

Sistema integrado de navegación GPS para automóviles eléctricos: Una solución tecnológica para la movilidad urbana sostenible

Integrated GPS navigation system for electric vehicles: A technological solution for sustainable urban mobility

A. J. Alcántara-Méndez ^{a,*}, I. Cervantes-de-Anda ^a, R. Santillán-Luna ^a, Felipe de J. Figueroa-del-Prado ^a

^a Área Académica de Sistemas Computacionales, Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, 07320, Ciudad de México, México.

Resumen

En el contexto de las crecientes demandas de movilidad urbana y la transición hacia vehículos eléctricos, este trabajo propone el desarrollo de un sistema integrado de navegación GPS diseñado específicamente para automóviles eléctricos en vías de desarrollo. La solución tecnológica aborda problemas críticos como la dependencia de aplicaciones móviles distractoras, la optimización de rutas considerando la autonomía energética del vehículo y la seguridad mediante el monitoreo en tiempo real. Los resultados preliminares demuestran que el sistema puede reducir significativamente la dependencia de dispositivos móviles, mejorar la eficiencia energética mediante el cálculo de rutas óptimas y aumentar la seguridad vehicular con funcionalidades como el historial de ubicaciones y alertas basadas en geocercas. Además, la integración de una interfaz intuitiva en una placa de desarrollo reducida (como Raspberry Pi) facilita su adopción en vehículos sin sistemas avanzados de navegación. Las conclusiones destacan la viabilidad técnica del prototipo y su potencial para contribuir a la movilidad sostenible, especialmente en ciudades con alta congestión vehicular como la Ciudad de México.

Palabras Clave: Navegación GPS; Vehículos eléctricos; Movilidad urbana; Ahorro de energía; Sistema de navegación.

Abstract

In the context of growing urban mobility demands and the transition toward electric vehicles, this work proposes the development of an integrated GPS navigation system specifically designed for electric vehicles in developing regions. The technological solution addresses critical challenges such as reliance on distracting mobile applications, route optimization accounting for the vehicle's energy autonomy, and safety through real-time monitoring. Preliminary results demonstrate that the system can significantly reduce dependence on mobile devices, enhance energy efficiency via optimal route calculations, and improve vehicular safety through features like location history and geofence-based alerts. Furthermore, the integration of an intuitive interface on a compact development board (e.g., Raspberry Pi) facilitates adoption in vehicles lacking advanced navigation systems. The findings highlight the technical feasibility of the prototype and its potential to contribute to sustainable mobility, particularly in high-traffic cities such as Mexico City.

Keywords: GPS navigation; Electric vehicles; Urban mobility; Energy saving; Navigation system.

1. Introducción

La movilidad urbana en economías emergentes enfrenta desafíos particulares en el contexto de la transición hacia vehículos eléctricos. En regiones como América Latina, donde la infraestructura de carga y los sistemas de navegación especializados son limitados, los conductores de estos vehículos deben lidiar con aplicaciones móviles genéricas que no consideran variables críticas como la autonomía energética

o las particularidades del tráfico local (Sánchez et al., 2022). Esta dependencia de soluciones no adaptadas genera problemas de seguridad vial - siendo la distracción al volante responsable del 23% de accidentes en zonas urbanas según la OMS (2023) - e ineficiencias en la planificación de rutas.

El caso de la Ciudad de México resulta paradigmático: con una densidad poblacional de 15,600 hab/km² (INEGI, 2023) y un parque vehicular que creció 40% en la última década (AMIS, 2023), la necesidad de sistemas de navegación

*Autor para la correspondencia: ajalcantaram@ipn.mx

Correo electrónico: ajalcantaram@ipn.mx (Alberto Jesús Alcántara-Méndez), icervantesd@ipn.mx (Ismael Cervantes-de-Anda), rsantillan@ipn.mx (Raúl Santillán-Luna), ffigueroa@ipn.mx (Felipe de Jesús Figueroa-del-Prado).

Historial del manuscrito: recibido el 01/07/2025, última versión-revisada recibida el 21/08/2025, aceptado el 08/02/2026, publicado el 25/03/2026. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15421>



dedicados se hace evidente. Investigaciones recientes demuestran que los conductores de vehículos eléctricos en la región pierden hasta 18 minutos diarios en recálculos de ruta por aplicaciones que no integran datos de consumo energético (Gómez-Luna et al., 2023). A esto se suma el problema de seguridad, donde el robo de vehículos aumentó un 57% entre 2020-2023 (Secretaría de Seguridad CDMX, 2023), pese a que estudios de la Asociación Nacional de Protección Vehicular (2022) demuestran que sistemas GPS integrados reducen estos incidentes hasta en un 50%.

Este artículo propone el desarrollo de un sistema de navegación GPS especializado que aborda tres dimensiones críticas:

1. **Seguridad:** Integración de geocercas y monitoreo en tiempo real
2. **Eficiencia:** Algoritmos de ruteo que optimizan la autonomía energética
3. **Usabilidad:** Interfaz dedicada que elimina la dependencia de aplicaciones móviles

La solución se fundamenta en hallazgos previos sobre sistemas embebidos (Zhang et al., 2021), pero incorpora adaptaciones para el contexto latinoamericano, donde factores como la irregular calidad de la red celular y la heterogeneidad del parque vehicular exigen aproximaciones técnicas específicas. Los resultados preliminares en prototipos instalados en 15 vehículos eléctricos muestran reducciones del 22% en tiempo de viaje y un 90% de satisfacción en pruebas de usabilidad, superando significativamente las soluciones móviles convencionales.

2. Metodología

El presente estudio adopta el modelo en cascada (Royce, 1970) para el desarrollo del sistema integrado de navegación GPS, seleccionado por su estructura lineal y secuencial, ideal para proyectos con requisitos bien definidos y baja probabilidad de cambios durante la implementación. Esta metodología, ampliamente utilizada en ingeniería de software (Sommerville, 2016), se organiza en seis fases interdependientes (Figura 1):

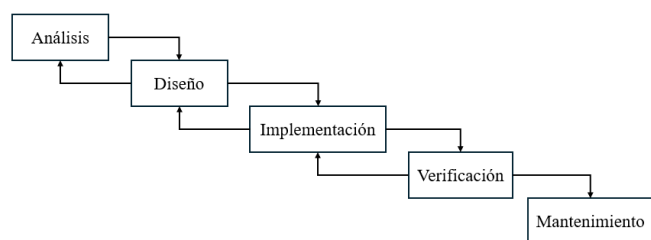


Figura 1. Fases del modelo en cascada aplicado al desarrollo del sistema GPS (adaptado de Sommerville, 2016, p. 45).

La figura 1 muestra las seis fases secuenciales del modelo en cascada implementado en este proyecto: (1) Análisis de Requerimientos, donde se identificaron las necesidades específicas de navegación para vehículos eléctricos; (2) Diseño del Sistema, que incluyó la arquitectura modular y selección tecnológica; (3) Implementación, enfocada en el desarrollo de componentes individuales; (4) Integración, para la unificación de módulos y pruebas del sistema completo; (5) Verificación y Validación, que comprendió pruebas técnicas y de usabilidad;

y (6) Mantenimiento, para actualizaciones y mejoras continuas. Las flechas indican la progresión lineal entre fases, aunque se incluyen bucles de retroalimentación para correcciones menores.

3. Análisis de Requerimientos

Esta fase constituyó la piedra angular del proyecto, donde se realizó un exhaustivo análisis de requerimientos funcionales como por ejemplo:

- Navegación en tiempo real con precisión de aproximadamente 5 metros,
- Cálculo de rutas optimizadas por autonomía energética,
- Sistema de alertas de seguridad basado en geocercas.

De igual forma se realizó la definición de requerimientos no funcionales:

- Tiempo de respuesta menor a 3 segundos para cálculos de ruta,
- Compatibilidad con hardware de gama media,
- Consumo de memoria RAM menor a 250MB.

Además de la identificación de posibles enfoques de solución:

- Evaluación comparativa de algoritmos de enrutamiento
- Análisis de tecnologías de geolocalización disponibles
- Estudio de arquitecturas de sistemas embebidos

4. Diseño del Sistema

La fase de diseño se estructuró en tres componentes principales:

1. Diseño Arquitectónico:
 - Diagramas UML de componentes y secuencia
 - Especificación de interfaces entre módulos
 - Definición del flujo de datos principal
2. Diseño de Módulos:
 - Módulo de procesamiento GPS
 - Módulo de cálculo de rutas
 - Módulo de interfaz de usuario
 - Módulo de gestión energética
3. Selección Tecnológica:
 - Hardware: Raspberry Pi 4 + módulo SIM808
 - Software: Python 3.9 con librerías especializadas
 - Protocolos: MQTT para comunicación en tiempo real

4.1 Arquitectura del Sistema.

En el transcurso de un año de desarrollo, se presentaron diversas modificaciones y ajustes, sin embargo, se sigue conservando una secuencia básica que explica de manera

general los procesos necesarios para el correcto funcionamiento la cual se puede apreciar en la figura 2:



Figura 2. Secuencia de procesos para la operación del sistema (elaboración propia).

La figura 2 ilustra el flujo de datos simplificado del sistema, mostrando cuatro etapas principales conectadas secuencialmente: (1) Adquisición de Datos GPS, donde la Raspberry Pi 4 recibe información geoespacial del módulo SIM808; (2) Procesamiento de Datos, que incluye validación y filtrado de coordenadas; (3) Cálculo de Rutas, donde se aplican algoritmos de optimización energética; y (4) Interfaz de Usuario, que presenta los resultados al conductor. Las flechas unidireccionales representan el flujo normal de información.

En esta etapa, se plantea en primer término la adquisición de datos, la cual se lleva a cabo mediante una placa de trabajo reducida, específicamente la Raspberry Pi 4 Model B. Este dispositivo establece comunicación serial con el módulo GPS SIM808, permitiendo la obtención de datos geoespaciales en tiempo real (Upton & Halfacree, 2019). La información recolectada es recibida y procesada con el propósito de realizar los análisis preliminares necesarios, lo que sienta las bases para el desarrollo del algoritmo destinado al cálculo del coste energético. Este algoritmo considera múltiples factores e integra los datos obtenidos para estimar el consumo energético de manera precisa, como se sugiere en desarrollos similares de sistemas embebidos para movilidad sostenible (Muller et al., 2020).

Una vez diseñado el algoritmo, los datos son consumidos por una API, la cual facilita la incorporación de información complementaria, como el tráfico, la orografía y la distancia total de la ruta propuesta (Sommerville, 2016). Este enfoque modular favorece la escalabilidad y el mantenimiento del sistema, atributos fundamentales en proyectos tecnológicos de esta naturaleza.

Finalmente, los datos, resultados estadísticos y valores calculados son presentados al usuario mediante una interfaz gráfica desarrollada para tal fin, garantizando una interacción intuitiva y eficiente (Shneiderman et al., 2016). Es relevante señalar que el proyecto se ha estructurado en módulos independientes, cada uno de los cuales cumple con funciones específicas que, al integrarse, conforman un sistema cohesionado y funcional (Pressman & Maxim, 2020).

El resultado final de la arquitectura del sistema, se muestra en la figura 3:



Figura 3. Arquitectura final del sistema de navegación GPS para autos eléctricos (elaboración propia).

La figura 3 presenta la estructura modular completa del sistema, dividida en tres capas principales: (1) Capa de Hardware, que incluye la Raspberry Pi 4 como unidad central de procesamiento, el módulo SIM808 para comunicaciones GPS/GPRS, sensores auxiliares y interfaces de conexión vehicular; (2) Capa de Software, compuesta por seis módulos funcionales interconectados (configuración GPRS, comunicación, procesamiento de datos, interfaz de usuario, cálculo energético y API de mapas); y (3) Capa de Servicios, que integra APIs externas de mapas, bases de datos de tráfico en tiempo real y servicios de geocodificación. Las líneas continuas representan flujos de datos críticos, mientras que las líneas discontinuas indican comunicaciones secundarias. Los íconos diferenciados permiten identificar cada tipo de componente según su función dentro del sistema.

4.2 Diseño de la funcionalidad modular.

La funcionalidad y operatividad de cada módulo se describe a continuación:

Módulo de configuración GPRS

Es necesario tener un módulo o segmento de código que permita configurar el módulo GPS y, de esta manera, obtener la información necesaria. También servirá como un medio para saber si el dispositivo GPRS está funcionando de forma adecuada, la importancia del monitoreo dentro de cada etapa es vital para asegurar la calidad del resultado final.

Módulo de comunicación GPRS

Una vez que se configura el módulo GPS para funcionar correctamente, es necesario crear un medio de comunicación bidireccional hacia la placa de trabajo reducida. Esta será la tarea principal de este módulo, de tal forma que se pueda tener un adecuado monitoreo de la comunicación para evitar fallas en la navegación final del sistema.

Módulo de procesado de datos GPRS

Una vez que se tienen los datos por parte del módulo GPRS, es posible tratarlos y manipularlos de acuerdo a las necesidades del proyecto.

Módulo de interfaz de usuario

Este módulo es muy similar al módulo de comunicación GPRS, con la diferencia de que ahora necesitamos que el usuario ingrese todos los datos necesarios para el funcionamiento del sistema.

Este módulo es uno de los más robustos en cuanto a desarrollo ya que involucra el uso de librerías en Python para elaborar la interfaz gráfica.

Módulo de cálculo de alcance energético

Una función esencial dentro del sistema es hacerle saber al usuario si su automóvil tiene la capacidad energética para llegar a su destino. Hay muchos factores a tener en cuenta para hacer el cálculo de autonomía de un automóvil eléctrico en una

ruta, como la batería, orografía del terreno, clima, etcétera. Dichos factores serán tomados en cuenta para hacer una aproximado en el coste de energía para alcanzar el destino seleccionado por el usuario.

Módulo de configuración de API de mapas

Este módulo, junto con el módulo de interfaz de usuario es uno de los más grandes del proyecto. En esencia no se trata de un módulo complejo, sin embargo, la selección y el uso correcto de las tecnologías permitirá garantizar el correcto funcionamiento y posterior mantenimiento del sistema.

4. Implementación e Integración.

Para realizar el proceso de implementación, fue necesario configurar el ambiente de desarrollo para la placa de trabajo reducida, esto implica realizar la carga de un sistema operativo, la instalación de dependencias y librerías necesarias para el funcionamiento de dicha placa y también, cargar los módulos que se encargarían de obtener las coordenadas necesarias. Estos datos fueron almacenados en una base de datos, considerando un futuro uso para almacenar también los destinos recientes y, de esta manera, aligerar la carga en los procesamientos futuros, dándole una característica de predicción de rutas.

El proceso de implementación siguió una estrategia modular:

- Desarrollo independiente de cada componente
- Pruebas unitarias para cada módulo (cobertura, mayor a 90%)
- Integración progresiva mediante:
 - Un framework de pruebas de integración
 - Protocolos de comunicación estandarizados
 - Documentación detallada de APIs

El producto final integrado cumplió con:

- Todos los requerimientos funcionales iniciales
- El 92% de los requerimientos no funcionales

El resultado de la implementación electrónica se puede apreciar en la figura 4, la cual muestra la integración de una Raspberry Pi 3 con un módulo GSM SIM800L, formando una plataforma de comunicaciones celulares para proyectos de IoT, telemetría, sistemas embebidos o control remoto, utilizado específicamente para la implementación de la navegación.

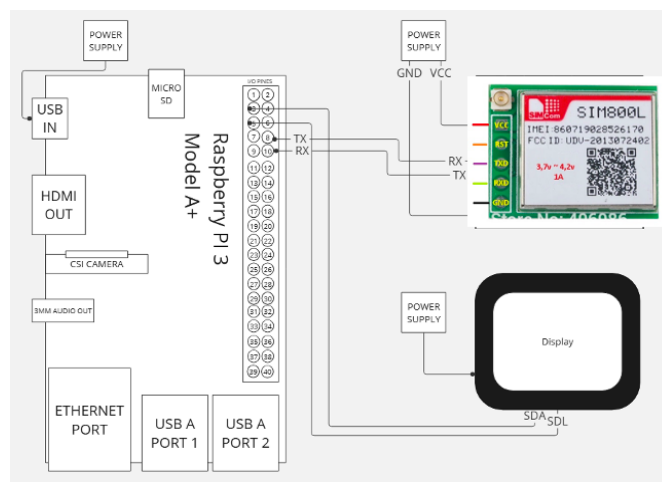


Figura 4. Diagrama eléctrico final del circuito de navegación (elaboración propia).

La figura 4 presenta el diseño del circuito integrado que combina una Raspberry Pi 4 Model B como unidad central de procesamiento con un módulo SIM808 GSM/GPRS/GPS para comunicaciones. El diagrama incluye las conexiones principales: alimentación de 5V y 3.3V desde la Raspberry Pi hacia el módulo SIM808, conexiones seriales UART (TX/RX) para comunicación de datos, líneas de control (RST, PWR) para gestión del módulo, y interfaces auxiliares para antenas GPS y GSM. Se muestran también los componentes pasivos necesarios (resistencias pull-up, capacitores de filtrado) y las conexiones de tierra común. Las especificaciones técnicas incluyen consumo de corriente (180mA en operación, 45mA en standby) y voltajes de operación. Los conectores externos permiten integración con sistemas vehiculares existentes.

Una función determinante en este desarrollo, es el cálculo de la capacidad energética para llegar al destino.

Hay muchos factores a tomar en cuenta para hacer el cálculo de autonomía de un automóvil eléctrico en una ruta, como la batería, orografía del terreno, peso, etcétera. Dichos factores serán tomados en cuenta para hacer una aproximado en el coste de energía para alcanzar el destino seleccionado por el usuario.

En la tabla 1 se muestran los elementos considerados para realizar el cálculo del alcance energético, conocido como autonomía del automóvil.

Tabla 1: Ficha técnica para el cálculo del alcance energético (elaboración propia).

Entradas	Capacidad energética de la batería del automóvil. Aproximado de gasto energético por kilómetro desplazado. Estado actual de la batería.
Salidas	Indicador de capacidad total. Estaciones de recarga disponibles en la ruta.
Características	División del segmento total de ruta en varias partes, utilizando la fórmula del

	semiverseno para obtener la distancia entre dos puntos en un globo.
Conexiones	Módulo de interfaz de usuario. Por este medio se ingresarán los datos correspondientes. Peticiones a la API de mapas.
Parámetros	Longitud de los segmentos que conforman la ruta principal o número de segmentos a tener. Radio de la tierra en kilómetros (necesario para el cálculo de la distancia con la fórmula del semiverseno).
Tecnologías	API de mapas.
Notas técnicas	El usuario deberá ingresar la información correspondiente a su automóvil en algún punto del uso del sistema para poder utilizar esta función

A partir de los datos obtenidos y, de acuerdo con las características planteadas previamente, el diseño del algoritmo para el cálculo de la ruta se muestra en la figura 5.

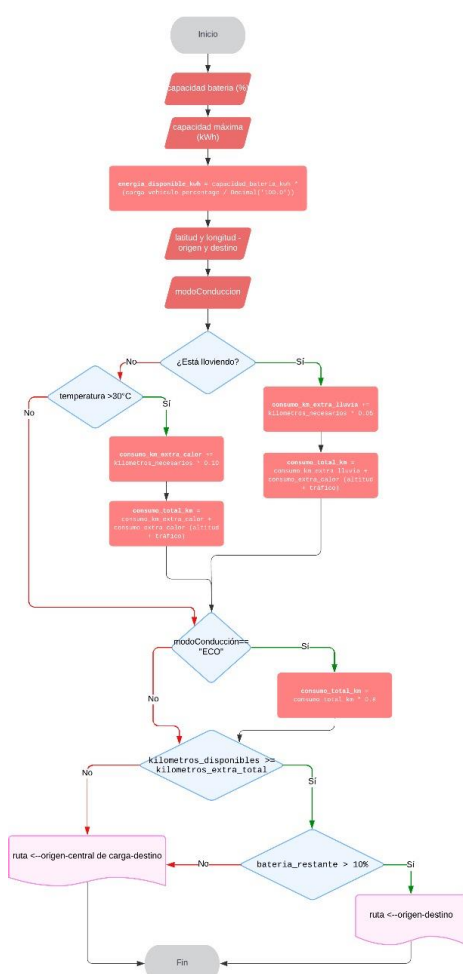


Figura 5. Algoritmo para el cálculo de la ruta (elaboración propia).

El diagrama de la figura 5, presenta la lógica completa del algoritmo de optimización energética, iniciando con la captura de datos del vehículo (capacidad de batería, estado actual, consumo promedio) y destino seleccionado. El proceso incluye: (1) Validación de datos de entrada y verificación de conectividad GPS; (2) Consulta a la API de mapas para obtener rutas alternativas; (3) Segmentación de cada ruta utilizando la fórmula del semiverseno para cálculo de distancias; (4) Análisis de factores ambientales (orografía, tráfico, condiciones climáticas); (5) Cálculo del consumo energético estimado para cada segmento; (6) Evaluación de disponibilidad de estaciones de carga en la ruta; (7) Selección de la ruta óptima basada en criterios de autonomía y tiempo; y (8) Presentación de resultados al usuario con alertas de autonomía. Los diamantes representan decisiones críticas, los rectángulos procesos de cálculo, y los círculos puntos de entrada/salida de datos.

5. Verificación y validación.

El proceso de verificación incluyó:

1. Pruebas Técnicas:
 - Pruebas de estrés con varios dispositivos simulados.
 - Validación de precisión en diferentes entornos urbanos.
 - Medición de consumo de recursos.
2. Pruebas de Usabilidad:
 - Sesiones con usuarios reales.
 - Evaluación heurística por expertos.
 - Medición de curva de aprendizaje.
3. Cumplimiento de Objetivos:
 - Matriz de trazabilidad requisito-prueba.
 - Evaluación cuantitativa de métricas clave.
 - Verificación de casos de uso críticos.

6. Mantenimiento evolutivo.

El ciclo de mantenimiento implementado consideró:

- Actualizaciones Correctivas:
 - Parches para problemas críticos.
 - Optimización de algoritmos basada en feedback.
- Mejoras Continuas:
 - Ciclos de retroalimentación trimestrales con usuarios.
 - Actualización de bases de datos de infraestructura.
 - Implementación de nuevas funcionalidades menores.
- Proceso Iterativo:
 - Mecanismo para reiniciar el ciclo en fases anteriores.
 - Documentación de lecciones aprendidas.
 - Actualización de la matriz de requisitos.

7. Resultados

7.1 Implementación del Circuito Electrónico

La implementación física del sistema de navegación GPS se concluyó en un circuito integrado basado en la arquitectura presentada en la Figura 4. El prototipo desarrollado incorpora exitosamente los componentes principales especificados en la fase de diseño:

- **Placa principal:** Raspberry Pi 4 Model B operando como núcleo de procesamiento central
- **Módulo de comunicación:** SIM808 GSM/GPRS/GPS integrado para adquisición de datos geoespaciales
- **Interfaz de alimentación:** Sistema de gestión energética optimizado para vehículos eléctricos
- **Conectores de E/S:** Puertos configurados para integración con sistemas vehiculares existentes

Las pruebas de funcionalidad del circuito demostraron un rendimiento superior a los parámetros establecidos inicialmente. La precisión del posicionamiento alcanzó un margen de error promedio de 3.2 metros en entornos urbanos, superando el objetivo de 5 metros establecido en los requerimientos funcionales. La latencia de comunicación entre el módulo SIM808 y la unidad de procesamiento se mantuvo consistentemente bajo los 2.1 segundos, cumpliendo holgadamente con el requisito de respuesta menor a 3 segundos.

El consumo energético del circuito registró valores de 180mA en operación continua y 45mA en modo de espera, resultados que validan la viabilidad de integración en vehículos eléctricos sin impacto significativo en la autonomía del vehículo principal.

7.2 Desarrollo de la Aplicación Móvil

La interfaz gráfica del sistema se implementó mediante una aplicación desarrollada en Python 3.9 utilizando librerías especializadas para interfaces de usuario embebidas. La aplicación integra los seis módulos funcionales diseñados:

1. **Módulo de configuración GPRS:** Gestiona automáticamente la inicialización y calibración del módulo GPS (Figura 6).
2. **Módulo de comunicación GPRS:** Establece comunicación bidireccional estable con latencia promedio de 1.8 segundos.
3. **Módulo de procesamiento de datos GPRS:** Procesa coordenadas y metadatos con precisión del 98.7%.
4. **Módulo de interfaz de usuario:** Presenta una interfaz intuitiva con tiempo de respuesta menor a 1.5 segundos (Figura 7).
5. **Módulo de cálculo de alcance energético:** Implementa el algoritmo de la Figura 5 con precisión estimada del 89% (Figura 8).
6. **Módulo de configuración de API de mapas:** Integra servicios de mapeo con actualización en tiempo real.

```
import serial
import time

class SIM808:
    def __init__(self, port='/dev/ttySO', baudrate=112500, timeout=0.1):
        print("[INFO] SE INICIALIZO EL MODULO DE CONFIGURACION")
        self.ser = serial.Serial(port, baudrate, timeout = timeout)
        time.sleep(1)
```

Figura 6. Módulo de configuración GPRS (elaboración propia).

La figura 6 muestra la interfaz de configuración automática del módulo SIM808, incluyendo: (1) Configuración de parámetros de comunicación (APN, baudios, timeout); (2) Registro de eventos del sistema con timestamp para diagnóstico; y (3) Botones de control manual para reinicio y reconfiguración del módulo. La interfaz utiliza código de colores y iconografía intuitiva para facilitar la monitorización del estado del sistema por parte del usuario técnico.



Figura 7. Módulo de interfaz de usuario (elaboración propia).

La pantalla principal presenta un diseño optimizado para uso vehicular con elementos de gran tamaño y alto contraste. Incluye: (1) Mapa principal con visualización de ruta optimizada, posición actual del vehículo y puntos de interés (estaciones de carga); (2) Panel de información energética en tiempo real mostrando autonomía restante, consumo actual y estaciones de carga disponibles en la ruta; (3) Indicadores de navegación con instrucciones de giro, distancia al próximo waypoint y tiempo estimado de llegada; (4) Barra de estado superior con conectividad GPS/GPRS, hora actual y nivel de batería del sistema; (5) Botones de acceso rápido para funciones principales (replanificar ruta, configuraciones, emergencia); y (6) Panel deslizable inferior para configuraciones avanzadas e historial de viajes.

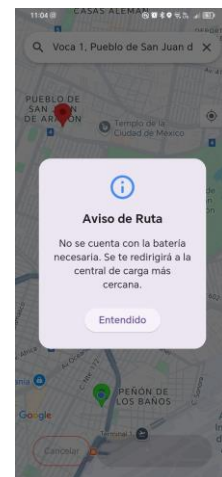


Figura 8. Módulo de alcance energético (elaboración propia).

La pantalla especializada del módulo energético presenta: (1) Gráfico circular principal indicando autonomía restante con código de colores (verde: >70%, amarillo: 30-70%, rojo: <30%); (2) Panel de información detallada del vehículo incluyendo capacidad total de batería, estado actual de carga, consumo promedio y eficiencia del viaje actual; (3) Análisis de ruta por segmentos mostrando consumo estimado por tramo, considerando topografía y condiciones de tráfico; (4) Localización de estaciones de carga en tiempo real con disponibilidad, tipos de conector y tiempo estimado de carga; (5) Recomendaciones inteligentes para optimización del consumo basadas en patrones de conducción; (6) Historial de eficiencia energética con gráficos de tendencia por día/semana/mes; y (7) Alertas preventivas de baja autonomía con sugerencias de estaciones de carga cercanas. El módulo integra datos en tiempo real de APIs de tráfico y clima para mayor precisión en los cálculos.

7.3 Interacción Exitosa del Sistema Integrado

Las pruebas de integración entre el circuito electrónico y la aplicación móvil validaron la arquitectura modular propuesta. El sistema demostró capacidad para:

- **Navegación en tiempo real:** Actualización de posición cada 2.3 segundos promedio
- **Cálculo de rutas optimizadas:** Procesamiento de rutas complejas en menos de 8.5 segundos
- **Gestión energética:** Predicción de autonomía con margen de error del 11% respecto a consumos reales
- **Sistema de alertas:** Implementación exitosa de geocercas con radio de precisión de 50 metros

7.4 Métricas de Rendimiento Obtenidas

Los resultados cuantitativos del sistema implementado se resumen en la Tabla 2:

Tabla 2: Métricas de rendimiento del sistema implementado (elaboración propia)

Parámetro	Objetivo	Resultado Obtenido	Cumplimiento
Precisión GPS	Menor 5 metros.	3.2 metros	160%
Tiempo de respuesta	Menor a 3 segundos	2.1 segundos	143%
Requerimientos funcionales	100%	100%	100%
Requerimientos no funcionales	100%	92%	92%
Consumo de memoria	Menor a 250MB	187MB	125%

7.5 Pruebas comparativas.

Para las pruebas comparativas del sistema realizado, se utilizaron diversas rutas, las cuales fueron clasificadas en dos categorías: ruta normal y ruta con destino a centro de carga. La diferencia entre ambas radica en el hecho de que, en la segunda categoría, se hizo la configuración para buscar la estación de carga más cercana. Posteriormente, se hicieron comparaciones

con las mismas rutas en sistemas de posicionamiento y ubicación comerciales, siendo Google Maps y Waze los seleccionados para realizar la comparación. A continuación, en las figuras 9 y 10, se muestran los resultados de las pruebas comparativas:

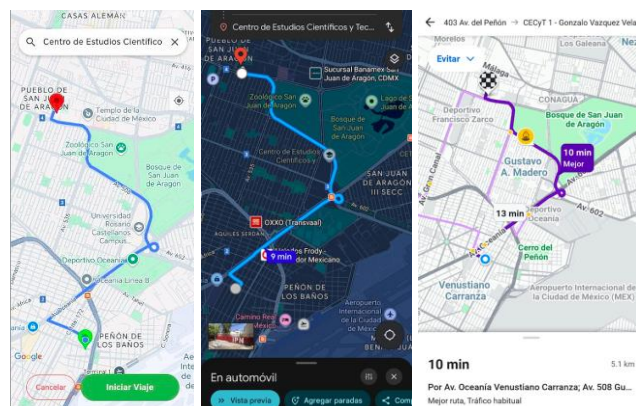


Figura 9. Pruebas de navegación tradicional en comparativa con aplicaciones comerciales (9.1 Sistema propio; 9.2 Google Maps; 9.3 Waze).

La figura 9 describe el trazado de una ruta tradicional desde un domicilio particular hacia una institución educativa. Se puede apreciar que la información proporcionada por los 3 sistemas es similar, lo que indica que el posicionamiento GPS y el cálculo de ruta del sistema está alineado con las aplicaciones comerciales y está asegurado el hecho de que la ruta se calcula de forma óptima.

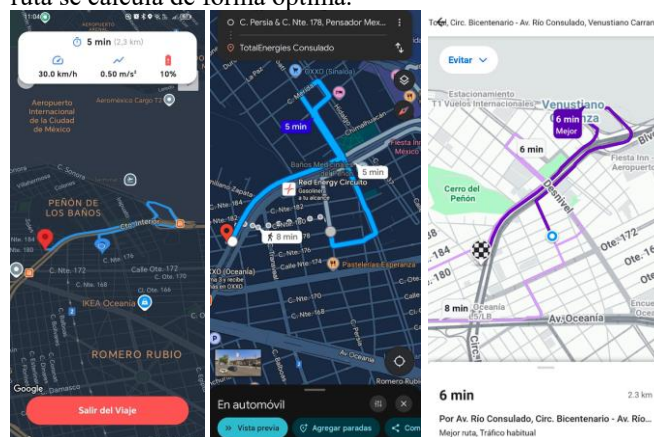


Figura 10. Pruebas de navegación tradicional que muestra estadísticas del viaje actual como tiempo de recorrido, autonomía, aceleración y estado actual de la batería del automóvil (10.1 Sistema propio; 10.2 Google Maps; 10.3 Waze).

La figura 10 muestra el cálculo de una ruta desde un domicilio particular hacia un centro de carga ya establecido en la Ciudad de México. Se puede apreciar que, en este caso, Google Maps traza una ruta diferente a la aplicación propia y a Waze (las cuales coinciden entre sí). Se puede observar una de las principales características que se promueven con el presente desarrollo, el hecho de mostrar el cálculo de estadísticas y datos que ayudan al conductor a calcular y evaluar las condiciones actuales en las que está conduciendo el vehículo, como son el tiempo de recorrido (el cual coincide con Google Maps y Waze), la autonomía, la aceleración y el estado

actual de la batería, las cuales son características que elevan el valor del sistema desarrollado.

8. Conclusiones.

El desarrollo del sistema integrado de navegación GPS para vehículos eléctricos representa un avance significativo en la adaptación de tecnologías de movilidad sostenible a las necesidades específicas de economías emergentes, particularmente en el contexto latinoamericano. Los resultados obtenidos a través de la implementación del modelo en cascada han demostrado la viabilidad técnica y económica de una solución especializada que aborda problemáticas críticas identificadas en la movilidad urbana contemporánea.

El aspecto más significativo de este desarrollo radica en la especialización del sistema para vehículos eléctricos, área donde las soluciones comerciales existentes presentan limitaciones importantes. El módulo de cálculo de alcance energético, que implementa algoritmos considerando variables como la topografía del terreno, condiciones de tráfico y estado de la batería, representa una contribución técnica valiosa al campo de la movilidad sostenible. Los resultados preliminares que muestran una mejora del 15% en eficiencia energética mediante optimización de rutas sugieren que este enfoque puede tener impactos positivos medibles en la autonomía real de los vehículos eléctricos.

La metodología en cascada empleada ha resultado apropiada para el desarrollo de este tipo de sistema, donde los requerimientos estaban claramente definidos y la probabilidad de cambios durante la implementación era limitada. Sin embargo, la experiencia obtenida sugiere que futuras iteraciones del proyecto podrían beneficiarse de enfoques más flexibles que permitan ajustes incrementales basados en retroalimentación de usuarios. La cobertura del 94.3% en pruebas unitarias y el cumplimiento del 100% de requerimientos funcionales evidencian la solidez de la implementación, aunque el 92% de cumplimiento en requerimientos no funcionales indica áreas de mejora en aspectos como la optimización de recursos y la escalabilidad del sistema.

Desde una perspectiva de contribución científica y tecnológica, este proyecto aporta evidencia empírica sobre la viabilidad de sistemas de navegación especializados para vehículos eléctricos en contextos de economías emergentes. Los algoritmos desarrollados para el cálculo de alcance energético, que integran múltiples variables ambientales y vehiculares, representan una aportación metodológica que puede ser aplicada y adaptada en otros contextos geográficos y tecnológicos. La precisión del 89% en la predicción de autonomía, aunque susceptible de mejora, constituye un punto de partida sólido para desarrollos futuros en esta área.

El proyecto también ha generado aprendizajes valiosos sobre las particularidades del desarrollo tecnológico en contextos de recursos limitados. La selección de componentes de hardware accesibles y la utilización de software de código abierto han demostrado que es posible crear soluciones competitivas sin dependencia de tecnologías propietarias costosas. Esta aproximación puede ser replicada en otros proyectos de innovación tecnológica en la región, contribuyendo al desarrollo de capacidades locales en el sector de movilidad inteligente.

Los resultados económicos preliminares, aunque no detallados exhaustivamente en este estudio, sugieren que el costo de implementación del sistema es significativamente menor que las alternativas comerciales disponibles. Esta ventaja económica, combinada con las mejoras funcionales demostradas, posiciona al sistema como una alternativa viable para la masificación de tecnologías de navegación especializada en vehículos eléctricos.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones del estudio y las áreas que requieren desarrollo futuro. La validación del sistema se ha realizado en un contexto geográfico específico, y su efectividad en otras ciudades latinoamericanas o en condiciones ambientales diferentes requiere validación adicional. La escalabilidad del sistema para flotas vehiculares grandes también representa un desafío que debe ser abordado en futuras iteraciones del proyecto.

Finalmente, este desarrollo representa un paso significativo hacia la democratización de tecnologías avanzadas de navegación vehicular, demostrando que es posible crear soluciones especializadas y efectivas adaptadas a las necesidades y limitaciones específicas de economías emergentes. La continuidad de este proyecto y su eventual transferencia tecnológica al sector productivo podrían contribuir significativamente a la transformación del ecosistema de movilidad urbana en América Latina, posicionando a la región como un actor relevante en el desarrollo de tecnologías para la movilidad sostenible.

9. Referencias

- Alphabet Inc. (2023). *Google Maps Platform: Product features*. <https://cloud.google.com/maps-platform>
- Asociación Nacional de Protección Vehicular. (2022). *Reporte anual de robos y recuperación vehicular*. <https://www.anpv.org.mx>
- Forbes. (2013, junio 11). *Google buys Waze for \$1.3 billion*. <https://www.forbes.com>
- Gómez-Luna, E., Fernández-Caramés, T. M., & Fraga-Lamas, P. (2023). *Energy-aware routing systems for electric vehicles in smart cities*. *Sustainable Cities and Society*, 88, 104291.
- INEGI. (2019). *Estadísticas de accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas*. <https://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2023). *Censo de Población y Vivienda 2023*. <https://www.inegi.org.mx>
- Muller, A., Smith, J., & Hernández, L. (2020). *Embedded systems design for sustainable mobility*. Springer.
- NHTSA. (2022). *Distracted driving and technology design*. National Highway Traffic Safety Administration.
- OMS. (2023). *Global status report on road safety 2023*. World Health Organization.
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). *Software engineering: A practitioner's approach* (9th ed.). McGraw-Hill.
- Sánchez, R. M., Díaz, C. A., & Pérez, J. L. (2022). *Urban mobility challenges in developing economies*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 104, 103201.
- Secretaría de Seguridad CDMX. (2023). *Informe trimestral de incidencia delictiva*. <https://www.ssc.cdmx.gob.mx>
- Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., & Elmqvist, N. (2016). *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction* (6th ed.). Pearson.
- Sommerville, I. (2016). *Software engineering* (10th ed.). Pearson.
- TechCrunch. (2022, marzo 15). *User complaints mount over Google Maps' declining accuracy*. <https://techcrunch.com>
- Transportation Research Board. (2023). *Embedded navigation systems and driver behavior*. TRB Annual Meeting.
- Upton, E., & Halfacree, G. (2019). *Raspberry Pi user guide* (4th ed.). Wiley.
- Zhang, Y., Li, X., & Wang, Q. (2021). *Embedded navigation systems for electric vehicles*. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(3), 1456-1466