

Diseño de red IIoT para la detección vehicular

IIoT network design for vehicle detection

Erick M. Díaz-Rodríguez

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones.
Maracaibo, Venezuela

 <https://orcid.org/0009-0006-7647-4749> | Correo electrónico: erickdiaz.rdgz@gmail.com


Gabriela V. Rey-Pérez

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones.
Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0008-0640-6323> | Correo electrónico: gabrp2908@gmail.com

Andrés A. Sánchez-Semprún

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0000-0002-6918-224X> | Correo electrónico: andres.sanchez.68880@uru.edu

Gilberto J. Araujo-Fernández

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones.
Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0008-5586-4945> | Correo electrónico: gilberto.araujo@uru.edu

Recibido: 04/10/2024 Admitido: 11/03/2025 Aceptado: 08/05/2025

Resumen

La medición del tráfico vehicular es de suma importancia en zonas urbanas a fin de monitorear el flujo de vehículos, por lo que se realizó el diseño de una red IIoT para la medición del tráfico de una avenida de Maracaibo, estado Zulia. Se empleó un enfoque descriptivo y proyectivo, con un diseño de campo, no experimental, longitudinal y cuantitativo, aplicando métodos de observación directa y documental. Los resultados indican que la tecnología LoRaWAN es la más idónea, además, se describieron los requerimientos y se seleccionaron los equipos de la red. Para el diseño se posicionaron los equipos de detección y red, se comprobó la factibilidad de los enlaces, se planteó el presupuesto del proyecto y se comprobó la correcta operación del equipo de detección. Se concluye que el diseño de red propuesto permite la contabilización vehicular y transmisión de estos datos, posibilitando su implementación rentable en la ciudad.

Palabras clave: Tránsito vehicular, IoT, sensor, LoRaWAN, radioenlace.

Abstract

The measurement of vehicular traffic is of utmost importance in urban areas in order to monitor the flow of vehicles, the purpose of this paper was design of an IIoT network was carried out to measure the traffic of an avenue in Maracaibo, Zulia state. A descriptive and projective approach was used, with a field, non-experimental, longitudinal and quantitative design, applying direct observation and documentary methods. The results indicate that LoRaWAN technology is the most suitable, in addition, the requirements were described and the network equipment was selected. For the design, the detection and network equipment were positioned, the feasibility of the links was checked, the project budget was proposed and the correct operation of the detection equipment was verified. In conclusion, the proposed network design allows the vehicle accounting and the transmission of this data, enabling its profitable implementation in the city.

Keywords: Vehicular traffic, IoT, sensor, LoRaWAN, radio link.

Introducción

La obtención de datos referentes al tráfico vehicular es de suma importancia en las grandes zonas urbanas a fin de controlar y monitorear el flujo de vehículos en las ciudades dado que sirve como herramienta esencial para prevenir el aumento del tráfico, comprobando el flujo vehicular existente y generando una movilización eficiente entre los usuarios. La ausencia de un sistema de medición efectivo representa un inconveniente en la planificación de proyectos viales, influyendo desfavorablemente a la calidad de vida de los ciudadanos, aumentando los tiempos de viaje y generando un mayor desgaste en las obras viales.

Una de las problemáticas más frecuentes en la ciudad de Maracaibo es la falta de fluidez en las arterias viales en horas pico, lo que ocasiona un aumento en la congestión del tráfico vehicular, siendo definida por Thomson y Bull [1] como “la condición en la que un alto número de vehículos se movilizan a una velocidad sin restricciones, progresando de manera irregular y obstaculizando el movimiento de los demás, resultando en un incremento del tiempo de tránsito para cada uno”.

Es por esto que la presente investigación busca proponer el diseño de una red IIoT que posibilite la contabilización de vehículos en la ciudad de Maracaibo, a fin de llevar un registro del flujo vehicular y proporcionar una herramienta que permita optimizar la gestión de recursos en la ciudad, con el identificando los puntos de mayor congestión en la vialidad terrestre en tiempo real para redistribuir las arterias viales y controlar el tránsito vehicular. Rodríguez y Bravo [2] expresan que “el IIoT impulsa el crecimiento urbano a través del análisis de datos en tiempo real, asistiendo en la toma de decisiones que mejoran la calidad de vida de los habitantes”. La implementación de dichos sistemas facilita la disminución del tráfico vehicular, reduciendo el tiempo de espera en los semáforos, lo cual respalda la sostenibilidad de la movilización urbana.

El estudio realizado por García, Parra, Jiménez, Lloret, & Lorenz [3] titulado: “Real-time traffic monitoring in urban areas using low-cost IoT sensors: A case study in Barcelona”, detalla la propuesta de un sistema de control vehicular que brinda un manejo más eficiente para el tráfico, proporcionando a esta investigación la base para la realización del diseño de la red de sensores IIoT.

Asimismo, el trabajo de Gite y Sukode [4] titulado: “Sistema de control y monitoreo de la congestión del tráfico vehicular con IoT” describe la implementación de un sistema que permite la gestión dinámica de señales de tráfico, posibilitando la implementación de tecnologías IoT para el aumento de la eficiencia y confiabilidad del sistema, contribuyendo a este trabajo en la manera de detectar y almacenar datos relacionados con la evolución de la congestión vehicular.

Durante esta investigación, se emplearon diferentes métodos de recopilación de datos para el desarrollo del diseño de red, como la revisión bibliográfica de fuentes especializadas, la recopilación y análisis de datos estadísticos referente al flujo vehicular, la elaboración de fichas técnicas correspondientes a los equipos incorporados en la red, y la realización de pruebas de verificación para el análisis del tráfico vehicular, así como del equipo de detección elaborado. Los resultados posibilitan la obtención de una red de conteo de vehículos que facilite el análisis de los datos para contribuir de forma directa a la reducción del congestionamiento vehicular en la ciudad de Maracaibo.

Materiales y métodos

La investigación fue de tipo descriptiva y proyectiva, con diseño de campo, no experimental, longitudinal y cuantitativo, se aplicaron técnicas de observación directa y documental y se realizó en la Universidad Rafael Urdaneta, estado Zulia, Venezuela. A continuación, se describen las fases y procedimientos llevados a cabo para diseñar la red IIoT para la medición del tráfico vehicular (Figura 1).

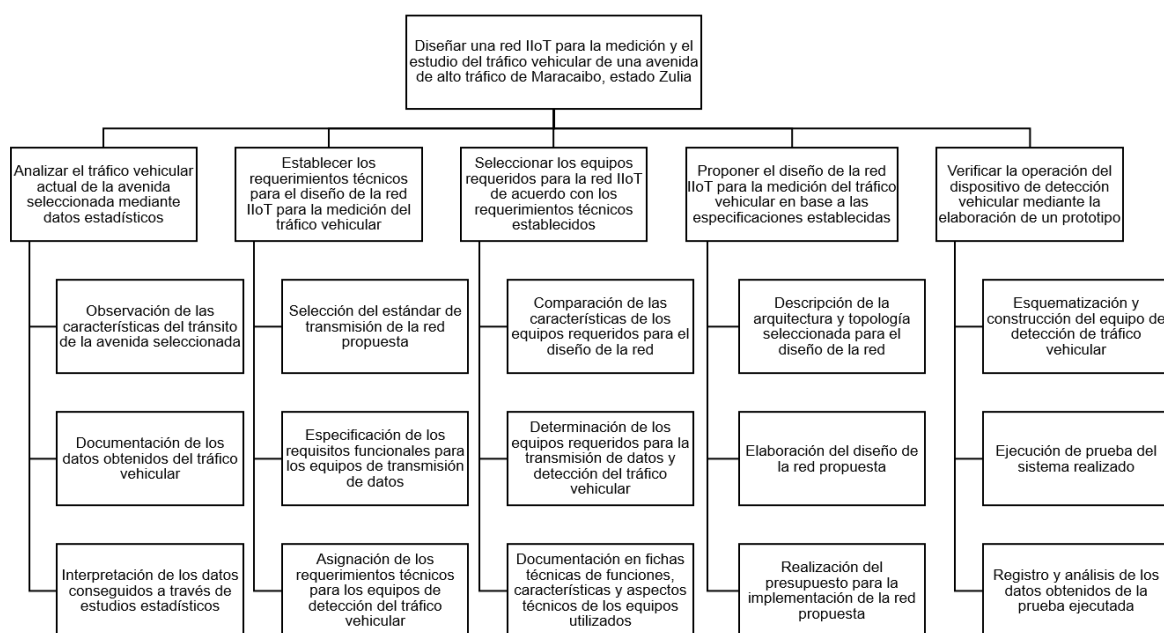


Figura 1. Diagrama del procedimiento de la investigación

Fase I. Análisis del tráfico vehicular de una avenida de la ciudad

En esta etapa se realizaron mediciones del tráfico vehicular de forma directa, en las horas pico de la mañana y la tarde, específicamente de 7:30 am a 8:30 am y de 5:00 pm a 6:00 pm, efectuadas en tres días diferentes de la misma semana, y se complementó con la repetición de estas mediciones en otra semana no consecutiva. Posteriormente, se interpretaron los datos de la avenida mediante análisis estadísticos.

Fase II. Determinación de los requerimientos técnicos de la red

En esta fase se llevó a cabo la selección de la tecnología de transmisión mediante una comparación entre las más destacadas, en función de indicadores como: frecuencia, velocidad de transmisión, rango de cobertura, requisitos de alimentación y número de canales. Los requerimientos técnicos de los equipos de red y de detección se presentaron en tablas, donde se especificaron cada una de las necesidades de los mismos para la red propuesta.

Fase III. Selección de los equipos requeridos

En cuanto a la selección de los equipos de red y de detección, se realizaron comparaciones entre distintas tecnologías y marcas, considerando para los equipos de red: la cobertura, frecuencia, velocidad de transmisión, cantidad máxima de nodos de sensores soportados, resistencia a la intemperie, capacidad de interconexión, temperatura de operación y costo. Para la elección del sensor del equipo de detección se consideró: el rango y ángulo de detección, el tipo de detección, la tensión de operación y el rango de temperatura. Posteriormente, se describieron los equipos seleccionados en fichas técnicas con el objetivo de recolectar las especificaciones y aspectos técnicos de los mismos.

Fase IV. Propuesta de diseño de la red

Para la propuesta del diseño de la red, en primer lugar, se describió la arquitectura y las topologías presentes en la misma, para determinar el posicionamiento de los equipos de red y detección mediante el software Google Earth, el cual también se empleó para extraer las coordenadas de las edificaciones en donde se localizan los radiotransmisores y gateway distribuidos en la ciudad. Luego de ubicar los equipos de la red se utilizaron los simuladores UISP Design Center y Radio Mobile, con la finalidad de comprobar la factibilidad

de los radioenlaces establecidos. Además, a partir de la obtención de la cantidad de equipos que conforman la red, se elaboró el presupuesto para la implementación del proyecto en la avenida y su expansión a la ciudad de Maracaibo.

Fase V. Verificación del dispositivo de detección vehicular

Por último, se llevó a cabo la esquematización y construcción del equipo de detección, en donde se requirió el sensor de ultrasonido y el microcontrolador, así como un protoboard, dos resistencias de 1 k Ω y de 560 Ω , cableado para realizar las conexiones, cable de alimentación y una batería. Además, se programó del dispositivo para ejecutar la prueba del mismo, la cual se llevó a cabo de 12:25 pm a 12:45 pm en la entrada del estacionamiento de la Universidad Rafael Urdaneta, donde se registraron los vehículos entrantes mediante observación directa y con el dispositivo elaborado, a fin de comparar ambos conteos y obtener la capacidad de conteo del equipo de detección.

Resultados y discusión

Análisis del tráfico vehicular de una avenida de la ciudad

Con respecto al análisis del tráfico vehicular, este se realizó en la avenida Las Delicias durante las horas pico determinadas, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de la intersección Av. Las Delicias y calle 78 Dr. Portillo

Intersección Av. Las Delicias con Dr. Portillo	Duración del semáforo (seg)	Cantidad de autos por ciclo	Cantidad de autos por hora
Norte hacia Sur	R: 47; V: 26	17	1056
Sur hacia Norte	R: 51; V: 28	15	989

En la Tabla 1 se evidenció una circulación promedio de 2045 vehículos aproximadamente, movilizándose por la Av. Las Delicias en el periodo de una hora; además se observó un alto tráfico vehicular con un elevado grado de congestión. A su vez, se identificó un nivel de servicio C en la intersección evaluada, donde la libertad de maniobra y la velocidad de los usuarios se ven limitadas.

Determinación de los requerimientos técnicos de la red

Se requirió de la selección de la tecnología de comunicación inalámbrica. En la Tabla 2 se muestra una comparación de las tecnologías Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN y Zigbee:

Tabla 2. Comparación técnica entre tecnologías de comunicaciones inalámbricas

Tecnología	Wi-Fi	Bluetooth	LoRaWAN	Zigbee
Frecuencia	2.4 y 5 GHz	2.4 GHz	902-928 MHz	868/915 MHz y 2.4 GHz
Velocidad de transmisión	11-300 Mbps	1 Mbps	0.3-50 Kbps	20/40/250 Kbps
Rango de cobertura	100 m	10 m	2-5 Km (zonas urbanas)	10-100 m
Requisitos de alimentación	Altos - Horas de batería	Medios - Días de batería	Muy bajos - Años de batería	Bajos - Años de batería
Número de canales	14/25	79	Hasta 64	1/10/16

Con la información recopilada se estableció la tecnología LoRaWAN como el estándar de transmisión principal empleado en la red, dado sus bajos requisitos de alimentación y su amplio rango de cobertura con respecto a las demás tecnologías probadas. De igual forma, se seleccionó el estándar Wi-Fi para la conexión de nodos de mayor jerarquía, dado el soporte de altos volúmenes de tráfico de datos que esta proporciona.

Seguidamente, se exponen los requisitos mínimos que deben cumplir los equipos de red y de detección vehicular para garantizar el correcto funcionamiento de la red propuesta, durante un periodo de tiempo considerable y con mínimo mantenimiento (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Requerimientos técnicos de los equipos de red

Equipos de red	Requerimientos técnicos
Gateway LoRaWAN	<ul style="list-style-type: none"> ● Escalabilidad ● Seguridad ● Disponibilidad ● Alta confiabilidad ● Mínimo mantenimiento ● Vida útil prolongada ● Resistencia a la intemperie ● Capacidad de interconexión ● Consumo energético mínimo ● Soporte a más de 100 nodos de sensores ● Topología dinámica
Radiotransmisor Ubiquiti	
Switch Ubiquiti	
Router Ubiquiti	

Tabla 4. Requerimientos técnicos de los equipos de detección

Equipos de detección	Requerimientos técnicos
Sensor de detección vehicular	<ul style="list-style-type: none"> ● Capacidad de conteo y detección de presencia ● Capacidad de operación bajo condiciones climáticas desfavorables ● Consumo energético mínimo ● Vida útil prolongada ● Capacidad de operación de 24 horas al día ● Velocidad de procesamiento alta ● Compatibilidad con módulo de comunicación LoRa ● Almacenamiento alto ● Capacidad de interconexión ● Potencia de transmisión alta ● Alta sensibilidad
Microcontrolador	
Módulo de comunicación LoRa	

Selección de los equipos requeridos

Para la selección de los equipos que se incorporan a la red, fue necesario comparar dispositivos de diversas marcas, que se encontraban en un rango similar de precios y características. A continuación, en la Tabla 5, se presenta la comparación entre diferentes gateways, considerando los requerimientos previamente especificados, a fin de evaluar su integración en la red:

Tabla 5. Comparación entre diversos gateway LoRaWAN

Gateway	Milesight	Dusun	Dragino	Khomp
Modelo	UG67	DSGW-014	OLG02	ITG 201
Cobertura	5 km, 15 km (Línea de vista)	5-10 km	5 km	2-5 km
Frecuencia	433/868/915 MHz	433/868/915 MHz	433/868/915 MHz	868/915 MHz
Velocidad de transmisión	10/100/1000 Mbps RJ45	10/100 Mbps RJ45	10/100 Mbps RJ45	10/100 Mbps RJ45
Canales de transmisión (Tx) y recepción (Rx)	8 (Half/ Full-duplex)	8 (Half/Full-duplex)	1 Tx y 2 Rx	8 (Full-duplex)
Cantidad de nodos sensores	1000-2000	1000-2000	300	1000
Resistencia a la intemperie	IP67	IP66	-	IP65
Capacidad de interconexión	802.11 b/g/n, 3G/4G y GPS	BLE 5.2, 802.11 b/g/n y LTE	802.11 b/g/n y 3G/4G	3G/4G
Temperatura de operación	-40 °C a 70 °C	-20 °C a 65 °C	-20 °C a 50 °C	-40 °C a 50 °C
Costo	650,00 usd	600,00 usd	125,00 usd	550,00 usd

De lo anterior, se seleccionó el gateway UG67 de la marca Milesight como el equipo intermediario entre los nodos de sensores y la red Wi-Fi, debido a que proporciona una transmisión por RJ45 de hasta 1000 Mbps, así como una gran cobertura de 5 km y hasta 15 km con línea de vista, con una transmisión simultánea por 8 canales, junto con una capacidad de hasta 2000 nodos sensores, la cual brinda grandes beneficios de escalabilidad, permitiendo la expansión de la red a toda la ciudad. Además, este dispositivo posee el mayor grado de protección IP y rango de temperatura de operación entre los dispositivos comparados, ofreciendo una alta resistencia a la intemperie y a las altas temperaturas de la ciudad.

En cuanto a la elección del radiotransmisor Wi-Fi, se compararon distintas marcas relevantes del mercado, como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación entre radiotransmisores

Radiotransmisor	D-link	TP-Link	Ubiquiti	Mikrotik
Modelo	DAP-3711	CPE220	NBE-2AC-13	MANTBOX 2 12s
Cobertura	5 km	13 km	15 km	1 km
Frecuencia	5.18-5.32 GHz	2.4-2.483 GHz	2.412-2.472 GHz	2.312-2.732 GHz
Velocidad de transmisión	867 Mbps	300 Mbps	330 Mbps	300 Mbps
Resistencia a la intemperie	IP66	IPX5	IEC 68-2-11/6/5 ETS 300 019-1-4	IP54
Capacidad de interconexión	802.11 a/n/ac	802.11 b/g/n	802.11 a/n/ac	802.11 b/g/n
Temperatura de operación	-40 °C a 65 °C	-40 °C a 70 °C	-40 °C a 70 °C	-40 °C a 70 °C
Costo	200,00 usd	60,00 usd	100,00 usd	100,00 usd

A través de la comparación realizada en la Tabla 6, se evidenció que la opción más apropiada para la red es el NBE-2AC-13 de la marca Ubiquiti, el cual permite la comunicación entre la red de sensores y el nodo central. Este radiotransmisor posee una velocidad de hasta 330 Mbps y de 1000 Mbps por RJ45. Si fuese necesaria la conexión inalámbrica entre este y el gateway, solo se puede establecer con el estándar 802.11n, igualmente se prefiere realizar una conexión alámbrica entre los mismos para alcanzar velocidades más altas. Además, este permite una comunicación de hasta 15 km con línea de vista, posibilitando las transmisiones a largas distancias requeridas en la red. Adicionalmente, este equipo otorga resistencia a la intemperie y a altas temperaturas que se necesitan para su correcta operación.

A través de un estudio de mercado realizado, se determinó que el switch y router UISP de la marca Ubiquiti son idóneos para la incorporación en la red propuesta, dado que son los que mejor se acoplan a los requerimientos técnicos planteados, además de evitar incompatibilidades con el radiotransmisor seleccionado. Cabe mencionar que ambos poseen un costo de 109,00usd cada uno.

Por otro lado, en cuanto a los equipos de detección, se presenta una comparación en la Tabla 7 entre múltiples tecnologías de sensores para su incorporación en el sistema de detección. Se obtuvo que el sensor idóneo para el equipo es el ultrasónico (HC-SR04), el cual dispone de un rango de detección de hasta 4 metros, cumpliendo las distancias mínimas requeridas. Además de poseer un ángulo de detección de entre 15° a 20°, así como un rango de temperatura de hasta 50 °C, permitiendo la detección con una temperatura exterior alta, como la existente en la ciudad de Maracaibo.

Tabla 7. Comparación entre sensores de distintas tecnologías

Sensor	Ultrasónico	Infrarrojo	Microondas	Láser
Modelo	HC-SR04	HC-SR501	Rcwl-0516	ky-008
Rango de detección	4 m	7 m	7 m	2 m
Ángulo de detección	15° a 20°	Hasta 110°	Rango esférico	Punto fijo
Tensión de operación	3.3-5 V	5-12 V	4-28 V	5 V
Rango de temperatura	0 °C a 50 °C	0 °C a 50 °C	10 °C a 40 °C	-10 °C a 40 °C

Finalmente, se seleccionó el microcontrolador ESP32, el cual ofrece las mejores características entre las marcas actuales en el mercado, cuyos precios rondan los 10,00 usd, siendo el costo del dispositivo seleccionado de 9,00usd. De igual forma, se eligió el módulo de comunicación LoRa SX1276, el cual es uno de los mejores módulos en la actualidad, y cuenta con un costo aproximado de 10,00usd. Estos equipos bajan su costo de forma notable al adquirir una cantidad considerable de los mismos.

A continuación, se presentan las fichas técnicas del radiotransmisor y del gateway elaboradas en este trabajo de investigación (Figura 2).

FICHA TÉCNICA DE EQUIPO	
Características Generales	
Equipo	Gateway LoRaWAN
Modelo	UG67
Marca/Fabricante	Milesight
Dimensiones	
Ancho (mm)	164
Alto (mm)	240
Largo (mm)	90.9
Función	
Proporción de cobertura a los nodos de la red, permitiendo la comunicación de estos para la recepción de información y transmisión de comandos relevantes.	
	

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Suministro energético	6 V a 12 V (802.3 af PoE)
Consumo de potencia	3.6 W
Potencia de transmisión	27 dBm
Sensibilidad	-140 dBm
Velocidad de transmisión	10/100/1000 Mbps RJ45
Cobertura	5 km, 15 km (Línea de vista)
Bandas de frecuencia	EU868 / US915
Canales de transmisión y recepción	8 (Half/Full-dúplex)
Estándar de transmisión	IEEE 802.11 b/g/n (2.4 GHz)
Procesador	Quad-core 1.5 GHz, 64-bit ARM Cortex-A53
Memoria	512 MB DDR4 8 GB eMMC
Grado de protección	IP67
Temperatura de operación	-40°C a +70°C
Humedad de funcionamiento	0% a 95% sin condensación

FICHA TÉCNICA DE EQUIPO	
Características Generales	
Equipo	Radiotransmisor
Modelo	NBE-2AC-13
Marca/Fabricante	Ubiquiti
Dimensiones	
Ancho (mm)	189
Alto (mm)	189
Largo (mm)	125
Función	
Transmisión, codificación y amplificación de señales radioeléctricas de amplia cobertura capaz de interconectar nodos punto a punto o punto a multipunto.	
	

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Suministro energético	24 V, 0.5 A (802.3 af PoE)
Potencia de transmisión	27 dBm
Sensibilidad	-68 a -96 dBm
Ganancia	13 dBi
Cobertura	15 km (Línea de vista)
Ancho del haz	H: 40° / E: 15°
Velocidad de transmisión	330 Mbps, 100/1000 Mbps RJ45
Frecuencia de operación	2412 – 2472 MHz
Estándar de transmisión	IEEE 802.11 a/n/ac
Procesador	Atheros MIPS 74Kc, 533 MHz
Memoria	64 MB DDR2
Protección en exteriores	IEC 68-2-14
	IEC 68-2-5
ETS 300 019-1-4	
Protección ESD/EMP	Aire: ±24kV, Contacto: ±24kV
Temperatura de operación	-40°C a +70°C
Humedad de funcionamiento	5% a 95% sin condensación

Figura 2. Fichas técnicas del gateway (izquierda) y del radiotransmisor (derecha)

Propuesta de diseño de la red

La red IIoT propuesta cuenta con diversos segmentos que permiten asegurar el correcto funcionamiento de la misma en sus respectivos puntos (Figura 3). Los nodos finales de la red, identificados como los equipos de detección vehicular, se comunican de forma inalámbrica a la red LoRaWAN mediante los módulos que estos incorporan. Luego, los gateway permiten la conexión entre la red LoRa y Wi-Fi a través de la comunicación con los radios mediante conexiones con RJ45, el cual ofrece velocidades de 1000 Mbps.

Por otro lado, los radiotransmisores se encuentran conectados hasta el nodo central a través de enlaces Wi-Fi, permitiendo la centralización de los datos y brindando tolerancia a fallas, de manera que, de perderse la conexión de un enlace, la red podrá continuar su funcionamiento.

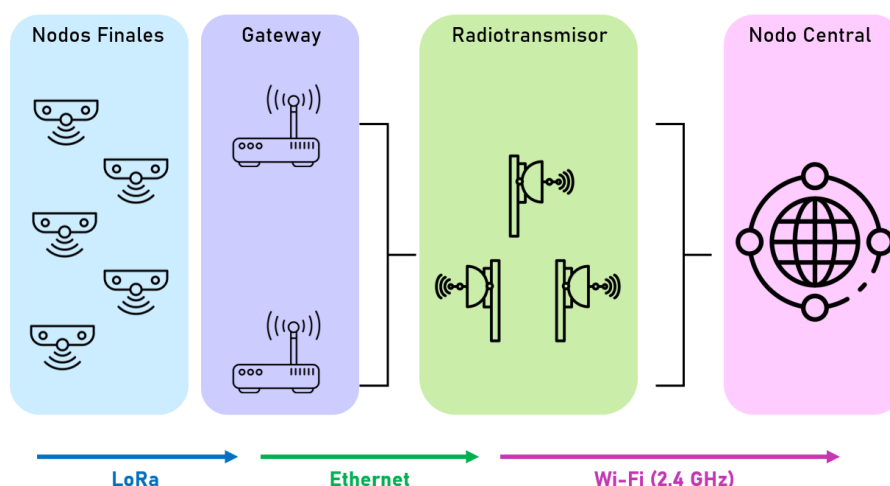


Figura 3. Arquitectura de la red propuesta

Dadas las tecnologías seleccionadas y los equipos empleados, se identifican de forma general dos redes en el diseño. Primeramente, la red LoRaWAN, la cual se despliega en una topología de estrella en donde los equipos de detección ubicados en cada uno de los semáforos de la avenida se conectan a un equipo central, siendo este un gateway, encargado de la recepción de los datos y la redirección de los mismos [5]. Por otro lado, la red Wi-Fi, la cual se encuentra configurada en una topología de malla parcial, donde los radiotransmisores se conectan entre sí, y algunos se conectan al nodo central de la red, proporcionando de esta forma diferentes rutas para la transmisión de información hacia este último. En el trabajo de Zhang & Liu [6] titulado: "Edge Computing in IoT-Based Traffic Management Systems: Architecture and Performance Evaluation" se analizan diferentes arquitecturas para la gestión de tráfico.

Ahora bien, para la elaboración del diseño de la red IIoT, se requiere detallar la disposición de los equipos de detección en los semáforos de la avenida. Para ello se propone la instalación de estos en cada semáforo presente en la avenida de interés, de forma que sean capaces de contabilizar el flujo de vehículos circulantes en cada canal de la vía, por lo que cada intersección semaforizada quedaría configurada para la captación de datos del conteo vehicular, para su posterior almacenamiento y transmisión.

En cuanto la disposición de los equipos de red en la ciudad, se realizó la búsqueda y selección de edificaciones públicas o gubernamentales con la suficiente altura para ubicar los gateway y radios, donde fueron elegidos los edificios que se presentan en la Figura 4. Además, se muestran los radioenlaces diseñados en color azul y la extensión de la Av. Las Delicias en color rojo.

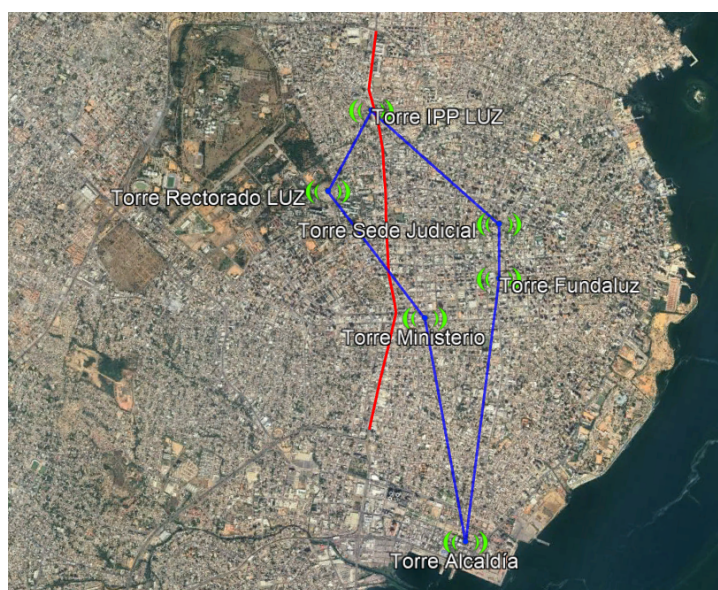


Figura 4. Enlaces Wi-Fi entre los radiotransmisores

Para la ubicación de los gateway pertenecientes a la red, se seleccionaron las torres del Ministerio Público y el IPP LUZ a fin de cubrir gran parte de la ciudad y la avenida, además se definió el nodo central de la red en la Alcaldía de Maracaibo, en la cual se almacenará y analizará la información recolectada. De esta forma, se tiene un total de seis (6) radioenlaces que no presentan edificios de gran altura de por medio que puedan obstruir la línea de vista o las zonas de Fresnel, posibilitando el correcto funcionamiento de los mismos. Las alturas de los radiotransmisores y gateway dispuestos se encuentran en un rango de 40 a 60 metros y las longitudes de los radioenlaces son de hasta 3,13 km, permitiendo de esta manera, la transmisión a altas velocidades gracias al radiotransmisor escogido.

Debido al posicionamiento de los equipos, se ejecutaron una serie de simulaciones para comprobar la factibilidad de los enlaces propuestos, donde luego de realizar las configuraciones pertinentes a cada software fueron obtenidos los datos que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Factibilidad de los radioenlaces propuestos

Enlace de radio	Potencia recibida	Sensibilidad	Margen
Alcaldía-Ministerio	-60 dBm	-74 dBm	14 dB
Alcaldía-Fundaluz	-61 dBm	-74 dBm	13 dB
Fundaluz-Sede Judicial	-47 dBm	-68 dBm	21 dB
Ministerio-Rectorado LUZ	-57 dBm	-74 dBm	17 dB
Sede Judicial-IPP LUZ	-57 dBm	-74 dBm	17 dB
Rectorado LUZ-IPP LUZ	-52 dBm	-71 dBm	19 dB

Tal como se evidenció en la Tabla 8, los radioenlaces planteados tienen un margen de 13 a 21 dB, donde el enlace de margen menor (Alcaldía-Fundaluz) es suficiente para mantener la comunicación en el mismo, en caso de presentarse atenuaciones añadidas por lluvia, gases, ruido u obstrucciones en las zonas de Fresnel, los radiotransmisores seleccionados permiten cambiar su modulación para disminuir la sensibilidad hasta -96 dBm y mantener la conexión de los radios; se debe tener en cuenta que esto disminuiría la velocidad de transmisión del radioenlace.

Por otra parte, a fin de demostrar la viabilidad del proyecto se presenta en la Tabla 9 un estimado de costos para el desarrollo del mismo, en donde se plantea la cantidad de equipos requeridos en la implementación de la red propuesta, así como los costos de mano de obra y gastos adicionales, tales como: equipos de protección

contra descargas electroestáticas hacia la red interna, equipos de alimentación eléctrica, cableado requerido, entre otros.

Para la ejecución de este proyecto se requiere de la construcción, instalación y verificación de aproximadamente 60 equipos de detección para cubrir todos los semáforos presentes en la avenida Las Delicias, además de la instauración de los equipos de red en conjunto con su configuración y prueba. Por ende, se estima que para llevar a efecto este proyecto se requieren alrededor de ocho (8) semanas.

Tabla 9. Presupuesto para la implementación del proyecto en la avenida Las Delicias

Lista de equipos	Costo unitario	Cantidad	Precio total
Gateway UG67	650,00 usd	2	1.300,00 usd
Radio NBE-2AC-13	100,00 usd	12	1.200,00 usd
Switch UISP	109,00 usd	4	436,00 usd
Router UISP	109,00 usd	2	218,00 usd
Equipo de detección	10,00 usd	60	600,00 usd
Mano de obra	-	-	500,00 usd
Extras	-	-	800,00 usd
Total	-	80	5.054,00 usd

Ahora bien, con la finalidad de expandir la red y cubrir la ciudad de Maracaibo, Fonseca y Quilote [3] indican que se tienen 226 intersecciones semaforizadas en la ciudad, y considerando que existen cuatro (4) semáforos activos en cada intersección, se tiene un aproximado de 904 semáforos. Por lo tanto, para realizar la expansión de la red se requiere instalar un equipo de detección por carril, y dado que se tienen al menos dos carriles por semáforo habría que implementar aproximadamente 1808 dispositivos de detección vehicular para conseguir cubrir todas las intersecciones semaforizadas. En la Tabla 10 se presenta el presupuesto requerido para la implementación de la red en la ciudad de Maracaibo.

Tabla 10. Presupuesto para la implementación del proyecto en la ciudad

Lista de equipos	Costo unitario	Cantidad	Precio total
Gateway UG67	650,00 usd	4	2.600,00 usd
Radio NBE-2AC-13	100,00 usd	20	2.000,00 usd
Switch UISP	109,00 usd	7	763,00 usd
Router UISP	109,00 usd	2	218,00 usd
Equipo de detección	10,00 usd	1.808	18.080,00 usd
Mano de obra	-	-	2.466,00 usd
Extras	-	-	1.000,00 usd
Total	-	1.841	27.127,00 usd

Es importante destacar que, para el proyecto de expansión de la red, se requiere la implementación de equipos de red adicionales, en el que se necesitan aproximadamente ocho (8) radiotransmisores, tres (3) switch y dos (2) gateway distribuidos estratégicamente en la ciudad, con el propósito de abarcar en su totalidad los dispositivos de detección desplegados en la misma. Adicionalmente, la ejecución de este proyecto se realizará de forma gradual, donde se pretende instalar los dispositivos de detección cada 10 semáforos, es decir, que se implementan 20 equipos cada ciclo. Por lo tanto, al tener que realizarse 91 ciclos, se requiere de aproximadamente 91 semanas para la instauración de los equipos de detección vehicular en toda la ciudad de Maracaibo.

De igual forma, se debe considerar el tiempo adicional para la implementación de los radiotransmisores, los gateway, switches y routers de la red, los cuales pueden ser implementados en aproximadamente nueve

(9) semanas, incluyendo la comprobación del funcionamiento de la red. Por lo que, para llevar a efecto este proyecto se requerirá de 100 semanas en total.

Verificación del dispositivo de detección vehicular

Para la verificación del dispositivo de detección vehicular se requirió de la construcción de un prototipo capaz de registrar los datos referentes al conteo de vehículos, en un entorno controlado como se presenta en la Figura 5.

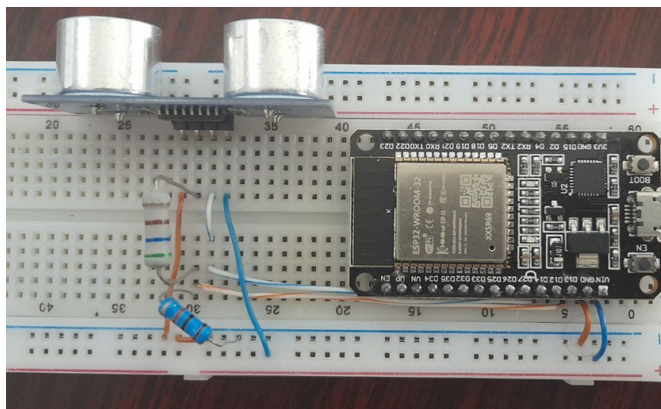


Figura 5. Construcción del prototipo

Se requirió de la programación del ESP32 mediante el lenguaje Arduino IDE, a fin de proporcionar al dispositivo la capacidad de conectividad Wi-Fi, así como la funcionalidad de detección y conteo vehicular y la interfaz del usuario para la visualización de los datos (Figura 6).

Una vez realizada la construcción y programación del prototipo, se llevó a cabo la prueba de conectividad del dispositivo de detección y la red Wi-Fi creada, en donde se verificó la dirección IP asignada de forma estática. Asimismo, mediante la ejecución del comando ping hacia el ESP32 se verificó la conexión entre los dispositivos de la red, contemplando el tiempo de respuesta de los paquetes enviados.

```
C:\Users\Erick>ping 192.168.71.69

Pinging 192.168.71.69 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=569ms TTL=255
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=64ms TTL=255
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=67ms TTL=255
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=77ms TTL=255

Ping statistics for 192.168.71.69:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 64ms, Maximum = 569ms, Average = 194ms

C:\Users\Erick>ping 192.168.71.69

Pinging 192.168.71.69 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=215ms TTL=255
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=229ms TTL=255
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=234ms TTL=255
Reply from 192.168.71.69: bytes=32 time=240ms TTL=255

Ping statistics for 192.168.71.69:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 215ms, Maximum = 240ms, Average = 229ms
```

Figura 6. Prueba de conectividad

Posterior a ello, se ejecutó la prueba de conteo vehicular (Figura 7) donde se evaluó la capacidad de detección del dispositivo, la cual se realizó a una hora de alta circulación durante 20 minutos, lo cual permitió observar el comportamiento del equipo bajo condiciones del entorno, similares a las que se presentarían en

el diseño de red propuesto. Esto mediante los registros emitidos por el microcontrolador siendo visibles en la página web diseñada, facilitando la visualización de los datos referentes a la cantidad de vehículos detectados, la distancia a la que se realizó la detección y la potencia recibida por el ESP32 desde la red creada.

```
Distancia (cm): 805.64
Potencia recibida (dBm): -36

Distancia (cm): 805.67
Potencia recibida (dBm): -42

Distancia (cm): 805.67
Potencia recibida (dBm): -34

Conteo vehicular: 51
Distancia (cm): 46.65
Potencia recibida (dBm): -35
```

Figura 7. Registro del conteo vehicular

Contemplando los resultados de la prueba del prototipo de detección vehicular, se registraron datos de gran interés referentes a su funcionamiento, destacando en la figura anterior la última medición realizada. Además, en las mediciones previas a la prueba final se presenta una distancia de aproximadamente 805 cm, indicando que no se obtuvo ninguna medida en el rango del sensor, por lo que no ocurre un aumento en el conteo de vehículos. De igual forma, se registró un total de 51 vehículos por parte del equipo de detección. A fin de determinar la capacidad de conteo del dispositivo, se llevó a cabo el conteo manual al mismo tiempo que se realizó la prueba del equipo, obteniéndose un total de 55 vehículos circulantes, presentando entonces un error porcentual del 7,27 % entre los dos conteos vehiculares. El error presentado se debe en gran medida a las velocidades de los vehículos que circulaban a más de 40 km/h, donde se ve disminuida la posibilidad de contabilización por parte del dispositivo, por lo que el tiempo de conteo establecido en la programación (500 ms) no es lo suficientemente pequeño como para captarlos. Sin embargo, el retraso entre mediciones debe ser adaptado a la velocidad promedio de los vehículos en la vía establecida, dado que si se disminuyera este tiempo conllevaría errores de conteo más grandes. Es por ello que, el tiempo establecido entre los conteos es el adecuado para el programa realizado y para las características de la vía donde fue ejecutada la prueba, en la cual los vehículos circulan a una velocidad promedio de 30 km/h.

Además, para disminuir el error ocurrido se debe aminorar el tiempo entre conteos a fin de medir la distancia hasta el vehículo en cuestión una mayor cantidad de veces y, para evitar el conteo repetido del mismo vehículo, se requiere añadir funciones extras al programa realizado, permitiendo de esta forma la captación de vehículos a altas velocidades.

Por otro lado, no se presentaron pérdidas en la conexión con la red Wi-Fi creada para la prueba ejecutada, verificando de esta forma la capacidad de conectividad del dispositivo. De igual forma, no ocurrieron pérdidas en el envío de paquetes de la transmisión, presentando un tiempo de respuesta muy bueno para la recepción y envío de los datos.

Conclusiones

Por medio del registro de las características del tránsito de la intersección evaluada se observó el alto tráfico vehicular presente en la misma, identificando un grado de congestión elevado en las horas de mayor demanda, el cual produce un aumento los tiempos de viaje de los vehículos, perjudicando de forma directa a los habitantes de la ciudad que circulen por la avenida. Asimismo, se contempló una circulación de densidad elevada, pero estable, donde la libertad de maniobra y la velocidad se ven restringidas.

Se determinaron los requisitos mínimos necesarios para el funcionamiento óptimo de la red IIoT, optándose por la tecnología LoRaWAN debido a los beneficios ofrecidos con respecto a las demás tecnologías, la cual permite la transmisión de datos a largas distancias con un consumo energético significativamente menor, lo que favorece a la recolección de datos del tráfico de la ciudad durante años y de forma independiente a la red eléctrica.

A partir de ello, se seleccionaron los equipos de red correspondientes para el diseño de la misma mediante la comparación de los parámetros más resaltantes como la cobertura que abarcan los mismos, siendo estos el gateway Milesight UG67 como nodo intermediario entre los sensores y el radiotransmisor Ubiquiti NBE-2AC-13 que fue utilizado como repetidor y nodo central de la red, así como también fueron seleccionados el switch y router UISP. En cuanto a los equipos de detección, se realizó una comparación de tecnologías de sensores donde se considera que el sensor de ultrasonido HC-SR04 es el más acorde para el sistema propuesto, a su vez se seleccionó el ESP32 con el módulo LoRa SX1276.

Para el diseño de la red, se verificó la factibilidad de los radioenlaces propuestos a través de los simuladores empleados, donde se obtuvo que no se presentan obstrucciones en la línea de vista y zonas de Fresnel, además se consiguieron los márgenes suficientes en caso de producirse atenuaciones añadidas en los enlaces de radio. Con relación a la viabilidad del proyecto, se estimó que la implementación del mismo en la avenida Las Delicias posee un costo de 5.054,00 usd y para su expansión gradual a los semáforos de la ciudad de Maracaibo se requiere un total de 27.127,00 usd.

Con respecto a la verificación del funcionamiento del equipo de detección, se obtuvo mediante la prueba realizada una capacidad de conteo adecuada para su implementación en la red, presentado un error del 7,27 % el cual surge por los vehículos que circulan a mayor velocidad que la promedio en la vía dada.

El diseño de red IIoT propuesto en el presente trabajo de investigación permite contabilizar el tráfico vehicular en la avenida Las Delicias y su transmisión al nodo central, la Alcaldía de Maracaibo, posibilitando además su expansión gradual a la ciudad de una forma rentable, por lo que es factible la implementación de la red. En el trabajo [6] Khan, M. A., et al. Titulado "LoRaWAN for Smart Cities: A Comprehensive Review of Applications, Challenges, and Future Directions" se analiza la escalabilidad de este tipo de proyectos con IoT.

Referencias bibliográficas

- [1] I. Thomson., y A. Bull, Serie Recursos Naturales e Infraestructura. La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. Santiago de Chile, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2001. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/c7b69c09-8fdb-4633-8950-05abc459c15c/content>.
- [2] T. Rodríguez., y J. Bravo, "IoT para la semaforización inteligente en la ciudad de Guayaquil". Polo del Conocimiento, 6, no.11, pp. 1022-1039, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.23857/pc.v6i11.3313>.
- [3] L. García., L. Parra., J. Jiménez., M., J. Lloret., & P. Lorenz., Real-time traffic monitoring in urban areas using low-cost IoT sensors: A case study in Barcelona. Sensors, Vol. 23, no. 5, 2560. 2023.
- [4] S. Gite., y S. Sukode, "Vehicle traffic congestion control and monitor in IoT". International Journal of Applied Engineering Research, 10, no. 8, pp. 19513-19523, 2015, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/277961383_Vehicle_Traffic_Congestion_Control_Monitoring_System_in_IoT.

[5] M. A. Khan., et al., "LoRaWAN for Smart Cities: A Comprehensive Review of Applications, Challenges, and Future Directions". IEEE Internet of Things Journal, Vol. 9, no. 4, 2358-2375. 2022.

[6] Y. Zhang., & H. Liu., "Edge computing in IoT-based traffic management systems: Architecture and performance evaluation". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 22, no. 8, 4990–5002. 2021.