



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“Diseño e Implementación de un Sistema Basado en  
Comunicaciones por Luz Visible como Soporte para  
Vehículos de Emergencia.”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autores:**

**JOSÉ LUIS GARCÍA VALDEZ**

**JUAN JOSÉ ROBLES HIDALGO**

**Director:**

**ING. DANIEL ESTEBAN ITURRALDE PIEDRA PH. D.**

**CUENCA, ECUADOR**

**2022**

# Diseño e Implementación de un Sistema Basado en Comunicaciones por Luz Visible como Soporte para Vehículos de Emergencia.

En el siguiente trabajo se presenta el diseño y la implementación de un sistema de comunicaciones por luz visible como soporte para vehículos de emergencia. Para ello, se elaboró un modelo del sistema compuesto por un enlace de radiofrecuencia entre un vehículo y una infraestructura, un sistema comunicación VLC entre una infraestructura y un vehículo y un enlace a un servidor externo mediante MQTT. Se realizaron pruebas de recepción de datos en los distintos enlaces, la información fue recibida, transmitida, procesada y presentada. El objetivo de las diferentes pruebas fue obtener un sistema de comunicaciones estable y funcional. Al final se obtuvieron los resultados esperados y se establecieron las conclusiones.



---

Ing. Daniel Iturralde Piedra Ph.D.

**Coordinador de carrera**



---

Ing. Daniel Iturralde Piedra Ph.D.

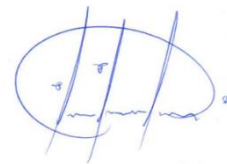
**Director de trabajo de Titulación**



---

Juan José Robles Hidalgo

**Autor**



---

José Luis García Valdez

**Autor**

# Design and Implementation of a System Based on Visible Light Communications as Support for Emergency Vehicles.

The following paper presents the design and implementation of a visible light communication system as a support for emergency vehicles. For this, a model of the system was developed, composed of: a radio frequency link between a vehicle and an infrastructure, a VLC system between an infrastructure and a vehicle, and a link to an external server via MQTT. Data reception tests were carried out in the different links, the information was received, transmitted, processed, and presented. The objective of the different tests was to obtain a stable and functional communications system. Finally, the expected results were obtained and the conclusions were drawn.



---

Daniel Iturralde Piedra, Eng. Ph.D.

**Faculty School Director**



---

Daniel Iturralde Piedra, Eng. Ph.D.

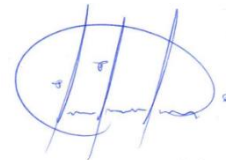
**Thesis Director**



---

Juan José Robles Hidalgo

**Author**



---

José Luis García Valdez

**Author**

**Translated by**



---

Juan José Robles Hidalgo



Language Unit

# *Diseño e Implementación de un Sistema Basado en Comunicaciones por Luz Visible como Soporte para Vehículos de Emergencia.*

García Valdez José Luis  
Escuela de Ingeniería Electrónica  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
luisgarcia10@es.uazuay.edu.ec

Robles Hidalgo Juan José  
Escuela de Ingeniería Electrónica  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
jrobles@es.uazuay.edu.ec

**Resumen**— En el siguiente trabajo se presenta el diseño y la implementación de un sistema de comunicaciones por luz visible como soporte para vehículos de emergencia. Para ello se elaboró un modelo del sistema compuesto por un enlace de radiofrecuencia entre un vehículo y una infraestructura, un sistema comunicación VLC entre una infraestructura y un vehículo y un enlace a un servidor externo mediante MQTT. Se realizaron pruebas de recepción de datos en los distintos enlaces, la información fue recibida, transmitida, procesada y presentada. El objetivo de las diferentes pruebas fue obtener un sistema de comunicaciones estable y funcional. Al final se obtuvieron los resultados esperados y se establecieron las conclusiones.

**Palabras Clave**— VLC, Radiofrecuencia, IoT, V2I, I2V, comunicaciones inalámbricas.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad algunos factores como la eficiencia, seguridad y prevención se han convertido en prioridades para muchas empresas, instituciones y/u organizaciones ya sean estas públicas o privadas. La tecnología y en especial la evolución de las comunicaciones inalámbricas permiten implementar sistemas que son capaces de complementarse con los dispositivos e infraestructura ya existentes en una zona determinada.

Un sistema de emergencia, al ser capaz de establecer una comunicación con una infraestructura y/o dispositivo, puede gestionar de mejor manera el funcionamiento de los elementos involucrados, que forman parte del mismo, en el caso de que alguna situación así lo demande y sea necesario mejorar la eficiencia en los tiempos de respuesta, así como la prevención de accidentes provocados por eventos que requieran de atención inmediata.

Además, el desarrollo de la industria del transporte ha generado el aumento de la tasa vehicular dentro de una zona urbana. Esta alta demanda trae consigo factores como el aumento de tráfico vehicular y, por ende, mayor tasa de colisiones y accidentes en las vías, siendo estos los problemas más importantes a ser tomados en cuenta. Según el Anuario Estadístico de Transporte (ANET), las cifras entre los años 2014 a 2019 es de 181.378 accidentes de tránsito en Ecuador,

siendo el año 2014 la de mayor cantidad con 38.658 siniestros [1]. Estos casos ocurren de manera frecuente y con mayor intensidad en el área central de la ciudad, donde existe mayor concurrencia vehicular y de personas, generalmente en espacios reducidos y de vías angostas. Esto se ha convertido en un gran problema para vehículos de emergencias, tales como: ambulancias, patrullas policiales y camiones de bomberos, complicando el paso y, por lo tanto, retrasando un factor vital como es el tiempo de llegada a su destino.

Este trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera: la sección II comprende el estado del arte, la sección III abarca el marco teórico con la información necesaria para el desarrollo del sistema, en la sección IV se encuentra la descripción del sistema, los resultados obtenidos se encuentran descritos en la sección V y finalmente en la sección VI se presentan las conclusiones obtenidas.

## II. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se exponen algunos artículos científicos resultantes de la investigación realizada por los autores referente al tema propuesto en este trabajo:

En [2] se realiza el diseño e implementación de un sistema de semaforización inteligente utilizando un enlace de comunicación por luz visible (VLC) entre camiones tráiler y semáforos con el objetivo de poder controlarlos, asegurando que flotas de camiones al pasar por intersecciones no se vean en la necesidad de desacelerar o tener un frenado de emergencia. El sistema es desarrollado de manera demostrativa utilizando vehículos robot y un módulo de luces para el semáforo. La técnica de modulación utilizada es de modulación por posición de pulso (PPM).

En [3] se presenta un sistema que utiliza comunicación VLC entre un vehículo de emergencia, un semáforo y un vehículo particular. La técnica de modulación utilizada es ON-OFF keying (OOK) para la comunicación de vehículo a infraestructura (V2I) y para vehículo a vehículo (V2V). El escenario de prueba es realizado a pequeña escala, obteniendo como resultado la demora de 1 segundo en la transmisión de un mensaje de alerta entre el vehículo de emergencia y el particular.

En [4] se investiga la técnica de transmisión de información para establecer una comunicación V2V en situaciones de emergencia, con el objetivo de realizar un control adaptativo de velocidad (ACC). En el transmisor, se realiza la modulación al haz de luz visible aplicando la técnica de modulación de acceso múltiple por división de código (CDMA), mientras que en el receptor se encuentra un filtro que es el encargado de recuperar la información luego de que el haz de luz codificado ha sido detectado. Al aplicar la técnica CDMA el sistema es robusto ante el ruido de fondo, por lo que la tasa de error de bit que se obtiene resulta considerablemente baja.

En [5] se presenta un sistema de bajo costo para la transmisión de mensajes V2V utilizando VLC y la técnica de modulación OOK, capaz de integrarse con los sistemas de transporte inteligentes (ITS), dirigido a aplicaciones de seguridad vial. El dispositivo fue capaz de detectar frenado brusco a una distancia máxima de 20 m, emitiendo una señal de alerta temprana a los demás conductores a velocidades de hasta 80 km/h.

### III. MÉTODOS

#### A. Comunicaciones por Luz Visible

Es una tecnología inalámbrica de comunicaciones ópticas que consiste en la transmisión de datos a frecuencias de 400 a 800 THz en el espectro visible [6]. A diferencia de otros sistemas de comunicación óptica inalámbrica, éste puede realizar la función de iluminación y comunicación simultáneamente [7].

Las características fundamentales de esta tecnología son:

- Diodo emisor de luz (LED) o láser como transmisor o fuente óptica y fotodiodo como receptor [7].
- El ancho de banda que utiliza va desde los 380nm a los 750nm [6].
- Espectro libre de interferencia electromagnética [6].
- Propiedades de conmutación rápida de los LEDs para la transmisión de datos en la onda potencia/intensidad radiada [7].
- Control con precisión del nivel de atenuación de los LEDs [7].

En la figura 2, se observan los elementos que constituyen un sistema de comunicación por luz visible VLC. Los datos son modulados y acoplados para transmitirse mediante una fuente óptica LED o láser. La corriente del controlador es modulada a una frecuencia alta para lograr la conmutación del transmisor LED. Por lo tanto, la luz emitida por el LED se transmite en forma de un pulso repetitivo de alta frecuencia y baja potencia media por un canal, generalmente el espacio libre, hacia un concentrador óptico que se encarga de controlar la conmutación y acoplar la señal recibida para ser amplificada y decodificada [7].

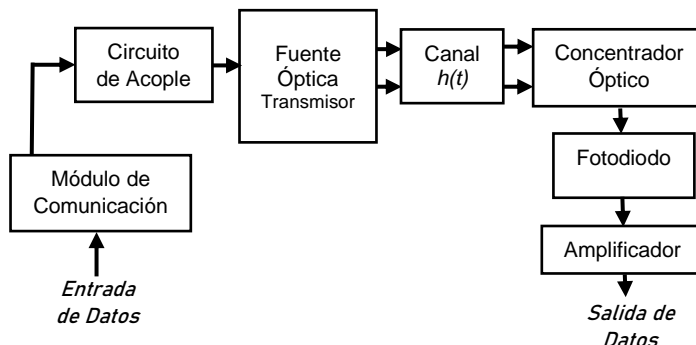


Fig. 2 Diagrama de bloques de un sistema VLC [7].

#### B. Redes VANET

Las redes Vehicle Ad-Hoc Networks (VANET) son un tipo de redes que realizan la comunicación a través de nodos no convencionales, en este caso vehículos. Estas redes surgen cuando un determinado número de vehículos se conectan entre sí [8].

En conjunto, las comunicaciones vehiculares e infraestructura, reciben el nombre de V2X. Las comunicaciones V2X se representan en la figura 3.

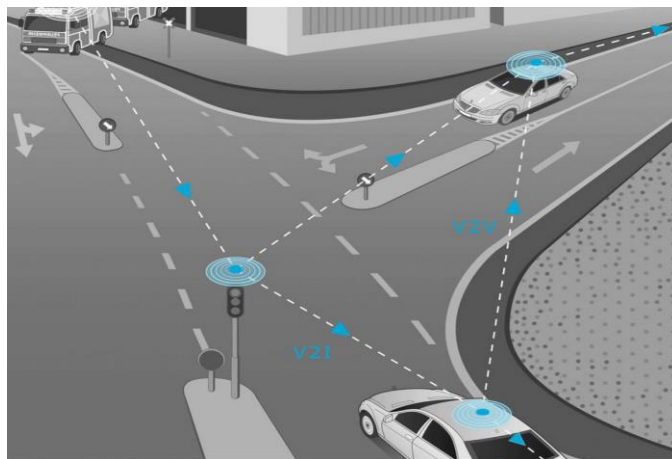


Fig. 3 Redes de Comunicación V2X [8].

Las redes V2X están conformadas por diferentes tipos de comunicaciones; descritas a continuación.

- **Vehicle-to-Infrastructure (V2I):** Dirigido a establecer enlaces entre vehículos e infraestructura vial, los cuales se encargan de proveer información al vehículo acerca de los sucesos detectados en ese momento y viceversa [8].
- **Vehicle-to-Network (V2N):** Este tipo de comunicación es capaz de realizar una conexión con una red adyacente mediante cualquier protocolo, sea este Wi-Fi, Bluetooth, etc. Idealmente se establece esta comunicación cuando existe la necesidad de obtener datos precisos de navegación (accesos a mapas) [8].

- **Vehicle-to-Vehicle (V2V):** En este tipo de enlace los intérpretes de la comunicación (vehículos) intercambian mensajes entre sí, con el objetivo de precautelar la seguridad vial [9].

#### IV. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la figura 4, se observa un modelo del sistema con los enlaces para la transmisión de datos. El vehículo de emergencia transmite una señal mediante un enlace de radiofrecuencia RF hacia la infraestructura de iluminación (V2I), ésta al estar conectada, junto con los dispositivos de control de tráfico a una red de área local (LAN), permite que todas las luminarias ubicadas en los postes reciban la información y la transmitan mediante un enlace de comunicación por luz visible hacia cada vehículo (I2V) que se encuentre en el área de iluminación, mientras que los semáforos, con esta señal recibida, permitan controlar su estado según la prioridad requerida.

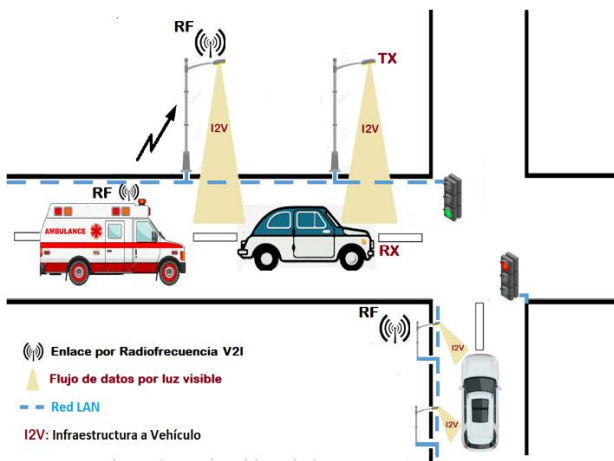


Fig. 4 Esquema gráfico del sistema.

El sistema descrito anteriormente se compone de los elementos mostrados en la Fig. 5.

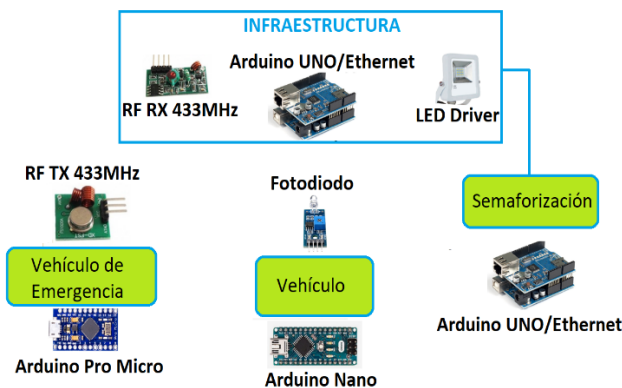


Fig. 5. Elementos del sistema.

El vehículo de emergencia contiene un microcontrolador y un transmisor, cada infraestructura está compuesta de un elemento receptor de radiofrecuencia, así como un dispositivo controlador y un LED transmisor, por otro lado, el vehículo consta de un fotodiodo receptor y un microcontrolador, finalmente la semaforización corresponde a un controlador y a LEDs actuadores.

#### V. RESULTADOS

Para realizar las diferentes pruebas y análisis se implementó un sistema a pequeña escala el cual permitió estudiar el comportamiento de las distintas etapas del sistema.

A continuación, se presenta la descripción del funcionamiento y resultados de cada de una estas etapas.

##### A. Comunicación RF

El objetivo principal de esta etapa fue, obtener un enlace de radiofrecuencia entre el vehículo de emergencia (ambulancia) y la infraestructura (luminaria). Para generar el enlace RF se requirió el uso módulos RF, los cuales trabajan a una frecuencia de 433 MHz, además utilizan una comunicación simplex, es decir unidireccional, que resultó de gran utilidad para esta aplicación.

El envío de la señal de emergencia a través de los módulos RF se da tanto para la infraestructura 1 como para la infraestructura 3, localizadas en la calle principal y secundaria respectivamente. Estas infraestructuras tienen el elemento receptor, y se activan dependiendo de la locación y en la calle en la que se encuentre el vehículo de emergencia.

En la fig 6. se muestra el dato obtenido en el receptor RF de las infraestructuras luego de ser enviado por el transmisor RF, localizado en el vehículo de emergencia. Este dato da inicio a la transmisión VLC en cada infraestructura.

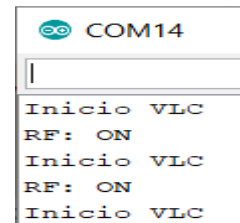


Fig. 6. Recepción de dato RF e inicio de la transmisión VLC. Monitor Serial Arduino

El enlace RF fue establecido sin dificultades ya que el alcance del módulo transmisor RF a 3.5v es de aproximadamente 5 metros, según los datos del fabricante, además de que se realizaron pruebas a diferentes ángulos y distancias entre el transmisor y receptor, sin obtenerse variaciones perceptibles en esta aplicación.

##### B. Red LAN

Esta red tiene como finalidad la comunicación entre los dispositivos del sistema y de estos con un servidor.

En la Fig. 7 se muestra la red local del sistema.

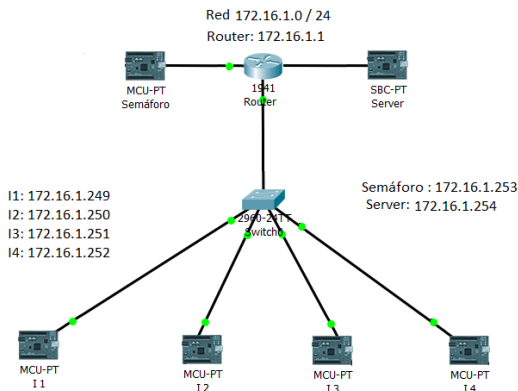


Fig. 7. Esquema de la red LAN del sistema. Packet Tracer

Como se observa en la Fig. 7, la red del sistema es privada, por lo que se ha utilizado un rango de direcciones clase B, las cuales corresponden al rango de direcciones privadas: 172.16.0.0 a 172.31.255.255.

La red esta compuesta de un Router, un switch, cinco microcontroladores Arduino con puerto Ethernet y un SBC (single-board computer) Raspberry Pi que aloja el servidor.

La dirección de la red es 172.16.0.0 /24

a. Router

La dirección del Router es 172.16.1.1.

La configuración del Router fue realizada utilizando la herramienta WinBox.

- Interfaces

Para las interfaces del Router se ha establecido un Puente de Red (bridge-lan), para utilizar la misma red en todos los puertos del Router y del switch.

Name	Type	Actual MTU	L2 MTU	Tx	Rx	Tx Packet (p/s)	Rx Packet (p/s)
R bridge_lan	Bridge	1500	1500	2.8 kbps	6.8 kbps	5	13
RS ether1	Ethernet	1500	1500	13.4 kbps	7.5 kbps	19	14
RS ether2	Ethernet	1500	1500	10.1 kbps	6.1 kbps	17	8
RS ether3	Ethernet	1500	1500	7.3 kbps	2.0 kbps	12	2
RS ether4	Ethernet	1500	1500	84.7 kbps	8.2 kbps	17	14

Fig. 8. Interfaces de la red. Winbox

- DHCP

Las direcciones para los dispositivos, tanto para las infraestructuras como para el semáforo y el servidor, se asignaron utilizando el Protocolo de Configuración Dinámica de Host (DHCP).

Una vez asignadas las direcciones, se colocaron las mismas como direcciones estáticas, debido a que el servidor utiliza la dirección fija de cada dispositivo para establecer la comunicación con el mismo.

En la Fig.9 se observan las direcciones asignadas por DHCP en la ventana de configuración “DHCP Server” de la herramienta WinBox.

Address	MAC Address	Client ID	Server	Active Address	Active MAC Address	Active Host	Expires After	Status
172.16.1.240	20:47:47:72:11:E7	1:20:47:47:72:11:e7	dhcp1	172.16.1.240	20:47:47:72:11:E7	DESKTOP...	6d 23:48:41	bound
172.16.1.249	00:AA:BB:CC:DE:01	1:0:aa:bb:cc:de:1	dhcp1	172.16.1.249	00:AA:BB:CC:DE:01	WIZnetCC...	6d 23:58:21	bound
172.16.1.250	00:AA:BB:CC:DE:02	1:0:aa:bb:cc:de:2	dhcp1	172.16.1.250	00:AA:BB:CC:DE:02	WIZnetCC...	6d 23:48:53	bound
172.16.1.251	00:AA:BB:CC:DE:03	1:0:aa:bb:cc:de:3	dhcp1	172.16.1.251	00:AA:BB:CC:DE:03		6d 23:48:45	bound
172.16.1.252	00:AA:BB:CC:DE:04	1:0:aa:bb:cc:de:4	dhcp1	172.16.1.252	00:AA:BB:CC:DE:04	WIZnetCC...	6d 23:48:49	bound
172.16.1.253	00:AA:BB:CC:DE:06	1:0:aa:bb:cc:de:6	dhcp1	172.16.1.253	00:AA:BB:CC:DE:06	WIZnetCC...	6d 23:43:41	bound
172.16.1.254	DC:A6:32:37:EE:BF	1:dc:a6:32:37:ee:bf	dhcp1	172.16.1.254	DC:A6:32:37:EE:BF	raspberrypi	6d 23:48:42	bound

Fig. 9. Direcciones asignadas por DHCP a los dispositivos. WinBox

- NetWatch

Para la verificación del enlace entre los dispositivos y el Router se utiliza la herramienta Netwatch. Además de que esta envía el dato hacia el panel del servidor, indicando la conexión de los dispositivos con el mismo.

Host	Interval	Timeout (...)	Status
172.16.1.249	00:00:01	1000	up
172.16.1.250	00:00:01	1000	up
172.16.1.251	00:00:01	1000	up
172.16.1.252	00:00:01	1000	up
172.16.1.253	00:00:01	1000	up

Fig. 10. Estado del enlace entre dispositivos y router.

b. Switch

El switch es el encargado de realizar la interconexión entre las infraestructuras, Router y servidor.

c. Infraestructuras

Las infraestructuras (luminarias) están conectadas a la red mediante el switch.

La comunicación entre estos dispositivos para el envío del dato de emergencia, es posible utilizando un protocolo UDP (Unit Data Protocol).

Una vez establecida esta comunicación, los datos se envían al servidor mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) para posteriormente ser visualizados en una plataforma.

d. Servidor

Se utilizó un ordenador de placa reducida (SBC) Raspberry PI, el cual aloja un servidor que procesa la información proveniente de las infraestructuras.

En este servidor se instaló una plataforma (ThingsBoard) que permite el monitoreo y control de los datos provenientes de los dispositivos de la red.



Todos los datos recibidos y el monitoreo de los enlaces se visualizan en una interfaz diseñada en esta plataforma.

En la Fig. 11, se observa el panel de visualización en ThingsBoard para el monitoreo del sistema.



Fig. 11 Interfaz de visualización en ThingsBoard.

### C. Comunicación VLC (I2V)

La comunicación VLC desde las infraestructuras hacia los vehículos se establece luego de que los dispositivos hayan recibido la señal de emergencia, ya sea que la ambulancia se encuentre en la calle principal o secundaria.

La comunicación realizada por la infraestructura tiene la finalidad de enviar una señal de alerta a los vehículos presentes en la zona de influencia de la luz de las luminarias.

En las siguientes imágenes, se observan los resultados obtenidos por parte del vehículo, al recibir el dato mediante la comunicación por luz visible VLC.

En la Fig. 12 se observan los datos recibidos en el vehículo a través de VLC. Estos datos presentan ruido, debido a que el receptor se encuentra a mayor distancia del alcance máximo de transmisión del LED.

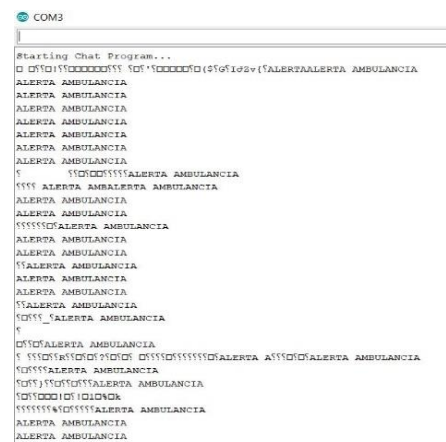


Fig. 12 Recepción de datos a través de VLC con presencia de ruido.

Posteriormente, en la Fig. 13 se presenta la recepción de datos obtenida a una distancia óptima entre el transmisor y el receptor.

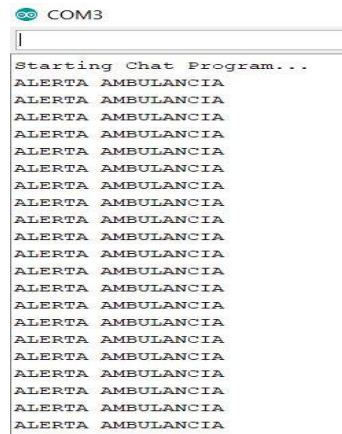


Fig. 13 Recepción de datos a través de VLC sin presencia de ruido.

Como se puede observar en la figura anterior, el ruido desaparece debido a que el receptor se encuentra en el área de alcance de transmisión de las luminarias, obteniéndose así un enlace de comunicaciones estable y fiable.

A continuación, en la Fig. 14 se presenta el enlace VLC establecido en el sistema, al presentarse una emergencia.



Fig. 14 Enlace Infraestructure-to-Vehicle (I2V) mediante VLC.

Como se observa en la imagen anterior, se recibió el mensaje de alerta después de que el vehículo de emergencia realizó el enlace de radiofrecuencia, provocando el cambio de estado del semáforo para priorizar el paso de dicho vehículo.



## VI. CONCLUSIONES

Al término del presente trabajo se establecieron las siguientes conclusiones.

Se obtuvo información de alta relevancia mediante la investigación de la teoría y el análisis del estado del arte, la cual permitió a los autores el desarrollo del sistema de comunicaciones planteado.

A partir de la información recabada, se implementó un modelo del sistema mediante el cuál se realizaron las diferentes pruebas de funcionamiento.

Se estableció un enlace de radiofrecuencia entre un vehículo y una infraestructura (V2I) mediante el uso de chips especializados para realizar esta comunicación. Dicho enlace no presentó limitaciones en la distancia de transmisión y recepción ya que tienen un alcance de hasta 200 metros de acuerdo a los datos del fabricante.

Se realizó la transmisión y recepción inalámbrica de datos mediante el uso de las comunicaciones por luz visible VLC. Las limitaciones para el uso de esta tecnología, en lo que a distancia de transmisión y recepción se refiere, vienen dadas principalmente por la potencia del transmisor (LED); es decir, a mayor potencia del transmisor se obtiene un mayor alcance en la transmisión de los datos. Para el presente trabajo se obtuvo un enlace VLC estable a una distancia aproximada de 30 cm entre el transmisor y receptor.

Se desarrolló una red LAN para la interconexión de las distintas infraestructuras, además de ello la comunicación de las mismas con un servidor, la cual permitió la administración y visualización de los datos generados en los diferentes enlaces de comunicación implementados en el sistema.

Por último, se afirma que es posible realizar enlace de comunicaciones entre una infraestructura y un vehículo de emergencia y que además dicho enlace puede complementarse con otro tipo de comunicaciones alámbricas e inalámbricas, permitiendo así el desarrollo de sistemas que pueden ser utilizados para solucionar distintas problemáticas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Inec, «Información Estadística de Transporte.» [En línea]. Available: [www.ecuadorencifras.gob.ec](http://www.ecuadorencifras.gob.ec). [Último acceso: 18 Febrero 2020].
- [2] N. Wang, Y. Qiao, W. Wang, S. Tang y J. Shen, Visible Light Communication based Intelligent Traffic Light System: Designing and Implementation, Hangzhou, China, 2018.
- [3] R. Shanmugasundaram, S. Prasanna Vadanam y V. Dharmarajan, Li-Fi Based Automatic Traffic Signal Control for Emergency Vehicles, Bangalore, India, 2018.
- [4] K. Siddiqi, R. D. A y S. Sheikh Muhammad, Visible Light Communication for V2V Intelligent Transport System, Lahore, 2016.
- [5] P. Sayeg y P. Charles, Sistemas de Transporte Inteligente, Bogota, 2006.
- [6] E. Ontiveros, D. Vizcaino y V. Sabater, Las ciudades del futuro: inteligentes, digitales y sostenibles., Barcelona: Editorial Ariel, S.A, 2016.
- [7] Z. Ghassemlooy y W. Popoola, Optical Wireless Communications, Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [8] ROHDE & SCHWARZ, TRENDS IN CONNECTED CARS - AT A GLANCE, Munich, 2018.
- [9] R. Lopez-Romero Guijarro, Análisis del Protocolo IEEE 802.11P en Sistemas de Comunicación Vehiculares V2X, Catalunya, 2019.
- [10] T. Li, «Introduction to Wireless Communications and Networks,» Michigan, Dept. Electrical and Computer Engineering.