
329008	2025-10-15 17:45:00	25	2	2	1	2025-11-07 15:06:11

FIGURA 4.2. Registros de detecciones vehiculares almacenados en la base de datos MySQL.

En la figura 4.3 se presenta un ejemplo del intercambio de mensajes entre el servidor y el nodo de campo. En este caso, el backend ejecuta un comando remoto dirigido al dispositivo, publicado en el tópico MQTT `dispositivo/id/comando` y el nodo recibe dicho comando, lo procesa localmente y responde en el tópico `dispositivo/id/respuesta`. El mensaje de respuesta incluye el campo de `cmdId` y el valor asociado al comando ejecutado, lo que permite verificar el funcionamiento bidireccional del sistema.



FIGURA 4.3. Intercambio de mensajes entre el backend y el nodo de campo mediante MQTT.

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. Banco de pruebas

El banco de pruebas se diseñó con el propósito de reproducir las condiciones reales de operación del sistema de detección de tránsito. De este modo, se garantizó la validez de los resultados dentro de un entorno controlado. El montaje permitió evaluar la robustez del firmware, la estabilidad de las comunicaciones y la capacidad del backend para procesar eventos en distintos escenarios de conectividad.

El objetivo principal consistió en analizar el comportamiento integral del sistema ante situaciones representativas de campo, que incluyeron la pérdida temporal del enlace GPRS, el almacenamiento local de eventos y la recuperación automática una vez restablecida la conexión.

4.1.1. Diseño del entorno de pruebas

El banco se compuso de los siguientes elementos principales:

- Contador de tránsito DTEC: configurado para generar tramas de detección simuladas con distintos intervalos de paso vehicular.
- Nodo de campo (ESP32-C3 + SIM800L): encargado de recibir las tramas RS-232, almacenarlas temporalmente y transmitirlas mediante MQTT al servidor central.
- Servidor de backend: implementado en Node.js/Express, con base de datos MySQL y broker Eclipse Mosquitto, desplegado mediante Docker Compose.
- Interfaz web de monitoreo: utilizada para visualizar en tiempo real los eventos recibidos y el estado de los dispositivos.

La figura 4.1 se muestra el banco de pruebas utilizado.

4.2. Pruebas de la API REST

Esta sección presenta las pruebas realizadas sobre la API REST implementada en el backend del sistema. El propósito fue validar la interacción entre los componentes principales (backend, base de datos y broker MQTT) y comprobar la integridad, la seguridad y el rendimiento de las operaciones ofrecidas por los endpoints.

4.2.1. Objetivos y alcance

Los objetivos específicos que guiaron la planificación de las pruebas fueron los siguientes:

- Verificar la implementación correcta de los endpoints asociados a dispositivos, mediciones, comandos, respuestas y usuarios.
- Confirmar la persistencia y consistencia de los datos en la base de datos MySQL.
- Validar el esquema de autenticación y autorización mediante tokens JWT.
- Evaluar la integración con el broker MQTT para la publicación y recepción de mensajes.
- Medir el tiempo de respuesta y la estabilidad del servicio en diferentes condiciones de red y carga.
- Comprobar el manejo de errores y la coherencia de las respuestas ante solicitudes inválidas.

El alcance incluyó operaciones sincrónicas (consultas, altas, modificaciones y eliminaciones) y asíncronas (envío y recepción de comandos MQTT) con el fin de cubrir todos los flujos funcionales.

4.2.2. Metodología de prueba

El proceso de validación se realizó con la herramienta Postman [37]. Se elaboraron colecciones de solicitudes y scripts de prueba en la pestaña Tests, que verificaron los códigos de estado HTTP, la estructura de las respuestas y el contenido de los mensajes.

El Collection Runner [38] permitió ejecutar los casos de prueba en distintos entornos: desarrollo local, red simulada GPRS e integración con el broker MQTT. Los resultados se exportaron en formato JSON y se analizaron mediante la extensión Newman [39].

El middleware Morgan registró las solicitudes HTTP, mientras que el sistema de logging Winston almacenó eventos críticos del backend, como errores de conexión, tiempos de procesamiento y publicaciones MQTT. La trazabilidad obtenida permitió optimizar parámetros como la concurrencia de conexiones MySQL y la retención de mensajes MQTT.

Para evaluar la tolerancia a fallos, se interrumpieron deliberadamente las conexiones del broker MQTT y del enlace GPRS. Los mensajes en cola se reenviaron al restablecer la red sin generar duplicaciones ni pérdidas.



FIGURA 4.1. Fotografía banco de pruebas.

El montaje permitió reproducir tres escenarios de prueba diferenciados:

1. Conectividad estable: transmisión continua sin pérdidas de enlace.
2. Conectividad intermitente: cortes GPRS aleatorios con verificación de la persistencia de los datos en la cola interna del nodo.
3. Modo desconectado prolongado: interrupción total de red durante intervalos extensos, lo que permitió evaluar la capacidad del firmware para conservar eventos en memoria y transmitirlos al restablecer la conexión.

4.1.2. Metodología experimental

Las pruebas se realizaron mediante la generación de tramas seriales controladas que representaban detecciones vehiculares. Se empleó un módulo de simulación que envió secuencias de tramas RS-232 al ESP32-C3. Durante cada ensayo se registraron los tiempos de procesamiento y la cantidad de eventos almacenados en la cola FIFO.

Para simular la pérdida de conectividad, se interrumpió manualmente el enlace GPRS del módulo SIM800L. Se verificó que los mensajes no enviados quedaran en cola local y que, una vez restablecida la conexión, los eventos se publicaran correctamente en los tópicos MQTT correspondientes:

- dispositivo/{id}/medicion
- dispositivo/{id}/respuesta

El backend registró la llegada de los eventos en la base de datos MySQL y comprobó su integridad, marcas de tiempo y ausencia de duplicaciones.

4.1.3. Resultados y observaciones

Los resultados experimentales demostraron que el sistema fue capaz de:

- Mantener la integridad de los datos en escenarios de conectividad inestable.

4.2. Pruebas de la API REST

27

4.2.3. Resultados obtenidos

Las pruebas confirmaron la estabilidad y solidez de la API REST. Todas las operaciones CRUD se ejecutaron correctamente y devolvieron respuestas en formato JSON con los códigos HTTP apropiados.

- Autenticación: las solicitudes sin token o con credenciales inválidas fueron rechazadas con los códigos 401 y 403.
- Integración MQTT: los comandos se publicaron en los tópicos `dispositivo/{id}/comando`, y las respuestas se recibieron en `dispositivo/{id}/respuesta`, que actualizó los estados en la base de datos.
- Persistencia: no se registraron pérdidas ni duplicaciones de datos en la base de datos MySQL.
- Rendimiento: el tiempo de respuesta promedio fue de 210 ms en entorno local y de 550 ms bajo simulación GPRS, con un máximo de 1,2 s en carga alta.
- Manejo de errores: los mensajes de error fueron claros y usaron códigos estandarizados (400, 404, 423, 500).

A continuación, se presentan las pruebas realizadas en el backend, destinadas a verificar el correcto funcionamiento de los servicios implementados.

Medición

La entidad Medicion constituye el núcleo del sistema, ya que representa los datos enviados por el firmware al backend. A continuación, se muestran las pruebas realizadas sobre el endpoint POST `/api/medicion`, donde se validó la correcta recepción y verificación de los campos obligatorios.

En la figura 4.4 se observa el envío correcto de los datos requeridos: fecha, valor, carril, clasificacionId y dispositivoId. El backend almacena la medición y retorna una confirmación en formato JSON.

The screenshot shows a Postman collection named 'flow_control' with a 'Medicion' folder. Inside, there is a 'create' request. The URL is 'POST 127.0.0.1:8000/api/medicion'. The 'Body' tab is selected, showing a JSON payload:

```

1 {
2     "fecha": "2025-11-12T21:35:00-00:00",
3     "valor": 125,
4     "carril": 2,
5     "clasificacionId": 1,
6     "dispositivoId": 1
7 }
  
```

The response status is '201 Created' with a response time of '879 ms' and a size of '512 B'. The response body is:

```

1 {
2     "message": "Medición creada con éxito",
3     "status": 1,
4     "data": [
5         {
6             "medicionId": 329800,
7             "fecha": "2025-11-13T00:15:00.000Z",
8             "valor": 125,
9             "carril": 2,
10            "clasificacionId": 1,
11            "dispositivoId": 1,
12            "createdAt": "2025-11-13T00:15:00.453Z"
13        }
  
```

FIGURA 4.4. Solicitud POST `/api/medicion` con todos los campos completos.

4.2. Pruebas de la API REST

27

- Asegurar la entrega de eventos por medio de la cola FIFO implementada en el firmware.
- Ejecutar comandos remotos y recibir respuestas de forma confiable.
- Reanudar la transmisión después de cortes de red sin pérdida de información.

Los tiempos promedio de publicación por evento se mantuvieron entre 300 y 600 ms en escenarios con conexión estable, con demoras proporcionales durante los períodos de reconexión.

4.2. Pruebas de la API REST

Esta sección presenta las pruebas realizadas sobre la API REST implementada en el backend del sistema. El propósito fue validar la interacción entre los componentes principales (backend, base de datos y broker MQTT) y comprobar la integridad, la seguridad y el rendimiento de las operaciones ofrecidas por los endpoints.

4.2.1. Objetivos y alcance

Los objetivos específicos que guiaron la planificación de las pruebas fueron los siguientes:

- Verificar la implementación correcta de los endpoints asociados a dispositivos, mediciones, comandos, respuestas y usuarios.
- Confirmar la persistencia y consistencia de los datos en la base de datos MySQL.
- Validar el esquema de autenticación y autorización mediante tokens JWT.
- Evaluar la integración con el broker MQTT para la publicación y recepción de mensajes.
- Medir el tiempo de respuesta y la estabilidad del servicio en diferentes condiciones de red y carga.
- Comprobar el manejo de errores y la coherencia de las respuestas ante solicitudes inválidas.

El alcance incluyó operaciones sincrónicas (consultas, altas, modificaciones y eliminaciones) y asíncronas (envío y recepción de comandos MQTT) con el fin de cubrir todos los flujos funcionales.

4.2.2. Metodología de prueba

El proceso de validación se realizó con la herramienta Postman [37]. Se elaboraron colecciones de solicitudes y scripts de prueba en la pestaña Tests, que verificaron los códigos de estado HTTP, la estructura de las respuestas y el contenido de los mensajes.

El Collection Runner [38] permitió ejecutar los casos de prueba en distintos entornos: desarrollo local, red simulada GPRS e integración con el broker MQTT. Los

En la figura 4.5 se muestra la respuesta ante una solicitud incompleta, donde falta al menos uno de los campos obligatorios. El sistema devuelve un mensaje en formato JSON indicando la causa del error.

```

POST 127.0.0.1:8090/api/medicion
{
  "fecha": "2025-11-12T21:15:00-03:00",
  "carril": 2,
  "clasificación": 1,
  "dispositivoId": 1,
  "deviceId": 1
}
{
  "message": "fecha, valor, carril, clasificación y dispositivoId son obligatorios.",
  "status": 0
}
  
```

FIGURA 4.5. Solicitud POST /api/medicion con campos faltantes.

Comando

La entidad Comando permite enviar instrucciones remotas a los nodos de campo a través del broker MQTT. Las pruebas se realizaron sobre el endpoint POST /api/comando, verificando tanto la creación exitosa como la validación de datos.

La figura 4.6 muestra una solicitud válida con los campos fecha, valor y dispositivoId, que genera un nuevo comando y lo envía al dispositivo indicado.

```

POST 127.0.0.1:8090/api/comando
{
  "fecha": "2025-11-12T21:15:00-03:00",
  "valor": "asset",
  "dispositivoId": 1
}
{
  "message": "Comando creado con éxito y publicado.",
  "status": 1,
  "date": "2025-11-12T21:15:00-03:00",
  "time": "2025-11-12T21:15:00.000Z",
  "device": "asset",
  "deviceID": 1,
  "createAt": "2025-11-12T21:15:00-03:00"
}
  
```

FIGURA 4.6. Solicitud POST /api/comando exitosa.

En la figura 4.7 se observa la respuesta del sistema ante una solicitud con parámetros faltantes.

resultados se exportaron en formato JSON y se analizaron mediante la extensión Newman [39].

El middleware Morgan registró las solicitudes HTTP, mientras que el sistema de logging Winston almacenó eventos críticos del backend, como errores de conexión, tiempos de procesamiento y publicaciones MQTT. La trazabilidad obtenida permitió optimizar parámetros como la concurrencia de conexiones MySQL y la retención de mensajes MQTT.

Para evaluar la tolerancia a fallos, se interrumpieron deliberadamente las conexiones del broker MQTT y del enlace GPRS. Los mensajes en cola se reenviaron al restablecer la red sin generar duplicaciones ni pérdidas.

4.2.3. Resultados obtenidos

Las pruebas confirmaron la estabilidad y solidez de la API REST. Todas las operaciones CRUD se ejecutaron correctamente y devolvieron respuestas en formato JSON con los códigos HTTP apropiados.

- Autenticación: las solicitudes sin token o con credenciales inválidas fueron rechazadas con los códigos 401 y 403.
- Integración MQTT: los comandos se publicaron en los tópicos dispositivo/{id}/comando, y las respuestas se recibieron en dispositivo/{id}/respuesta, que actualizó los estados en la base de datos.
- Persistencia: no se registraron pérdidas ni duplicaciones de datos en la base de datos MySQL.
- Rendimiento: el tiempo de respuesta promedio fue de 210 ms en entorno local y de 550 ms bajo simulación GPRS, con un máximo de 1,2 s en carga alta.
- Manejo de errores: los mensajes de error fueron claros y usaron códigos estandarizados (400, 404, 423, 500).

A continuación, se presenta la tabla 4.1 con los resultados de las pruebas de los endpoints REST:

4.2. Pruebas de la API REST

29

```

{
  "fecha": "2025-11-12T21:15:00-03:00",
  "cmdId": 29,
  "dispositivoId": 4
}
    
```

FIGURA 4.7. Solicitud POST /api/comando con error por datos incompletos.

Respuesta

La entidad **Respuesta** almacena los mensajes enviados por los nodos de campo en respuesta a los comandos recibidos. Se evaluó el endpoint **POST /api/respuesta**, y se comprobó la asociación correcta con el comando original y el dispositivo.

La figura 4.8 muestra un ejemplo de respuesta registrada exitosamente, con los campos fecha, cmdId, valor y dispositivoId.

```

{
  "fecha": "2025-11-12T21:15:00-03:00",
  "cmdId": 29,
  "valor": "on",
  "dispositivoId": 8
}
    
```

FIGURA 4.8. Solicitud POST /api/respuesta exitosa.

En la figura 4.9 se observa la respuesta generada cuando alguno de los campos requeridos no fue proporcionado.

```

{
  "fecha": "2025-11-12T21:15:00-03:00",
  "cmdId": 29,
  "dispositivoId": 1
}
    
```

FIGURA 4.9. Solicitud POST /api/respuesta con error de validación.

A continuación, se presenta la tabla 4.1 con los resultados de las pruebas de los endpoints REST:

4.3. Pruebas de componentes

29

TABLA 4.1. Resultados de las pruebas realizadas sobre los principales endpoints de la API REST mediante Postman.

Endpoint	Tipo	Resultado	Código HTTP	Tiempo medio (ms)
GET /dispositivo	GET	Consulta correcta de todos los dispositivos	200	215
GET /dispositivo/{id}	GET	Recuperación exitosa de un dispositivo específico	200	225
POST /dispositivo	POST	Alta de nuevo dispositivo	201	245
GET /medicion/dispositivo/{id}	GET	Consulta de mediciones por dispositivo	200	230
POST /comando	POST	Publicación de comando en MQTT	201	310
GET /comando/{id}	GET	Consulta de estado de comando	200	520
POST /respuesta	POST	Registro de respuesta	201	245
GET /respuesta/{id_com}	GET	Recuperación de respuesta asociada	200	225
POST /usuario/login	POST	Autenticación válida (JWT)	200	180
GET /usuario	GET	Acceso restringido (JWT)	403	190

Los ensayos confirmaron que la API REST cumple los criterios de fiabilidad, seguridad y desempeño definidos en el diseño. El uso de colecciones automatizadas permitió repetir las pruebas en distintos entornos y documentar los resultados con precisión.

4.3. Pruebas de componentes

Las pruebas de componentes tuvieron como propósito verificar la integración entre los módulos del sistema (firmware, backend, broker MQTT, base de datos y frontend) y asegurar el correcto comportamiento de manera individual y conjunta.

A diferencia del banco de pruebas y de la validación de la API REST, esta etapa se centró en la integridad del flujo de datos completo, el manejo de errores y la coherencia operativa ante fallas o sobrecarga.

4.3.1. Enfoque general

El sistema se evaluó bajo un esquema progresivo:

TABLA 4.1. Resultados de las pruebas realizadas sobre los principales endpoints de la API REST mediante Postman.

Endpoint	Tipo	Resultado	Código HTTP	Tiempo medio (ms)
GET /dispositivo	GET	Consulta correcta de todos los dispositivos	200	215
GET /dispositivo/{id}	GET	Recuperación exitosa de un dispositivo específico	200	225
POST /dispositivo	POST	Alta de nuevo dispositivo	201	245
GET /medicion/dispositivo/{id}	GET	Consulta de mediciones por dispositivo	200	230
POST /comando	POST	Publicación de comando en MQTT	201	310
GET /comando/{id}	GET	Consulta de estado de comando	200	520
POST /respuesta	POST	Registro de respuesta	201	245
GET /respuesta/{id_com}	GET	Recuperación de respuesta asociada	200	225
POST /usuario/login	POST	Autenticación válida (JWT)	200	180
GET /usuario	GET	Acceso restringido (JWT)	403	190

Los ensayos confirmaron que la API REST cumple los criterios de fiabilidad, seguridad y desempeño definidos en el diseño. El uso de colecciones automatizadas permitió repetir las pruebas en distintos entornos y documentar los resultados con precisión.

4.3. Pruebas de componentes

Las pruebas de componentes tuvieron como propósito verificar la integración entre los módulos del sistema (firmware, backend, broker MQTT, base de datos y frontend) y asegurar el correcto comportamiento de manera individual y conjunta.

A diferencia del banco de pruebas y de la validación de la API REST, esta etapa se centró en la integridad del flujo de datos completo, el manejo de errores y la coherencia operativa ante fallas o sobrecarga.

4.3.1. Enfoque general

El sistema se evaluó bajo un esquema progresivo:

1. Pruebas unitarias: destinadas a validar la funcionalidad de cada componente de software.
2. Pruebas de integración: diseñadas para verificar la comunicación entre módulos y la consistencia de los datos.
3. Pruebas de tolerancia a fallos: enfocadas en la recuperación automática ante desconexiones, errores de red o reinicios.

El entorno completo se desplegó en contenedores Docker independientes, lo que permitió reproducir escenarios de prueba con precisión y medir el impacto de fallas.

4.3.2. Resultados por componente

Cada módulo del sistema fue evaluado de forma independiente para verificar su funcionamiento, la integridad de los datos y la robustez ante fallos de conexión. Se resumen los principales resultados obtenidos en las pruebas de cada componente:

- Firmware (ESP32-C3): se validó el análisis de tramas RS-232, el almacenamiento temporal en colas FIFO y la publicación confiable de mensajes MQTT.
- Broker MQTT: se realizaron desconexiones simuladas. El sistema mantuvo la sesión y retransmitió los mensajes pendientes.
- Backend: se comprobó la correcta gestión de solicitudes REST y la sincronización con el broker MQTT.
- Frontend: se verificó la comunicación bidireccional con la API REST y la actualización en tiempo real de las mediciones.
- Manejo de errores: los registros de Winston y Morgan mostraron reconexiones exitosas sin pérdida de información.

Las pruebas confirmaron la cohesión del sistema y su capacidad de recuperación ante fallas. El uso de contenedores Docker facilitó la integración y la detección de incompatibilidades. Los resultados validaron la solidez de la arquitectura distribuida y su adecuación a entornos con conectividad limitada.

4.4. Pruebas del frontend

Las pruebas del frontend tuvieron como finalidad evaluar el correcto funcionamiento de la interfaz web desarrollada, garantizando su compatibilidad, usabilidad, rendimiento y capacidad de interacción con el backend del sistema.

4.4.1. Objetivos

Los objetivos específicos de esta etapa fueron los siguientes:

- Verificar la compatibilidad del frontend con los navegadores más utilizados (Chrome, Firefox) y con dispositivos móviles Android.
- Evaluar el rendimiento general de la aplicación: tiempos de carga, latencia en consultas a la API y velocidad de actualización de los gráficos.

4.3. Pruebas de componentes

31

1. Pruebas unitarias: destinadas a validar la funcionalidad de cada componente de software.
2. Pruebas de integración: diseñadas para verificar la comunicación entre módulos y la consistencia de los datos.
3. Pruebas de tolerancia a fallos: enfocadas en la recuperación automática ante desconexiones, errores de red o reinicios.

El entorno completo se desplegó en contenedores Docker independientes, lo que permitió reproducir escenarios de prueba con precisión y medir el impacto de fallas.

4.3.2. Resultados por componente

Cada módulo del sistema fue evaluado de forma independiente para verificar su funcionamiento, la integridad de los datos y la robustez ante fallos de conexión. Se resumen los principales resultados obtenidos en las pruebas de cada componente:

- Firmware (ESP32-C3): se validó el análisis de tramas RS-232, el almacenamiento temporal en colas FIFO y la publicación confiable de mensajes MQTT.
- Broker MQTT: se realizaron desconexiones simuladas. El sistema mantuvo la sesión y retransmitió los mensajes pendientes.
- Backend: se comprobó la correcta gestión de solicitudes REST y la sincronización con el broker MQTT.
- Frontend: se verificó la comunicación bidireccional con la API REST y la actualización en tiempo real de las mediciones.
- Manejo de errores: los registros de Winston y Morgan mostraron reconexiones exitosas sin pérdida de información.

En la figura 4.10 se puede observar el intercambio de mensajes entre el nodo de campo y el servidor. En la parte superior de la imagen se muestra la consola del ESP32-C3, donde el firmware registra el envío de una medición a través del módulo SIM800L utilizando el protocolo MQTT. En la parte inferior, se visualiza la consola del backend desarrollada en Node.js, que recibe y procesa el mensaje, verificando los datos de la medición antes de almacenarlos en la base de datos.

4.4. Pruebas del frontend

31

- Analizar la usabilidad de la interfaz mediante pruebas con usuarios: oportunidades de mejora en la disposición de elementos visuales y en los flujos de interacción.
- Validar la correcta ejecución de comandos y confirmaciones visuales en tiempo real a través de la comunicación con el broker MQTT y la API REST.
- Comprobar el manejo de errores de conexión y autenticación, así se generen mensajes claros y retroalimentación inmediata al usuario.

4.4.2. Metodología

Las pruebas se realizaron sobre la versión estable del frontend, desarrollado con los frameworks Ionic y Angular, y desplegado en un entorno controlado junto al backend y el broker MQTT. Se observó la interacción del usuario, a fin de verificar el comportamiento integral del sistema en distintos escenarios:

- Compatibilidad y visualización: se validó la correcta visualización de los componentes en distintas resoluciones y navegadores, utilizando Chrome DevTools [40] y el modo responsive de Ionic. El diseño adaptativo permitió mantener la legibilidad de los gráficos y menús tanto en pantallas de escritorio como en dispositivos móviles. Las pruebas demostraron una compatibilidad completa con los navegadores modernos, presentando solo ligeras diferencias en el renderizado de iconos SVG en Firefox.
- Rendimiento: el análisis de desempeño se realizó con Lighthouse [41] y el monitor de red de los navegadores. El tiempo promedio de carga inicial fue de 2,3 segundos en Chrome y 2,7 segundos en Firefox. En dispositivos móviles Android, el tiempo de carga fue de 3,8 segundos, debido a la menor capacidad de procesamiento. La latencia promedio de las consultas REST se mantuvo por debajo de los 250 milisegundos en red local, que aumentó a 600 milisegundos bajo simulación GPRS.
- Usabilidad: se realizaron pruebas con un grupo reducido de usuarios familiarizados con sistemas de monitoreo vial, quienes interactuaron con la interfaz durante sesiones controladas. Los resultados indicaron una alta comprensión del flujo de navegación y una percepción positiva de la organización visual. Las observaciones fueron incorporadas en una versión posterior mediante ajustes de color, iconografía y jerarquía visual.
- Comunicación y validación funcional: se comprobó que los comandos emitidos desde la interfaz se transmitieran correctamente al backend y se visualizaran sus estados en tiempo real. Del mismo modo, los eventos de tránsito publicados por los dispositivos se reflejaron de forma inmediata en la aplicación, sin inconsistencias ni retrasos notables. Las alertas visuales ante pérdida de conexión, errores de autenticación o respuestas HTTP inválidas funcionaron según lo esperado, mostrando mensajes informativos y acciones de recuperación.

A continuación, se presentan las distintas pantallas que conforman la aplicación:

La figura 4.2 muestra la pantalla de inicio de sesión, donde el usuario debe ingresar sus credenciales para acceder al sistema.

The screenshot displays two terminal windows. The top window, titled 'Log módulo ESP32C3', shows MQTT messages being published from the node to a topic named 'medicion'. The bottom window, titled 'Log backend', shows the server receiving these messages and publishing them back to the same topic. A red box highlights the message 'Publicación en el topico de medición' in the top window, and another red box highlights the message 'Recepción en el topico de medición' in the bottom window.

```

t diego@banghevalidad:~/proyectos/Nejimir.c ~ Log módulo ESP32C3
I (34806) GPRS: 0x3fc95f80 2f 31 2f 6d 65 64 69 63 69 6f 6e 7b 22 64 69 73 | /1/0
+edition('dis')
I (34806) GPRS: 0x3fc95f90 76 0f 73 69 74 09 76 6f 49 64 22 3e 31 2c 22 76 | positi
tivoId":1,"v"
I (34816) GPRS: 0x3fc95fa0 61 6c 6f 72 22 3a 33 33 2c 22 03 61 72 72 69 6c | alor
"33,"carril"
I (34826) GPRS: 0x3fc95fb0 22 3a 32 2c 22 69 6c 61 73 69 66 69 65 61 68 69 | ":"2,
"clasificación"
I (34836) GPRS: 0x3fc95fc0 6f 6e 49 64 22 3a 31 2c 22 66 65 63 68 61 22 3a | onId
"1,"fecha":|
I (34840) GPRS: 0x3fc95fd0 22 32 30 32 35 2d 31 30 2d 31 35 34 31 37 3a 30 | "202
5-10-15T17:0|
I (34856) GPRS: 0x3fc95fe0 30 3a 30 30 2d 30 33 3a 30 30 22 7d | 0:00
+03:00")
I (36535) GPRS: CIPSEND OK:
SEND OK

I (36536) GPRS: PUBLISH enviado: /dispositivo/1/medicion -> {"dispositivoId":1,"velo
t":33,"carril":2,"clasificaciónId":1,"fecha":"2025-10-15T17:00:00-03:00")

2 diego@banghevalidad:~/proyectos/flow-track/app_R ~ Log backend
node-backend | [2025-11-06 12:01:37] : Trato de obtener ultima medición para este d
ispositivoId: 1
node-backend | [2025-11-06 12:01:37] : Trato de obtener ultimo comando para este di
spositivoId: 1
node-backend | [2025-11-06 12:01:52] : Token en chequeo: eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cC
I0IxKWC19.eyJlcVymSlbmQ1nsimFtZS16ImFkbmluIiwiJcGFzc3dvcmQiOiyMTIzMny0TdnHNdhn
WE3NDM4OTRMGU8TgwM2jMyisImRlc2NyaXA10m51b6x0LCJpYXQ10jE3MjI0NDExNDJ9.cg_TUY9h14cz
FHld8yfimAPwvPcaT_56gvodgRYUNu
node-backend | [2025-11-06 12:01:52] : Trato de obtener últi
Recepción en el
ste d
ispositivoId: 1
node-backend | [2025-11-06 12:01:52] : Trato de obtener ultimo comando para este di
spositivoId: 1
node-backend | [2025-11-06 12:01:54] : MQTT mensaje recibido: /dispositivo/1/medi
on
node-backend | [2025-11-06 12:01:54] : MQTT Ingreso Medicion : dispositivoId: 1, fe
cha: 2025-10-15T17:00:00-03:00, valor: 33, carril: 2, clasificaciónId: 1

```

FIGURA 4.10. Interacción entre el nodo de campo (ESP32-C3 + SIM800L) y el backend.

Las pruebas confirmaron la cohesión del sistema y su capacidad de recuperación ante fallas. El uso de contenedores Docker facilitó la integración y la detección de incompatibilidades. Los resultados validaron la solidez de la arquitectura distribuida y su adecuación a entornos con conectividad limitada.

4.4. Pruebas del frontend

Las pruebas del frontend tuvieron como finalidad evaluar el correcto funcionamiento de la interfaz web desarrollada, garantizando su compatibilidad, usabilidad, rendimiento y capacidad de interacción con el backend del sistema.

4.4.1. Objetivos

Los objetivos específicos de esta etapa fueron los siguientes:

- Verificar la compatibilidad del frontend con los navegadores más utilizados (Chrome, Firefox) y con dispositivos móviles Android.



FIGURA 4.2. Pantalla de inicio de sesión del frontend.

Una vez autenticado, el usuario accede al panel principal mostrado en la figura 4.3, donde se presenta el listado de dispositivos registrados junto con su estado de conexión y otras variables relevantes.

The screenshot shows a table titled 'Listado de Dispositivos' (Device List) with four entries. Each entry includes the device name, location, type, and a 'VER' (View) button. The entries are: 'contador 1' (Padre Básica, DTSC), 'contador 2' (Tres Arroyos, PUD), 'contador 3' (Cerrotago, DTSC), and 'contador 4' (Piton, DTSC_ORD).

Listado de Dispositivos		
contador 1	Ubicación: Padre Básica	VER >
contador 2	Ubicación: Tres Arroyos	VER >
contador 3	Ubicación: Cerrotago	VER >
contador 4	Ubicación: Pitón	VER >

FIGURA 4.3. Panel principal con visualización del listado de dispositivos.

Al seleccionar un dispositivo del listado, el sistema despliega un panel detallado con la información específica de dicho equipo. La figura 4.4 ilustra la primera vista del panel, donde se muestran los datos generales de identificación, el último comando enviado, su respuesta y la última medición.

4.4. Pruebas del frontend

33

- Evaluar el rendimiento general de la aplicación: tiempos de carga, latencia en consultas a la API y velocidad de actualización de los gráficos.
- Analizar la usabilidad de la interfaz mediante pruebas con usuarios: oportunidades de mejora en la disposición de elementos visuales y en los flujos de interacción.
- Validar la correcta ejecución de comandos y confirmaciones visuales en tiempo real a través de la comunicación con el broker MQTT y la API REST.
- Comprobar el manejo de errores de conexión y autenticación, así se generen mensajes claros y retroalimentación inmediata al usuario.

4.4.2. Metodología

Las pruebas se realizaron sobre la versión estable del frontend, desarrollado con los frameworks Ionic y Angular, y desplegado en un entorno controlado junto al backend y el broker MQTT. Se observó la interacción del usuario, a fin de verificar el comportamiento integral del sistema en distintos escenarios:

- Compatibilidad y visualización: se validó la correcta visualización de los componentes en distintas resoluciones y navegadores, utilizando Chrome DevTools [40] y el modo responsive de Ionic. El diseño adaptativo permitió mantener la legibilidad de los gráficos y menús tanto en pantallas de escritorio como en dispositivos móviles. Las pruebas demostraron una compatibilidad completa con los navegadores modernos, presentando solo ligeras diferencias en el renderizado de iconos SVG en Firefox.
- Rendimiento: el análisis de desempeño se realizó con Lighthouse [41] y el monitor de red de los navegadores. El tiempo promedio de carga inicial fue de 2,3 segundos en Chrome y 2,7 segundos en Firefox. En dispositivos móviles Android, el tiempo de carga fue de 3,8 segundos, debido a la menor capacidad de procesamiento. La latencia promedio de las consultas REST se mantuvo por debajo de los 250 milisegundos en red local, que aumentó a 600 milisegundos bajo simulación GPRS.
- Usabilidad: se realizaron pruebas con un grupo reducido de usuarios familiarizados con sistemas de monitoreo vial, quienes interactuaron con la interfaz durante sesiones controladas. Los resultados indicaron una alta comprensión del flujo de navegación y una percepción positiva de la organización visual. Las observaciones fueron incorporadas en una versión posterior mediante ajustes de color, iconografía y jerarquía visual.
- Comunicación y validación funcional: se comprobó que los comandos emitidos desde la interfaz se transmitieran correctamente al backend y se visualizaran sus estados en tiempo real. Del mismo modo, los eventos de tránsito publicados por los dispositivos se reflejaron de forma inmediata en la aplicación, sin inconsistencias ni retrasos notables. Las alertas visuales ante pérdida de conexión, errores de autenticación o respuestas HTTP inválidas funcionaron según lo esperado, mostrando mensajes informativos y acciones de recuperación.

A continuación, se presentan las distintas pantallas que conforman la aplicación:

4.4. Pruebas del frontend

33

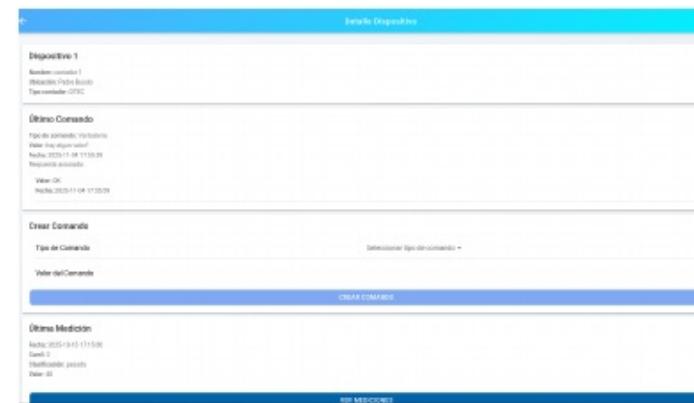


FIGURA 4.4. Panel de visualización del dispositivo: datos generales.

La figura 4.5 se muestra la preparación para la ejecución de un comando.

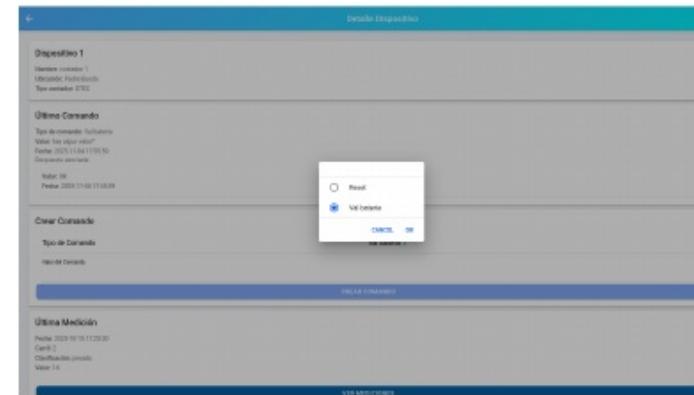


FIGURA 4.5. Panel de visualización del dispositivo: preparación para la ejecución de un comando.

En la figura 4.6 se habilita para la ejecución del comando.

La figura 4.11 muestra la pantalla de inicio de sesión, donde el usuario debe ingresar sus credenciales para acceder al sistema.



FIGURA 4.11. Pantalla de inicio de sesión del frontend.

Una vez autenticado, el usuario accede al panel principal mostrado en la figura 4.12, donde se presenta el listado de dispositivos registrados junto con la ubicación y el tipo de contador.

 A screenshot of a web-based application interface titled 'Listado de Dispositivos'. It displays four items in a grid:

- contador 1**: Ubicación: Padre Banda, Tipo: DTEC. A 'VER' button is to the right.
- contador 2**: Ubicación: Tres Arroyos, Tipo: PADE. A 'VER' button is to the right.
- contador 3**: Ubicación: Gobernadora, Tipo: DTEC. A 'VER' button is to the right.
- contador 4**: Ubicación: Potosí, Tipo: DTEC.DRD. A 'VER' button is to the right.

FIGURA 4.12. Panel principal con visualización del listado de dispositivos.

Al seleccionar un dispositivo del listado, el sistema despliega un panel detallado con la información específica de dicho equipo. La figura 4.13 ilustra la primera vista del panel de dispositivo, donde se muestran los datos generales de identificación (nombre, ubicación y tipo), el último comando enviado, su respuesta, la última medición registrada y un botón para visualizar las mediciones históricas.

A screenshot of a detailed device view. At the top, it shows 'Dispositivo 1' with details: Nombre: contador 1, Ubicación: Padre Banda, Tipos: DTEC. Below that is the 'Último Comando' section, which is currently empty. Underneath is the 'Crear Comando' section, showing a dropdown for 'Tipo de Comando' set to 'Nuevo Medidor'. At the bottom is the 'Última Medición' section, also currently empty.

FIGURA 4.6. Panel de visualización del dispositivo: ejecución de un comando.

La figura 4.7 muestra el comando ejecutado y la respuesta pendiente.

A screenshot of the same device view as figure 4.6, but with a command being processed. The 'Último Comando' section now shows a command for 'Nuevo Medidor' sent at 2023-11-01 16:02:21. The 'Crear Comando' section is still visible below it. The 'Última Medición' section remains empty.

FIGURA 4.7. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y la respuesta pendiente.

La figura 4.8 se muestra la respuesta al comando.

4.4. Pruebas del frontend

35

Dispositivo 1

Nombre: contador 1
Ubicación: Padre Buodo
Tipo contador: DTEC

Último Comando

Tipo de comando: Val batería
Valor: hay algún valor?
Fecha: 2025-11-04 17:55:59
Respuesta asociada:

Valor: OK
Fecha: 2025-11-04 17:55:59

Crear Comando

Tipo de Comando: Seleccionar tipo de comando ▾
Crear nuevo comando

Última Medición

Fecha: 2025-10-15 17:15:00
Carril: 2
Clasificación: pesado
Valor: 40

VER MEDICIONES

FIGURA 4.13. Panel de visualización del dispositivo.

En la figura 4.14 se muestra la creación de un comando asociado a un tipo de comando específico del contador. Al seleccionarse el tipo, el sistema habilita la opción para generar el nuevo comando.

4.4. Pruebas del frontend

35

Dispositivo 1

Nombre: contador 1
Ubicación: Padre Buodo
Tipo contador: DTEC

Último Comando

Tipo de comando: Val
Valor: hay algún valor?
Fecha: 2025-11-04 17:55:59
Respuesta asociada:
Valor: OK
Fecha: 2025-11-04 17:55:59

Crear Comando

Tipo de Comando: Seleccionar tipo de comando ▾
Valor: OK

Última Medición

Fecha: 2025-10-15 17:15:00
Carril: 2
Clasificación: pesado
Valor: 40

FIGURA 4.8. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y su respuesta.

Después, en la figura 4.9 se presenta el historial de mediciones, con paginación y exportación a csv.

Historial de mediciones - Dispositivo 1

ANTERIOR SIGUIENTE

Fecha	Carril	Clasificación	Valor
2025-10-15 17:15:00	Carril 2	Pesado	40
2025-10-15 17:15:00	Carril 1	Pesado	40
2025-10-15 17:15:00	Carril 2	Pesado	40
2025-10-15 17:15:00	Carril 1	Pesado	40

FIGURA 4.9. Panel de visualización del historial de mediciones.

4.4.3. Resultados y observaciones

Los resultados globales de las pruebas de frontend se resumen en los siguientes puntos:

- Compatibilidad completa con navegadores Chrome y Firefox, y compatibilidad en móviles Android.
- Tiempos de carga promedio inferiores a 3 s en escritorio y 4 s en dispositivos móviles.

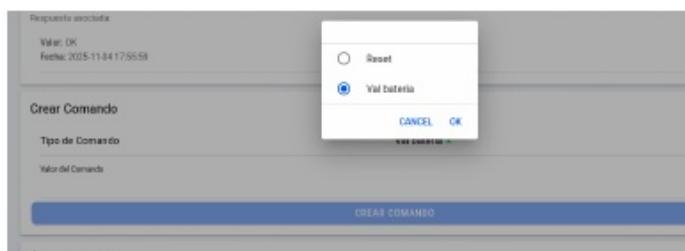


FIGURA 4.14. Panel de visualización del dispositivo: preparación para la ejecución de un comando y su ejecución.

En la figura 4.15 se muestra la habilitación y ejecución del comando. Además, es posible ingresar un valor asociado junto con la selección del tipo de comando.



FIGURA 4.15. Panel de visualización del dispositivo: ejecución de un comando.

La figura 4.16 muestra el comando ejecutado con sus detalles y la respuesta en estado pendiente.

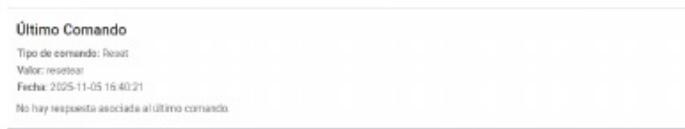


FIGURA 4.16. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y la respuesta pendiente.

La figura 4.17 se muestra la respuesta al comando, con los detalles que devuelve la misma.

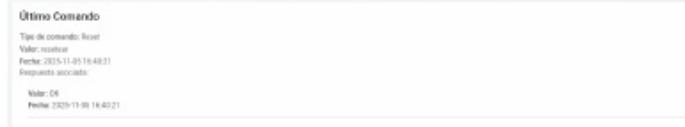


FIGURA 4.17. Panel de visualización del dispositivo: comando ejecutado y su respuesta.

- Comunicación estable con la API REST y el broker MQTT, incluso ante re-conexiones de red.
- Interfaz intuitiva y valorada positivamente por los usuarios de prueba, con mejoras implementadas en la versión final.

En conjunto, las pruebas permitieron validar la madurez funcional de la interfaz web y su adecuación a las necesidades operativas de los usuarios finales.

4.5. Prueba final de integración

La prueba final de integración tuvo como objetivo validar el flujo completo del sistema bajo condiciones de operación equivalentes a las de un entorno real. Esta etapa permitió comprobar la interoperabilidad entre todos los componentes involucrados: el nodo de campo, el firmware embebido, el módulo de comunicación GPRS, el broker MQTT, la API REST, la base de datos y la interfaz web.

El ensayo buscó garantizar que el sistema, en su conjunto, cumpliera con los requisitos de confiabilidad, sincronización y trazabilidad definidos en las fases de diseño y desarrollo.

4.5.1. Metodología de la prueba

Para la validación end-to-end se configuró un entorno de ensayo en el que participaron todos los subsistemas desplegados simultáneamente. El flujo de integración se estructuró de la siguiente manera:

1. El contador de tránsito DTEC generó una trama RS-232 que fue recibida por el nodo ESP32-C3.
2. El firmware procesó la trama, generó un evento y lo publicó mediante MQTT en el tópico `dispositivo/{id}/medicion`.
3. El backend, suscrito a dicho tópico, validó el mensaje, lo registró en la base de datos y notificó a la interfaz web a través de su API REST.
4. El frontend consultó la API y actualizó la vista en tiempo real con la nueva medición.
5. Desde la interfaz, se envió un comando de prueba al nodo, que fue publicado por el backend en el tópico `dispositivo/{id}/comando`.
6. El firmware recibió el comando, ejecutó la acción asociada y respondió mediante un mensaje en el tópico `dispositivo/{id}/respuesta`, que fue procesado nuevamente por el backend y mostrado al usuario.

La figura 4.10 se muestra la ejecución de las pruebas de integración.

4.4. Pruebas del frontend

37

Luego, al presionar el botón Mediciones, se mostrará el historial correspondiente, como se observa en la figura 4.18. En esta vista se indica, para cada registro, el carril, la clasificación y el valor del volumen de los vehículos.



FIGURA 4.18. Panel de visualización del historial de mediciones.

4.4.3. Resultados y observaciones

Los resultados globales de las pruebas de frontend se resumen en los siguientes puntos:

- Compatibilidad completa con navegadores Chrome y Firefox, y compatibilidad en móviles Android.
- Tiempos de carga promedio inferiores a 3 s en escritorio y 4 s en dispositivos móviles.
- Comunicación estable con la API REST y el broker MQTT, incluso ante re conexiones de red.
- Interfaz intuitiva y valorada positivamente por los usuarios de prueba, con mejoras implementadas en la versión final.

4.5. Prueba final de integración

37

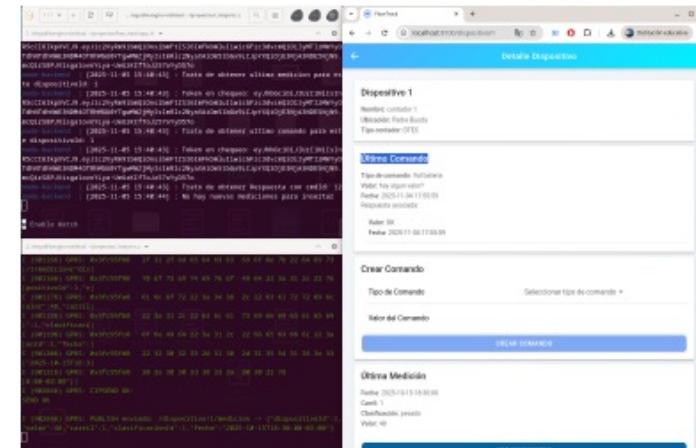


FIGURA 4.10. Fotografía pruebas finales de integración.

En el video 4.1 se muestra la prueba completa del funcionamiento del sistema, que verifica la integración de los distintos componentes, la comunicación entre módulos y la operación general.

Video 4.1: Prueba integral del sistema en funcionamiento.
<https://youtu.be/T4vcsNNGdc8?si=QBCrA6GHNZcklFO9>

4.5.2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la prueba integral confirmaron el correcto funcionamiento de todo el sistema bajo condiciones reales de comunicación y sincronización de datos.

En particular, se observaron los siguientes aspectos destacados:

- Interoperabilidad completa: todos los componentes del sistema hardware, middleware y software interactuaron sin incompatibilidades ni pérdidas de información.
- Sincronización en tiempo real: la actualización de la interfaz web frente a la recepción de un nuevo evento.
- Confidencialidad del flujo de comandos: las órdenes enviadas desde el frontend fueron recibidas y ejecutadas correctamente por el nodo, con confirmaciones visibles en pantalla.
- Tiempos de ida y vuelta (round-trip): entre 3 y 5 segundos en condiciones normales de red GPRS, y hasta 12 segundos bajo conectividad inestable, sin pérdida de comandos ni duplicación de respuestas.
- Trazabilidad completa: cada evento quedó registrado en la base de datos con su respectivo timestamp e id de dispositivo.

En conjunto, las pruebas permitieron validar la madurez funcional de la interfaz web y su adecuación a las necesidades operativas de los usuarios finales.

4.5. Prueba final de integración

La prueba final de integración tuvo como objetivo validar el flujo completo del sistema bajo condiciones de operación equivalentes a las de un entorno real. Esta etapa permitió comprobar la interoperabilidad entre todos los componentes involucrados: el nodo de campo, el firmware embebido, el módulo de comunicación GPRS, el broker MQTT, la API REST, la base de datos y la interfaz web.

El ensayo buscó garantizar que el sistema, en su conjunto, cumpliera con los requisitos de confiabilidad, sincronización y trazabilidad definidos en las fases de diseño y desarrollo.

4.5.1. Metodología de la prueba

Para la validación end-to-end se configuró un entorno de ensayo en el que participaron todos los subsistemas desplegados simultáneamente. El flujo de integración se estructuró de la siguiente manera:

1. El contador de tránsito DTEC generó una trama RS-232 que fue recibida por el nodo ESP32-C3.
2. El firmware procesó la trama, generó un evento y lo publicó mediante MQTT en el tópico dispositivo/{id}/medicion.
3. El backend, suscrito a dicho tópico, validó el mensaje, lo registró en la base de datos y notificó a la interfaz web a través de su API REST.
4. El frontend consultó la API y actualizó la vista en tiempo real con la nueva medición.
5. Desde la interfaz, se envió un comando de prueba al nodo, que fue publicado por el backend en el tópico dispositivo/{id}/comando.
6. El firmware recibió el comando, ejecutó la acción asociada y respondió mediante un mensaje en el tópico dispositivo/{id}/respuesta, que fue procesado nuevamente por el backend y mostrado al usuario.

Se presentan los pasos realizados durante la prueba integral del sistema, cuyo objetivo es verificar la correcta interacción entre el dispositivo, el backend y la interfaz web en un escenario completo de funcionamiento.

En la figura 4.19 se muestra la captura del log del módulo ESP32-C3 junto con el log del backend, durante la publicación y recepción de una medición. En la parte superior se observa el envío del mensaje MQTT en el tópico dispositivo/1/medicion, mientras que en la parte inferior el backend registra la recepción del mensaje, su validación y almacenamiento en la base de datos.

La prueba end-to-end permitió validar la solidez de la arquitectura propuesta y su adecuación a escenarios reales de operación. El flujo completo, desde la generación de un evento hasta su visualización en la web y el control remoto del nodo, se ejecutó de forma estable, con tiempos de respuesta consistentes y trazabilidad total.

Estos resultados confirmaron que la solución es técnicamente viable para su despliegue en entornos de campo, que ofrece una integración transparente entre hardware embebido, servicios de red y aplicaciones web. Además, la arquitectura modular basada en estándares abiertos garantiza la posibilidad de futuras expansiones y adaptaciones a nuevas tipologías de dispositivos o protocolos de comunicación.

4.6. Comparación con otras soluciones

Con el fin de evaluar el desempeño y pertinencia del sistema desarrollado frente a alternativas existentes, se realizó un análisis comparativo entre la solución propuesta y sistemas comerciales y académicos de gestión de dispositivos de campo y monitoreo vehicular.

Se consideraron seis criterios principales: costo de implementación, flexibilidad tecnológica, escalabilidad, comportamiento ante conectividad intermitente, adecuación a entornos locales y disponibilidad de soporte técnico. Esto permitió situar la solución frente a plataformas consolidadas y proyectos académicos similares.

Las soluciones comerciales ofrecen plataformas robustas con soporte integral, pero presentan altos costos y baja flexibilidad para integrar hardware heterogéneo o protocolos abiertos. Las propuestas académicas son más experimentales y abiertas tecnológicamente, aunque con limitaciones de madurez, soporte y adaptación a producción.

La solución desarrollada combina bajo costo, independencia tecnológica y arquitectura modular basada en estándares abiertos (MQTT, REST, JSON), que permite rápida adaptación a entornos con conectividad variable, como rutas argentinas, sin depender de infraestructura propietaria ni servicios móviles externos.

En la tabla 4.2 se observa la comparación de la solución propuesta frente a alternativas comerciales y académicas:

4.5. Prueba final de integración

39

```

[+] (180076) GPRS: 0x3fc95fe0 2f 31 2f 0d 65 64 69 63 69 6f 6e 7b 22 64 09 73 |[1]
[+] medición["dis"]
[+] (180076) GPRS: 0x3fc95fe0 70 6f 73 69 74 69 76 6f 49 64 22 5a 31 2c 22 76 |[pos
[+] dispositivoId":1,"v|
[+] (180076) GPRS: 0x3fc95fe0 61 6c 6f 72 22 3a 33 38 2c 22 63 61 72 72 69 6c |[el
[+] "r:30,"carril|
[+] (180076) GPRS: 0x3fc95fe0 22 3a 32 2c 32 63 6c 63 73 69 66 69 63 61 63 69 |[cl
[+] "clasificación|
[+] (180080) GPRS: 0x3fc95fe0 67 6e 49 64 22 3a 32 2c 22 66 65 63 68 61 22 38 |[en
[+] "2,"fecha":|
[+] (180080) GPRS: 0x3fc95fe0 22 32 30 32 15 20 31 30 2d 31 35 54 51 37 38 31 |[20
[+] 25-10-15T17:18:00| |
[+] (180080) GPRS: 0x3fc95fe0 30 3a 30 30 2d 10 31 34 30 10 22 7d |[6:0
[+] 0-05:00"|
[+] (180270) GPRS: CIPSENO OK:
[+] END OK
[+] Publicación medición

[+] (1802470) GPRS: PUBLISH enviado: /dispositivo/1/medición -- {"dispositivoId":1,"val
[+] "o":38,"carril":2,"clasificaciónId":2,"fecha":"2025-10-15T17:18:00-03:00"}|[

[+] (1802470) GPRS: PUBLISH recibido: /dispositivo/1/medición -- {"dispositivoId":1,"val
[+] "o":38,"carril":2,"clasificaciónId":2,"fecha":"2025-10-15T17:18:00-03:00"}|[

node-backend | [2025-11-06 12:02:52] : Trato de obtener la medición para este dispositivoId: 1 | Receptor medición
node-backend | [2025-11-06 12:02:57] : Buscando mediciones para dispositivoId: 1 (1
[+] mit 100, offset 0, desde -, hasta -)
node-backend | [2025-11-06 12:03:00] : MQTT mensaje recibido: /dispositivo/1/medic
node-backend | [2025-11-06 12:03:00] : MQTT Ingreso Medicion : dispositivoId: 1, fe
[+] cha: 2025-10-15T17:18:00-03:00, valor: 38, carril: 2, clasificaciónId: 2
node-backend | [2025-11-06 12:03:00] : MQTT medición guardada para dispositivo 1
node-backend | [2025-11-06 12:03:07] : Token en chequeo: eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cC
[+] IiKpxVCj9.eyJlc2VydmlidmluamFzZG1tZW5hbmUuZW1pc3dvcmQidHlUYTIiPmYyOTdhNdn
[+] HE3NDM4OTRHMGUYYtgwMNCjMyisInRlc2HysKA10wS1bgw9LClpyXQ10jE3HjJ0NDEyM0J9.CG_TUy9h14Cz
[+] mnaDfWqDw-Qraf_x600n_gwu

```

FIGURA 4.19. Publicación de una medición por parte del módulo ESP32-C3 y recepción en el backend.

En la figura 4.20 se visualiza la interfaz web luego de recibir la medición publicada. La aplicación consulta la API REST del backend y actualiza en tiempo real la tabla de mediciones, que muestra el nuevo registro con su fecha, valor, carril, clasificación y dispositivo asociado.

4.6. Comparación con otras soluciones

39

TABLA 4.2. Comparación de la solución propuesta frente a alternativas comerciales y académicas.

Criterio	Propuesta	Comerciales	Académicas
Costo	Bajo (hardware económico + software abierto)	Alto (licencias y servicios)	Medio
Flexibilidad	Alta (protocolos estándar, modular)	Baja (propietaria)	Media
Escalabilidad	Alta (MQTT + API REST)	Alta	Media
Conectividad intermitente (colas FIFO, reinicios)	Totalmente soportada	Parcial	Poco explorada
Adecuación a rutas	Adaptada a entornos rurales y semiurbanos	Genérica	Variable
Soporte y documentación	Media (open source, docs técnicas)	Alta (soporte empresarial)	Baja

Finalmente, la solución desarrollada logra un equilibrio entre robustez, bajo costo y adaptabilidad, posicionándola como alternativa viable para proyectos de monitoreo vial en entornos con infraestructura limitada. Su orientación a estándares abiertos y su independencia de plataformas propietarias aseguran sostenibilidad y facilidad de futuras ampliaciones.

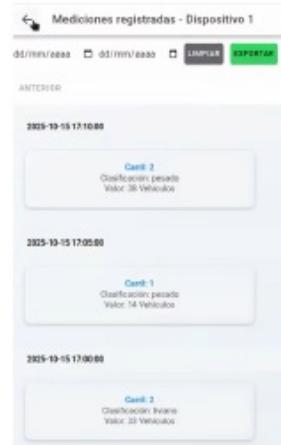


FIGURA 4.20. Visualización de la medición recibida en la interfaz web del sistema.

Después se validó la comunicación descendente del sistema, en la cual la interacción se inicia desde la interfaz web. El objetivo fue comprobar que los comandos generados por el usuario fueran correctamente transmitidos al backend, publicados en el tópico MQTT correspondiente y finalmente recibidos y ejecutados por el nodo de campo ESP32-C3.

En la figura 4.21 se muestra la interfaz del sistema desde la cual se ha emitido un comando hacia el dispositivo. El usuario seleccionó el tipo de comando a enviar y su valor (si es necesario) y el backend recibió esta solicitud mediante la API REST y la publica en el tópico `dispositivo/1/comando`, que queda a la espera de la respuesta del dispositivo.

Último Comando

Tipo de comando: Reset
Valor: resetear
Fecha: 2025-11-06 12:03:50
No hay respuesta asociada al último comando.

Crear Comando

Tipo de Comando	Seleccionar tipo de comando
Valor del Comando	

CREAR COMANDO

FIGURA 4.21. Generación de un comando desde la interfaz web.

En la figura 4.22 se muestra parte de la traza del proceso de ejecución del comando, donde la consola del módulo ESP32-C3 registra la recepción del comando.

```

t: diegoburgos-OptiPlex-5090:~/proyectos/ti_vazquez_v11$ Log ESP32C3
[...]
I (246946) GPRS: 0x3fc96150 28 02 00 00
I (246946) GPRS: CONNACK recibido, MQTT conectado
I (246946) GPRS: MQTT conectado
T (247346) GPRS: Comando enviado: AT+CIPSENDO=29

I (247476) GPRS: 0x3fc95f98 82 1b 00 01 00 16 2f 64 69 73 78 6f 73 89 74 69 [...]
.../dispositivo
T (247476) GPRS: 0x3fc95fae 76 6f 2f 31 2f 63 6f 6d 61 6e 64 6f 00 |yo
!/comando,]
I (248586) GPRS: CIPSENDO OK:
SEND OK
@
I (248586) GPRS: SUBSCRIBE enviado: /dispositivo/1/comando
I (252486) APP_ESP32C3: PUBLISH recibido. Retained: Si
I (252486) APP_ESP32C3: Tópico: /dispositivo/1/comando
I (252486) APP_ESP32C3: Payload: {"cmdId":16,"tipoComandoId":1,"valor":"resetear","fecha":"2025-11-06T15:03:50.025Z"}]


```

FIGURA 4.22. Visualización consola del módulo ESP32-C3 que registra la recepción del comando.

En la figura 4.23 se visualiza la ejecución del flujo de respuesta entre el nodo y el backend. En la consola superior se observa el log del ESP32-C3, que publica la respuesta con el resultado del procesamiento interno del contador. Esta respuesta es publicada por el firmware en el tópico `dispositivo/1/respuesta`, incluyendo los campos `fecha`, `cmdId`, `valor` y `dispositivoId`. En la consola inferior se aprecia el registro del backend, el cual recibe el mensaje desde el broker MQTT, valida su estructura y almacena la información en la base de datos MySQL.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo, junto con una reflexión sobre los resultados alcanzados y las posibles líneas de desarrollo futuro.

5.1. Resultados y metas

El sistema desarrollado permitió cumplir los objetivos propuestos, alcanzando una solución integral para la detección y transmisión de eventos de tránsito en entornos con conectividad limitada. La arquitectura implementada demostró ser eficiente, modular y adaptable a distintos escenarios de despliegue, manteniendo la integridad de los datos y la estabilidad del flujo de comunicación entre nodos de campo, servidor y cliente web.

A continuación, se sintetizan los principales resultados y aportes del proyecto:

- Se logró diseñar e implementar un sistema distribuido basado en protocolos abiertos (MQTT, REST y JSON), capaz de operar de forma confiable ante conectividad intermitente.
- El firmware embebido en el ESP32-C3 validó su capacidad para procesar tramas RS-232, almacenar eventos temporalmente y asegurar su retransmisión una vez restablecida la conexión.
- Se desarrolló una biblioteca específica para el manejo del módulo SIM800L, que permite ejecutar comandos AT y establecer la comunicación con el broker MQTT y que garantiza la publicación y suscripción de mensajes bajo condiciones variables de red.
- El backend, desarrollado en Node.js con Express y MySQL, garantizó la persistencia de los datos, la trazabilidad de los eventos y la autenticación segura mediante tokens JWT.
- El broker MQTT (Eclipse Mosquitto) permitió la comunicación asincrónica y la publicación confiable de mensajes entre dispositivos y servidor, con soporte para retención de mensajes.
- La interfaz web, desarrollada en Ionic y Angular, proporcionó una visualización clara y funcional de los eventos de tránsito, junto con la posibilidad de emitir comandos y supervisar el estado de los nodos en tiempo real.
- Las pruebas realizadas en laboratorio demostraron la estabilidad del sistema y su capacidad de recuperación ante fallas o desconexiones.

```

old":1]
I (290936) GPRS: CIPSEND OK:
SEND OK

I (290936) GPRS: PUBLISH enviado: /dispositivo/1/respuesta -> {"fecha":"2025-11-06T15:03:58.825Z","cmdId":16,"valor":"OK","dispositivoId":1}
I (290936) GPRS: Comando enviado: AT+CIPSEND=20

I (291070) GPRS: 0x3fc95f70 31 18 00 10 2f 64 09 73 70 6f 73 09 74 69 69 75 6f |1./dispositivo|
I (291076) GPRS: 0x3fc95f80 1f 31 2f 63 6f 6d 6c |1/comando|
I (291936) GPRS: CIPSEND OK:
SEND OK

I (291936) GPRS: PUBLISH enviado: /dispositivo/1/comando ->
I (291990) APP_ESP32C3: PUBLISH recibido. Retained: No
I (291990) APP_ESP32C3: Topico: /dispositivo/1/comando
I (291996) APP_ESP32C3: Payload:
[]

c: diego@bergeno-vaibad: ~/proyectos/Node_track/app_N ~
ispositivoId: 1
node-backend | [2025-11-06 12:06:04] : Trato de obtener ultimo comando para este dispositivoId: 1
node-backend | [2025-11-06 12:06:04] : Token en cache: IINIIIsInR5Cc
I61kpXVCJ9_eyJlc2VybW91bmQlOms1bmFtZS16ImFkbmluIiwjRecepción respuesta
MyyQT@hhtTdhN
ME3NDM4OTRhMGU8YTgwMWZjMyIsImRlc2NyxA10w51b6x9LCJ
PHL6g0YfiaWPww9caf_5bgvobYRYUNU
node-backend | [2025-11-06 12:06:04] : Trato de obtener Respuesta con cmdId: 16
node-backend | [2025-11-06 12:06:04] : MQTT mensaje recibido: /dispositivo/1/respuesta
sts
node-backend | [2025-11-06 12:06:09] : MQTT Ingreso respuesta : fecha: 2025-11-06T15:03:58.825Z, valor: OK, cmdId: 16
node-backend | [2025-11-06 12:06:09] : MQTT respuesta guardada para dispositivo 1

```

FIGURA 4.23. Intercambio de mensajes entre el ESP32-C3 y el backend durante la recepción y procesamiento de una respuesta.

Finalmente, en la Figura 4.24 se muestra la visualización del resultado en la interfaz web. Una vez almacenada la respuesta, la aplicación cliente consulta el endpoint correspondiente de la API REST y actualiza la vista con la información más reciente del dispositivo. De esta manera, el usuario puede verificar en tiempo real que el comando fue recibido y ejecutado correctamente, completando el ciclo de comunicación bidireccional del sistema.

- La arquitectura modular permitió aislar componentes, facilitar el mantenimiento y posibilitar futuras extensiones sin comprometer la estabilidad del sistema base.

El cronograma original se mantuvo en líneas generales, con ajustes menores asociados a la disponibilidad de hardware y a la calibración de los tiempos de respuesta del módulo GPRS. Los riesgos identificados durante la planificación, vinculados principalmente a la inestabilidad del enlace móvil y a la gestión de colas locales, fueron mitigados mediante estrategias de reconexión automática y verificación de integridad de datos, que demostraron ser efectivas en las pruebas finales.

5.2. Trabajo futuro

El trabajo realizado es un punto de partida para la evolución del sistema hacia una plataforma más completa, eficiente y adaptable a entornos operativos reales. Entre las líneas de continuidad propuestas se destacan las siguientes:

- Incorporar un módulo de comunicación que integre nativamente el protocolo MQTT, en reemplazo del SIM800L. Esta modificación permitiría reducir la complejidad del firmware, aumentar la confiabilidad del enlace y mejorar los tiempos de transmisión.
- Implementar mecanismos de actualización remota OTA para el firmware de los nodos de campo, con el fin de simplificar el mantenimiento y asegurar la uniformidad de versiones en despliegues múltiples.
- Incorporar un módulo de análisis histórico y visualización avanzada que permita detectar patrones de tránsito, generar reportes automáticos y apoyar la toma de decisiones operativas.
- Integrar servicios de geolocalización y mapas interactivos para representar la ubicación de los dispositivos y eventos en tiempo real.
- Evaluar el desempeño del sistema en entornos de campo prolongados, con el propósito de obtener métricas de confiabilidad, consumo energético y latencia bajo condiciones reales de operación.
- Desarrollar herramientas de monitoreo remoto y alertas automáticas, que notifiquen anomalías en los dispositivos o interrupciones de comunicación sin intervención manual.
- Incorporar técnicas de inteligencia artificial para la detección de tránsito no registrado, lo que permitiría incrementar la precisión del sistema en escenarios con oclusión parcial o interferencias.
- Migrar la comunicación móvil a redes 4G o 5G, con el fin de mejorar la disponibilidad, reducir la latencia y soportar mayor volumen de datos en despliegues masivos.

Dispositivo 1

Nombre: contador 1
Ubicación: Padre Buodo
Tipo contador: DTEC

Último Comando

Tipo de comando: Reset
Valor: resetear
Fecha: 2025-11-06 12:03:50
Respuesta asociada:

Valor: OK
Fecha: 2025-11-06 12:03:50

FIGURA 4.24. Visualización de la respuesta del dispositivo en la interfaz web tras el procesamiento exitoso en el backend.

4.5.2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en la prueba integral confirmaron el correcto funcionamiento de todo el sistema bajo condiciones reales de comunicación y sincronización de datos.

En particular, se observaron los siguientes aspectos destacados:

- Interoperabilidad completa: todos los componentes del sistema hardware, middleware y software interactuaron sin incompatibilidades ni pérdidas de información.
- Sincronización en tiempo real: la actualización de la interfaz web frente a la recepción de un nuevo evento.
- Confidabilidad del flujo de comandos: las órdenes enviadas desde el front-end fueron recibidas y ejecutadas correctamente por el nodo, con confirmaciones visibles en pantalla.
- Tiempos de ida y vuelta (round-trip): entre 3 y 5 segundos en condiciones normales de red GPRS, y hasta 12 segundos bajo conectividad inestable, sin pérdida de comandos ni duplicación de respuestas.
- Trazabilidad completa: cada evento quedó registrado en la base de datos con su respectivo timestamp e id de dispositivo.

La prueba end-to-end permitió validar la solidez de la arquitectura propuesta y su adecuación a escenarios reales de operación. El flujo completo, desde la generación de un evento hasta su visualización en la web y el control remoto del nodo, se ejecutó de forma estable, con tiempos de respuesta consistentes y trazabilidad total.

Estos resultados confirman que la solución es técnicamente viable para su despliegue en entornos de campo, que ofrece una integración transparente entre

Bibliografía

- [1] Juan Asiaín et al. «LoRa-Based Traffic Flow Detection for Smart-Road». En: *Sensors* 21.2 (2021), pág. 338. DOI: [10.3390/s21020338](https://doi.org/10.3390/s21020338). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/338>.
- [2] Jan Micko et al. «Review of IoT Sensor Systems Used for Monitoring the Road Infrastructure». En: *Sensors* 23.9 (2023), pág. 4469. DOI: [10.3390/s23094469](https://doi.org/10.3390/s23094469). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/9/4469>.
- [3] Gianluca Peruzzi et al. «Combining LoRaWAN and NB-IoT for Edge-to-Cloud Low-Power Connectivity». En: *Applied Sciences* 12.3 (2022), pág. 1497. DOI: [10.3390/app12031497](https://doi.org/10.3390/app12031497). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1497>.
- [4] Miovision. *TrafficLink / Managed Connectivity*. <https://www.miovision.com/> / trafficlink/. Soluciones comerciales. 2023.
- [5] Sensys Networks. Documentación técnica y productos. <https://www.sensysnetworks.com/>. 2023.
- [6] MetroCount. *Contadores y guías técnicas*. <https://www.metrocount.com/>. 2023.
- [7] Exemys Managed Connectivity. Accedido: 16-Sep-2025. 2025, URL: <https://www.exemys.com/site/index.shtml>.
- [8] Digi International. *Digi Remote Manager: IoT Device Monitoring and Management Solution*. <https://www.digi.com/products/iot-software-services/digi-remote-manager>. Accedido: 11 de septiembre de 2025. 2025.
- [9] A. A. Sukmandhani, M. Zarlis y Nurudin. «Monitoring Applications for Vehicle based on Internet of Things (IoT) using the MQTT Protocol». En: *BINUS Conference Proceedings*. Accedido: 11 de septiembre de 2025. 2023. URL: <https://research.binus.ac.id/publication/C1B25545-66P9-49C3-B873-D6C537EA23B3/monitoring-applications-for-vehicle-based-on-internet-of-things-iot-using-the-mqtt-protocol/>.
- [10] S. Bharath y C. Khusi. «IoT Based Smart Traffic System Using MQTT Protocol: Node-Red Framework». En: *2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. Accedido: 11 de septiembre de 2025. 2021. DOI: [10.1109/GCAT5182.2021.9587636](https://doi.org/10.1109/GCAT5182.2021.9587636).
- [11] Zuoling Niu. «Research and Implementation of Internet of Things Communication System Based on MQTT Protocol». En: *Journal of Physics: Conference Series* 012019 (2023). Accedido: 11 de septiembre de 2025.
- [12] OpenRemote. *OpenRemote: 100 % Open Source IoT Device Management Platform*. <https://openremote.io/>. Accedido: 11 de septiembre de 2025. 2025.
- [13] Espressif Systems. *ESP32-C3 Series Datasheet*. Accedido: 23-Sep-2025. Espressif Systems. 2021. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf.
- [14] Analog Devices. *Fundamentals of RS-232 Serial Communications*. <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/fundamentals-of-rs232-serial-communications.html>. Accedido: 11-Sep-2025. 2020.

hardware embebido, servicios de red y aplicaciones web. Además, la arquitectura modular basada en estándares abiertos garantiza la posibilidad de futuras expansiones y adaptaciones a nuevas tipologías de dispositivos o protocolos de comunicación.

4.6. Comparación con otras soluciones

Con el fin de evaluar el desempeño y pertinencia del sistema desarrollado frente a alternativas existentes, se realizó un análisis comparativo entre la solución propuesta y sistemas comerciales y académicos de gestión de dispositivos de campo y monitoreo vehicular.

Se consideraron seis criterios principales: costo de implementación, flexibilidad tecnológica, escalabilidad, comportamiento ante conectividad intermitente, adecuación a entornos locales y disponibilidad de soporte técnico. Esto permitió situar la solución frente a plataformas consolidadas y proyectos académicos similares.

Las soluciones comerciales ofrecen plataformas robustas con soporte integral, pero presentan altos costos y baja flexibilidad para integrar hardware heterogéneo o protocolos abiertos. Las propuestas académicas son más experimentales y abiertas tecnológicamente, aunque con limitaciones de madurez, soporte y adaptación a producción.

La solución desarrollada combina bajo costo, independencia tecnológica y arquitectura modular basada en estándares abiertos (MQTT, REST, JSON), que permite rápida adaptación a entornos con conectividad variable, como rutas argentinas, sin depender de infraestructura propietaria ni servicios móviles externos.

En la tabla 4.2 se observa la comparación de la solución propuesta frente a alternativas comerciales y académicas:

- [15] Texas Instruments. RS-232 Glossary and Selection Guide. <https://www.ti.com/lit/SLLA607>. Accedido: 11-Sep-2025, 2016.
- [16] Douglas E. Comer. *Internetworking with TCP/IP: Principles, Protocols, and Architecture*. 6th. Pearson, 2014. ISBN: 9780136085300.
- [17] OASIS y MQTT.org. *MQTT Version 5.0 Specification*. <https://mqtt.org/mqtt-specification/>. Accedido: 11-Sep-2025, 2019.
- [18] IBM. *What Is a REST API (RESTful API)?* <https://www.ibm.com/think/topics/rest-apis>. Accedido: 11-Sep-2025, 2021.
- [19] Microsoft Azure Architecture Center. *Web API Design Best Practices*. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/best-practices/api-design>. Accedido: 11-Sep-2025, 2022.
- [20] Texas Instruments. MAX232: Dual EIA-232 Driver/Receiver. Datasheet. 2016. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>.
- [21] Espressif Systems. *ESP-IDF Programming Guide for ESP32-C3*. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32c3/index.html>. Consultado el 11 de septiembre de 2025, 2024.
- [22] SIM800L GSM/GPRS Module Datasheet. Disponible en: https://simcom.ee/documents/SIM800L/SIM800L_Hardware_Design_V1.01.pdf. SIMCom Wireless Solutions. 2019.
- [23] Eclipse Foundation. *Eclipse Mosquitto: An Open Source MQTT Broker*. <https://mosquitto.org/>. Consultado el 11 de septiembre de 2025, 2025.
- [24] OpenJS Foundation. *Node.js JavaScript Runtime*. <https://nodejs.org/>. Consultado el 11 de septiembre de 2025, 2025.
- [25] Express.js Foundation. *Express: Fast, unopinionated, minimalist web framework for Node.js*. <https://expressjs.com/>. Consultado el 11 de septiembre de 2025, 2025.
- [26] Oracle Corporation. *MySQL: The World's Most Popular Open Source Database*. <https://www.mysql.com/>. Consultado el 11 de septiembre de 2025, 2025.
- [27] Sequelize. <https://sequelize.org/>. Accedido: 2025-09-25, 2025.
- [28] Winston - A logger for just about everything. <https://github.com/winstonjs/winston>. Accedido: 2025-09-25, 2025.
- [29] Morgan - HTTP request logger middleware for Node.js. <https://github.com/expressjs/morgan>. Accedido: 2025-09-25, 2025.
- [30] Ionic Team. *Ionic Framework - Cross-platform mobile apps with web technologies*. Último acceso: 19 de septiembre de 2025, 2025. URL: <https://ionicframework.com/>.
- [31] Angular Team. *Angular - One framework. Mobile desktop*. Último acceso: 19 de septiembre de 2025, 2025. URL: <https://angular.io/>.
- [32] Docker Documentation. *Docker Compose: Define and run multi-container applications*. <https://docs.docker.com/compose/intro/>. Accedido: 02-10-2025, 2025.
- [33] Espressif Systems. *ESP-IDF Programming Guide*. Último acceso: 19 de septiembre de 2025, 2025. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/>.
- [34] GitHub, Inc. *GitHub: Where the world builds software*. Último acceso: 19 de septiembre de 2025, 2025. URL: <https://github.com/>.
- [35] Martin Fowler. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Capítulo 11: Object-Relational Behavioral Patterns. Addison-Wesley Professional, 2002. ISBN: 978-0321127426.

4.6. Comparación con otras soluciones

45

TABLA 4.2. Comparación de la solución propuesta frente a alternativas comerciales y académicas.

Criterio	Propuesta	Comerciales	Académicas
Costo	Bajo (hardware económico + software abierto)	Alto (líneas y servicios)	Medio
Flexibilidad	Alta (protocolos estándar, modular)	Baja (propietaria)	Media
Escalabilidad	Alta (MQTT + API REST)	Alta	Media
Conectividad intermitente (colas FIFO, reintentos)	Totalmente soportada	Poco explotada	
Adecuación a rutas	Parcial	Adaptada a entornos rurales y semiurbanos	Genérica
Soporte y documentación	Media (open source, docs técnicas)	Alta (soporte empresarial)	Baja

Finalmente, la solución desarrollada logra un equilibrio entre robustez, bajo costo y adaptabilidad, que la posiciona como alternativa viable para proyectos de monitoreo vial en entornos con infraestructura limitada. Su orientación a estándares abiertos y su independencia de plataformas propietarias aseguran sostenibilidad y facilidad de futuras ampliaciones.

Bibliografía

45

- [36] M. Jones, J. Bradley y N. Sakimura. *JSON Web Token (JWT)*. RFC 7519. Internet Engineering Task Force (IETF). 2015. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519>.
- [37] Postman, Inc. *Postman API Platform*. Herramienta para pruebas y automatización de APIs REST. 2025. URL: <https://www.postman.com/>.
- [38] Postman, Inc. *Postman Collection Runner and Newman CLI*. Herramienta de Postman para ejecutar pruebas automatizadas de colecciones de API. 2025. URL: <https://learning.postman.com/docs/collections/running-collections/intro-to-collection-runs/>.
- [39] Inc. Postman. *Newman: Command-line Collection Runner for Postman*. <https://www.npmjs.com/package/newman>. Último acceso: 31 de octubre de 2025. 2025.
- [40] Google Developers. *Chrome DevTools*. Accedido: octubre 2025. 2024. URL: <https://developer.chrome.com/docs/devtools/>.
- [41] Google Developers. *Google Lighthouse*. Accedido: octubre 2025. 2024. URL: <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/>.
- [42] FHWA. *Traffic Monitoring Guide*. Inf. téc. Federal Highway Administration, 2022. URL: https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/tmguide/2022_TMG_Final_Report.pdf.
- [43] FHWA. *Traffic Detector Handbook, 3rd Edition*. Inf. téc. Federal Highway Administration, 2006. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/06108.pdf>.