

**Prototipo de Gestión de Movilidad Semafórica para Ambulancias,  
Bajo el Concepto de Ciudad Inteligente**



**Deicy Rossana Mompotes Pizo  
Javier Alberto Muñoz Narvaez**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, 2019**

**Prototipo de Gestión de Movilidad Semafórica para Ambulancias,  
Bajo el Concepto de Ciudad Inteligente**



**Deicy Rossana Mompotes Pizo  
Javier Alberto Muñoz Narvaez**

**Documento final de trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Directora: Mag. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, 2019**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>CAPÍTULO 1: Generalidades</b> .....	1
<b>1.1. Introducción</b> .....	1
<b>1.2. Ciudades Inteligentes</b> .....	2
<b>1.3. Dimensiones de las Ciudades Inteligentes</b> .....	3
<b>1.3.1. Dimensión Medioambiental</b> .....	4
<b>1.3.2. Dimensión Económica</b> .....	5
<b>1.3.3. Dimensión Social</b> .....	6
<b>1.3.4. Dimensión de Gobierno</b> .....	6
<b>1.4. Uso de las TIC en las Ciudades Inteligentes y Sostenibles</b> .....	7
<b>1.4.1. Uso de las TIC en la Infraestructura de la Ciudad</b> .....	7
<b>1.5. Impactos de las TIC en la Sostenibilidad de las Ciudades Inteligentes y Sostenibles [4]</b> .....	9
<b>1.5.1. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad Ambiental</b> .....	9
<b>1.5.2. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad Económica</b> .....	11
<b>1.5.3. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad Social</b> .....	11
<b>1.5.4. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad del Gobierno</b> .....	12
<b>CAPÍTULO 2: Tecnologías Radio para la Transmisión de Información en un Sistema de Gestión de Movilidad Semafórica para Ambulancias</b> .....	15
<b>2.1. Introducción</b> .....	15
<b>2.2. IEEE 802.16 (WiMAX)</b> .....	15
<b>2.3. IEEE 802.11</b> .....	16
<b>2.3.1. 802.11 ah</b> .....	18
<b>2.3.2. 802.11 af</b> .....	18
<b>2.4. Radio Trunking</b> .....	19
<b>2.4.1. Clasificación de los Sistemas Troncales</b> .....	19
<b>2.4.2. Estructura de una Red Troncal</b> .....	20
<b>2.4.3. Canales del Sistema Troncal</b> .....	20
<b>2.5. Sistemas Móviles Celulares</b> .....	21
<b>2.5.1. Primera Generación (1G)</b> .....	21
<b>2.5.2. Segunda Generación (2G)</b> .....	21
<b>2.5.3. Tercera Generación (3G)</b> .....	22
<b>2.5.4. Cuarta Generación (4G)</b> .....	22
<b>2.5.5. Quinta Generación (5G)</b> .....	23
<b>2.6. Sistema Propietario en 900 MHz – airMAX de Ubiquiti</b> .....	23

2.7. Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, <i>Low-Power, Wide Area Networks</i> ).....	24
2.7.1. Sigfox.....	24
2.7.2. LoRa ( <i>Long Range</i> ).....	26
2.8. Comparación de las Tecnologías Radio .....	32
<b>CAPÍTULO 3: Metodología de Desarrollo .....</b>	<b>35</b>
3.1. Introducción .....	35
3.2. ¿Qué es un Prototipo? .....	35
3.3. Modelo de Prototipos .....	36
3.4. Aplicación del Modelo de Prototipos .....	38
3.4.1. Recolección y Refinamiento de Requisitos .....	38
3.4.2. Modelado, Diseño Rápido .....	39
3.4.3. Construcción del Prototipo.....	42
3.4.4. Desarrollo, Evaluación del Prototipo.....	70
3.4.5. Refinamiento del Prototipo .....	87
3.4.6. Producto de Ingeniería .....	88
<b>CAPÍTULO 4: Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b>	<b>89</b>
4.1. Introducción .....	89
4.2. Conclusiones .....	89
4.3. Trabajos Futuros.....	90
<b>Referencias .....</b>	<b>93</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1. Ciudad inteligente. ....	2
Figura 1.2. Dimensiones de una ciudad inteligente y sostenible según la UIT.....	9
Figura 2.1. Sistema troncal monoemplazamiento.....	20
Figura 2.2. Banda ultra estrecha. ....	25
Figura 2.3. Arquitectura de la red sigfox.....	26
Figura 2.4. Arquitectura de la red LoRa.....	27
Figura 2.5. Trama física de LoRa. ....	31
Figura 3.1. Fases del modelo de prototipos. ....	37
Figura 3.2. Modelo del prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias. Por los autores. ....	40
Figura 3.3. Diagrama de flujo del prototipo. Por los autores. ....	41
Figura 3.4. Unidad a bordo.....	44
Figura 3.5. Conexiones de la unidad a bordo. ....	44
Figura 3.6. Unidad a bordo implementada. ....	45
Figura 3.7. Diagrama de secuencia de la UaB. Por los autores. ....	46
Figura 3.8. Red LoRa.....	49
Figura 3.9. Gateway LoRa OLG01. ....	51
Figura 3.10. Unidad de control implementada. ....	51
Figura 3.11. Diagrama de secuencia de la UC. Por los autores. ....	52
Figura 3.12. Puntos de referencia para identificar la ruta de la ambulancia. Por los autores. ....	54
Figura 3.13. Unidad de semáforos. ....	59
Figura 3.14. Diagrama circuital de la unidad de semáforos. ....	60
Figura 3.15. Distribución de los semáforos en una intersección. Por los autores. ....	61
Figura 3.16. Unidad de semáforos implementada. ....	61
Figura 3.17. Diagrama de secuencia de la US. Por los autores. ....	62
Figura 3.18. API Key y API Request de ThingSpeak.....	65
Figura 3.19. Coordenadas GPS de la ambulancia almacenadas en ThingSpeak.....	65
Figura 3.20. Localización de la ambulancia en Google maps.....	66
Figura 3.21. Intersección donde se implementa el prototipo. Adaptado de Google maps....	66
Figura 3.22. Rutas de la intersección donde se implementa el prototipo. Adaptado de Google maps. ....	67
Figura 3.23. Unidad a bordo instalada. ....	68
Figura 3.24. Unidad de control instalada. ....	69
Figura 3.25. Unidad de semáforos instalada. ....	69
Figura 3.26. Distribución de las unidades del prototipo en la intersección. Adaptado de Google maps. ....	70
Figura 3.27. Montaje para encontrar el patrón de radiación de la antena LoRa. ....	72
Figura 3.28. Patrón de radiación de la antena LoRa. ....	73
Figura 3.29. GPS Mobile Mapper 6 Magellan.....	74
Figura 3.30. Fiabilidad del sistema.....	77
Figura 3.31. Procesos realizados por el sistema. ....	78
Figura 3.32. Retardos del sistema a 200 metros. ....	81
Figura 3.33. Retardos del sistema a 300 metros. ....	82
Figura 3.34. Retardos del sistema a 400 metros. ....	82

Figura 3.35. Rangos de la señal. ....	85
Figura 3.36. Cobertura de la OLG01 en Xirio online utilizando Rec. UIT-R P.526-11.....	85
Figura 3.37. Cobertura de la OLG01 en Xirio online utilizando COST 231 Walfish-Ikegami.....	85
Figura 3.38. Cobertura de la OLG01 con un SF de 9. ....	86
Figura 3.39. Cobertura de la OLG01 con un SF de 7. ....	87

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.1. Dimensiones de una ciudad inteligente y sostenible según la UIT.....	4
Tabla 1.2. Uso de las TIC en la infraestructura física urbana según la UIT. ....	9
Tabla 2.1. Tabla comparativa de tecnologías.....	34
Tabla 3.1. Tecnologías candidatas.....	42
Tabla 3.2. Características de la tarjeta LoRa/GPS. ....	43
Tabla 3.3. Tarjetas Arduino compatibles con LoRa. ....	43
Tabla 3.4. Características de la tarjeta Arduino uno. ....	43
Tabla 3.5. Características del radioenlace UaB-UC. ....	47
Tabla 3.6. Gateways LoRa.....	49
Tabla 3.7. Características de la gateway LoRa. ....	50
Tabla 3.8. Características de la tarjeta LoRa. ....	59
Tabla 3.9. Comparación entre coordenadas del GPS de referencia y GPS LoRa. ....	74
Tabla 3.10. Resultados de la prueba de fiabilidad del sistema. ....	76
Tabla 3.11. Resultados de la prueba de retardo del sistema.....	80
Tabla 3.12. Tiempo que tarda la ambulancia en atravesar el cruce y retardo máximo del sistema. ....	81
Tabla 3.13. Parámetros configurados en Xirio online. ....	84
Tabla 3.14. Características del radioenlace gateway LoRa - tarjeta LoRa/GPS. ....	86

## **Anexos**

**ANEXO A** Conversión de Coordenadas Geográficas a Cartesianas UTM

**ANEXO B** Configuración de Xirio Online para las pruebas de Cobertura del Sistema.

**ANEXO C** Manual de Configuración de la OLG01.



## Lista de acrónimos

<b>ADR</b>	<i>Adaptive Data Rate</i> , Velocidad de Datos Adaptable
<b>AES</b>	<i>Advanced Encryption Algorithm</i> , Algoritmo de Cifrado Avanzado
<b>AMPS</b>	<i>Advanced Mobile Phone System</i> , Sistema Telefónico Móvil Avanzado
<b>AP</b>	<i>Access Point</i> , Punto de Acceso
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i> , Interfaz de Programación de Aplicaciones
<b>BS</b>	<i>Base Stations</i> , Estaciones Base
<b>BSS</b>	<i>Basic Service Set</i> , Grupo de Servicio Básico
<b>BW</b>	<i>Bandwidth</i> , Ancho de Banda
<b>CA</b>	<i>Carrier Aggregation</i> , Agregación de Portadores
<b>CR</b>	<i>Code Rate</i> , Tasa de Código
<b>CRC</b>	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , Verificación de Redundancia Cíclica
<b>CSS</b>	<i>Chirp Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado de Chirp
<b>DSSS</b>	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa
<b>DTIM</b>	<i>Delivery Traffic Indication Map</i> , Mapa de Indicación de Tráfico de Entrega
<b>EIP</b>	<i>European Innovation Partnership</i> , Asociación Europea de Innovación
<b>ESS</b>	<i>Extended Service Set</i> , Grupo de Servicio Extendido
<b>ETSI</b>	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Estandarización de las Telecomunicaciones
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia
<b>FHSS</b>	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencias
<b>FS</b>	<i>Fixed Station</i> , Estación Fija
<b>FSK</b>	<i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia
<b>GDB</b>	<i>Geolocation Data Base</i> , Base de Datos de Geolocalización
<b>GDD</b>	<i>Geolocation Database Dependent</i> , Base de Datos de Geolocalización Dependiente
<b>GFSK</b>	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana

<b>GMSK</b>	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Mínimo Gaussiano
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio System</i> , Servicio General de Paquetes vía Radio
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile Communications</i> , Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.
<b>HSDPA</b>	<i>High Speed Downlink Packet Access</i> , Acceso Descendente de Paquetes a Alta Velocidad
<b>HSPA</b>	<i>High Speed Packet Access</i> , Acceso a Paquetes de Alta Velocidad
<b>HSUPA</b>	<i>High Speed Uplink Packet Access</i> , Acceso Ascendente de Paquetes a Alta Velocidad
<b>IBSS</b>	<i>Independent Basic Service Set</i> , Grupo de Servicio Básico Independiente
<b>ICIC</b>	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i> , Coordinación de Interferencia Entre Celdas
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet
<b>ITS</b>	<i>Intelligent Transport Systems</i> , Sistemas Inteligentes de Transporte
<b>LoRa</b>	<i>Long Range</i> , Largo Alcance
<b>LPWAN</b>	<i>Low-Power, Wide Area Networks</i> , Redes de Área Amplia de Baja Potencia
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución de Largo Término
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio
<b>MIC</b>	<i>Message Integrity Code</i> , Código de Integridad del Mensaje
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiple Entrada Múltiple Salida
<b>MS</b>	<i>Mobile Stations</i> , Estaciones Móviles
<b>MSK</b>	<i>Minimum Shift keying</i> , Modulación por Desplazamiento Mínimo
<b>M2M</b>	<i>Machine to Machine</i> , Máquina a Máquina
<b>NMC</b>	<i>Network Management Center</i> , Centro de Gestión de la Red
<b>NMEA</b>	<i>National Marine Electronics Association</i> , Asociación Nacional de Electrónica Marina
<b>NSS</b>	<i>Network Switching System</i> , Sistema de Conmutación de Red
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal

<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>OOK</b>	<i>On-Off Keying</i> , Modulación Digital de Amplitud
<b>PABX</b>	<i>Private Branch Exchange</i> , Centralita privada
<b>PER</b>	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquetes
<b>PHY</b>	<i>Physical Layer</i> , Capa Física
<b>PLCP</b>	<i>Physical Layer Convergence Procedure</i>
<b>PMD</b>	<i>Physical Medium Dependent</i>
<b>PoE</b>	<i>Power over Ethernet</i> , Alimentación a Través de Ethernet
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio
<b>RAW</b>	<i>Restricted Access Window</i> , Ventana de Acceso Restringido
<b>Rb</b>	<i>Rate Bit</i> , Tasa de Bits
<b>Rc</b>	<i>Rate Chip</i> , Tasa de Chips
<b>Rs</b>	Rate Symbol, Tasa de Símbolos
<b>SF</b>	<i>Spreading Factor</i> , Factor de Ensanchamiento
<b>SS</b>	<i>Subscriber Stations</i> , Estaciones Suscriptores
<b>TCP/IP</b>	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo
<b>TIC</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>TIM</b>	<i>Traffic Indication Map</i> , Mapa de Indicación de Tráfico
<b>TSC</b>	<i>Trunking System Controller</i> , Controlador del Sistema
<b>TWT</b>	<i>Target Wake up Time</i> , Tiempo de Activación
<b>UaB</b>	Unidad a Bordo
<b>UC</b>	Unidad de Control
<b>UHF</b>	<i>Ultra High Frequency</i> , Ultra Alta Frecuencia
<b>UIT</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i> , Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles
<b>UNB</b>	<i>Ultra-Narrow Band</i> , Banda Ultra Estrecha
<b>US</b>	Unidad de Semáforos
<b>UTM</b>	<i>Universal Transverse Mercator</i>
<b>VHF</b>	<i>Very High Frequency</i> , Muy Alta Frecuencia
<b>VPN</b>	<i>Virtual Private Network</i> , Red Privada Virtual
<b>WiMAX</b>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas

- WMAN** *Wireless Metropolitan Area Network*, Red de Área Metropolitana Inalámbrica
- WSD** *White Space Devices*, Dispositivos de Espacio en Blanco
- WSN** *Wireless Sensor Networks*, Redes de Sensores Inalámbricos



## CAPÍTULO 1: Generalidades

### 1.1. Introducción

Las ciudades siempre se han considerado como los centros de desarrollo cultural, social, económico y político, caracterizados por un aumento constante de sus habitantes. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el 68% de la población mundial vivirá en las ciudades para 2050 [1]. Esto se debe a que las personas migran a estas zonas en búsqueda de nuevas oportunidades ya sea laborales o educativas para obtener mejores condiciones de vida.

Aunque estas migraciones promueven el desarrollo de la ciudad, también generan múltiples retos en cuanto a la gestión de los servicios públicos, movilidad, bienestar social y de vivienda, por lo que es primordial realizar las mejoras necesarias para alcanzar un estilo de vida favorable en pro de preservar los recursos naturales para las generaciones actuales y del futuro.

Además de la creciente urbanización, la mayoría de ciudades actuales presentan diferentes desafíos tales como: una infraestructura inadecuada, ya que está diseñada solo para una fracción de su población existente; una mayor competencia entre ciudades para asegurar las inversiones, empleos, negocios y talento para el éxito económico; las expectativas de los ciudadanos, quienes reciben cada vez más acceso instantáneo, en cualquier lugar, en cualquier momento y de forma personalizada, a la información y los servicios a través de dispositivos móviles y computadores; y, finalmente, los crecientes desafíos ambientales debido a que las ciudades albergan a la mitad de la población mundial, pero utilizan dos tercios de la energía mundial y generan tres cuartos de las emisiones de CO<sub>2</sub> del mundo [2].

Hoy en día diversos organismos han enfocado su atención en estos retos que las ciudades enfrentan, para ello han planteado soluciones que en su mayoría involucran a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), como medio facilitador para crear lugares inteligentes y auto sostenibles. Cabe resaltar que estas soluciones no pueden ser satisfactorias si en las personas no se crea una concientización en cuanto al consumo responsable de los recursos.

A estos espacios donde se brindan soluciones creativas se conocen como *Smart cities*, “ciudades inteligentes”, lugares en los que se utilizan las TIC para mejorar la competitividad y la eficacia operativa de los servicios urbanos, propiciando así un espacio de calidad, con la disponibilidad de recursos económicos y ambientales, y en el cual las personas tengan un nivel de vida favorable a lo largo del tiempo.



## 1.2. Ciudades Inteligentes

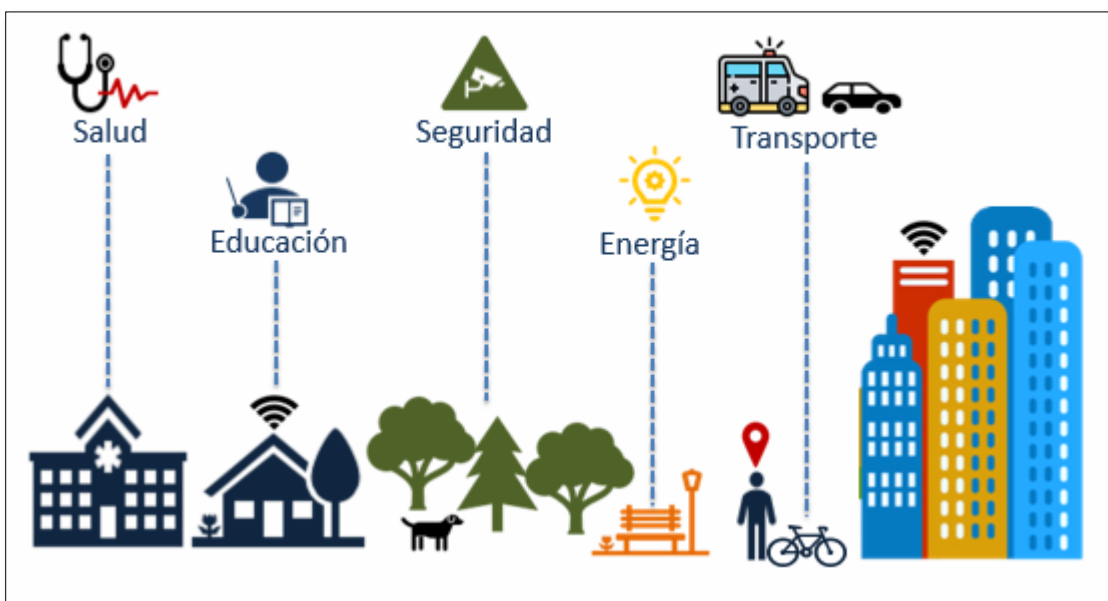


Figura 1.1. Ciudad inteligente.

El concepto de ciudades inteligentes se encuentra en constante evolución, de allí que no se tenga un significado universal; pero en general, se entiende como el desarrollo urbano sostenible capaz de satisfacer las necesidades básicas de instituciones, empresas y los mismos habitantes en aspectos de economía, políticos, ambientales, sociales o de transporte [3].

Según la Unión Internacional de las Telecomunicaciones UIT “una ciudad inteligente y sostenible es una ciudad innovadora que utiliza las TIC y otros medios para mejorar la calidad de vida, la eficiencia de la operación y los servicios urbanos y la competitividad, al tiempo que garantiza la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras con respecto a aspectos económicos, sociales, ambientales y culturales” [4].

La Asociación Europea de Innovación (EIP, *European Innovation Partnership*) define una ciudad inteligente como “un lugar donde las redes y servicios tradicionales se hacen más eficientes con el uso de tecnologías digitales y de telecomunicaciones en beneficio de sus habitantes y empresas. Una ciudad inteligente va más allá del uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para un mejor uso de los recursos y menos emisiones. Significa redes de transporte urbano más inteligentes, instalaciones mejoradas de suministro de agua y eliminación de desechos y formas más eficientes de iluminación y calefacción de edificios. También significa una administración de la ciudad más interactiva y receptiva, espacios públicos más seguros y satisfacer las necesidades de una población que envejece” [5].



Por otro lado, la organización *Smart Cities Council* define que “una ciudad inteligente utiliza las TIC para mejorar su habitabilidad, viabilidad y sostenibilidad. Una ciudad inteligente realiza tres procesos: recolecta, comunica y analiza datos. Primero, recopila información sobre sí misma a través de sensores, otros dispositivos y sistemas existentes. A continuación, comunica esos datos mediante redes cableadas o inalámbricas. En tercer lugar analiza esos datos para comprender lo que está sucediendo ahora y lo que probablemente sucederá después” [2].

Una ciudad inteligente, además, es aquella en la que se tiene una participación colectiva por parte de empresas, gobernantes y habitantes, con el fin de alcanzar una plena inclusión que favorezca el desarrollo. Uno de los factores más relevantes es el de la participación ciudadana, hoy en día el ciudadano deja de ser un simple receptor de servicios para convertirse en un elemento activo, hecho que favorece a los gestores públicos, debido a que les permite obtener un conocimiento desde el punto de vista del usuario y así mejorar los servicios que presta. Los gestores deben generar las herramientas necesarias para recoger la información que el ciudadano produce y mejorar el proceso de toma de decisiones [6].

Por su parte las TIC juegan un papel muy importante, debido a que permiten crear los canales de comunicación entre los diferentes actores de la ciudad para la recolección de información que numerosos dispositivos electrónicos y redes de sensores desplegados en toda la ciudad envían hacia el centro de control y gestión, encargado de procesar dicha información y convertirla en conocimiento para la toma de decisiones.

Por ejemplo, varios sensores distribuidos en diferentes zonas de la ciudad brindan información en tiempo real acerca de las condiciones climáticas de la misma, de la cantidad de tráfico generado en las calles o sobre el flujo de ciudadanos. También se tienen paradas de buses inteligentes en los que se suministra a los usuarios información sobre la llegada del próximo autobús, o parqueaderos inteligentes en los cuales por medio de una combinación de sensores y comunicación inalámbrica se identifica la presencia de automóviles, permitiendo que los usuarios conozcan la disponibilidad de sitios de parqueo. Así mismo, los sistemas de iluminación pública conectados a un sistema de control inteligente resultan altamente eficientes porque manejan de forma dinámica el nivel de iluminación dependiendo de la hora del día, generando grandes ahorros de energía [7].

### **1.3. Dimensiones de las Ciudades Inteligentes [4]**

Según la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) la sostenibilidad de una ciudad inteligente depende de las dimensiones descritas en la tabla 1.1.



Dimensiones	Descripción
<b>Medioambiental</b>	Capacidad de proteger la calidad y la reproducción existentes y futuras de los recursos naturales. Se espera que la ciudad sea sostenible en su funcionamiento para las generaciones futuras
<b>Económica</b>	Capacidad de generar ingresos y empleo para el sustento de los ciudadanos. Se espera que la ciudad pueda prosperar con respecto a empleos, crecimiento y finanzas
<b>Social</b>	Capacidad de garantizar que el bienestar (seguridad, salud, educación) de los ciudadanos se pueda entregar de manera equitativa a pesar de las diferencias de clase, raza o género. Se espera que la ciudad sea útil a sus habitantes y visitantes
<b>Gobierno</b>	Capacidad de mantener condiciones sociales de estabilidad, democracia, participación y justicia. Se espera que la ciudad sea robusta en su capacidad para administrar políticas y agrupar las diferentes categorías

Tabla 1.1. Dimensiones de una ciudad inteligente y sostenible según la UIT [4].

Cada dimensión se explica con más detalle a continuación:

### 1.3.1. Dimensión Medioambiental

A escala mundial, las ciudades presentan el mayor desafío de política ambiental, representando el 75% del consumo de energía y el 80% de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [4]. Por lo tanto, la sostenibilidad ambiental es uno de los componentes más críticos en el funcionamiento de cualquier ciudad. Las ciudades deben considerar las siguientes categorías de la dimensión ambiental:

- Gestión ambiental de la ciudad:
  - Estrategia ambiental
  - Gestión ambiental integrada
  - Administración municipal de medio ambiente
  - Conservación ambiental efectiva
- Energía y cambio climático:
  - Emisiones de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> de la producción de energía, emisiones per cápita)
  - Energía (rendimiento energético, conservación, energías renovables)
- Prevención de la contaminación y gestión de recursos:
  - Residuos (gestión de residuos, tratamiento de aguas residuales)





- Aire [partículas urbanas y calidad del aire, contaminación del aire interior, ozono local, ozono regional, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), entre otros.]
- Agua (agua potable, índice de calidad del agua, gestión del agua)
- Ruido (contaminación acústica)
- Fertilidad del suelo, generación y renovación
- Preservación ecológica:
  - Zonas verdes y espacio público
  - Especies nativas
  - Agricultura (polinización de cultivos y vegetación natural, control de posibles plagas agrícolas, mantenimiento de la biodiversidad)
- Protección de radiación:
  - Ultravioleta solar (UV)
  - Radiación electromagnética

### **1.3.2. Dimensión Económica**

Un objetivo para las ciudades inteligentes y sostenibles es determinar una forma económica de lograr la sostenibilidad sin sacrificar la calidad de vida de sus ciudadanos. Por lo tanto, en la dimensión económica, una ciudad necesita examinar si:

- 1) La economía está experimentando un proceso activo o inactivo durante las diferentes etapas de la construcción de la ciudad.
- 2) Hay suficientes recursos económicos para llevar a cabo un mayor desarrollo de la ciudad.

La ciudad debe considerar las siguientes categorías de la dimensión económica según corresponda:

- Producto interno bruto (PIB)
- Empleo
- Resistencia financiera
- Inversión de capital
- Capital humano
- Exportar e importar
- Innovación
- Comercio
- Economía basada en el conocimiento.



### **1.3.3. Dimensión Social**

En la dimensión social, la ciudad necesita examinar:

- 1) Si la ciudad ha alcanzado su objetivo o ha progresado sin degradar la calidad de vida de manera apreciable.
- 2) Qué efecto ha jugado la ciudad en varios aspectos del desarrollo social.

Las siguientes categorías de la dimensión social deben ser evaluadas por una ciudad:

- Servicios sociales
- Satisfacción ciudadana
- Educación
- Salud
- Seguridad Pública
- Alojamiento
- Cultura y recreación
- Inclusión social
- Equidad de ingresos
- Equidad de consumo
- Servicios personalizados
- Acceso a la información
- Transparencia del sector público

### **1.3.4. Dimensión de Gobierno**

La ciudad necesita analizar en qué medida:

- 1) La construcción de una ciudad inteligente y sostenible ayuda a mejorar la administración urbana.
- 2) El gobierno juega un papel innovador durante el desarrollo de la ciudad inteligente y sostenible.
- 3) Las autoridades locales están preparadas y pueden implementar una estrategia de ciudad inteligente y sostenible.

Aunque la gobernanza electrónica promueve un estándar de automatización y la eficiencia del gobierno, persisten algunos problemas obstinados de administración urbana, mientras surgen nuevos desafíos sociales. Se espera que la gobernanza en una ciudad inteligente y sostenible mejore las condiciones de estabilidad, equidad, participación, transparencia, ética y justicia. Las siguientes categorías de la dimensión de gobierno deben ser evaluadas por una ciudad:

- Infraestructura de la ciudad
- Igualdad de género
- Igualdad de acceso a los servicios públicos



- Apertura y participación pública

Las categorías adicionales de la dimensión de gobierno comúnmente evaluada por la ciudad incluyen (pero no se limitan a):

- Bienes de la ciudad
- Participación de los interesados
- Iniciativas centradas en los ciudadanos y acceso a servicios
- Eficiencia de la gestión de la ciudad
- Capacidad para tomar decisiones

#### **1.4. Uso de las TIC en las Ciudades Inteligentes y Sostenibles [4]**

Las TIC actúan como plataforma entre las diferentes infraestructuras físicas y de información y permiten las siguientes funciones que son fundamentales tanto para alcanzar los objetivos como para maximizar el rendimiento de las ciudades inteligentes y sostenibles:

- Intercambio de información y conocimiento a través de las TIC: Mediante el intercambio inmediato y preciso de información, las ciudades podrían tener un mejor conocimiento de su situación y tomar las medidas adecuadas.
- Pronósticos basados en las TIC: la preparación para situaciones como los desastres naturales requiere una cantidad considerable de datos dedicados al estudio de patrones, la identificación de tendencias, el reconocimiento de áreas de riesgo y la predicción de problemas potenciales. La ciudad podría mejorar su preparación y capacidad de respuesta mediante la gestión eficiente de estos datos e información.
- Integración posibilitada por las TIC: las vulnerabilidades y fortalezas de la ciudad podrían comprenderse mejor mediante el acceso a información oportuna y pertinente (por ejemplo, sistemas de alerta temprana).
- Modelos digitales basados en las TIC: la planificación es un paso clave en el desarrollo de la ciudad, para lo cual las TIC pueden utilizarse como herramienta.

##### **1.4.1. Uso de las TIC en la Infraestructura de la Ciudad**

Además de las infraestructuras TIC, como la infraestructura de red, las aplicaciones de software, la computación en la nube o las plataformas de datos y los dispositivos de acceso especificados, en las ciudades inteligentes y sostenibles las TIC pueden ayudar en el diseño, la construcción, la gestión o el funcionamiento en curso y en la organización de diversas interacciones entre los elementos de la infraestructura física. Se espera que mediante las TIC se conecten una variedad de infraestructuras



públicas y se proporcionen servicios mucho más eficaces a la ciudadanía. En la tabla 1.2 se observa el uso de las TIC en la infraestructura física urbana.

Tema de infraestructura	Uso de las TIC
<b>Gestión de edificios</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Automatización de edificios</li><li>• Control de construcción</li><li>• Sistemas de red de tecnología de la información</li><li>• Solución de gestión de crisis (energía, daños a la infraestructura)</li><li>• Gestión de la información del edificio</li></ul>
<b>Comunicaciones de datos y confidencialidad, integridad y disponibilidad</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Voz / video / datos</li><li>• Audiovisual</li><li>• Cableado estructurado</li><li>• Protocolo de Control de Transmisión / Protocolo de Internet (TCP / IP)</li><li>• Sistema de automatización de edificios</li><li>• Acceso a la red privada virtual</li><li>• Acceso a la computadora</li><li>• Acceso a la red</li><li>• <i>Firewalls</i></li><li>• Servicios y aplicaciones de seguridad gestionados</li><li>• Banda ancha móvil</li><li>• Resistencia de la red de telecomunicaciones</li><li>• Infraestructura de seguridad de datos</li><li>• Biometría</li></ul>
<b>Red inteligente / energía / servicios públicos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Logística energética.</li><li>• Distribución (electricidad, agua, gas).</li><li>• Monitor de utilidad</li><li>• Monitor de calor</li><li>• Iluminación</li><li>• Potencia de respaldo</li><li>• Funciones de control/gestión de la demanda de oferta</li><li>• Monitor de fugas</li></ul>
<b>Seguridad física</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Control de acceso</li><li>• Detección de intrusos por video vigilancia</li><li>• Sensores perimetrales y de movimiento</li><li>• Paneles de alarma contra incendios</li><li>• Detección (humo / calor / gas)</li><li>• Supresión de incendios</li><li>• Notificación y evacuación</li></ul>

Tema de infraestructura	Uso de las TIC
Respuesta de emergencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de incendios integrado</li> <li>• Servicios de emergencia médica y policial</li> <li>• Comando y control centralizado y remoto</li> <li>• Proceso de toma de decisiones escalable</li> </ul>
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control y monitoreo del tráfico (ferrocarril, metro, autobuses, vehículos particulares)</li> <li>• Sistemas de transporte inteligente (ITS)</li> <li>• Gestión de suministros 24/7 (logística)</li> </ul>

Tabla 1.2. Uso de las TIC en la infraestructura física urbana según la UIT [4].

### 1.5. Impactos de las TIC en la Sostenibilidad de las Ciudades Inteligentes y Sostenibles [4]

Las ciudades Inteligentes y sostenibles, como se muestra en la figura 1.2, incorporan cuatro dimensiones y una serie de infraestructuras físicas y de servicios, con las TIC en el núcleo actuando como la plataforma que integra todos los demás elementos.

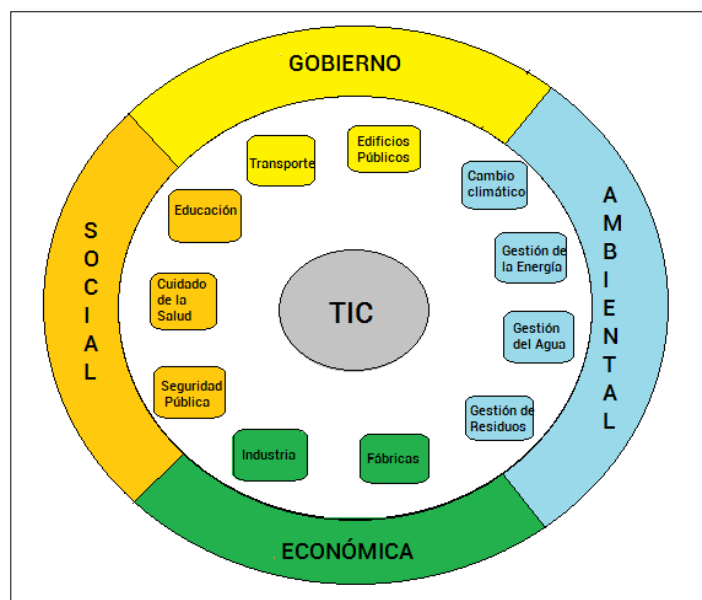


Figura 1.2. Dimensiones de una ciudad inteligente y sostenible según la UIT [4].

#### 1.5.1. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad Ambiental.

- **Cambio climático**

Las TIC pueden utilizarse para mitigar y adaptarse al cambio climático en las ciudades. Estas tecnologías son útiles para acelerar la implementación de acciones concretas al ofrecer herramientas y aplicaciones que brinden a los usuarios los



medios para consumir de manera sostenible, además de proporcionar canales para influir en otras personas, incluidos los responsables políticos y brindar soluciones personalizadas y fáciles de usar para medir y entregar la información relacionada con el medio ambiente.

- **Gestión de la energía**

Las ciudades pueden resolver problemas de gestión energética con el desarrollo de nuevas tecnologías para recopilar información y controlar la energía con el fin de optimizar su consumo.

Los sistemas inteligentes de gestión de la energía pueden usar sensores, medidores avanzados, controles digitales y herramientas analíticas para automatizar, monitorear y controlar el flujo de energía.

- **Gestión del agua**

Los sistemas de gestión inteligente del agua utilizan soluciones basadas en las TIC para proporcionar acceso a agua potable, gestionar la demanda de manera más eficiente y desarrollar un mejor mecanismo de fijación de precios. Los ejemplos incluyen:

- Proporcionar un monitoreo continuo de la calidad y disponibilidad del agua mediante sensores inteligentes
- Una mejor gestión del agua

Los sistemas de gestión inteligente del agua incluyen:

- Tuberías inteligentes y redes de sensores
- Medición inteligente
- Módems de comunicación
- Sistemas de información geográfica
- Computación en la nube
- Control de supervisión y adquisición de datos
- Modelos y herramientas de optimización y apoyo a la toma de decisiones
- Herramientas de comunicación y sistemas de información basados en la web

La integración de estas tecnologías se adapta para controlar los recursos hídricos y comprender los problemas del sector del agua en las zonas urbanas.

- **Gestión de residuos**

Este desafío de la gestión de residuos (incluidos los residuos electrónicos) puede abordarse mediante la reducción de la fuente, la identificación adecuada de la



categoría de residuos y el reciclaje. Las TIC brindan varias soluciones a futuro para convertir los desechos en un recurso y crear economías de ciclo cerrado. Los sistemas inteligentes de gestión de residuos pueden habilitar, entre otras, las siguientes áreas de acción:

- Implementación de sistemas de seguimiento de residuos para monitorear y controlar el movimiento de diferentes tipos de residuos
- Clasificación de residuos sin la intervención del operador
- Aprovechar la tecnología para recopilar y compartir datos desde la fuente hasta el transporte y la eliminación de residuos
- Conectar varios sistemas inteligentes de gestión de residuos con proveedores locales que presten estos servicios

### **1.5.2. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad Económica**

Las TIC han desempeñado un papel en la mejora de los procesos industriales, la modernización de la gestión, el crecimiento económico, la mejor asignación de recursos, entre otros; con lo cual se contribuye a la sostenibilidad económica. La industria de las TIC sigue teniendo un impacto positivo. El uso de estas tecnologías mejora los procesos industriales a través de la fabricación inteligente, por ejemplo, basada en tecnologías avanzadas de computación, así como las TIC interoperables existentes y en evolución. Su objetivo es apoyar la innovación y el desarrollo de productos, servicios y tecnologías, mejorando la eficiencia y la fiabilidad de la gestión del ciclo de vida de fabricación, el rendimiento económico, la seguridad y la sostenibilidad. Por lo tanto, las TIC brindan opciones para la transformación económica y pueden ayudar a impulsar las economías.

Hay una variedad de fuentes de datos donde la aplicación de las TIC mejora la eficiencia de la asignación y utilización de recursos para las empresas existentes y las nuevas. El comercio electrónico es un ejemplo de una aplicación de las TIC que puede mejorar la eficiencia del comercio y las transacciones comerciales.

### **1.5.3. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad Social**

- **Educación**

Las TIC pueden tener un impacto positivo en la educación para mejorar la calidad de vida. Algunas contribuciones importantes de las herramientas de TIC a la educación incluyen:

- Provisión de un entorno de aprendizaje personalizado, basado en el nivel de progresión, intereses, estilo de aprendizaje y antecedentes
- La labor del maestro para diseñar y evaluar actividades de aprendizaje, incluida la comunicación con estudiantes, padres y miembros de la comunidad y el intercambio de experiencias de desarrollo profesional



- Ayudar a los padres y las comunidades para que participen en el proceso de aprendizaje a través de recursos electrónicos que contribuyan a aumentar la conciencia y compromiso en su educación

- **Cuidado de la salud**

Los datos de salud podrían usarse para capacitar a los especialistas en salud a fin de mejorar la eficiencia y la productividad de la atención médica de los pacientes. La atención médica inteligente se puede proporcionar a través de la telemedicina, la medicina electrónica y la gestión electrónica de la salud. Estos servicios pueden incluir diagnóstico o tratamiento, solicitar una cita en línea, registros digitales, servicios de salud en el hogar a distancia, sistemas de alarma de salud, sistemas de monitoreo remoto de pacientes y sistema de portabilidad de datos en el caso de la recuperación ante desastres.

- **Seguridad pública**

Los roles de las TIC en la seguridad pública incluyen el uso de herramientas analíticas que ayudan a detectar, responder y resolver problemas de seguridad personal que ponen en peligro la vida, particularmente durante o en respuesta a catástrofes graves.

#### **1.5.4. Contribución de las TIC a la Sostenibilidad del Gobierno**

- **Edificios públicos**

Los edificios inteligentes pueden mejorar la calidad de vida al proporcionar entornos domésticos y comerciales más cómodos y seguros. Los sistemas de edificios inteligentes pueden utilizar la información de las TIC para aumentar la eficiencia energética, reducir las emisiones y optimizar el uso de los servicios públicos, lo que lleva a la efectividad operativa y la satisfacción del usuario.

- **Transporte**

Mejorar la movilidad y disminuir la congestión del tráfico son algunos de los desafíos que enfrentan las ciudades inteligentes en la actualidad. La congestión impacta en la vida cotidiana de los viajeros, así como en las empresas y visitantes de una ciudad. Para abordar este desafío, los planificadores de la ciudad deben buscar soluciones de transporte para reducir la congestión, así como optimizar el uso del transporte público de la ciudad. Esto podría proporcionar un transporte eficiente de personas y bienes de manera oportuna, segura, rentable, ecológica y sostenible. Los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, *Intelligent Transport Systems*) pueden implementarse para lograr estos objetivos.

Si se tiene en cuenta a los sistemas de emergencia como ambulancias y su necesidad de salvar vidas humanas, se resalta aún más los beneficios que trae la implementación de ITS, ya que en las ciudades los automóviles, peatones y sobre todo las intersecciones reguladas por semáforos, provocan un aumento en el tiempo que tardan las ambulancias para prestar sus servicios.





En la actualidad, entre las propuestas realizadas para contrarrestar los problemas que se generan en las vías de la ciudad se tiene la semaforización inteligente, un sistema que integra diferentes herramientas y tecnologías para dar prioridades cuando las ambulancias se acerquen a las intersecciones realizando un control semafórico, y evitar así que estas se vean detenidas por el tráfico acumulado que pueda presentarse.

En el proceso del control de semáforos se ven involucrados diferentes elementos, como: una unidad central de toma de decisiones, una unidad para el control de los semáforos, así como también de una tecnología que permita realizar la comunicación entre ellas. Es importante tener en cuenta que el sistema debe soportar movilidad, debido a que estos automóviles por el servicio que prestan están viajando a altas velocidades (superiores a las de los vehículos de transporte público y particulares).

A continuación, en el capítulo 2 se presentan algunas tecnologías que pueden ser utilizadas para brindar una comunicación inalámbrica en el sistema de control semafórico para ambulancias.



## **CAPÍTULO 2: Tecnologías Radio para la Transmisión de Información en un Sistema de Gestión de Movilidad Semafórica para Ambulancias**

### **2.1. Introducción**

Las ciudades inteligentes se caracterizan por hacer uso de las TIC para prestar servicios de alta calidad a las personas. Con el paso del tiempo surgen tecnologías cada vez más eficientes que permiten satisfacer las necesidades de los ciudadanos de una mejor manera. En la actualidad, hay una gran variedad de tecnologías empleadas en diversos campos con el fin de cumplir el objetivo de las ciudades inteligentes, que corresponde a proporcionar una mejor calidad de vida a las personas. Entre estas tecnologías están las inalámbricas que presentan enormes ventajas, como fácil instalación y alta escalabilidad.

Dichos avances tecnológicos han beneficiado a sectores como la medicina, la educación y el transporte, en este último, por ejemplo, se han implementado semáforos inteligentes en las vías con el uso de cámaras o sensores con los cuales se estudia la cantidad de tráfico, para así posteriormente diseñar estrategias que optimicen la prestación de este servicio.

En sistemas de emergencia como bomberos, policía y ambulancias, es fundamental que haya aplicaciones inteligentes para que sus vehículos cumplan con eficiencia sus servicios, sobre todo en medios urbanos donde la cantidad de tráfico es significativa. Una manera de hacerlo es brindar una conexión entre el vehículo de emergencia y la red de semáforos, para así disminuir el tiempo de viaje. Las tecnologías inalámbricas que brindan una solución deben tener ciertas características como: brindar amplia cobertura y desempeñarse correctamente en ambientes de movilidad.

En este capítulo se presenta un estudio de las tecnologías inalámbricas factibles de ser utilizadas para el desarrollo de un prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias.

### **2.2. IEEE 802.16 (WiMAX) [8]**

La tecnología WiMAX, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), también conocido como el estándar IEEE 802.16; la organización encargada de su expansión, implementación y adopción, es WiMAX Forum.



WiMAX está basado en una Red de Área Metropolitana Inalámbrica (WMAN, *Wireless Metropolitan Area Network*) y alcanza una velocidad máxima de transmisión de datos en el enlace descendente de hasta 75 Mbps en un rango de 50 Km, dependiendo de la configuración de la antena y la técnica de modulación, aunque en la práctica se puede alcanzar una velocidad de datos de 10 Mbps en 10 km. Utiliza la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) como técnica de multiplexación para el enlace ascendente y descendente.

Inicialmente entró a operar en frecuencias de 10-66 GHz con propagación por línea de vista, pero luego se expandió para trabajar en el rango de 2-11 GHz con capacidad de propagación sin línea de vista utilizando la capa OFDMA PHY, con subcanalización que permite la asignación dinámica de tiempo y frecuencia a múltiples usuarios.

Otras versiones de WiMAX incluyen IEEE 802.16-2004 e IEEE 802.16-2005; la primera se conoce como WiMAX fijo, porque no tiene movilidad, se usa para acceso fijo y nómada y no admite traspasos. La segunda se conoce como WiMAX móvil, que es la versión ampliada de WiMAX fijo y presenta características nuevas para admitir Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) mejorada y proporcionar movilidad con una velocidad superior a 120 km/h. WiMAX móvil usa una red troncal totalmente IP (*Internet Protocol*) [9].

La red WiMAX consta de Estaciones Móviles (MS, *Mobile Stations*), Estaciones Suscriptores (SS, *Subscriber Stations*) y Estaciones Base (BS, *Base Stations*); una BS junto con las MS y SS conforman una celda. Los tipos de comunicación son: Punto a Multipunto (entre múltiples estaciones de suscriptores/móviles y estaciones base) y Punto a Punto (entre dos estaciones base) [10]. Algunas versiones que se han publicado del estándar son: 802.16.2-2004, 802.16p-2012, 802.16-2012, 802.16n-2013, 802.16q-2015 y 802.16s-2017 [11].

### **2.3. IEEE 802.11 [12]**

IEEE 802.11 es un estándar para redes inalámbricas definido por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) abreviado como WiFi (*Wireless Fidelity*), el cual está en continua evolución.

IEEE 802.11 se divide en dos capas principales, la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, *Media Access Control*) y la capa física PHY, estas dos capas permiten que un único protocolo de datos pueda usarse con distintos métodos de transmisión. La capa física a su vez se divide en dos:



- PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*) que mapea las tramas MAC en el medio y establece los límites de la capa MAC y la PHY
- PMD (*Physical Medium Dependent*) que se encarga de transmitir las tramas MAC

Para enviar los datos WiFi cuenta con técnicas de Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencias (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*) o por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) y OFDMA.

Una red 802.11 está compuesta por cuatro componentes básicos: Sistema de distribución, Punto de Acceso (AP, *Access Point*), medio inalámbrico y estación. El sistema de distribución es el componente físico encargado de conducir las tramas a su destino. El AP es el medio de intercomunicación de todos los terminales inalámbricos y es el puente de interconexión de la red fija a Internet, el AP desempeña tres funciones: portal, cuando sirven para conectar la red inalámbrica a una cableada; puente, cuando su función es conectarse con otros AP's y enrutador para direccionar los datos dentro de la zona de cobertura [13].

El elemento fundamental de la arquitectura de las redes 802.11 es la celda que se define como el área geográfica donde hay un grupo de estaciones interconectadas y un único punto de acceso, el cual tiene la capacidad de gestionar todo el tráfico de las estaciones y de comunicarse con otras celdas o redes. En una red WiFi se tienen diferentes modos de operación: Grupo de Servicio Básico Independiente (IBSS, *Independent Basic Service Set*). Modo Ad-hoc, Modo infraestructura y Grupo de Servicio Extendido (ESS, *Extended Service Set*). IBSS corresponde a una celda inalámbrica donde no hay sistema de distribución y por lo tanto no hay conexión con otras redes. En el modo Ad-hoc no existe un punto de acceso, su función es realizada de forma aleatoria por una de las estaciones conectadas, el tráfico de información se lleva a cabo entre las dos estaciones involucradas sin necesidad de recurrir a una jerarquía (AP). En el modo Infraestructura el AP realiza las funciones de coordinación, todo el tráfico pasa por él, existe una pérdida de eficiencia cuando dos estaciones dentro de un mismo BSS (*Basic Service Set*) desean comunicarse entre sí, sin embargo, es eficiente cuando la mayor parte del tráfico se origina o finaliza en las redes exteriores a las que está conectado el AP. El modo ESS se obtiene cuando se unen varios BSS's mediante un sistema de distribución, de esta manera se logra una cobertura mayor en comparación a la que proporciona un BSS.

La familia IEEE 802.11 cuenta con dos estándares de baja potencia, IEEE 802.11 ah (*WiFi HaLow*) y IEEE 802.11af (*WiFi-fi*); que trabajan en bandas de frecuencia por debajo de un Giga Hertz [13].



### 2.3.1. 802.11 ah

WiFi HaLow opera en 900 MHz, por lo tanto, proporciona una cobertura mayor en comparación con los demás estándares WiFi que trabajan en 2,4 y 5 GHz; ofrece una mejor capacidad para atravesar obstáculos, una escalabilidad mejorada y un bajo consumo de energía. Cada nodo tiene una identificación de asociación y propone una organización de red jerárquica con un gran número de estaciones asociadas [14].

En la capa MAC esta tecnología tiene diferentes características para admitir estaciones de potencia limitada en redes densas como: encabezado MAC corto, Ventana de Acceso Restringido (RAW, *Restricted Access Window*), Mapa de Indicación de Tráfico (TIM, *Traffic Indication Map*), Mapa de Indicación de Tráfico de Entrega (DTIM, *Delivery Traffic Indication Map*) y Tiempo de Activación (TWT, *Target Wake up Time*). El mecanismo RAW se introdujo para abordar la escalabilidad de miles de dispositivos densamente desplegados. RAW tiene como objetivo aumentar el rendimiento y la eficiencia energética al dividir las estaciones en diferentes grupos, cada uno de los cuales tiene acceso al canal durante un intervalo que no se superpone. TIM y DTIM se utilizan desde el AP para avisar a la estación si hay paquetes almacenados en el búfer. TWT permite una mayor reducción del consumo de energía para las estaciones que transmiten pocos datos. De hecho, las estaciones pueden permanecer en un estado de ahorro de energía durante períodos de tiempo muy largos sin perder su asociación con el AP [15].

WiFi HaLow permite la conectividad de baja potencia necesaria para aplicaciones que incluyen sensores y dispositivos portátiles, brinda soluciones para *smart home*, atención médica digital, así como para entornos industriales, entre otros [16].

### 2.3.2. 802.11 af

Este estándar conocido también como WiFi-fi utiliza el espectro de espacio en blanco de TV de Muy Alta Frecuencia (VHF, *Very High Frequency*) y Frecuencia Ultra Alta (UHF, *Ultra High Frequency*); opera entre 54 y 790 MHz, en estos rangos de frecuencia las condiciones de propagación de la señal mejoran en comparación con los estándares de WiFi que trabajan en 2,4 y 5 GHz. En la actualidad el espectro se asigna en bloques de frecuencia que prestan servicios con licencia o sin licencia, esta asignación de espectro estático tiene recursos limitados para soportar el aumento exponencial de dispositivos inalámbricos, en consecuencia se crea este estándar que presenta las especificaciones para el uso compartido del espectro entre los Dispositivos de Espacio en Blanco (WSD, *White Space Devices*) sin licencia y los servicios con licencia en la banda de espacio en blanco de TV.

Los WSD deben ser capaces de soportar diferentes anchos de canal y aprender de una Base de Datos de Geolocalización (GDB, *Geolocation Data Base*) la cual



contiene el uso de la banda ya sea por usuarios con licencia o sin licencia, almacena las frecuencias permisibles y los parámetros de operación por ubicación geográfica, además informa que canales están disponibles y durante cuánto tiempo, esto con el fin de evitar interferencias con los dispositivos existentes en los canales vecinos, de esta manera los WSD tienen acceso a la información sobre la frecuencia de funcionamiento y la región de los demás dispositivos que operan en la misma banda.

Contar con las bases de datos permite resolver varios problemas de red como la congestión y la planificación de frecuencias en grandes escalas de tiempo, sin embargo, la mayor responsabilidad recae sobre las autoridades regulatorias de cada región las cuales autorizan y administran las GDB, por lo tanto, la operación de éstas depende de los requisitos de seguridad y tiempo del dominio regulatorio<sup>1</sup> aplicado [17].

## **2.4. Radio Trunking [18]**

Esta tecnología se basa en una asignación de frecuencia dinámica, donde los usuarios pueden comunicarse sin necesidad de monitorear el canal antes de usarlo, las decisiones sobre la asignación de frecuencias las realiza un centro de control y todos los canales son compartidos por todos los usuarios para reducir la congestión del canal, una ventaja es la fácil expansión porque brinda la oportunidad de agregar más usuarios sin necesidad de cambiar la estructura del sistema.

Radio Trunking es frecuentemente utilizada por la policía, militares, ambulancias, bomberos, servicios de seguridad, servicios de transporte, en las fábricas, en las minas, entre otros. La asignación de frecuencias se hace por medio de diferentes protocolos de señalización: digitales y analógicos.

### **2.4.1. Clasificación de los Sistemas Troncales**

Los sistemas troncales se clasifican de varias formas, entre ellas:

- Por la asignación de los canales (por llamada o por mensaje, por transmisión o mixta)
- Por el tipo de cobertura (local, regional, nacional)
- Por su configuración (monoemplazamiento, multiemplazamiento)
- Por la utilización de las frecuencias (heterofrecuenciales, isofrecuenciales)
- Por el tipo de información intercambiada (voz, datos, voz y datos)
- Por la modalidad de explotación (semidúplex, dúplex)
- Por la banda de frecuencias (VHF, banda III, UHF)

---

<sup>1</sup> El dominio regulatorio se refiere a los roles de arquitectura (circuito abierto y circuito cerrado) y a los mecanismos utilizados como: consulta de disponibilidad de canal, gestión de horarios, control de canal de red, señal de verificación de contacto, habilitación para GDD (*Geolocation Database-Dependent*) y mapa de espacio en blanco [17].



- Por la tecnología empleada (analógica, digital)
- Por el tipo de servicio prestado (autoprestación, servicio a terceros)

#### 2.4.2. Estructura de una Red Troncal

Existen dos tipos de redes: monoemplazamiento y multiemplazamiento. En la primera la red tiene solo una estación base y se compone por un nodo central que se encarga de la gestión del sistema y tiene una estación base asociada, la cual a su vez cuenta con estaciones fijas y móviles con sus correspondientes terminales. Para la configuración multiemplazamiento la red cuenta con varios nodos, cada uno de ellos gestiona y dispone de un grupo de frecuencias para los móviles de su respectiva zona. En la figura 2.1 se observa un sistema troncal monoemplazamiento, el cual cuenta con varios terminales, extensiones telefónicas y líneas de control a las estaciones base.

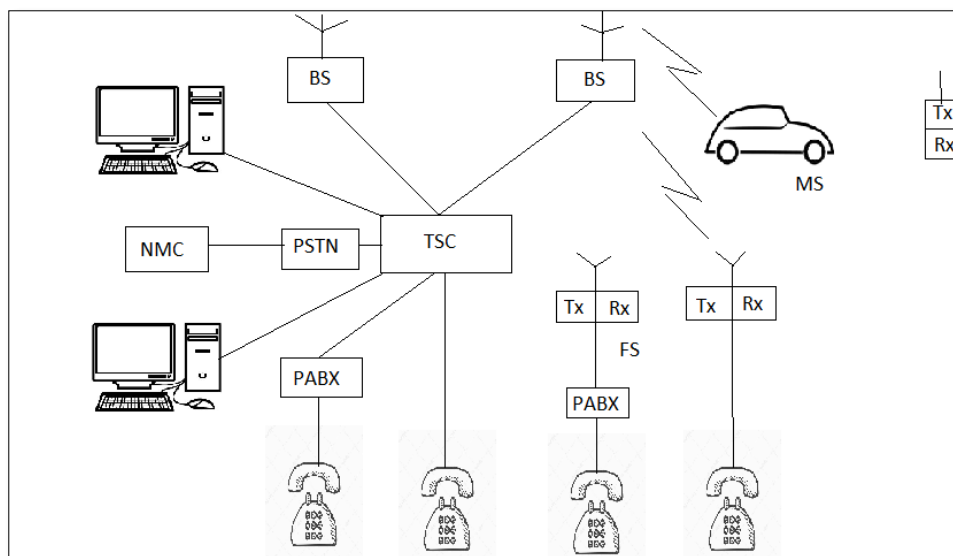


Figura 2.1. Sistema troncal monoemplazamiento [18].

NMC: Centro de Gestión de la Red (Network Management Center)

TSC: Controlador del Sistema (*Trunking System Controller*)

FS: Estación Fija (*Fixed Station*)

PABX: Centralita privada (*Private Branch Exchange*)

MS: Estación Móvil (*Mobile Station*)

El sistema cuenta con un servidor donde se realiza toda la gestión del nodo central, éste se encarga de tres funciones, las tareas de proceso, conmutación y entrada/salida de datos.

#### 2.4.3. Canales del Sistema Troncal

Cada estación base cuenta con un canal de señalización común para todos los terminales, y con un conjunto de canales de tráfico que son dedicados, cada uno de ellos es asignado a un terminal y utilizado de manera exclusiva.





El canal de control o señalización tiene dos configuraciones diferentes: canal dedicado o canal variable, en la primera configuración el canal se utiliza de manera permanente para la señalización, y en la segunda se usa como un canal más de tráfico cuando todos los demás canales estén ocupados. El canal de control se emite constantemente y su función es brindar orientación a los móviles en la red.

## **2.5. Sistemas Móviles Celulares**

Los sistemas móviles celulares están revolucionando la industria de las comunicaciones. La aparición de los teléfonos inalámbricos supone una nueva y mejorada forma de comunicación entre las personas; donde no se realiza una comunicación a un sitio sino a un individuo en particular.

Los nuevos sistemas celulares básicamente se componen de tres partes, el Sistema de Conmutación de Red (NSS, *Network Switching System*), la Estación Base (BS, *Base Station*) y la Estación Móvil (MS, *Mobile Station*).

A continuación, se describe cómo han evolucionado estos sistemas.

### **2.5.1. Primera Generación (1G) [19]**

Hacia 1979 aparece la primera generación (1G) de la telefonía móvil, un sistema totalmente analógico y estrictamente para voz, usaba el método de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) que tenía algunas deficiencias debido a que asignaba a cada usuario una frecuencia única, lo que causaba que las llamadas se bloquearan fácilmente. Operaba en un ancho de banda limitado de 20 MHz. En América la tecnología utilizada fue el Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS, *Advanced Mobile Phone System*), en la que se divide el espacio geográfico de comunicación en celdas, con la característica de no reuso de frecuencias en celdas adyacentes para evitar la interferencia.

### **2.5.2. Segunda Generación (2G) [19]**

Comenzó a introducirse en 1990 con el estándar europeo Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile communications*) y utiliza el Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*); otros estándares que aparecieron, fueron: AMPS Digital e IS-95. En estos sistemas se digitaliza no solo el enlace de control, sino también la señal de voz, y se realizan mejoras en cuanto a la calidad del servicio y mayor capacidad con bajos costos para los usuarios.

En esta generación la transmisión de datos oscila entre 9.6 y 14.4 Kbps, las bandas de frecuencias utilizadas fueron 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz. Seguidamente a





2G apareció 2.5G que ofrecía mejores características y capacidades adicionales como el Servicio General de Paquetes vía Radio (GPRS, *General Packet Radio System*).

### **2.5.3. Tercera Generación (3G)**

Con la aparición de 3G, llegan diferentes tipos de información que puede ser enviada como: voz, video y multimedia, y capacidades de transmisión desde 144 Kbps hasta 2 Mbps, además se permiten servicios que requieren mayor ancho de banda como el acceso a Internet, correo electrónico, transferencia de archivos, videos e imágenes. Estos sistemas brindan servicios con capacidad de transmisión de datos de hasta 384 Kbps a usuarios que pueden estar viajando a 120 Km/h en ambientes exteriores y una capacidad de 2Mbps a usuarios con movilidad inferior a 10 Km/h en interiores [19].

Algunas de las tecnologías que se emplean en 3G están: Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunication System*), utilizado en Europa, y las evoluciones de CDMA2000, la primera CDMA2000 1xEV-DO y la segunda CDMA2000 1xEV-DV [20].

Como sucedió con la segunda generación, en 3G se han ido realizando mejoras a lo largo de su convergencia hacia 4G, por lo que han aparecido nuevos sistemas intermedios 3.5G, como HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) y HSPA+ (*High Speed Packet Access*) [21].

### **2.5.4. Cuarta Generación (4G)**

La tecnología 4G se conoce comúnmente como Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*), se desarrolló desde el principio para soportar de paquete de datos y no tiene soporte para voz con conmutación de circuitos. Otros requisitos importantes fueron, capacidad de banda ancha móvil, uso más flexible del espectro y mayor eficiencia espectral, además se desarrolló una nueva arquitectura de red central, conocida como Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*) para reemplazar la arquitectura usada por GSM y HSPA.

La primera versión de LTE hizo parte del release 8 [22] de la especificación 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) y el primer lanzamiento comercial se hizo en 2009. Define velocidades superiores a 1 Gbps y utiliza OFDMA, para obtener una alta flexibilidad de ancho de banda, Coordinación de Interferencia Entre-Celdas (ICIC, *Inter-Cell Interference Coordination*) para hacer reuso de frecuencias, CA (*Carrier Aggregation*) para utilizar más espectro del disponible en una sola comunicación y sistema de Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO, *Multiple Input*



*Multiple Output*) que consiste en utilizar varias antenas transmisoras y receptoras modificando los patrones de radiación según sea necesario [23].

### **2.5.5. Quinta Generación (5G)**

Las nuevas redes celulares 5G tienen proponen incrementar la velocidad de conexión y transmisión de datos, además de optimizar el uso del espectro electromagnético, por lo tanto, es indispensable que se utilicen antenas MIMO, ya que estas permiten a los dispositivos trabajar en múltiples frecuencias de forma simultánea para múltiples entradas y múltiples salidas.

La tecnología 5G debe cumplir con tres requisitos fundamentales: tener la capacidad de soportar el creciente número de dispositivos que acceden a la red, por medio de sistemas como Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*) y comunicaciones de Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*) ; proporcionar la contextualización de la información al usuario, en otras palabras los usuarios no deben acceder a la red para obtener información desde Internet, sino que ésta vendrá a ellos, y finalmente debe ser lo suficientemente rápida para garantizar baja latencia. En este tipo de redes es muy importante la integración de la nube con objetos de uso cotidiano como automóviles, electrodomésticos, textiles y aplicaciones para la salud [24]. La velocidad en esta tecnología alcanza los 10 Gbps y se espera que en Colombia esté disponible en 2020 [25].

### **2.6. Sistema Propietario en 900 MHz – airMAX de Ubiquiti**

Ubiquiti Networks, una empresa dedicada a la fabricación de equipos para brindar comunicación a corta y larga distancia; cuenta con una serie de productos entre los que se encuentran, radios, antenas, software, protocolos de comunicación y herramientas para brindar comunicación inalámbrica de banda ancha sin licencia [26].

Una de sus líneas de producción es la serie airMAX, diseñada para superar las redes tradicionales basadas en el estándar 802.11, con las siguientes características:

- Utiliza el protocolo AirMax (basado en TDMA) para exteriores, donde los nodos ocultos no son un problema. El protocolo 802.11 (basado en detección de portadora) se diseñó para redes de interiores en donde los clientes pueden escucharse entre ellos.
- El protocolo AirMax detecta paquetes de voz/video y les da prioridad. También asigna prioridades sobre clientes que se encuentren activos sobre otros que no lo estén, para optimizar la latencia.



- AirMax se basa en la tecnología de radio MIMO 1x1 y 2x2. Provee 150Mbps de tráfico TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) para conexiones punto a punto y 100Mbps para punto a multipunto [27].

## 2.7. Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, *Low-Power, Wide Area Networks*)

Una Red de Área Amplia de Baja Potencia, es una red de comunicaciones inalámbrica extendida, que permite comunicaciones a grandes distancias entre dispositivos como sensores y medidores inteligentes, con una baja velocidad de transmisión de datos a fin de mantener un bajo consumo de energía y prolongar la vida útil de las baterías.

Una LPWAN está diseñada para aplicaciones industriales, donde los equipos envían pequeñas cantidades de información a largas distancias, la tasa de transmisión de datos de esta red varía entre 0,3 kbps a 50 kbps por canal y opera en la banda ISM [28].

### 2.7.1. Sigfox [29]

Sigfox es una red diseñada para el Internet de las Cosas que fue creada por la compañía francesa Sigfox en el año 2009 y brinda conectividad de bajo consumo, lo que permite alargar el tiempo de vida de las baterías y reducir costos, además es el principal proveedor de conectividad móvil dedicada al Internet de las Cosas<sup>2</sup> (IoT, *Internet of Things*) y a las comunicaciones M2M.

Algunas características de esta tecnología se muestran a continuación:

- **Banda Ultra Estrecha (UNB, *Ultra-Narrow Band*)**

Sigfox utiliza 192 KHz del espectro en bandas no licenciadas para enviar mensajes utilizando la modulación UNB; cada mensaje tiene un ancho de 100 Hz y se transmite a una tasa de 100 o 600 bps. En la figura 2.2 se observa este principio.

---

<sup>2</sup> Infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperatividad de las TIC presentes y futuras [30].

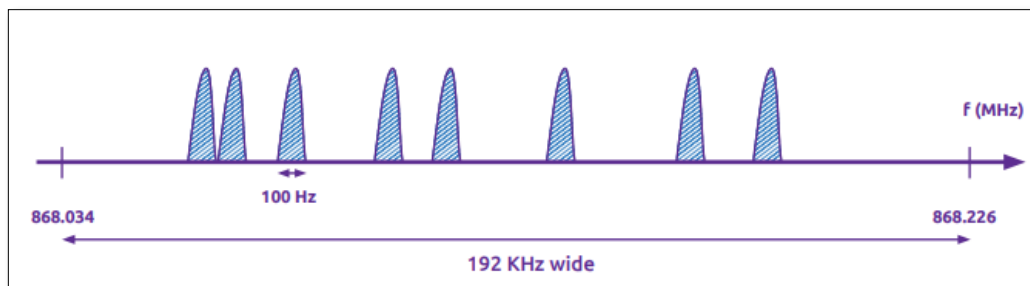


Figura 2.2. Banda ultra estrecha [29].

- **Acceso aleatorio**

En Sigfox la transmisión entre la red y el dispositivo no está sincronizada. El dispositivo envía un mensaje en una frecuencia aleatoria, posteriormente emite 2 réplicas del mensaje en diferentes frecuencias y tiempos (diversidad de tiempo y frecuencia), además no existe sincronización entre la red y los dispositivos. Las estaciones base monitorean el espectro y buscan señales de UNB para demodular.

- **Recepción cooperativa**

El mensaje emitido es recibido por cualquier estación base cercana (en promedio son tres), a esto también se lo conoce como “diversidad espacial”.

- **Pequeños mensajes**

El protocolo de comunicación que utiliza Sigfox está diseñado para mensajes pequeños, con una carga útil que varía entre 0 a 12 bytes, por lo que, de acuerdo con las regulaciones, Sigfox permite hacer el envío de aproximadamente 40 mensajes por día. En el enlace descendente el tamaño del mensaje es de 8 bytes (estático).

- **Arquitectura de la red Sigfox**

Sigfox tiene una arquitectura de red plana, que se compone de dos capas: la capa de equipos de red, consiste en todas las estaciones base y demás elementos como antenas, que se encargan de recibir los mensajes provenientes de los dispositivos y transferirlos a la segunda capa que corresponde al sistema de soporte Sigfox.

El sistema de soporte Sigfox, es la red central, encargada de procesar los mensajes y enviarlos a través de llamadas de retorno al sistema del cliente. Esta capa es el puente para la entrada hacia los diferentes actores de la red (Sigfox, operadores de Sigfox, canales y clientes finales), para interactuar con el sistema a través de

interfaces de cuidado web o mediante una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*).

La conexión entre las dos capas se realiza por medio de Internet público, pero está asegurada con una conexión de Red Privada Virtual (VPN, *Virtual Private Network*). La arquitectura de Sigfox, se muestra en la figura 2.3.

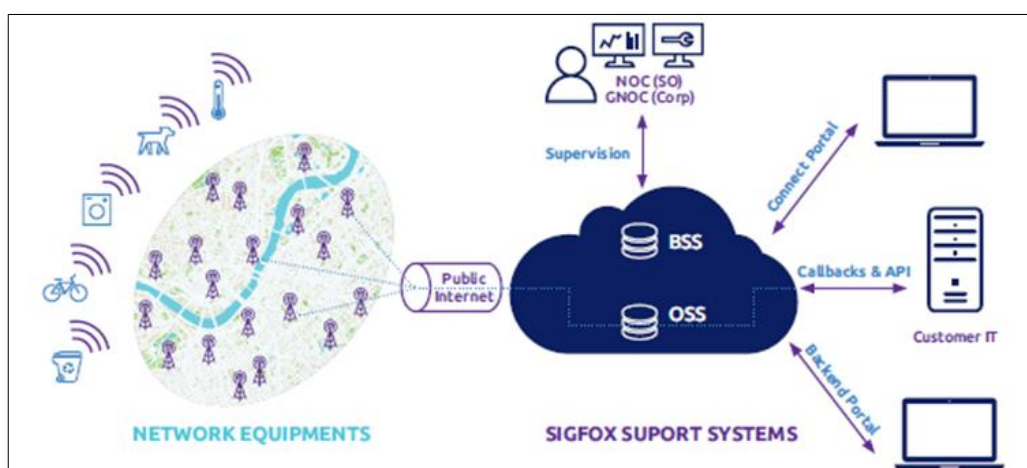


Figura 2.3. Arquitectura de la red sigfox [29].

### 2.7.2. LoRa (*Long Range*)

LoRa es una tecnología inalámbrica propiedad de Semtech<sup>3</sup>, diseñada para aplicaciones de IoT y hoy en día es una de las mejores alternativas debido a su bajo costo y sus equipos de bajo consumo de energía. LoRaWAN define el protocolo y la arquitectura del sistema para la red desarrollado por LoRa Alliance<sup>4</sup>.

- **Arquitectura de red**

La red LoRa está formada por tres elementos:

- a. Dispositivos finales: se utilizan para la conexión de los objetos a la red LoRa, transmiten la información a la puerta de enlace.
- b. Puertas de enlace: son las estaciones base LoRa que reciben la información desde múltiples dispositivos finales y la retransmiten a los servidores de red.
- c. Servidores de red: son los encargados de la recepción y procesamiento de la información de los dispositivos finales.

<sup>3</sup> Semtech es un proveedor líder de semiconductores analógicos y de señal mixta de alto rendimiento y algoritmos avanzados [31].

<sup>4</sup> LoRa Alliance es una asociación sin fines de lucro que tiene como fin respaldar y promover la adopción global del estándar LoRaWAN [32].

De esta forma varios dispositivos finales se comunican con una o varias puertas de enlace en una topología de estrella mediante comunicaciones de un solo salto, la función de la puerta de enlace es transmitir datos en ambas direcciones de forma transparente (convirtiendo paquetes RF en paquetes IP y viceversa) entre los dispositivos finales y un servidor de red central, este último está conectado a las puertas de enlace por medio inalámbrico o cableado mediante conexiones IP estándar, y tiene bajo su responsabilidad el intercambio de datos y la administración de la red. El servidor central de red está conectado a otro servidor de aplicaciones donde se implementan las aplicaciones de IoT. En la figura 2.4 se observa la arquitectura de red LoRa [33].

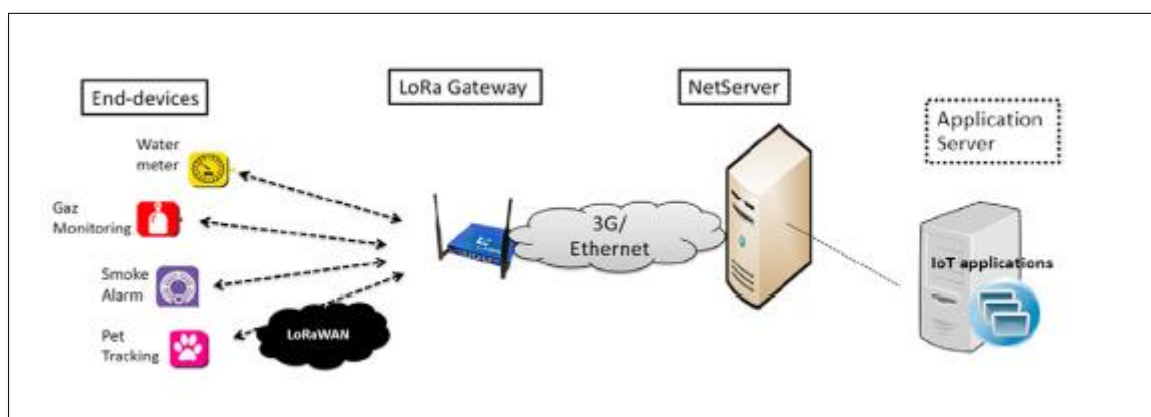


Figura 2.4. Arquitectura de la red LoRa [33].

- **Características generales**

En LoRa todos los paquetes de comunicación entre los dispositivos finales y las puertas de enlace incluyen un esquema de Velocidad de Datos Adaptable (ADR, *Adaptive Data Rate*), que permite incrementar la capacidad de la red y la batería de los dispositivos finales. ADR consiste en configurar la velocidad de datos y la potencia de salida de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*) para cada dispositivo final individualmente [34]. El mecanismo de acceso de canal se basa en una técnica similar a ALOHA<sup>5</sup>, donde los dispositivos finales eligen aleatoriamente un canal de enlace ascendente para la transmisión, no obstante, esto puede resultar en un uso simultáneo de canal y generar colisiones entre las diferentes transmisiones [35]. Las bandas de operación de esta tecnología son 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz [36].

LoRa utiliza Espectro Ensanchado de Chirp (CSS, *Chirp Spread Spectrum*) donde los datos se codifican con un chirp, el cual es esencialmente una señal de chirrido gsinusoidal modulada en frecuencia de banda ancha que aumenta o disminuye con

<sup>5</sup> Con esta técnica de acceso al medio, cada estación puede acceder al canal en cualquier instante que requiera enviar información, una vez transmitido el mensaje, se espera una confirmación por parte del destino, sino se recibe, espera un tiempo aleatorio y vuelve a retransmitir el mensaje [38].





el tiempo [37]; una ventaja de este método es que las compensaciones de tiempo y frecuencia entre el transmisor y el receptor son equivalentes, lo que reducen en gran medida la complejidad del diseño del receptor.

- **Factor de ensanchamiento, ancho de banda y tasa de código**

En LoRa existen 3 parámetros que afectan la sensibilidad del receptor, la velocidad de datos de transmisión y la robustez del sistema frente a interferencias, los cuales son:

- Factor de Ensanchamiento (SF, *Spreading Factor*): varía desde 7 hasta 12 y proporciona una compensación entre la velocidad de transmisión de datos y cobertura. La elección de un SF más alto aumenta la cobertura (mejora la sensibilidad del receptor), pero disminuye la velocidad de transmisión de datos (aumenta el tiempo de bit). Una de las ventajas que brinda es la posibilidad de realizar transmisiones simultáneas con diferentes SF en un mismo canal (coexistencia de dispositivos LoRa) [35].
- Ancho de Banda (BW, *Bandwidth*): LoRa utiliza generalmente una banda de 125 KHz o más para transmitir la señal y permite el uso de BW escalable de 125 KHz, 250 KHz o 500 KHz. Un incremento del BW permite el uso de una mayor velocidad efectiva de datos, reduciendo así el tiempo de transmisión, pero ocasiona una reducción de la sensibilidad, lo anterior se puede corroborar con la ecuación 1, donde se define la sensibilidad del receptor en términos del BW, la figura de ruido y la relación señal a ruido SNR [37] [39] [40].

$$S = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \text{ [dBm]} \quad (1)$$

- Tasa de Código (CR, *Code Rate*): permite al receptor detectar y también corregir errores [35]. Disminuir la CR ayuda a reducir la Tasa de Error de Paquetes (PER, *Packet Error Rate*) en presencia de pequeñas ráfagas de interferencia, es decir, un paquete transmitido con una tasa de código de 4/8 será más tolerante a la interferencia que una señal transmitida con una tasa de código de 4/5 [39].

- **Tasa de bits, tasa de símbolos y tasa de chips**

La relación entre la Tasa de Bits ( $R_b$ , *Rate Bit*), la Tasa de Símbolos ( $R_s$ , *Rate Symbol*) y la Tasa de Chips<sup>6</sup> ( $R_c$ , *Rate Chip*) para LoRa se expresa de la siguiente manera [41]:

---

<sup>6</sup> En las técnicas de espectro ensanchado se usa una señal de código de expansión que consta de un número de bits llamados "chips" [42].



- Tasa de bits

$$R_b = SF * \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}} [bits/seg] \quad (2)$$

- Periodo de símbolo

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} [seg] \quad (3)$$

- Tasa de símbolo

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} [Símbolo/seg] \quad (4)$$

Se envía un chip por segundo por Hertz de ancho de banda, así:

- Tasa de chip

$$R_c = R_s * 2^{SF} [chips/seg] \quad (5)$$

$$R_c = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} = BW [chips/seg] \quad (6)$$

LoRa también incluye un esquema de corrección de errores variables que mejora la robustez de la señal transmitida, dado por:  $4/(4 + CR)$ , de esta manera la tasa de bits nominal de la señal se define como:

- Tasa de bits nominal

$$R_b = SF * \frac{4}{\frac{4 + CR}{2^{SF}}} \frac{1}{BW} [bits/seg] \quad (7)$$

- **Tipos de dispositivos finales**

Las aplicaciones de IoT tienen diferentes necesidades con respecto al intercambio de datos, la autonomía energética y la vida útil de la batería del dispositivo final, por lo tanto, en una red LoRa los dispositivos finales están preconfigurados según tres clases y la diferencia consiste en cómo y cuándo reciben mensajes del enlace descendente.





– **Clase A [33]**

La comunicación en esta clase siempre se inicia por el dispositivo final y es de tipo asincrónica, además, asegura un bajo consumo de energía y se adapta con facilidad a dispositivos de baja potencia. Estos dispositivos pueden realizar una transmisión al servidor central (enlace ascendente) en cualquier momento y cuando finaliza abre dos ventanas de recepción para escuchar la transmisión del servidor, lo que permite la posibilidad de comunicación bidireccional o comandos de control de red; después espera un acuse de recibo en ambas ventanas, sino no lo recibe vuelve a retransmitir el mensaje; el dispositivo final puede hacer hasta 8 retransmisiones. Esta clase de dispositivos ingresan al modo de reposo de baja potencia durante el tiempo que lo defina su aplicación. Los dispositivos de clase A son los más eficientes desde un punto de vista energético y son adecuados para aplicaciones que sólo requieran enviar datos.

– **Clase B [33]**

Esta clase es adecuada para dispositivos finales alimentados por batería, la comunicación varía en el enlace descendente porque ofrece más ventajas de recepción, ya que existe una transmisión periódica de mensajes beacon por parte de la puerta de enlace, de esta manera existe una sincronización, con el objetivo de planificar el tiempo en que el dispositivo debe abrir la ventana de recepción. Debido al mecanismo de sincronización se presenta un mayor consumo energético en el dispositivo final comparado con los dispositivos de clase A.

– **Clase C [33]**

Los dispositivos de esta clase requieren el mayor consumo de energía y tienen una escucha continua del medio para recibir datos de enlace descendente, de esta manera el servidor de red puede iniciar una transmisión en cualquier momento, por lo que no existe latencia, sin embargo, si hay una pérdida de potencia en el receptor, razón por la cual esta clase es ideal para aplicaciones que disponen de potencia de forma continua.

De esta forma se clasifican los dispositivos finales en tres tipos de aplicaciones en cuanto al enlace descendente, la primera donde no se necesitan enviar datos al dispositivo final, la segunda que tiene una demanda media de envío de datos al dispositivo final y finalmente las que tienen una gran demanda.

- **Trama física de LoRa**

En la figura 2.5 se aprecia la trama física de LoRa, la cual a su vez contiene la trama MAC.

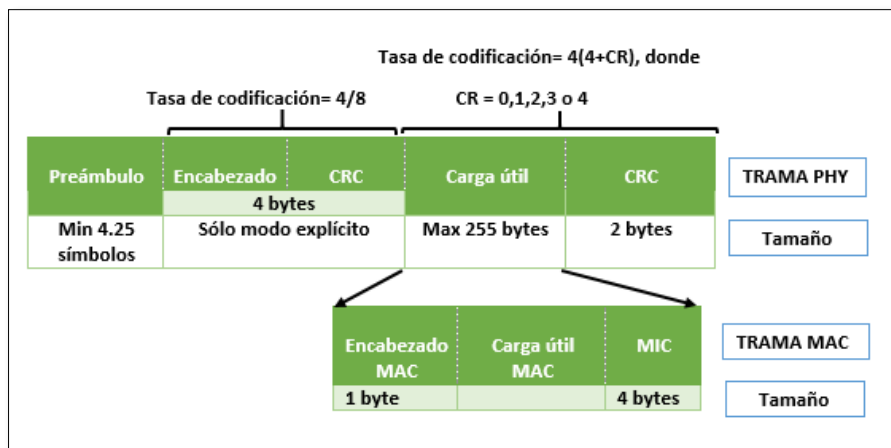


Figura 2.5. Trama física de LoRa [35].

A continuación, se explica cada uno de los campos de la trama física:

- **Preámbulo:** el esquema de modulación del paquete se define en el preámbulo de sincronización, así cada paquete tiene definido los parámetros de modulación de manera individual, lo que permite que cada paquete tenga el esquema de transmisión en función a la distancia a la puerta de enlace y así se ajusta el rendimiento y el consumo eléctrico dependiendo de las condiciones. Existe un byte de sincronización al final del preámbulo, el cual permite diferenciar entre las redes LoRa que estén transmitiendo en la misma banda de frecuencias, de esta manera un dispositivo solo escucha las emisiones que tienen su mismo byte de sincronización, por lo que existe la ventaja de que distintas redes LoRa puedan coexistir en un mismo espacio.
- **Encabezado:** este depende de la elección de dos modos de operación disponibles: el modo operacional explícito predeterminado, en el cual se especifica la tasa de codificación, la longitud de la carga útil y la presencia de CRC en la trama. El segundo, modo operacional implícito, especifica que la velocidad de codificación y la longitud de la carga útil en la trama son fijas. En este modo, la trama no contiene este campo, lo que resulta en una reducción en el tiempo de transmisión. También se cuenta con un campo CRC de 2 bytes que permite que el receptor descarte los paquetes con un encabezado no válido.
- **Carga útil:** el tamaño de este campo varía desde 2 a 255 bytes y contiene la trama de control de acceso al medio, la cual a su vez está formada por tres campos: el encabezado de la trama MAC, la carga útil MAC y un campo que contiene el código de integridad del mensaje (MIC, *Message Integrity Code*). El tipo de mensaje que contiene la carga útil MAC se indica en el encabezado MAC, existen 6 tipos de mensajes, clasificados en tipo *join* y tipo *data*, los primeros se emplean en el proceso de registro y activación de los



dispositivos y los segundos se utilizan para enviar órdenes y datos de aplicación. En el encabezado MAC también se indica el tipo de trama (datos o acuse de recibo), la versión del protocolo y su dirección (enlace ascendente o descendente) y el campo MIC se utiliza como la firma digital de la carga útil.

- **CRC:** este campo es opcional y comprende bytes de verificación de redundancia cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*) para la protección contra errores para la carga útil (2 bytes) [35].

- **Seguridad**

LoRa tiene un mecanismo de cifrado simétrico de llave compartida, donde se utiliza la misma llave para cifrar y descifrar la información, por ello ambos lados (servidor y dispositivo final) deben conocer dicha llave.

En una red LoRa solo los dispositivos autorizados pueden activarse mediante un proceso de autenticación mutua entre el dispositivo final y el servidor de red. Durante el proceso de activación, el dispositivo final mediante la Appkey calcula el MIC del mensaje que envía al servidor como petición de conexión, esta llave a su vez está almacenada por el servidor, que la utiliza para comprobar la autenticidad del mensaje, posteriormente el servidor responde con un mensaje de aceptación con un MIC que se calcula con la Appkey compartida, además este mensaje es cifrado también con esta llave.

De la Appkey se derivan dos llaves la llave de sesión de aplicación AppSkey y la llave de sesión de red NwkSkey, que sirven para cifrar todo el tráfico entre un dispositivo final y el servidor de red, la creación de estas dos llaves se hace también con un valor aleatorio que se crea durante el proceso de activación, de esta forma se tiene mayor seguridad ya que la creación de las llaves no es posible así se cuenta con la llave inicial. El algoritmo de cifrado utilizado es AES-128bits (*Advanced Encryption Algorithm*) [43].

## 2.8. Comparación de las Tecnologías Radio

En la tabla 2.1 se observa un resumen de las tecnologías estudiadas; con las características que se consideran determinantes en el diseño e implementación del prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias.

Se tendrán en cuenta 4 criterios principales para la elección de la tecnología con la que se transmitirá y recibirá información en el prototipo: el primero es la accesibilidad a los equipos, el segundo el uso de bandas libres, el tercero la cobertura, se necesita que el prototipo brinde cobertura mayor o igual a 1 Km y el cuarto la posibilidad de brindar ubicación mediante GPS (*Global Positioning System*)



incorporado. Es importante tener en cuenta que la velocidad de transmisión de datos no es un criterio de selección porque no se transmitirán grandes volúmenes de información.

Tecnología Características	IEEE 802.16	IEEE 802.11		Radio Trunking	Sistemas Móviles Celulares	Sistema Propietario en 900 MHz	Sigfox	LoRa
		Ah	Af					
<b>Frecuencia de Operación</b>	2 GHz-11 GHz  10 GHz-66 GHz	900 MHz	54 MHz  790 MHz	VHF UHF 220 MHz 400 MHz 800 MHz 900 MHz	800 MHz-900 MHz (1G) 850 MHz-1900 MHz (2G) 850 MHz-1900 MHz (3G) 1700 MHz-2500 MHz (4G) 3500 MHz (5G)	900 MHz	868 MHz Europa 902 MHz EEUU	433 MHz 780 MHz 868 MHz 915 MHz
<b>Cobertura</b>	50 km	1km	>1 km	Local  Regional  Nacional	Macroceldas 1 km -30km Microceldas 0.2 km-2 km Picoceladas 4 m- 200 m Femtoceladas <100m	> 5 km Rural  < 5 km Urbano	30 – 50 km Rural  3 -10 km Urbano	15 km Rural  2 km -5 Km Urbano
<b>Velocidad de Transmisión de Datos</b>	75 Mbps	78 Mbps	26.7 Mbps	28.8 Kbps	1 kbps– 2.4 kbps (1G) 9.6 kbps - 14.4 kbps (2G) 144 kbps - 2 Mbps (3G) >1 Gbps (4G) 1Gbps- 10 Gbps (5G)	150 Mbps en PtP  100 Mbps en PtMP	100 o 600 bps	300 bps-50 Kbps
<b>Disponibilidad de Equipos <sup>7</sup></b>	No	No	No	Si	No	Si	Si	Si
<b>Técnica de Acceso</b>	OFDMA	SC OFDM	SC OFDM	TDMA	FDMA (1G) TDMA (2G) CDMA (3G)	TDMA	Acceso Aleatorio	ALOHA

<sup>7</sup> Disponibilidad de equipos en la Universidad del Cauca



Tecnología Características	IEEE 802.16	IEEE 802.11		Radio Trunking	Sistemas Móviles Celulares	Sistema Propietario en 900 MHz	Sigfox	LoRa
		Ah	Af					
<b>Técnica de Acceso</b>					OFDMA(4G)		(El dispositivo envía el mensaje en tres frecuencias aleatorias)	
<b>Topología</b>	PtP, PtMP y Malla	PtP Estrella Árbol	PtP Estrella Árbol	PtP, PtMP	PtP, PtMP	PtP, PtMP	Estrella	Estrella
<b>Movilidad</b>	Hasta 120 km/h	Si	Si	Si	Hasta 120 Km/h (3G)	Si	Si	Si
<b>Tipo de Red</b>	WMAN	WLAN	WLAN	WMAN	WMAN	WMAN	WMAN	LPWAN

Tabla 2.1. Tabla comparativa de tecnologías.



## CAPÍTULO 3: Metodología de Desarrollo

### 3.1. Introducción

Para lograr el éxito de un proyecto, es importante elegir una metodología que permita establecer prioridades y definir un orden de las actividades que se ejecutan durante el proceso de su creación y así cumplir con el objetivo planteado inicialmente.

En el desarrollo de prototipos se cuenta con diferentes metodologías que facilitan su direccionamiento, entre ellas el modelo de prototipos. Este modelo posibilita la creación de una versión inicial del producto para validar su funcionalidad ante los clientes, entre sus ventajas permite o tiende a resolver un conjunto de problemas y da una idea clara del proceso funcional del sistema, además de ahorrar tiempo y dinero al identificar fallas en las primeras etapas de elaboración del producto. El modelo de prototipos favorece la recopilación de requisitos y el análisis general [44].

El capítulo consta inicialmente de la definición de prototipo, seguido de una descripción de la metodología modelo de prototipos y sus seis fases. Posteriormente, aparece el desarrollo detallado de cada una de estas fases, en las cuales se presenta la creación del prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias, bajo el concepto de ciudad inteligente.

### 3.2. ¿Qué es un Prototipo?

Un prototipo es una versión inicial, simulación o muestra de un producto, que permite a los desarrolladores probar sus ideas e indicar al usuario el propósito detrás de una característica de diseño o el concepto de diseño general para evaluar su viabilidad y ahorrar tiempo y dinero. Algunos se elaboran para tener una percepción de cómo podría ser el aspecto final del producto y otros ayudan a demostrar su funcionalidad [45] [46] [47].

Entre los tipos de prototipos que existen, están [48] [49] [50]:

- **Prototipos de baja fidelidad:** desarrollan aspectos generales del sistema sin entrar en gran detalle, se caracterizan por ser económicos, rápidos de construir, rápidos de arreglar y no precisan de técnicos expertos. Son contruidos con elementos muy distintos a los del producto final (papel, cartulina, entre otros) y uno de sus objetivos es recopilar información por parte del usuario lo más pronto posible.



- **Prototipos de fidelidad media:** sirven de modelo para el producto final, sus funciones son simuladas en pantalla empleando maquetas y al igual que los prototipos de baja fidelidad para su elaboración emplean materiales que pueden diferir del producto final.
- **Prototipos de alta fidelidad:** desarrollan aspectos más precisos, detallados y presentan un modelo completo, con una parte del total de funcionalidades del producto final. Se caracterizan por emplear herramientas especiales como java y HTML que posteriormente son empleadas en el desarrollo del producto, por requerir de expertos que manejen estas herramientas y emplear mayor tiempo en su creación. Estos prototipos son más costosos.
- **Prototipos horizontales:** proporcionan diferentes características, pero sin mucho detalle. Cubren un amplio número de funciones, pero en su mayoría no son operativas. Son útiles para evaluar el alcance del producto, pero no su uso real.
- **Prototipos verticales:** este tipo de prototipos desarrollan pocas características del producto, pero sus funcionalidades están totalmente implementadas. De esta manera los prototipos verticales permiten probar a profundidad una parte del sistema final bajo condiciones reales.

Es vital para asegurar el éxito a largo plazo de un producto, evaluar y validar previamente la forma y función de prototipos, implementando metodologías que favorezcan su creación al proporcionar herramientas y procedimientos necesarios.

El presente trabajo desarrolla un prototipo vertical, ya que una parte de las funcionalidades totales del sistema final son implementadas y luego evaluadas en un escenario real para analizar su desempeño.

### 3.3. Modelo de Prototipos

El modelo de prototipos busca definir los objetivos generales de un sistema y luego identificar un conjunto de requisitos, se usa cuando no hay información detallada de los requisitos al inicio o si se trata de un sistema grande y complejo cuando no existe un mecanismo manual para determinarlos. Este modelo es prueba y error, es decir si el usuario no está de acuerdo con alguna parte del prototipo (prueba fallida), se debe corregir el error hasta que quede satisfecho, además es muy útil si el usuario no tiene total claridad de lo que necesita y ayuda a los desarrolladores a reducir riesgos de cambios en etapas más avanzadas de la creación del producto [50] [51] [52].

El prototipo debe ser construido en poco tiempo y sin grandes inversiones de dinero, ya que a partir de su aprobación se inicia la construcción del sistema. Las fases del modelo de prototipos inician con una recolección y análisis de requisitos y finalizan con el producto de ingeniería, éstas se presentan en la figura 3.1, seguidamente se hace una breve descripción de cada una [50] [53] [54].

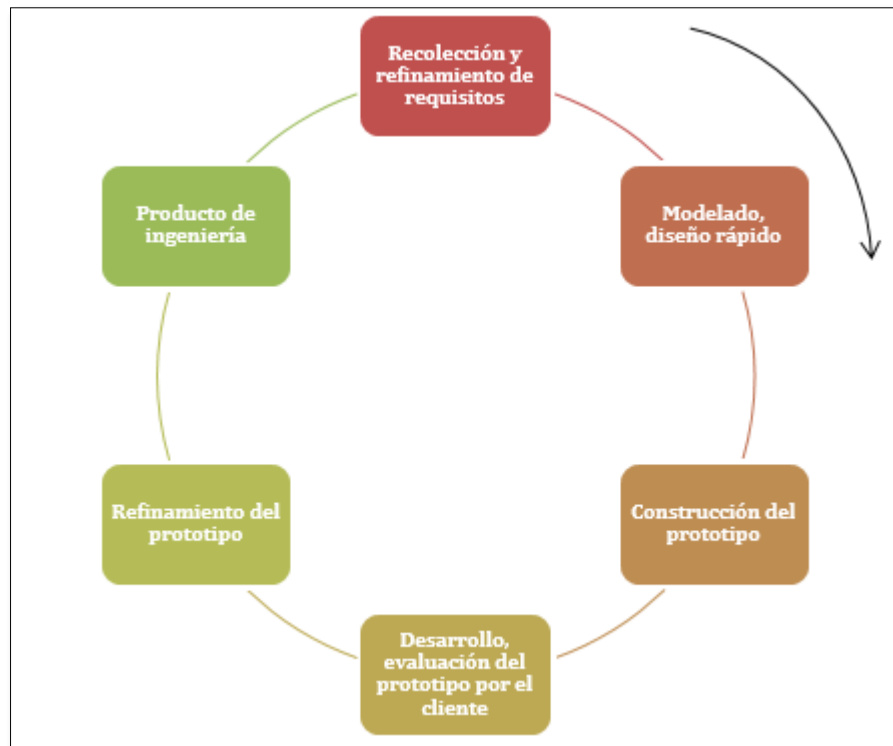


Figura 3.1. Fases del modelo de prototipos [53] [54].

Fase 1: *Recolección y refinamiento de requisitos*; se establecen y definen los requisitos que debe cumplir el sistema.

Fase 2: *Modelado, diseño rápido*; se crea un diseño previo, rápido, sencillo y no completo del sistema. Éste brinda una idea del sistema final.

Fase 3: *Construcción del prototipo*; en esta fase se construye el diseño real del prototipo basado en la información recopilada en la fase 2, este es un pequeño modelo del sistema requerido.

Fase 4: *Desarrollo, evaluación del prototipo por el cliente*; aquí se presenta al usuario el sistema propuesto para una evaluación inicial y así conocer las debilidades y fortalezas de éste.

Fase 5: *Refinamiento del prototipo*; si el usuario no se encuentra satisfecho con el resultado del prototipo, éste se refina hasta cumplir con todas las sugerencias.





Fase 6: *Producto de ingeniería*; cuando se desarrolla el sistema final en base al prototipo, se prueba a fondo y se lleva a producción. Este se somete a un mantenimiento de rutina.

Como ventajas del modelo de prototipos se tiene que:

- No modifica el flujo del ciclo de vida
- Por lo general evita construir productos que no cumplan con las necesidades de los usuarios
- Aumenta la probabilidad de éxito
- Reduce costos de elaboración del producto
- Útil cuando no se conocen los requisitos totales y detallados

Y como desventajas:

- El usuario puede creer que el prototipo es el producto final
- El desarrollador es propenso a ampliar el prototipo para construir el producto final sin tener en cuenta los compromisos de calidad y mantenimiento que tiene con el cliente

### **3.4. Aplicación del Modelo de Prototipos**

Para la realización del trabajo se utiliza el modelo de prototipos, cada una de sus fases se describen a continuación:

#### **3.4.1. Recolección y Refinamiento de Requisitos**

El prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias está diseñado para ser implementado en una intersección vial controlada por semáforos, de forma que cuando una ambulancia se avecine a la intersección, esta establezca una comunicación inalámbrica con el centro de control y este a su vez una comunicación inalámbrica con la red de semáforos para que se haga una priorización al carril por el que transita, estableciendo la luz del semáforo que controla ese carril en verde y el resto en rojo; es importante tener en cuenta que cuando la ambulancia haya atravesado la intersección, el funcionamiento de los semáforos debe volver a su estado inicial.

Antes de mencionar los requisitos funcionales y no funcionales del sistema, se presenta el problema de estudio que se busca resolver.

- **Problema de estudio**

Hoy en día a causa del tráfico, las ambulancias necesitan realizar numerosas maniobras para poder avanzar, provocando en ocasiones accidentes o malestares



para los conductores que, entre el sonido de la sirena y la acumulación de automóviles, necesitan acomodarse para ceder la vía.

El problema del congestionamiento vehicular ocasiona que las ambulancias no puedan realizar su trabajo de una manera óptima, por ejemplo, si se tratase de un caso en el cual el paciente se encuentre en un estado crítico, el tiempo que tarda en atravesar el cruce se traduce en la sobrevivencia o no del mismo, todo debido a no contar con técnicas que permitan la movilidad del tránsito.

Por lo expuesto y a falta de vías exclusivas para los sistemas de emergencia, se propone un prototipo de gestión de movilidad semafórica, mediante el cual se dé prioridad al carril por donde viaja una ambulancia durante el traslado de un paciente, estableciendo a una distancia adecuada la luz del semáforo a verde, evitando que se generen accidentes.

- **Requisitos funcionales**

- Establecer una comunicación radio entre la ambulancia, el centro de control y la red de semáforos de una intersección.
- Identificar la ruta por la cual se está movilizandando la ambulancia.
- Identificar la ubicación de la ambulancia sobre la carretera.
- Cambiar a verde la luz del semáforo que controla el carril por el que viaja la ambulancia en el momento en que ésta informe sobre su acercamiento, mientras los demás semáforos de la intersección cambian su luz a rojo.
- Reestablecer el funcionamiento normal de los semáforos en la intersección, después de que la ambulancia haya pasado por la misma.

- **Requisitos no funcionales**

- Emplear una tecnología radio que soporte movilidad.
- El sistema debe operar en bandas no licenciadas.
- La tecnología utilizada debe brindar una cobertura mayor o igual a 1 Km.
- El tiempo de respuesta del sistema debe garantizar que el control semafórico se realice antes de que la ambulancia llegue a la intersección.

### **3.4.2. Modelado, Diseño Rápido**

El prototipo consta básicamente de tres unidades: la unidad a bordo (UaB), la unidad de control (UC) y la unidad de semáforos (US). Estas se comunican entre sí, a través de una tecnología inalámbrica.

La UaB ubicada en el interior de la ambulancia se encarga de recibir el código civil C/A desde los satélites, con lo cual determina las coordenadas GPS de la ambulancia, para posteriormente enviarlas de manera inalámbrica hacia la UC.

La UC se instala en un lugar elevado próximo a la intersección y recibe las coordenadas enviadas por la UaB, a partir de estas realiza el cálculo de la distancia entre la ambulancia y la intersección a la que se acerca, identifica el carril sobre el que se moviliza y la localiza en un mapa en una página web. Por último, cuando la ambulancia se encuentra cerca a los semáforos, esta unidad se comunica inalámbricamente con la US para informarle (con un código) sobre el modo de operación de la intersección.

La US se localiza cerca a los semáforos de la intersección, cuando recibe el código transmitido por la UC, procesa esta información y por medio de comunicación cableada con los semáforos, controla las luces de los mismos para dar prioridad al carril en el que se encuentra la ambulancia.

A fin de evitar posibles interferencias, la comunicación entre la UaB y la UC se realiza a través de una frecuencia diferente al radioenlace entre la UC y la US. El modelo del sistema de control semafórico para ambulancias se muestra en la figura 3.2.

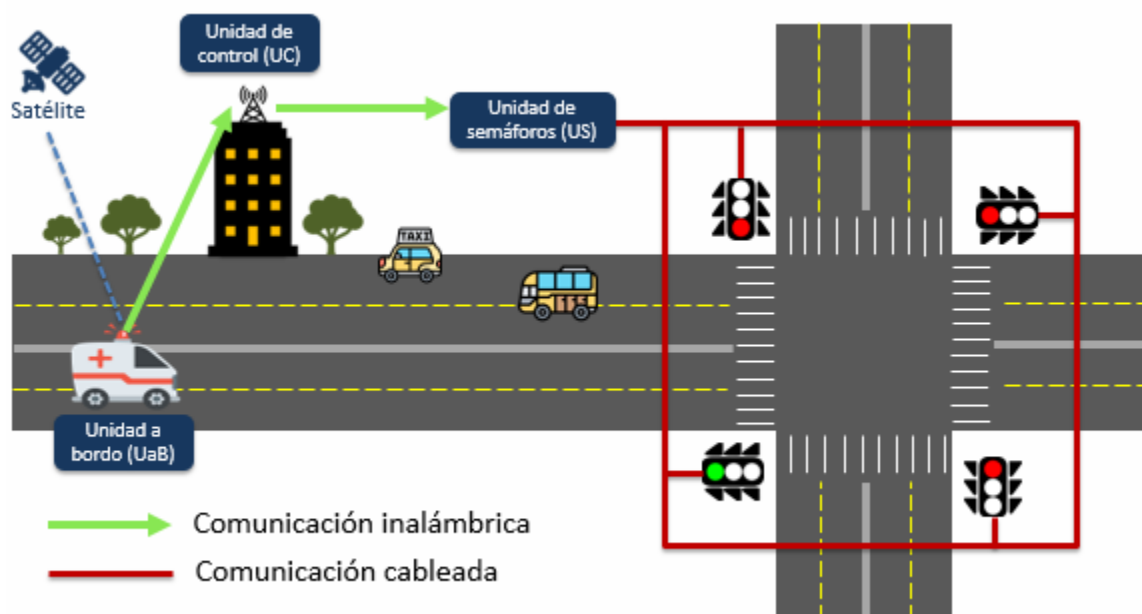


Figura 3.2. Modelo del prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias. Por los autores.

A continuación, en la figura 3.3 se presenta un diagrama de flujo en el cual se describen los procedimientos que realiza el sistema.

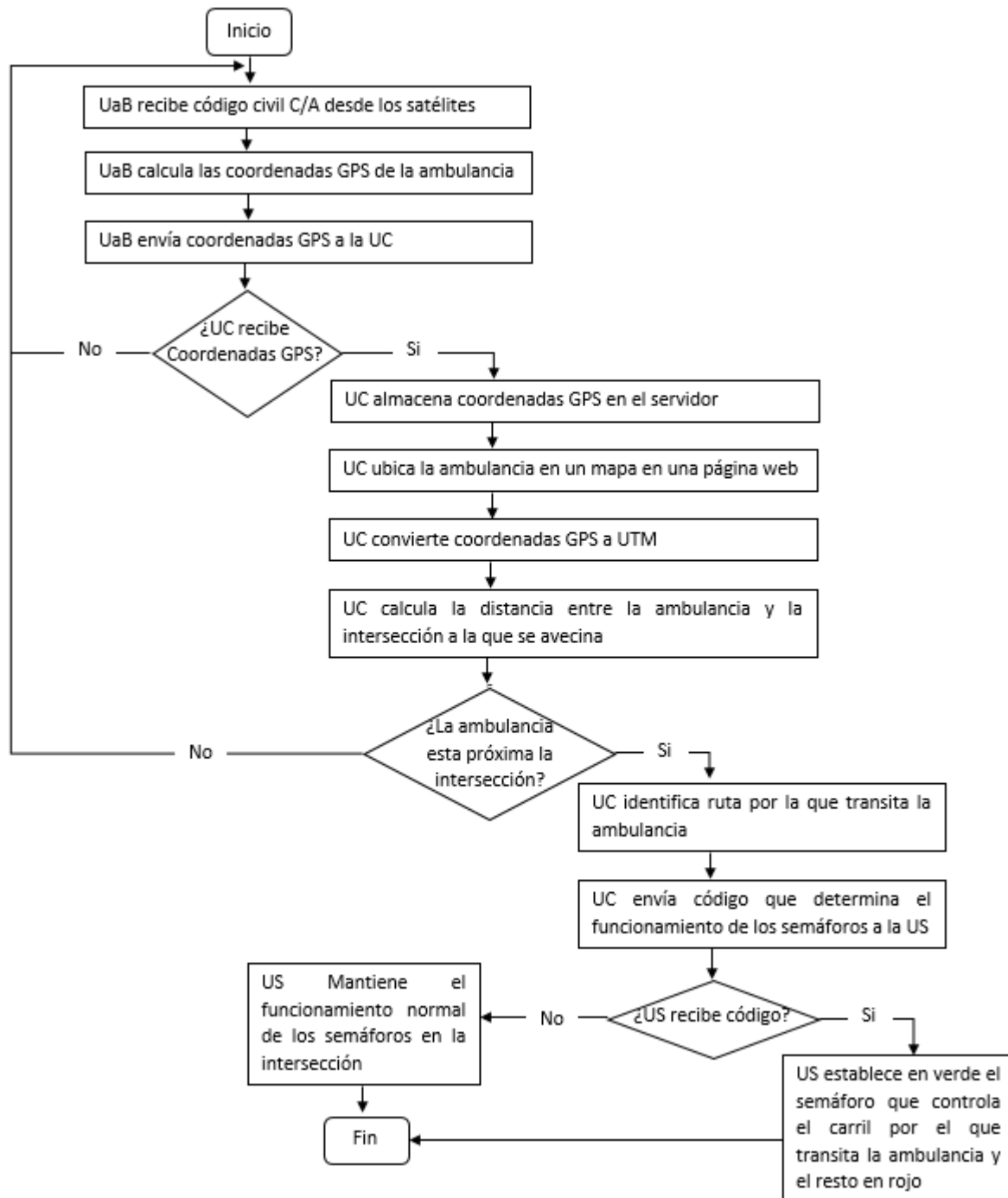


Figura 3.3. Diagrama de flujo del prototipo. Por los autores.

**Nota:** cuando la ambulancia se encuentre atravesando la intersección, aproximadamente a 100 metros de los semáforos, la UC deja de enviar la señal a la US, con lo cual esta última entiende que el funcionamiento de los semáforos debe volver a su estado inicial, no sin antes esperar un tiempo de 10 segundos en el que se espera que la ambulancia haya atravesado completamente la intersección.



### 3.4.3. Construcción del Prototipo

En esta fase se desarrollan e implementan cada una de las unidades que conforman el diseño real del prototipo mostradas en la fase de diseño rápido.

- **Tecnología para la transmisión y recepción de información**

En la tabla 3.1 se observan las tecnologías estudiadas en el capítulo dos, con los criterios propuestos que permiten elegir la mejor opción para la implementación del prototipo.

Características	Tecnología						
	IEEE 802.16	IEEE 802.11	Radio Trunking	Sistemas Móviles Celulares	Sistema Propietario en 900 MHz	Sigfox	LoRa
Disponibilidad de Equipos	X	X	✓	X	✓	✓	✓
Uso de Bandas Libres	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Cobertura	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GPS	X	X	X	X	X	X	✓

Tabla 3.1. Tecnologías candidatas.

Como se observa en la tabla 3.1, LoRa tiene una ventaja en comparación con las demás tecnologías, cuenta con disponibilidad de equipos, trabaja en bandas ISM, brinda una cobertura mayor a 1 km y además tiene incorporado GPS. De esta manera se elige a LoRa como la mejor solución para el desarrollo del sistema. A continuación, se procede a diseñar las unidades que componen el prototipo.

- **Unidad a Bordo (UaB)**

La función de la UaB es determinar las coordenadas de latitud y longitud a la cual se encuentra la ambulancia a partir de la señal C/A captada desde los satélites y enviarlas a la unidad de control a través de un radioenlace en una frecuencia específica (canal 1).

Por lo anterior, es indispensable que la UaB cuente con un equipo que incorpore un sistema GPS; es así como se elige la tarjeta LoRa/GPS para que haga parte de esta unidad. En la tabla 3.2 se describen sus características más relevantes.



Especificaciones LoRa	Especificaciones GPS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basado en el transceptor SX1276 / SX1278</li> <li>• Frecuencia: 433 / 868 / 915 MHz</li> <li>• Modulación: FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y OOK</li> <li>• Velocidad de bits programable de hasta 300 kbps</li> <li>• +20 dBm-100 mW de salida de RF constante vs +14 dBm de alta eficiencia PA</li> <li>• Sensibilidad: hasta -148 dBm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basado en MT339</li> <li>• Velocidad de bits programable hasta 300 Kbps</li> <li>• Voltaje de E/S: 2.7 V - 2.9V</li> </ul>

Tabla 3.2. Características de la tarjeta LoRa/GPS [55].

LoRa/GPS es una tarjeta diseñada para usarse con Arduino, una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software; las tarjetas Arduino cuentan con un microcontrolador y puertos que permiten leer entradas (por ejemplo, los datos de un sensor) y convertirlas en salidas (por ejemplo, activar un motor o encender un led). Aunque existen diferentes tarjetas Arduino, las que se encontraron disponibles y se adaptan al presente trabajo se aprecian en la tabla 3.3.

Tarjeta	Microcontrolador	Voltaje	Costo (COP)
Arduino Mega	ATmega2560	5 V	35000
Arduino Due	AT91SAM3X8E	3.3 V	70000
Arduino Uno	ATmega328P	5 V	18000

Tabla 3.3. Tarjetas Arduino compatibles con LoRa [56].

Por costo y disponibilidad, se elige la tarjeta Arduino uno para el desarrollo del prototipo, la cual tiene las características que se observan en la tabla 3.4.

Características Arduino uno
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de entrada (recomendado): 7-12 V</li> <li>• Voltaje de entrada (límite): 6-20 V</li> <li>• Pines digitales E/S: 14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)</li> <li>• Pines PWM digitales E/S:6</li> <li>• Pines de entrada analógica: 6</li> <li>• Pin de Corriente DC por E/S: 20 mA</li> <li>• Pin de Corriente DC para 3.3 V: 50 mA</li> <li>• Memoria Flash: 32 KB (ATmega328P) de los cuales 0.5 KB utilizados por el cargador de arranque</li> <li>• SRAM: 2 KB (ATmega328P)</li> <li>• EEPROM: 1 KB (ATmega328P)</li> </ul>

Tabla 3.4. Características de la tarjeta Arduino uno [57].



A continuación, en la figura 3.4 se presenta como están implementadas la tarjeta LoRa/GPS y la tarjeta Arduino uno, que conforman la UaB.

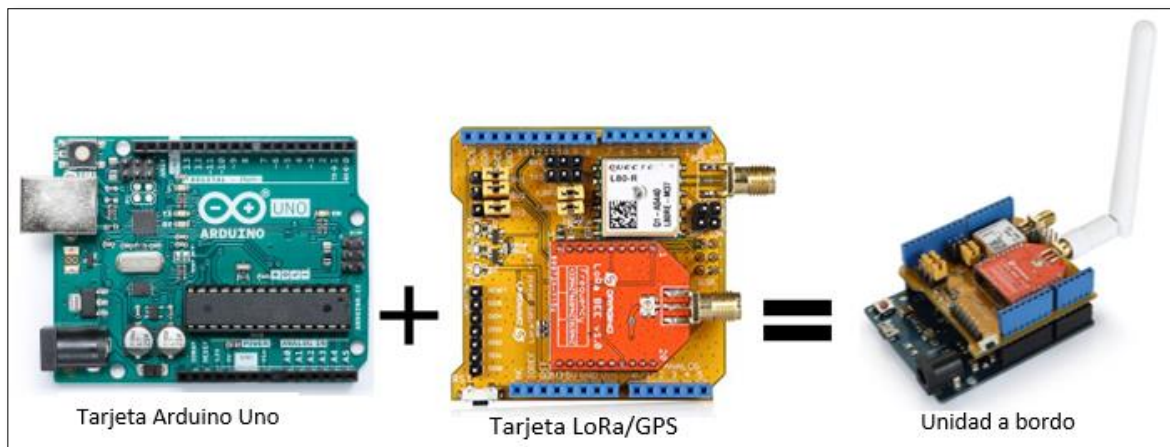


Figura 3.4. Unidad a bordo.

La figura 3.5 muestra las conexiones realizadas en la UaB, la conexión entre los pines GPS\_Rx y D4, y los pines GPS\_Tx y D3 de la tarjeta LoRa/GPS, se hace para recibir la señal C/A desde el satélite, y en la figura 3.6, se aprecia su respectiva implementación final.

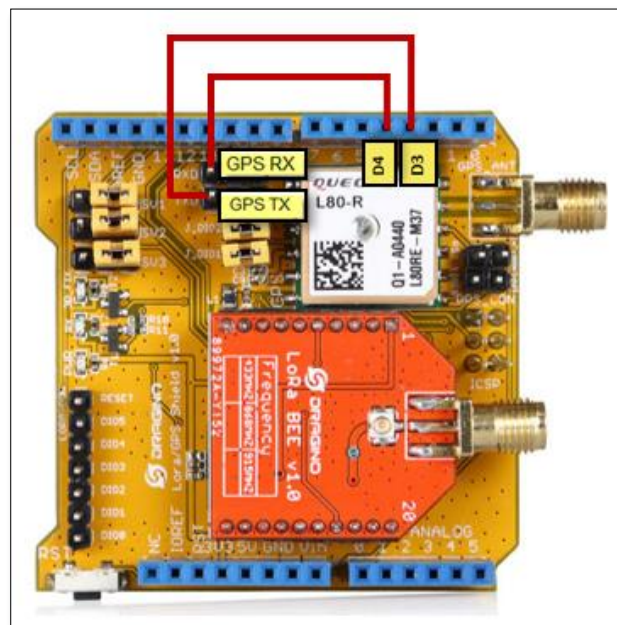


Figura 3.5. Conexiones de la unidad a bordo.



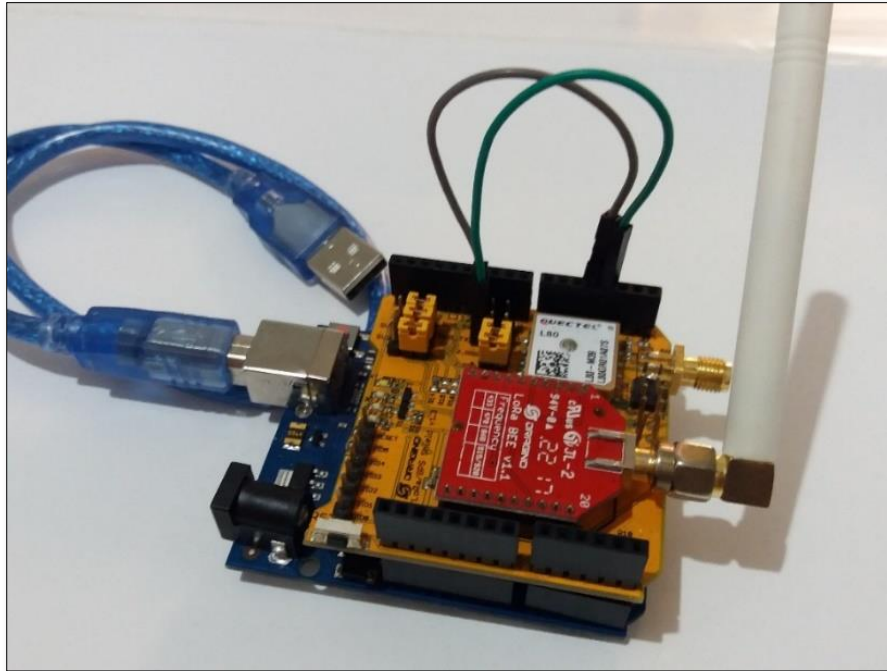


Figura 3.6. Unidad a bordo implementada.

El diagrama de secuencia en el que se especifican los procesos que ejecuta la UaB y los mensajes enviados hacia la UC se describe en seguida.



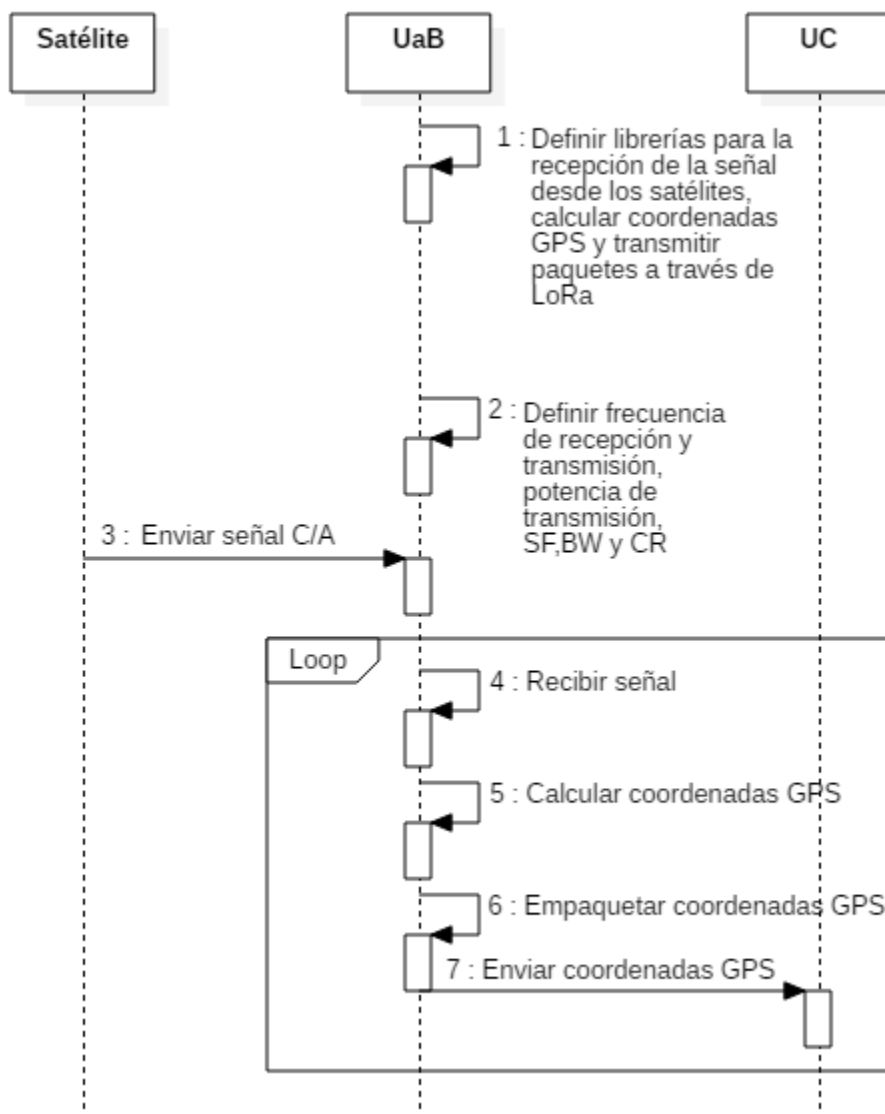


Figura 3.7. Diagrama de secuencia de la UaB. Por los autores.

El lenguaje de programación empleado para desarrollar el algoritmo con las tareas de esta unidad, está basado en C a través de la herramienta Arduino IDE, como se describe a continuación:

- Cálculo de coordenadas GPS de la ambulancia

Para este caso se usa la librería TinyGPS, la cual proporciona algunas funcionalidades NMEA<sup>8</sup>, para extraer datos de posición, fecha, hora, altitud y velocidad de dispositivos que utilizan GPS, esta biblioteca es software libre.

<sup>8</sup> NMEA (*National Marine Electronics Association*), es una asociación encargada de definir el estándar NMEA 0183, el cual consta de una interfase eléctrica y un protocolo de datos para la comunicación entre dispositivos marino [58] [59].



– Envío de paquetes a la UC

El envío de paquetes hacia la UC con las coordenadas GPS de la ambulancia se logra gracias a la librería RadioHead, la cual incluye funciones de transmisión y recepción de datagramas no direccionados; a las funciones de la librería se accede por medio de controladores y/o gestores como RH\_RF95 (único compatible con LoRa), el cual especifica el formato de paquetes enviados y recibidos de la siguiente manera:

- 8 símbolos de preámbulo
- Encabezado explícito con encabezado CRC (internamente manejado por la radio)
- Encabezado: 4 octetos (TO, FROM, ID, FLAGS)
- Datos: 0 a 251 octetos
- CRC (manejado internamente por la radio)

Para transmitir los paquetes se deben definir los parámetros del radioenlace (UaB–UC) como frecuencia de transmisión, potencia de transmisión, factor de ensanchamiento, ancho de banda y tasa de código; estos se escogieron teniendo en cuenta lo presentado en el capítulo 2 sobre las características de LoRa y se observan en la tabla 3.5.

Característica	Descripción
Frecuencia de transmisión	868 MHz, canal 1
BW	125 KHz, para lograr una velocidad de transmisión de datos aceptable sin afectar la sensibilidad del receptor
SF	7, pequeño para evitar demoras en la comunicación
CR	4/5
Potencia de transmisión	20 dBm

Tabla 3.5. Características del radioenlace UaB-UC.

– Pseudocódigo UaB

**Inicio Setup**

```
Inicializar serial ← 9600
ss.begin (9600);
Mientras (serial disponible)
  Si (rf95.init no disponible) entonces
    Escribir 'inicio de LoRa fallido'
  Mientras (1)
  Fin mientras
```



*Fin si*

*Frecuencia de transmisión ← 868 MHz*

*Factor de ensanchamiento ← 7*

*Ancho de banda ← 125 KHz*

*Tasa de código ← 4/5*

*Potencia de transmisión ← 20dBm*

*Escribir 'listo para enviar'*

*Fin mientras*

### **Fin Setup**

### **Inicio Loop**

*Flotantes: latitud, longitud*

*gps.f\_get\_position(&latitud, &longitud)*

*longitud == TinyGPS::GPS\_INVALID\_F\_ANGLE ? 0.0 : longitud, 6*

*latitud == TinyGPS::GPS\_INVALID\_F\_ANGLE ? 0.0 : latitud, 6*

*datastring1 +=dtostrf(latitud, 0, 6, gps\_lat)*

*datastring2 +=dtostrf(longitud, 0, 6, gps\_lon)*

*Si (longitud!=1000.000000)*

*concatenar gps\_lon ← gps\_lon, gps\_lat*

*caracter: datasend*

*datasend ← gps\_lon*

*enviar datasend*

*Fin si*

### **Fin Loop**

- **Unidad de Control (UC)**

La UC realiza la función de recepción de coordenadas GPS de la ambulancia enviadas por la UaB en una frecuencia específica (canal 1), seguidamente almacena estas coordenadas en el servidor en línea ThingSpeak que permite hacer el seguimiento de la ambulancia sobre la carretera a través de un mapa en una página web. Luego convierte las coordenadas geográficas a coordenadas cartesianas UTM<sup>9</sup> y calcula la distancia entre la ambulancia y el cruce hacia el que se acerca, identificando además el carril por el cual viaja, y estableciendo una comunicación inalámbrica con la US en una frecuencia diferente (canal 2) a la utilizada en el radioenlace UaB y UC, sobre la cual se envía un código que determina el modo de operación de los semáforos en la intersección.

<sup>9</sup> UTM (*Universal Transverse Mercator*), método empleado para referenciar cualquier punto de la superficie terrestre a partir de un tipo particular de proyección cilíndrica para representar la tierra sobre el plano [60].

LoRa tiene gateways que funcionan como puertas de enlace de código abierto; estos dispositivos permiten establecer comunicaciones inalámbricas LoRa, además de conexiones a una red IP a través de WiFi, Ethernet, 3G o 4G, para la conexión con Google maps, por lo tanto, son adecuadas para realizar las funciones de la UC. En la figura 3.8 se aprecia la red LoRa y en la tabla 3.6 algunos modelos gateway LoRa.

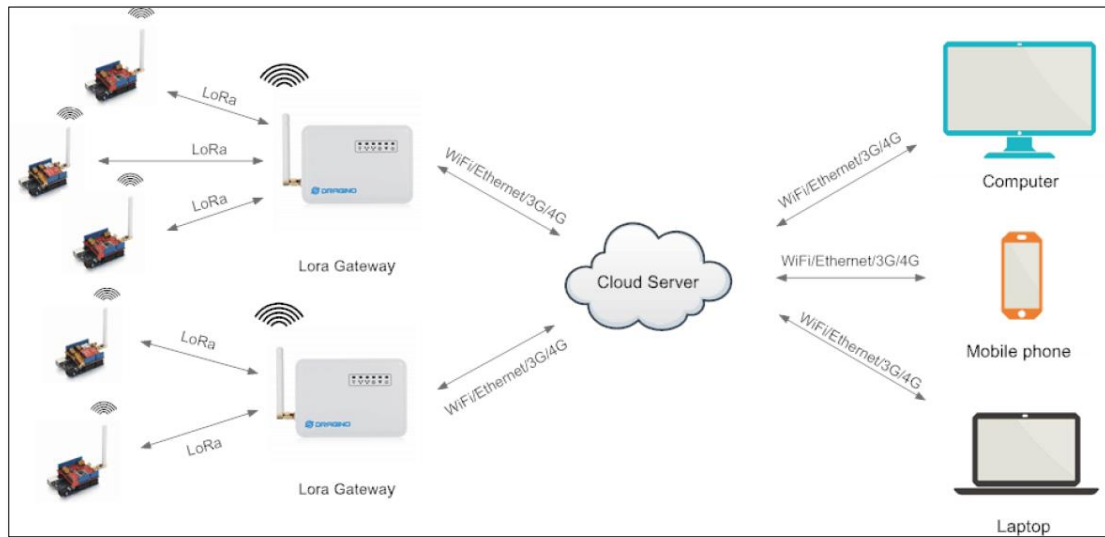


Figura 3.8. Red LoRa [61].

MODELO	APLICACIÓN
<p><b>LG01-P</b></p>	INDOOR
<p><b>LG01-S</b></p>	INDOOR
<p><b>OLG01</b></p>	OUTDOOR

Tabla 3.6. Gateways LoRa [61].



Teniendo en cuenta que el modelo OLG01 está diseñado para trabajar en exteriores, es seleccionado como la UC del prototipo. En la tabla 3.7 se encuentran sus características más relevantes.

<b>Especificaciones gateway LoRa</b>	
<b>Sistema hardware</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Linux<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Procesador ar9331 de 400 Mhz</li><li>✓ 64MB de RAM</li><li>✓ Flash de 16MB</li></ul></li><li>• MCU<ul style="list-style-type: none"><li>✓ MCU: ATmega328P</li><li>✓ Flash: 32KB</li><li>✓ SRAM: 2KB</li><li>✓ EEPROM: 1 KB</li></ul></li></ul>
<b>Especificaciones WiFi</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• IEEE 802.11 b / g / n</li><li>• Banda de frecuencia: 2.4 -2.462 Ghz</li><li>• Potencia de tx:<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 11n potencia de transmisión: mcs7/15:11 db mcs0:17 db</li><li>✓ 11b potencia de transmisión: 18 db</li><li>✓ 11g 54M potencia de transmisión: 12db</li><li>✓ 11g 6M potencia de transmisión: 18 db</li></ul></li><li>• Sensibilidad<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 11g 54M: -71dBm</li><li>✓ 11n 20M: -67dBm</li></ul></li></ul>
<b>Especificaciones LoRa</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rango de frecuencia<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Banda (HF): 862-1020 Mhz</li><li>✓ Banda (LF): 410-528 Mhz</li></ul></li><li>• Velocidad de bits programable de hasta 300 kbps</li><li>• Sensibilidad: hasta -148 dBm</li><li>• Modulación FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y OOK</li><li>• +20 dBm - 100 mW de salida de RF constante contra +14 dBm de alta eficiencia PA</li></ul>

Tabla 3.7. Características de la gateway LoRa [61].

La gateway LoRa OLG01 que compone la UC se aprecia en la figura 3.9, cuenta con 2 puertos RJ45, el primero utilizado para realizar la conexión a Internet, y el segundo para conectar con el computador que controla esta unidad, además de servir como vía para el suministro de corriente a través del PoE (*Power over Ethernet*).



Figura 3.9. Gateway LoRa OLG01.

En la figura 3.10 se presenta un esquema con la implementación de esta unidad, y en la figura 3.11, el diagrama de secuencia de la misma.

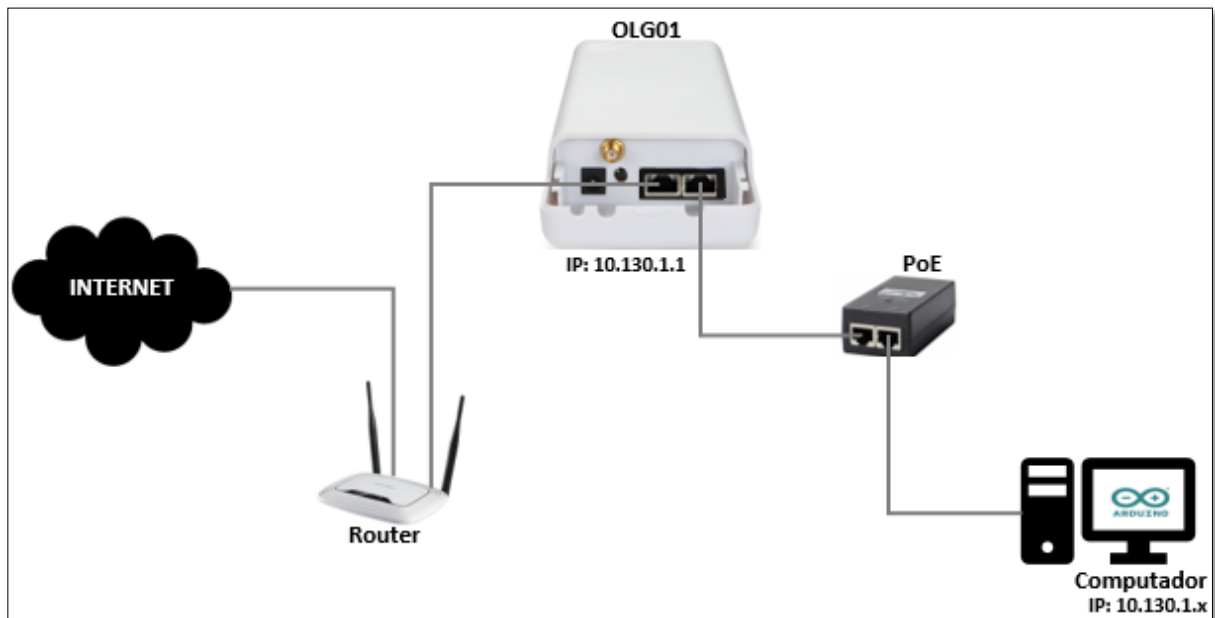


Figura 3.10. Unidad de control implementada.

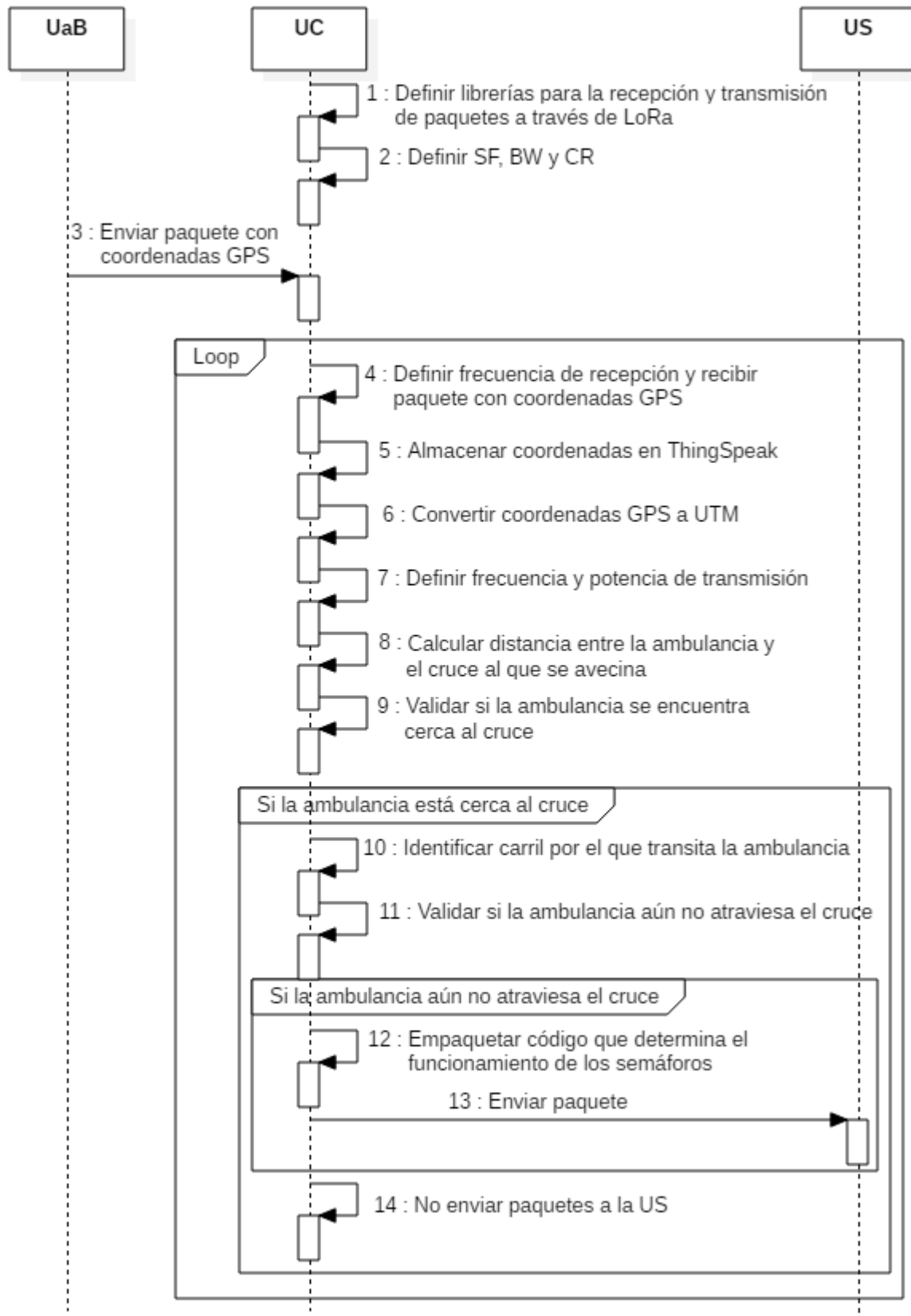


Figura 3.11. Diagrama de secuencia de la UC. Por los autores.



La Gateway OLG01 trae incorporado el microcontrolador ATmega328p encargado de realizar las comunicaciones con la parte LoRa Radio, el lenguaje de programación de este microcontrolador está basado en C y la herramienta de programación es Arduino IDE. El algoritmo desarrollado para la UC contiene lo siguiente:

- Recepción y transmisión de paquetes

Esta tarea es realizada gracias al uso de la librería RadioHead por medio del gestor RH\_RF95, que permite enviar y recibir paquetes a través de un transceptor radio con capacidad LoRa. El formato de los paquetes se mostró previamente en la UaB. Los valores de SF, CR, y BW que definen las características de comunicación para transmitir y recibir paquetes se escogieron igual a la UaB.

Los paquetes provenientes de la UaB se reciben a través del canal 1 con una frecuencia de 868 MHz, y los paquetes transmitidos hacia la US con la información del funcionamiento de los semáforos se envían por medio del canal 2 con una frecuencia de 915 MHz.

- Localización de la ambulancia a través de un mapa en Internet

Con las coordenadas GPS de la ambulancia recibidas, la UC procede a realizar un seguimiento de la misma por medio de un mapa de Google utilizando ThingSpeak. Esta tarea se describe más adelante.

- Conversión de coordenadas GPS a UTM

La conversión de las coordenadas se realiza mediante las fórmulas de Coticchia-Surace, estas ecuaciones fueron planteadas por Alberto Coticchia y Luciano Surace [62], este proceso se describe en el anexo A.

- Toma de decisiones

Después de la conversión de las coordenadas GPS a UTM, la UC calcula la distancia existente entre la ambulancia y la intersección a la que se aproxima, mediante el teorema de Pitágoras; se debe tener en cuenta que la intersección está controlada por cuatro semáforos y que cada uno de ellos tiene sus coordenadas de referencia en formato UTM (metros). Este proceso se describe a continuación con las ecuaciones 8, 9, 10 y 11.

Coordenadas:

Ambulancia: X0, Y0



Semáforo 1: SX1, SY1

Semáforo 2: SX2, SY2

Semáforo 3: SX3, SY3

Semáforo 4: SX4, SY4

$$Sd1 = \sqrt{(X0 - SX1)^2 + (Y0 - SY1)^2} \quad [m] \quad (8)$$

$$Sd2 = \sqrt{(X0 - SX2)^2 + (Y0 - SY2)^2} \quad [m] \quad (9)$$

$$Sd3 = \sqrt{(X0 - SX3)^2 + (Y0 - SY3)^2} \quad [m] \quad (10)$$

$$Sd4 = \sqrt{(X0 - SX4)^2 + (Y0 - SY4)^2} \quad [m] \quad (11)$$

Posteriormente si  $Sd1$ ,  $Sd2$ ,  $Sd3$  y  $Sd4$  son menores o iguales a la distancia apropiada para que se haga el control semafórico (por ejemplo 300 m), la UC identifica el carril por el cual transita la ambulancia calculando y comparando la distancia entre ésta y cuatro puntos de referencia ubicados en cada carril, como se aprecia en la figura 3.12.

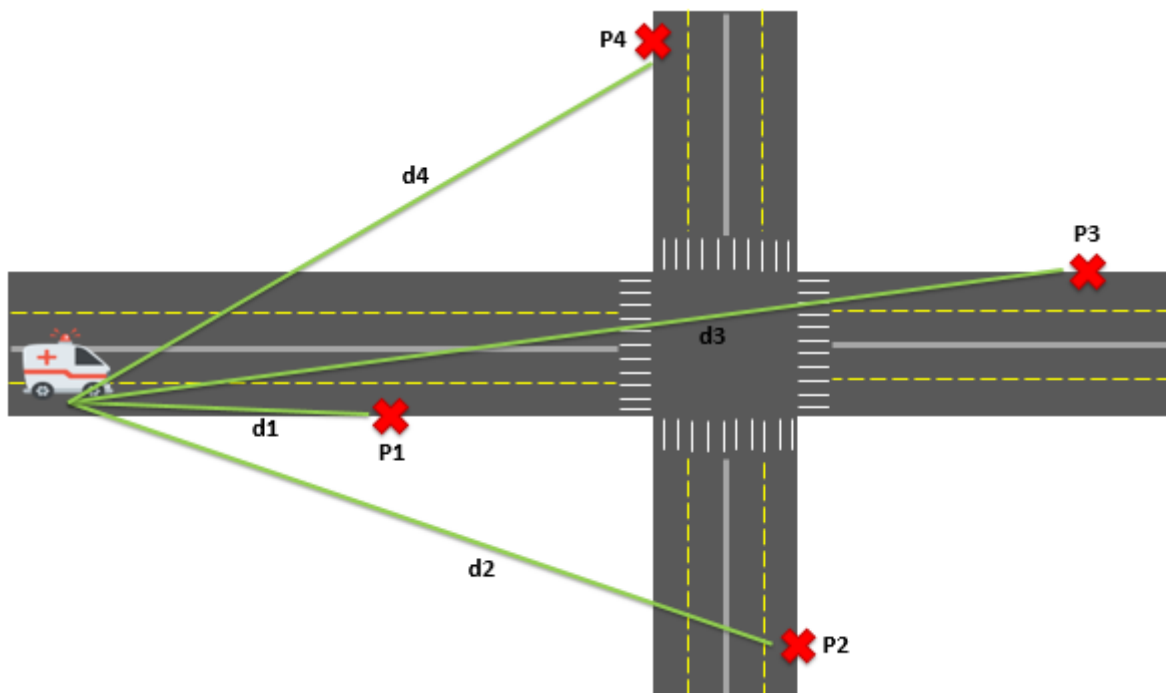


Figura 3.12. Puntos de referencia para identificar la ruta de la ambulancia. Por los autores.



Donde, coordenadas:

Ambulancia: X0, Y0

P1: X1, Y1

P2: X2, Y2

P3: X3, Y3

P4: X4, Y4

Y utilizando Pitágoras se estima las distancias d1, d2, d3 y d4:

$$d1 = \sqrt{(X0 - X1)^2 + (Y0 - Y1)^2} \quad [m] \quad (12)$$

$$d2 = \sqrt{(X0 - X2)^2 + (Y0 - Y2)^2} \quad [m] \quad (13)$$

$$d3 = \sqrt{(X0 - X3)^2 + (Y0 - Y3)^2} \quad [m] \quad (14)$$

$$d4 = \sqrt{(X0 - X4)^2 + (Y0 - Y4)^2} \quad [m] \quad (15)$$

De esta manera la menor distancia indica el carril por el que viaja la ambulancia; luego la UC envía un código a la US teniendo en cuenta lo siguiente:

- Si d1 es menor a d2, d3 y d4, enviar código 1
- Si d2 es menor a d1, d3 y d4, enviar código 2
- Si d3 es menor a d1, d2 y d4, enviar código 3
- Si d4 es menor a d1, d2 y d3, enviar código 4

Por último, si la UC calcula un Sd1, Sd2, Sd3 o Sd4 menor a 100 metros, deja de transmitir información a la US, indicando que los semáforos deben volver a su estado normal de funcionamiento.

– Pseudocódigo UC

### **Inicio Setup**

*Inicializar puente ← 115200*

*Inicializar consola*

*Mientras (consola disponible)*

*Si (rf95.init no disponible) entonces*

*Escribir 'inicio de LoRa fallido'*

*Mientras (1)*



*Fin mientras*

*Fin si*

*Frecuencia de recepción ← 868 MHz*

*Factor de ensanchamiento ← 7*

*Ancho de banda ← 125 KHz*

*Tasa de código ← 4/5*

*Escribir 'listo para recibir'*

*Fin mientras*

### **Fin Setup**

### **Inicio Loop**

#### **Inicio RecibirPaquetes**

*Si (rf95 disponible)*

*Escribir 'obtener nuevos datos'*

*Si (recibe paquete)*

*Extraer longitud*

*Extraer latitud*

*String dato1 ← "campo1 ← latitud"*

*String dato2 ← "campo2 ← longitud"*

#### **Inicio CargarDatos**

*String cargar\_url ←  
"https://api.thingspeak.com/update?api\_key=8WW2JLF86E8Q3HG&dato1&dato2"*

*Escribir 'llamar comando Linux para enviar datos'*

*Crear proceso P*

*Iniciar P ("curl -k cargar\_url")*

*Ejecutar P*

#### **Fin CargarDatos**

*Convertir latitud, longitud de la ambulancia a formato UTM*

*Longitud ← X0*

*Latitud ← Y0*

*//coordenadas UTM de los semáforos:*

*//Semáforo1*

*Longitud, Latitud ← SX1, SY1*

*//Semáforo2*

*Longitud, Latitud ← SX2, SY2*

*//Semáforo3*

*Longitud, Latitud ← SX3, SY3*



```
//Semáforo4
Longitud, Latitud ← SX4, SY4
//calcular distancia entre la ambulancia y la intersección:
flotante Sd1 ← sqrt(((X0-SX1)*(X0-SX1))+((Y0-SY1)*(Y0-SY1)))
flotante Sd2 ← sqrt(((X0-SX2)*(X0-SX2))+((Y0-SY2)*(Y0-SY2)))
flotante Sd3 ← sqrt(((X0-SX3)*(X0-SX3))+((Y0-SY3)*(Y0-SY3)))
flotante Sd4 ← sqrt(((X0-SX4)*(X0-SX4))+((Y0-SY4)*(Y0-SY4)))
//coordenadas UTM de los puntos de referencia:
//P1
Longitud, Latitud ← X1, Y1
//P2
Longitud, Latitud ← X2, Y2
//P3
Longitud, Latitud ← X3, Y3
//P4
Longitud, Latitud ← X4, Y4
//calcular distancia entre la ambulancia y los puntos de referencia para identificar
carril:
flotante d1 ← sqrt(((X0-X1)*(X0-X1))+((Y0-Y1)*(Y0-Y1)))
flotante d2 ← sqrt(((X0-X2)*(X0-X2))+((Y0-Y2)*(Y0-Y2)))
flotante d3 ← sqrt(((X0-X3)*(X0-X3))+((Y0-Y3)*(Y0-Y3)))
flotante d4 ← sqrt(((X0-X4)*(X0-X4))+((Y0-Y4)*(Y0-Y4)))
//el sistema hace el control semafórico a una distancia d entre la ambulancia y la
intersección
Frecuencia de transmisión ← 915 MHz
Si (Sd1 >=d && Sd2>=d && Sd3>=d && Sd4>=d)
//identificador de ruta:
Entero id ← 0
Escribir 'esperando acercamiento de la ambulancia'
Fin Si
sino Si (d1<d2 && d1<d3 && d1<d4)
Si (Sd1>=100 && (id==0 || id==1)
id ← 1
Entero código ← 1
Caracter código
Enviar código
Escribir 'código'
Fin Si
Sino
id ← 5
```



*Fin Sino*

*Fin sino Si*

*sino Si (d2<d1 && d2<d3 && d2<d4)*

*Si (Sd2>=100 && (id==0 || id==2))*

*id ← 2*

*Entero código ← 2*

*Caracter código*

*Enviar código*

*Escribir 'código'*

*Fin Si*

*Sino*

*id ← 5*

*Fin Sino*

*Fin sino Si*

*sino Si (d3<d1 && d3<d2 && d3<d4)*

*Si (Sd3>=100 && (id==0 || id==3))*

*id ← 3*

*Entero código ← 3*

*Caracter código*

*Enviar código*

*Escribir 'código'*

*Fin Si*

*Sino*

*id ← 5*

*Fin Sino*

*Fin sino Si*

*sino Si (d4<d1 && d4<d2 && d4<d3)*

*Si (Sd4>=100 && (id==0 || id==4))*

*id ← 4*

*Entero código ← 4*

*Caracter código*

*Enviar código*

*Escribir 'código'*

*Fin Si*

*Sino*

*id ← 5*

*Fin Sino*

*Fin sino Si*

***Fin RecibirPaquetes***

***Fin Loop***

- **Unidad de Semáforos (US)**

Esta unidad controla el funcionamiento de los semáforos en la intersección, para ello la US recibe inalámbricamente (en el canal 2) el código enviado por la UC que identifica la ruta por la que transita la ambulancia, y de acuerdo con esta información, toma la decisión sobre el estado de las luces en los semáforos del cruce.

Finalmente, la US mediante una comunicación cableada con los semáforos, establece su funcionamiento. Esta unidad no necesita GPS incorporado, porque es una unidad fija, por lo tanto, su latitud y longitud permanecen constantes, teniendo en cuenta lo anterior y la disponibilidad de equipos se escoge la tarjeta LoRa para que conforme la US. En la tabla 3.8 se encuentran sus características más relevantes.

Especificaciones LoRa
<ul style="list-style-type: none"><li>• Basado en el transceptor SX1276 / SX1278</li><li>• Frecuencia: 433 / 868 / 915 MHz</li><li>• Modulación: FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y OOK</li><li>• Velocidad de bits programable de hasta 300 kbps</li><li>• +20 dBm-100 mW de salida de RF constante vs +14 dBm de alta eficiencia PA</li><li>• Sensibilidad: hasta -148 dBm</li></ul>

Tabla 3.8. Características de la tarjeta LoRa [63].

De igual forma como se hizo en la UaB y por compatibilidad, se opta por escoger la tarjeta Arduino uno para que forme parte de esta unidad. La US se observa en la figura 3.13.

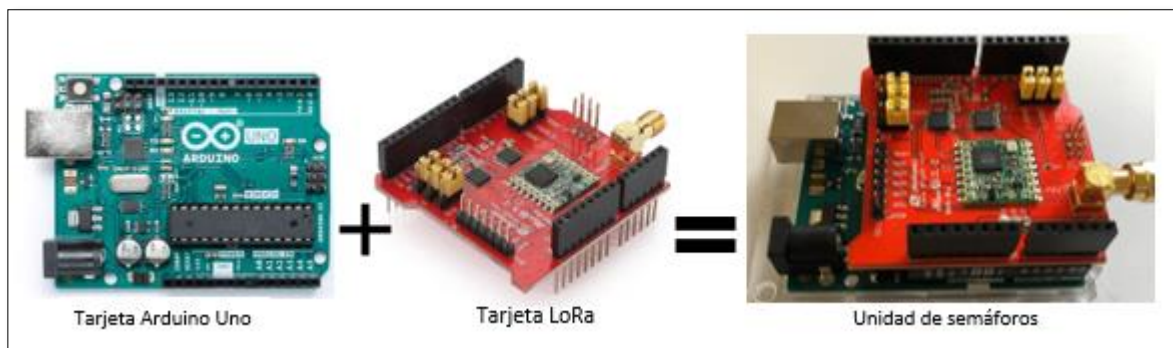


Figura 3.13. Unidad de semáforos.

A continuación, en la figura 3.14 se presenta el diagrama circuital de la US.



**Nota:** no se cuenta con el permiso para utilizar los semáforos reales de una intersección, por lo tanto, estos se representan a través de leds en una protoboard.

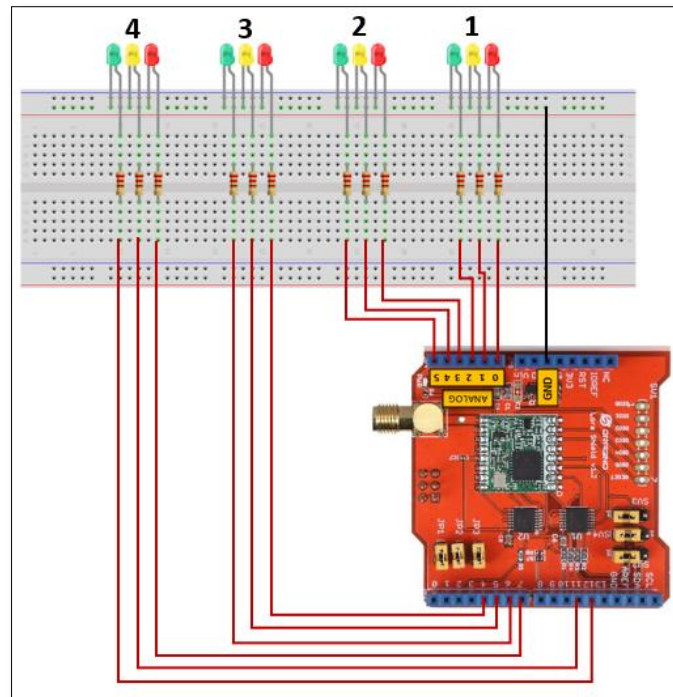


Figura 3.14. Diagrama circuital de la unidad de semáforos.

En la figura 3.14, cada grupo de leds (rojo, amarillo y verde) representa un semáforo en la intersección, estos han sido numerados del uno al cuatro indicando la ruta que deben controlar, es decir:

- Semáforo 1 controla ruta 1
- Semáforo 2 controla ruta 2
- Semáforo 3 controla ruta 3
- Semáforo 4 controla ruta 4

Mientras no se acerque una ambulancia, cada grupo de leds funciona de la misma manera que cada semáforo real en la intersección. La figura 3.15 describe cómo sería la distribución de los semáforos y rutas en la intersección, y la figura 3.16 la implementación final de la US.

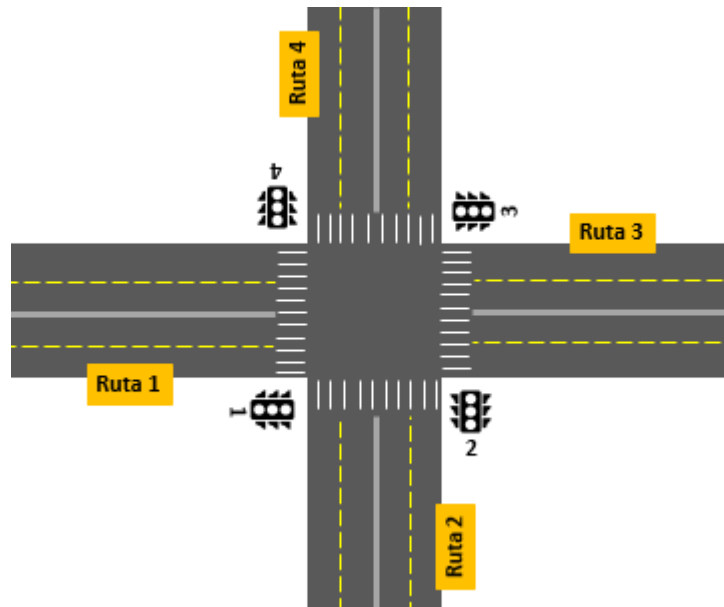


Figura 3.15. Distribución de los semáforos en una intersección. Por los autores.

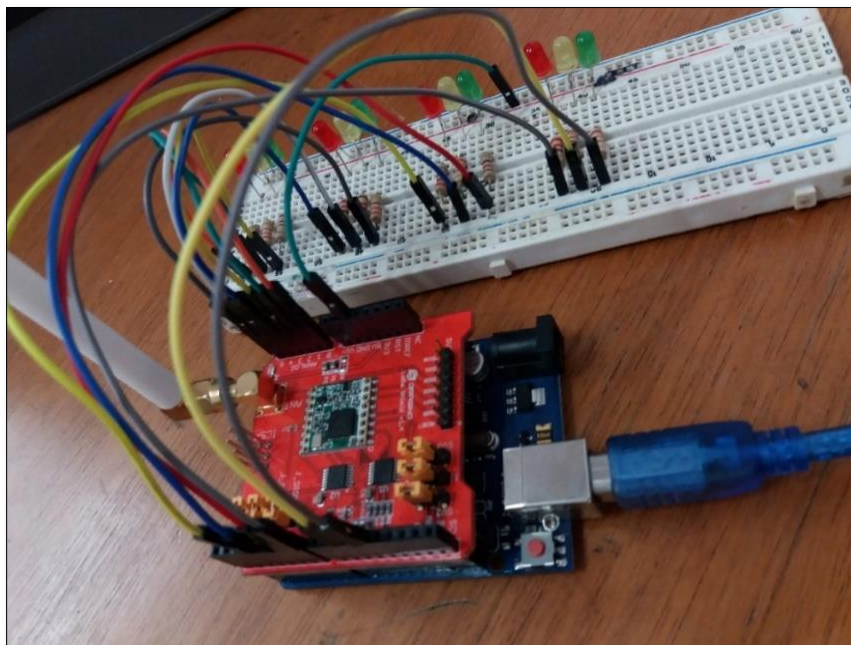


Figura 3.16. Unidad de semáforos implementada.

En la figura 3.17 se presenta un diagrama de secuencia en el que se especifican los procesos que ejecuta la US y los mensajes recibidos desde la UC.



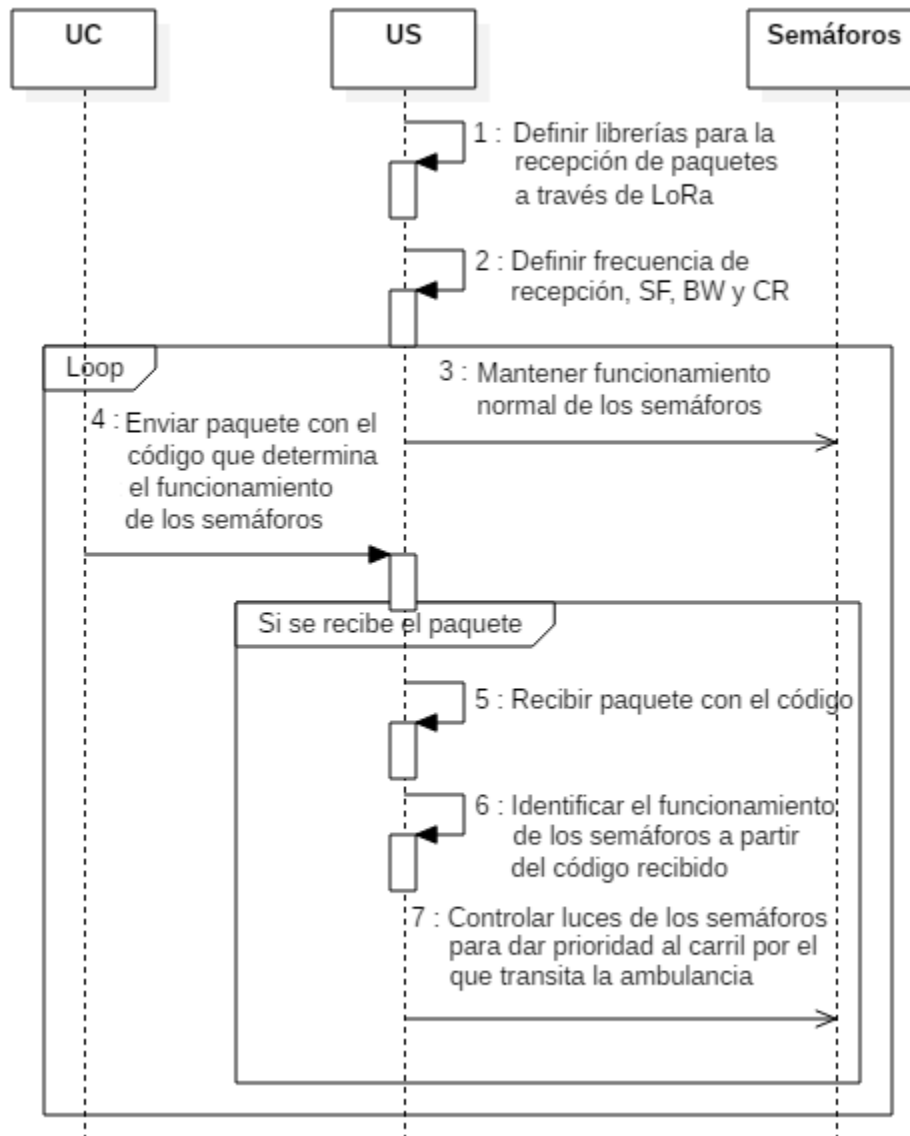


Figura 3.17. Diagrama de secuencia de la US. Por los autores.

El lenguaje de programación utilizado en esta unidad se basa en C a través de la herramienta Arduino IDE, e incluye lo siguiente:

- Recepción de paquetes desde la US

La US, al igual que la UaB y la UC implementa la librería RadioHead para realizar las comunicaciones inalámbricas, la cual especifica el formato (presentado en la UaB) de los paquetes recibidos. Aspectos como BW, CR y SF se tomaron igual que en la UaB.

La frecuencia de recepción de la US se establece en 915MHz, correspondiente al canal 2, por el cual la unidad de control envía el código.



– Control semafórico

De acuerdo al código que recibe la US, esta determina la prioridad de los carriles, entendiéndose que:

- Si el código es igual a 1, el carril con prioridad es el 1, por tanto, el semáforo instalado en este lugar establece su luz en verde y el resto deben cambiar a rojo.
- Si llega el código 2 el carril con la prioridad es el 2, y así sucesivamente para los carriles 3 y 4.
- Cuando la US deja de recibir información proveniente de la UC, significa que la UaB se encuentra atravesando la intersección, entonces la US espera un tiempo de 10 segundos para que la ambulancia atraviese completamente la intersección y establece nuevamente el funcionamiento normal de los semáforos.

– Pseudocódigo US

**Inicio Setup**

```
Inicializar serial ← 9600
ss.begin(9600);
Si (rf95.init no disponible) entonces
  Escribir 'inicio de LoRa fallido'
  Mientras (1)
    Fin mientras
  Fin si
Frecuencia de recepción ← 915 MHz
Factor de ensanchamiento ← 7
Ancho de banda ← 125 KHz
Tasa de código ← 4/5
Escribir 'listo para recibir'
```

**Fin Setup**

**Inicio Loop**

**Inicio Verificar**

```
Si (recibe paquete)
  Leer paquete
  Código ← paquete
  Si (código == 1)
    Semáforo1: verde
    Semáforos 2,3 y 4: rojo
```



*Fin Si*  
*sino Si (código == 2)*  
*Semáforo2: verde*  
*Semáforos 1,3 y 4: rojo*  
*Fin sino Si*  
*sino Si (código == 3)*  
*Semáforo3: verde*  
*Semáforos 1,2 y 4: rojo*  
*Fin sino Si*  
*sino Si (código == 4)*  
*Semáforo4: verde*  
*Semáforos 1,2 y 3: rojo*  
*Fin sino Si*

*Fin Si*

*sino*

*Mantener funcionamiento normal de los semáforos*

*Fin sino*

***Fin Verificar***

***Fin Loop***

- **Seguimiento de la ambulancia**

La unidad de control es la encargada de monitorear la ambulancia sobre la carretera, gracias a su capacidad de establecer una conexión con una red IP a través de Ethernet y posteriormente una comunicación con el servidor de IoT ThingSpeak; una plataforma para almacenar, visualizar, y extraer flujos de datos desde la nube.

Al registrar una cuenta en ThingSpeak se obtiene una API Key y unos API Request, como se aprecia en la figura 3.18, los cuales se incluyen en una serie de comandos RESTful API<sup>10</sup> desarrollados en Arduino IDE e implementados en la OLG01 para establecer una conexión con el servidor ThingSpeak, donde se almacenan las coordenadas GPS de la ambulancia recibidas desde la unidad a bordo, como se observa en la figura 3.19.

---

<sup>10</sup> Un RESTful API, es una interfaz de programación de aplicaciones que utiliza peticiones HTTP para obtener, colocar, enviar y borrar datos [61].

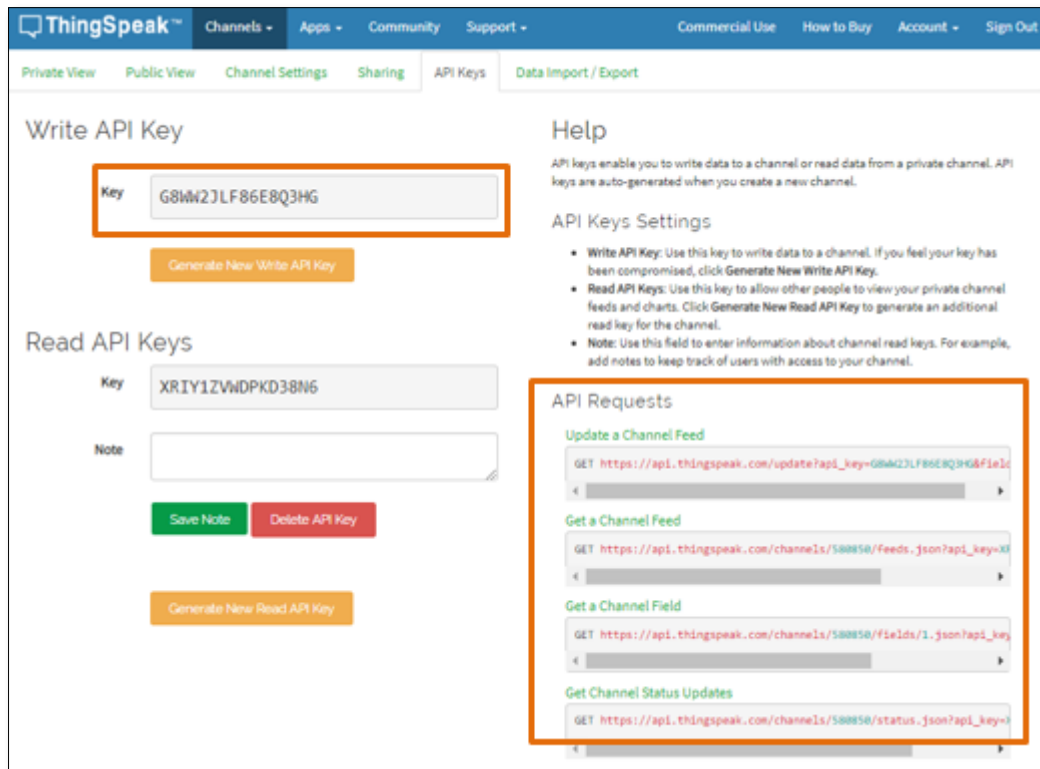


Figura 3.18. API Key y API Request de ThingSpeak.

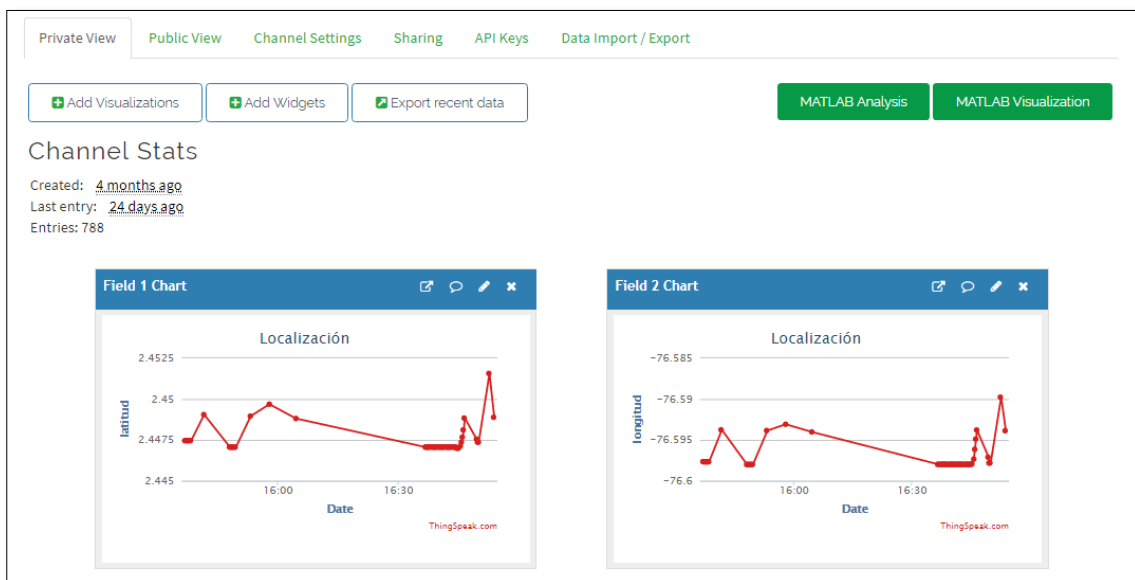


Figura 3.19. Coordenadas GPS de la ambulancia almacenadas en ThingSpeak.

Luego, utilizando JavaScript y HTML se extraen las coordenadas GPS de la ambulancia para ser visualizadas en Google maps. En la figura 3.20, se aprecia la ubicación de la ambulancia en un instante determinado.



Figura 3.20. Localización de la ambulancia en Google maps.

- **Implementación**

Las unidades que componen el prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancia se instalan en la intersección que se origina entre la carrera 2 con la calle 15 norte de la ciudad de Popayán, donde está ubicada la sede de ingenierías de la Universidad del Cauca, tal y como se aprecia en la figura 3.21.



Figura 3.21. Intersección donde se implementa el prototipo. Adaptado de Google maps.



En la figura 3.22, se indican las rutas que componen la intersección, las cuales se encuentran numeradas del uno al cuatro e identificadas por los colores verde, azul, amarillo y rojo respectivamente. Estas son controladas por los semáforos simulados a través de leds en una protoboard, los cuales se visualizan en la figura 3.14.



Figura 3.22. Rutas de la intersección donde se implementa el prototipo. Adaptado de Google maps.

La UaB, UC y US se distribuyen en la intersección de la siguiente manera:

- La UaB, aunque el modelo del prototipo señala que se ubica en el interior de la ambulancia, por falta de disponibilidad de estos vehículos, es instalada en el interior de un automóvil particular que representa la ambulancia, el cual transita a través de la intersección seleccionada. En la figura 3.23 se presenta esta unidad.





Figura 3.23. Unidad a bordo instalada.

- La UC se instala en un lugar elevado para tener una mejor línea de vista con la UaB y así conseguir que la ambulancia pueda ser detectada desde distancias mayores antes de llegar a la intersección, logrando una amplia zona de cobertura; por lo tanto, se selecciona la azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, con una altitud aproximada de 15 metros. La figura 3.24 indica la UC instalada.



Figura 3.24. Unidad de control instalada.

- La US se ubica aproximadamente a 5 metros de la intersección, esta se aprecia en la figura 3.25.

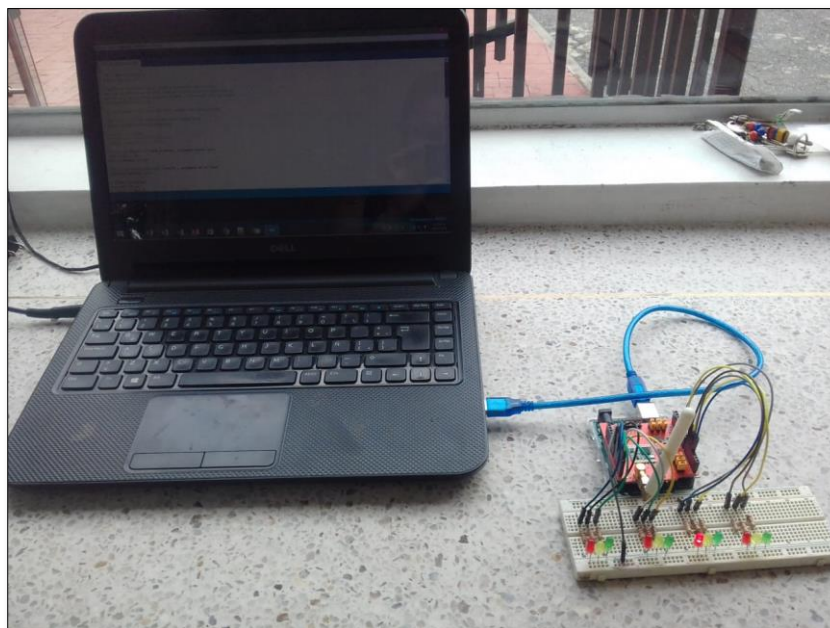


Figura 3.25. Unidad de semáforos instalada.

En la figura 3.26, se observa la distribución de las unidades en la intersección.





Figura 3.26. Distribución de las unidades del prototipo en la intersección. Adaptado de Google maps.

#### 3.4.4. Desarrollo, Evaluación del Prototipo

Para determinar el desempeño del prototipo se evalúan 3 parámetros técnicos; la fiabilidad, cobertura y retardo del sistema:

**Fiabilidad:** según la UIT se define la fiabilidad como la probabilidad de que un elemento pueda realizar su función requerida en condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo determinado [64]. La finalidad de esta prueba es determinar el número de veces que el sistema hace un control semafórico cada vez que la ambulancia transita por la intersección.

**Retardo:** en telecomunicaciones se define como el tiempo que transcurre desde que se trasmite una señal hasta que se recibe [65]. El objetivo de esta prueba es determinar el tiempo que tarda el sistema en realizar el control semafórico, desde el momento en que es detectada la ambulancia en la intersección.

**Cobertura:** la zona de cobertura de un sistema se define como el área geográfica donde los diferentes dispositivos de la red pueden establecer comunicación con el nodo central o entre sí. Esta prueba tiene como propósito obtener el alcance máximo de comunicación entre la unidad de control y la unidad a bordo, igualmente se hace una comparación entre los resultados de las pruebas en el escenario real y los resultados de la herramienta de simulación Xirio online.

Antes de evaluar los parámetros técnicos mencionados anteriormente, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:



1. Previamente se estimó la conectividad entre las diferentes unidades que componen el prototipo instaladas en la intersección, para ello se hizo transmitir un breve mensaje de confirmación entre éstas, en el que se indicaba que la comunicación se estaba llevando a cabo con éxito; durante el desarrollo de la prueba se observó que la comunicación entre los dispositivos era correcta, pero existían algunos puntos donde se perdía la señal a causa de construcciones y obstáculos presentes, especialmente en las rutas 2, 3 y 4 de la intersección.

Luego se evaluaron las unidades con sus funciones ya desarrolladas, llegando a la conclusión de que el modo de operación del prototipo era el esperado, es decir, cuando el vehículo con la UaB se acercaba a la intersección, la ruta por la que transitaba era identificada y luego los leds (que simulan cada semáforo en la intersección) funcionaban de tal manera para darle prioridad. Cuando el vehículo atravesaba la intersección, los leds volvían a su estado inicial.

Sin embargo, al igual que en la prueba de conectividad se tuvieron problemas en las rutas 2, 3 y 4 debido a que la comunicación entre las unidades pudo establecerse sólo cuando la UaB se encontraba muy cerca de la intersección; de esta manera, el control de los semáforos se realizó muy tarde y no fue posible controlarlos desde una distancia apropiada (antes de que el vehículo con la UaB llegue a la intersección) para alcanzar a evacuar, en caso de existir, tráfico acumulado.

En consecuencia, y al no tener la posibilidad de implementar el prototipo en otra intersección de la ciudad en la que se cuente con las condiciones adecuadas como: acceso a corriente eléctrica, internet y a un sitio elevado para instalar la UC; se opta por evaluar los parámetros técnicos de fiabilidad, retardo y cobertura del sistema, haciendo transitar el vehículo con la UaB a través de la ruta 1.

2. Los leds que simulan cada semáforo en la intersección, mientras no se aproxime el vehículo con la UaB, están funcionando igual que los semáforos reales.
3. Debido a la falta de tarjetas LoRa/GPS (UaB), no se puede evaluar el caso en el que más de una ambulancia se acerque a la intersección al mismo tiempo.

**Nota:** Al vehículo que lleva instalada la UaB (que representa la ambulancia), en adelante se le llamará “ambulancia”.

- **Actividades previas**

Previamente a la medición de los parámetros técnicos especificados en el plan de pruebas, se realizan algunas actividades para conocer el patrón de radiación<sup>11</sup> de las antenas y la precisión del GPS LoRa.

- Patrón de radiación de las antenas

Para determinar una orientación apropiada de las antenas, que permita obtener la mayor ganancia en las comunicaciones, se encuentra el patrón de radiación, de la siguiente manera: la antena de prueba (LoRa) se ubica sobre una plataforma giratoria, para que sea excitada por una antena fuente configurada a 868 MHz, la plataforma está conectada a un computador que dispone del software CASSY lab 2, el cual permite dibujar el patrón de radiación de la antena bajo prueba.

El montaje realizado para llevar a cabo la prueba se observa en la figura 3.27, es importante tener en cuenta que se ubicaron paneles de aislamiento alrededor de la antena de prueba, simulando una cámara anecoica.



Figura 3.27. Montaje para encontrar el patrón de radiación de la antena LoRa.

Para encontrar el patrón de radiación se debe elegir el paso angular, que determina el número de muestras que se toman en los 360°, de esta manera entre menor sea su valor, mayor será el número de muestras. En la figura 3.28 se visualiza el patrón de radiación de la antena LoRa, con paso angular de 0.5°.

<sup>11</sup> El patrón de radiación es un gráfico o diagrama polar sobre el que se representa la fuerza de los campos electromagnéticos emitidos por una antena [66].

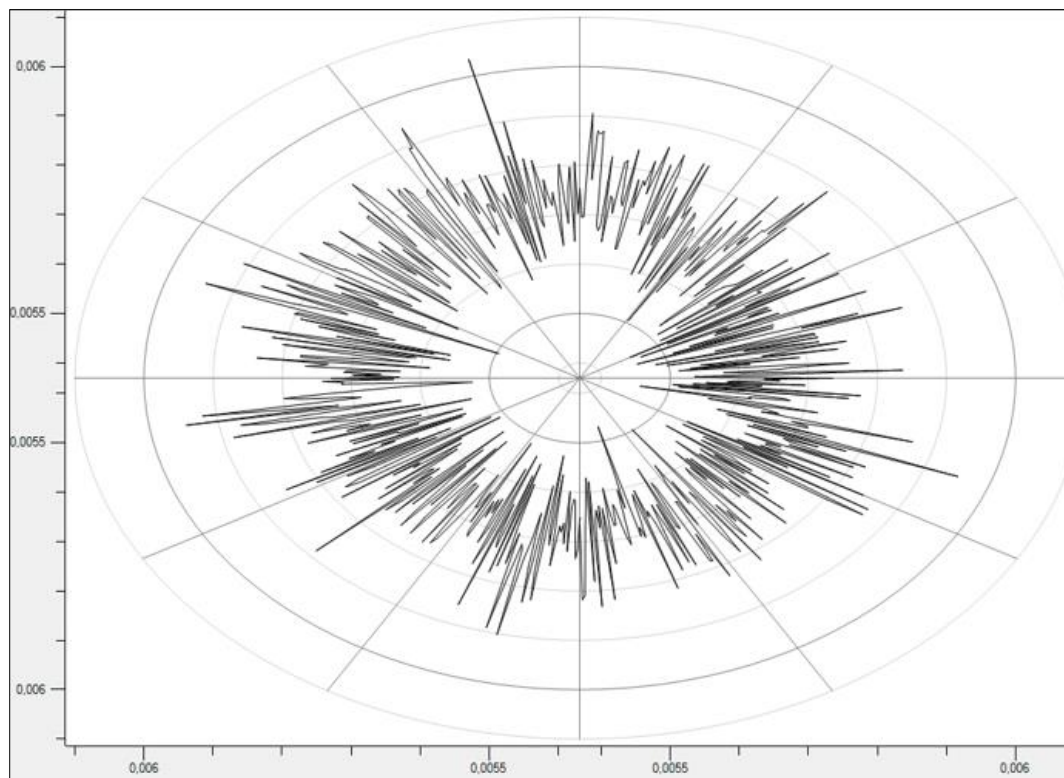


Figura 3.28. Patrón de radiación de la antena LoRa.

A partir de la figura 3.28, se observa que la antena radia potencia en todas las direcciones, pero no lo hace de manera uniforme; también se aprecia que la señal experimenta atenuación, debido al entorno donde se realizó la prueba, se determina entonces que la antena es aproximadamente omnidireccional, por lo tanto su orientación en cualquiera de las unidades (UaB, UC y US) que la poseen no influye en gran medida en el radioenlace.

#### – Exactitud del GPS LoRa

Para medir el grado de exactitud del GPS de los dispositivos LoRa, se tomaron las coordenadas de 10 puntos de manera simultánea con el GPS LoRa y un dispositivo de referencia denominado Mobile Mapper 6 Magellan, que obtiene datos de posicionamiento en tiempo real con una precisión de 1 a 3 metros. Este dispositivo se observa en la figura 3.29, posteriormente se convierten las coordenadas geográficas a UTM (metros) y se encuentra la distancia entre los puntos, para así obtener el error del GPS LoRa. Los resultados obtenidos se observan en la tabla 3.9.



Figura 3.29. GPS Mobile Mapper 6 Magellan.

Coordenadas GPS de referencia (Grados decimales)	Coordenadas GPS LoRa (Grados decimales)	$\Delta d$ entre coordenadas GPS de referencia y GPS LoRa (m)
Latitud: 2.446398 Longitud: -76.597964	Latitud: 2.4464444 Longitud: -76.597972	5.211548889
Latitud: 2.4464906 Longitud: -76.5986131	Latitud: 2.446525 Longitud: -76.598595	4.303621428
Latitud: 2.446574 Longitud: -76.597986	Latitud: 2.446538 Longitud: -76.597984	3.987115339
Latitud: 2.447511 Longitud: -76.597595	Latitud: 2.447495 Longitud: -76.597633	4.581639911
Latitud: 2.446675 Longitud: -76.598013	Latitud: 2.446718 Longitud: -76.598029	5.076818357
Latitud: 2.446153 Longitud: -76.598487	Latitud: 2.446195 Longitud: -76.598507	5.149369253
Latitud: 2.447305 Longitud: -76.598314	Latitud: 2.447272 Longitud: -76.598352	5.583587582
Latitud: 2.445825 Longitud: -76.598621	Latitud: 2.445854 Longitud: -76.598576	5.94411960933
Latitud: 2.445735 Longitud: -76.598428	Latitud: 2.445749 Longitud: -76.598396	3.88128177409
Latitud: 2.446904 Longitud: -76.598801	Latitud: 2.446861 Longitud: -76.598819	5.15908567963

Tabla 3.9. Comparación entre coordenadas del GPS de referencia y GPS LoRa.

Como se aprecia en la tabla 3.9, la máxima diferencia que se obtuvo fue 5,94411960933 m y la mínima fue 3.88128177409 m, obteniendo un promedio de 4,887818782 m y un coeficiente de variación del 13,1667% lo que indica que los datos no varían significativamente, este error del GPS LoRa significa un retardo de 0.219 segundos (para una ambulancia que está viajando a una velocidad máxima permitida de 80 Km/h), este valor no se considera significativo en comparación con





el tiempo que tarda la ambulancia en atravesar la intersección, desde el momento en que es detectada por el sistema.

- **Fiabilidad del sistema**

Para evaluar la fiabilidad del sistema se hace transitar la ambulancia a través de la ruta uno en varias ocasiones, mientras se toma registro de las veces en las cuales se obtiene un resultado satisfactorio. Una respuesta favorable se logra si el sistema identifica la señal enviada por la ambulancia al acercarse a la intersección y seguidamente la luz del semáforo que controla el carril sobre el que transita se establece en verde, en tanto el resto de estos permanecen en rojo. Cabe señalar que una vez la ambulancia esté atravesando el dispositivo de control de tráfico, el sistema espera un tiempo de 10 segundos para que atraviese la intersección antes de establecer nuevamente el funcionamiento normal de los semáforos.

Si lo anterior ocurre, se registra la hora en que la ambulancia envía la señal, y la hora en la que el semáforo implicado pone su luz en verde y los demás en rojo. De lo contrario el prototipo no funciona adecuadamente y alguno de los tiempos no se anota o ambos. Durante el proceso de detección de la ambulancia y posterior control de los semáforos, se ejecutan todas las tareas de cada unidad explicadas en la etapa de diseño.

La distancia escogida para que el prototipo determine que la ambulancia se encuentra cerca de la intersección y controle los semáforos, se ha establecido en 300 m, esto con el fin de simular un tráfico acumulado menor a este valor. El número de vueltas realizadas por la ambulancia en la ruta 1 a lo largo de tres días a una velocidad promedio de 40 Km/h es de 50.

Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 3.10, donde:

Tiempo 1: hora en que la ambulancia envía la señal para que se dé prioridad al carril sobre el que transita, el cual se imprime en la UC.

Tiempo 2: hora en que el sistema establece la luz del semáforo en verde y el resto en rojo, el cual se imprime en la US.

Además, el registro del tiempo 1 indica una correcta comunicación entre la UaB y la UC, y el registro del tiempo 2 una comunicación adecuada entre la UC y la US.



Día	Número de vuelta	Tiempo 1 (Hrs:Min:Seg)	Tiempo 2 (Hrs:Min:Seg)	Funcionamiento del Prototipo	
				Correcto	Incorrecto
1	1	15:28:38	15:28:39	x	
	2	15:32:12	15:32:15	x	
	3	15:50:48	15:50:52	x	
	4	16:00:56	16:00:58	x	
	5	16:14:16	16:14:19	x	
	6	16:17:18	16:17:21	x	
	7	16:28:13	16:28:16	x	
	8	16:32:50	16:32:54	x	
	9	16:38:52	16:38:55	x	
	10	16:50:46	16:50:49	x	
	11	16:56:11	16:56:13	x	
	12	17:01:59	17:02:01	x	
	13	17:05:20	-----		x
	14	19:31:36	19:31:37	x	
	15	19:45:19	19:45:20	x	
2	16	8:50:49	8:50:53	x	
	17	9:02:53	9:02:57	x	
	18	9:08:34	9:08:37	x	
	19	9:13:34	9:13:37	x	
	20	9:23:35	9:23:38	x	
	21	9:28:22	9:28:24	x	
	22	9:33:34	9:33:36	x	
	23	9:38:49	9:38:52	x	
	24	9:42:33	9:42:37	x	
	25	9:48:49	9:48:52	x	
	26	9:55:02	-----		x
	27	10:01:21	-----		x
	28	10:51:50	10:51:52	x	
	29	10:54:02	10:54:06	x	
30	10:58:18	10:58:21	x		
3	31	21:02:44	21:02:47	x	
	32	21:06:54	21:06:56	x	
	33	21:09:33	21:09:37	x	
	34	21:11:55	21:12:00	x	
	35	21:14:51	21:14:56	x	
	36	21:23:52	21:23:54	x	
	37	21:27:42	21:27:45	x	
	38	21:28:49	21:28:52	x	
	39	21:32:25	21:32:28	x	
	40	21:35:47	21:35:49	x	
	41	21:39:45	21:39:48	x	
	42	21:46:34	21:46:37	x	
	43	21:52:25	21:52:28	x	
	44	21:57:13	21:57:17	x	
	45	21:59:23	21:59:25	x	
	46	22:02:07	22:02:09	x	
	47	22:08:17	22:08:20	x	
	48	22:12:03	22:12:06	x	
	49	22:18:32	22:18:34	x	
	50	22:23:18	22:23:21	x	

Tabla 3.10. Resultados de la prueba de fiabilidad del sistema.



En la tabla anterior se observa cómo 47 de las 50 veces en las que la ambulancia se encontró transitando por la intersección, el sistema realizó un trabajo adecuado, y sólo en 3 oportunidades no se comportó como se esperaba; esto se corrobora con la figura 3.30 donde se ha estimado en porcentaje su grado de fiabilidad, obteniéndose un total de 94% de aciertos frente a un 6% de fallos.

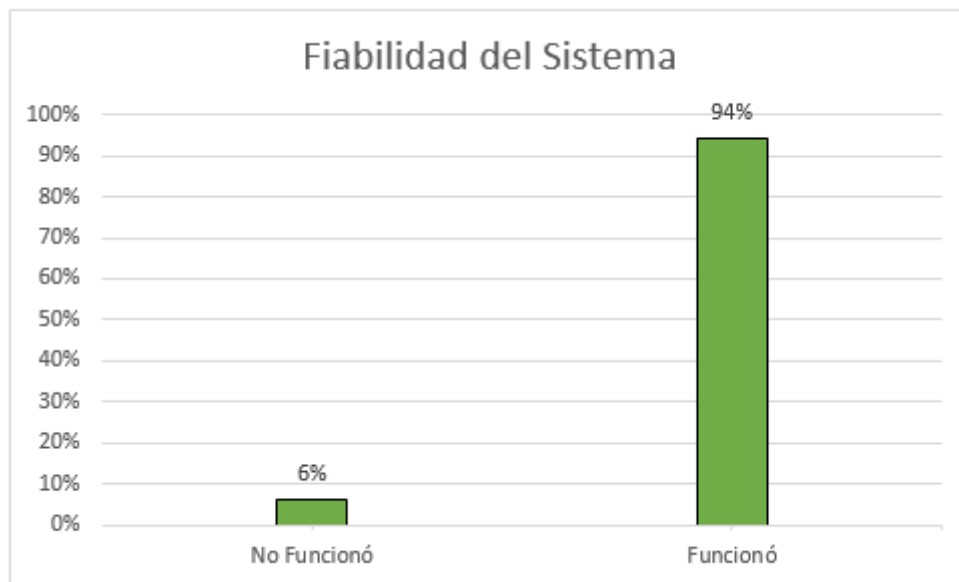


Figura 3.30. Fiabilidad del sistema.

El reconocimiento de la ambulancia se realiza cuando ésta se encuentra a una distancia que oscila entre los 270m y 300m aproximadamente del semáforo y no exactamente a los 300m, debido a la velocidad del vehículo de emergencia y al tiempo transcurrido mientras la UaB recibe los datos GPS desde el satélite, además del retraso que experimenta la señal al ser procesada y emitida desde la UaB a la UC y desde la UC a la US.

En los tres fallos registrados en la tabla 3.10, el sistema si imprime el tiempo 1, lo que significa que la UC recibe la señal emitida por la UaB y se efectúa el reconocimiento de la ambulancia, el que no se anota es el tiempo 2, hecho que advierte que la US no recibe la señal enviada por la UC y por ende no se hace el control de los semáforos. Teniendo en cuenta que los errores no se presentan en el enlace UaB y UC, el cual se considera de mayor complejidad al tratarse de una comunicación entre una unidad fija y otra que se encuentra en constante movimiento, y si en el enlace UC y US, estimado como menos complejo por realizarse entre dos unidades que se encuentran fijas, se cree que la falencia no se debe a pérdidas de la señal durante la comunicación, sino a fallos en los equipos, principalmente en la UC, la cual después de recibir la señal emitida por la UaB es la encargada de ejecutar el mayor número de tareas, lo que puede causar la no emisión de la señal de ésta hacia la US; sin embargo lo anterior se deja para futuro caso de estudio.





En solución se plantea distribuir cierto número de actividades realizadas por la UC entre las otras dos unidades, con el propósito de disminuir los procesos realizados por esta unidad y lograr que su desempeño sea más eficiente.

- **Retardo del sistema**

El objetivo de esta prueba es determinar el tiempo que emplea el sistema en establecer el semáforo en verde, cuando la ambulancia se encuentra próxima a la intersección y se necesita dar prioridad al carril por el que viaja. Para alcanzar este fin, el vehículo de emergencia transita repetidamente a lo largo de la ruta uno.

Durante las veces que la ambulancia está en la carretera (ruta uno) emite una señal informando de su presencia (mediante coordenadas GPS captadas desde el satélite), a partir de la cual el sistema determina su ubicación y calcula su distancia al cruce. De esta manera, es posible conocer el momento en que se encuentra cerca de los semáforos y se requiere realizar el control de los mismos. Es en este instante cuando se empieza a evaluar el tiempo utilizado por el prototipo para realizar su función (brindar prioridad al carril sobre el que se posiciona la ambulancia a partir de un control semafórico).

Como se observa en la figura 3.31, el funcionamiento del prototipo implica varios procesos que invierten tiempo y retrasan el resultado, así, el retardo total del sistema es la suma de cada tiempo empleado en cada proceso, además del tiempo empleado para realizar la comunicación inalámbrica desde la UaB a la UC y de la UC a la US.



Figura 3.31. Procesos realizados por el sistema.



Para encontrar el retardo total del sistema, se captura el tiempo en el que el prototipo realiza el primer proceso (UaB envía coordenadas GPS a la UC), luego el tiempo en el que termina el último (control de los semáforos), y finalmente se hace la resta entre estos dos tiempos para obtener así un valor total del retardo experimentado. De esta manera:

$$\text{Retardo total del sistema} = \frac{\text{hora en que efectúa el último proceso} - \text{hora en que efectúa el primer proceso}}{[\text{seg}]} \quad (16)$$

Durante la práctica, se consideraron tres distancias sobre las cuales el sistema determina que la ambulancia está cerca a la intersección, estas fueron 200m, 300m y 400m, con el propósito de simular diferentes cantidades de tráfico acumuladas en el semáforo. Para cada una de las distancias se hizo transitar la ambulancia a lo largo de la ruta uno 50 veces con una velocidad promedio de 40 Km/h, a fin de obtener un retardo máximo del sistema.

Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 3.11, donde:

Hora 1: hora en que el sistema efectúa el primer proceso.

Hora 2: hora en que el sistema efectúa el último proceso.

D: distancia establecida para considerar que la ambulancia está cerca de los semáforos.

Día	D (m)	Número de vuelta	Hora 1 (Hrs:Min:Seg)	Hora 2 (Hrs:Min:Seg)	Retardo (seg)	Número de vuelta	Hora 1 (Hrs:Min:Seg)	Hora 2 (Hrs:Min:Seg)	Retardo (seg)
1	200	1	14:26:05	14:26:08	3	26	16:37:57	16:38:02	5
		2	14:32:48	14:32:51	3	27	16:41:31	16:41:36	5
		3	14:37:59	14:38:04	5	28	19:37:14	19:37:16	2
		4	14:43:07	14:43:10	3	29	19:41:56	19:41:58	2
		5	14:53:50	14:53:53	3	30	19:46:37	19:46:39	2
		6	14:59:03	14:59:06	3	31	19:50:13	19:50:16	3
		7	15:09:35	15:09:38	3	32	19:54:59	19:55:01	2
		8	15:19:12	15:19:14	2	33	19:59:36	19:59:38	2
		9	15:24:08	15:24:11	3	34	20:02:34	20:02:38	4
		10	15:27:23	15:27:27	4	35	20:07:18	20:07:21	3
		11	15:32:44	15:32:48	4	36	20:10:19	20:10:21	2
		12	15:37:27	15:37:30	3	37	20:15:16	20:15:18	2
		13	15:42:39	15:42:41	2	38	20:17:55	20:17:58	3
		14	15:48:16	15:48:18	2	39	20:25:24	20:25:28	4
		15	15:53:30	15:53:31	1	40	20:28:39	20:28:41	2
		16	15:57:51	15:57:54	3	41	20:32:58	20:33:02	4
		17	16:00:46	16:00:49	3	42	20:36:06	20:36:08	2
		18	16:05:45	16:05:47	2	43	20:38:50	20:38:54	4
		19	16:08:42	16:08:44	2	44	20:46:39	20:46:43	4
		20	16:13:18	16:13:21	3	45	20:54:21	20:54:23	2
		21	16:16:48	16:16:52	4	46	20:59:09	20:59:10	1
		22	16:21:11	16:21:12	1	47	21:07:10	21:07:12	2



Día	D (m)	Número de vuelta	Hora 1 (Hrs:Min:Seg)	Hora 2 (Hrs:Min:Seg)	Retardo (seg)	Número de vuelta	Hora 1 (Hrs:Min:Seg)	Hora 2 (Hrs:Min:Seg)	Retardo (seg)
1	200	23	16:25:18	16:25:22	4	48	21:12:30	21:12:32	2
		24	16:29:12	16:29:13	1	49	21:20:07	21:20:10	3
		25	16:32:40	16:32:44	4	50	21:26:12	21:26:15	3
2	300	1	15:28:38	15:28:39	1	26	20:47:02	20:47:04	2
		2	15:32:12	15:32:15	3	27	20:49:21	20:49:26	5
		3	15:50:48	15:50:52	4	28	20:51:50	20:51:52	2
		4	16:00:56	16:00:58	2	29	20:54:02	20:54:06	4
		5	16:14:16	16:14:19	3	30	20:58:18	20:58:21	3
		6	16:17:18	16:17:21	3	31	21:02:44	21:02:47	3
		7	16:28:13	16:28:16	3	32	21:06:54	21:06:56	2
		8	16:32:50	16:32:54	4	33	21:09:33	21:09:37	4
		9	16:38:52	16:38:55	3	34	21:11:55	21:12:00	5
		10	16:50:46	16:50:49	3	35	21:14:51	21:14:56	5
		11	16:56:11	16:56:13	2	36	21:23:52	21:23:54	2
		12	17:01:59	17:02:01	2	37	21:27:42	21:27:45	3
		13	17:05:20	17:05:23	3	38	21:28:49	21:28:52	3
		14	19:31:36	19:31:37	1	39	21:32:25	21:32:28	3
		15	19:45:19	19:45:20	1	40	21:35:47	21:35:49	2
		16	19:50:49	19:50:53	4	41	21:39:45	21:39:48	3
		17	20:02:53	20:02:57	4	42	21:46:34	21:46:37	3
		18	20:08:34	20:08:37	3	43	21:52:25	21:52:28	3
		19	20:13:34	20:13:37	3	44	21:57:13	21:57:17	4
		20	20:23:35	20:23:38	3	45	21:59:23	21:59:25	2
		21	20:28:22	20:28:24	2	46	22:02:07	22:02:09	2
		22	20:33:34	20:33:36	2	47	22:08:17	22:08:20	3
		23	20:38:49	20:38:52	3	48	22:12:03	22:12:06	3
		24	20:42:33	20:42:37	4	49	22:18:32	22:18:34	2
		25	20:43:49	20:43:52	3	50	22:23:18	22:23:21	3
3	400	1	15:36:03	15:36:08	5	26	18:50:00	18:50:03	3
		2	16:15:23	16:15:25	2	27	18:54:09	18:54:12	3
		3	16:20:54	16:20:56	2	28	18:59:50	18:59:53	3
		4	16:25:51	16:25:54	3	29	19:03:06	19:03:09	3
		5	16:49:28	16:49:32	4	30	19:07:34	19:07:37	3
		6	17:11:30	17:11:33	3	31	19:11:47	19:11:50	3
		7	17:17:27	17:17:29	2	32	19:15:50	19:15:53	3
		8	17:21:06	17:21:08	2	33	19:18:56	19:18:58	2
		9	17:26:15	17:26:20	5	34	19:22:23	19:22:25	2
		10	17:30:07	17:30:08	1	35	19:27:26	19:27:30	4
		11	17:35:17	17:35:20	3	36	19:33:58	19:34:01	3
		12	17:39:37	17:39:41	4	37	19:37:28	19:37:31	3
		13	17:43:51	17:43:53	2	38	19:42:56	19:43:00	4
		14	17:47:34	17:47:36	2	39	19:45:20	19:45:25	5
		15	17:53:12	17:53:15	3	40	19:50:49	19:50:51	2
		16	17:57:00	17:57:01	1	41	19:54:15	19:54:18	3
		17	18:01:13	18:01:17	4	42	19:59:48	19:59:52	4
		18	18:06:18	18:06:22	4	43	20:07:15	20:07:17	2
		19	18:10:32	18:10:34	2	44	20:12:08	20:12:13	5
		20	18:13:50	18:13:52	2	45	20:17:40	20:17:43	3
		21	18:18:34	18:18:37	3	46	20:22:16	20:22:19	3
		22	18:23:27	18:23:30	3	47	20:27:44	20:27:47	3
		23	18:36:07	18:36:10	3	48	20:33:11	20:33:16	5
		24	18:40:56	18:40:59	3	49	20:38:38	24:50:42	4
		25	18:45:34	18:45:37	3	50	20:43:11	20:43:15	4

Tabla 3.11. Resultados de la prueba de retardo del sistema.



De acuerdo con los resultados que se presentan en la tabla 3.11, el retardo máximo experimentado por el sistema cuando la ambulancia se encuentra a distancias de 200m, 300m o 400m del semáforo, es de 5 segundos y el más pequeño es de 1 segundo.

Este retardo no se considera crítico, porque es menor en comparación con el tiempo empleado por la ambulancia en recorrer 200m si viajara a una velocidad de 80 Km/h, como se muestra en la tabla 3.12.

Distancia a la cual el sistema detecta la ambulancia (m)	Tiempo empleado por la ambulancia en atravesar la intersección, desde el momento en que es detectada por el sistema viajando a una velocidad de 80 Km/h (seg)	Retardo máximo del prototipo (seg)
200	9	5
300	13.5	5
400	18	5

Tabla 3.12. Tiempo que tarda la ambulancia en atravesar el cruce y retardo máximo del sistema.

Los valores de retardo que se obtuvieron en la práctica se presentan gráficamente a continuación.

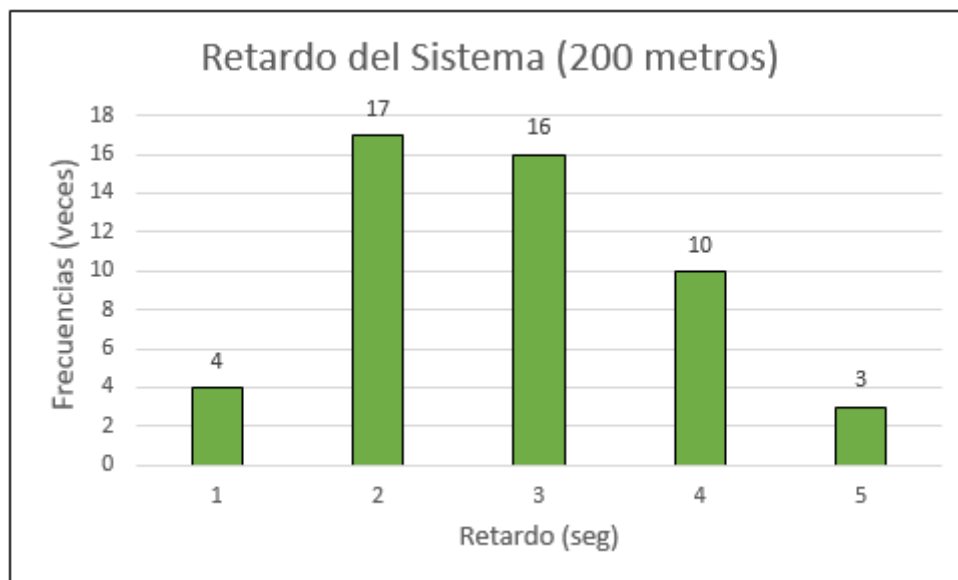


Figura 3.32. Retardos del sistema a 200 metros.

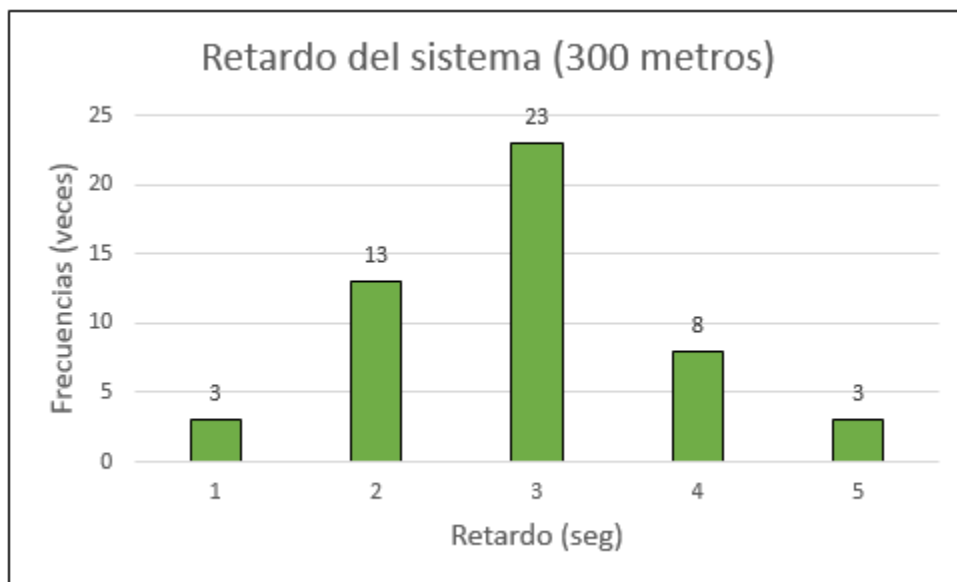


Figura 3.33. Retardos del sistema a 300 metros.

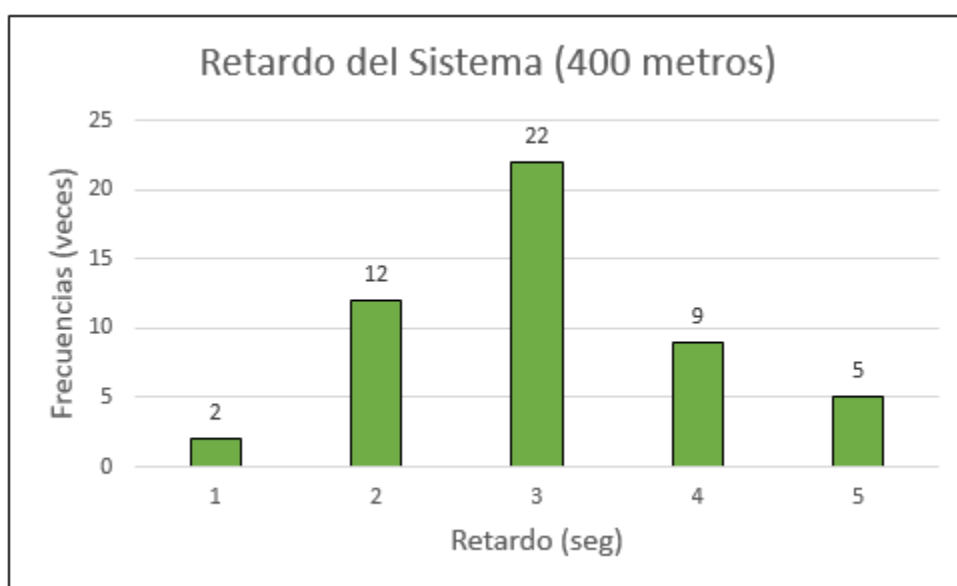


Figura 3.34. Retardos del sistema a 400 metros.

Con respecto a las figuras anteriores, se determina que a medida que aumenta la distancia a la cual el sistema detecta la presencia de la ambulancia cerca al semáforo, la frecuencia con la que aparecen valores de retardo mayores se incrementa, por ejemplo, cuando la distancia es igual a 200 m, se presenta con mayor reiteración un retardo igual a 2 segundos con un total de 17 veces, mientras que para los casos en que la distancia es de 300m y 400m el retardo que más se presenta es el de 3 segundos con una cantidad de 23 y 22 veces respectivamente.



- **Cobertura del sistema**

Con la finalidad de identificar el alcance máximo de cobertura<sup>12</sup> que ofrece la tecnología LoRa sobre la intersección antes mencionada, se han implementado dos procedimientos: en el primero se hace uso de Xirio online, una herramienta que permite realizar cálculos radioeléctricos en línea, para obtener un mapa de la zona de cobertura que tiene el nodo central (gateway LoRa); en el segundo se realizan medidas experimentales utilizando la gateway LoRa instalada en la azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, que emite una señal inalámbrica hacia la tarjeta LoRa/GPS encargada de medir el nivel de potencia de la señal recibida. Esta tarjeta se encuentra ubicada en un vehículo que se desplaza por diferentes zonas de la ciudad con el propósito de recolectar varios datos y obtener así un mapa de cobertura de la gateway de manera experimental.

Los parámetros de configuración para realizar la simulación de cobertura de LoRa en Xirio online, se muestran en la tabla 3.13.

---

<sup>12</sup> Conocer el alcance máximo de cobertura, permite para futuras implementaciones saber cuántas gateways LoRa se necesitan para cubrir la ciudad en su totalidad.



<b>Estudio de cobertura</b>	
<b>Categoría</b>	Internet de las cosas
<b>Subcategoría</b>	Internet de las cosas
<b>Servicio</b>	LoRa WAN
<b>Características del transmisor</b>	
<b>Ubicación</b>	Latitud: 02°26'48.18"N, longitud: 076°35'55.08"W, azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca
<b>Antena</b>	LoRa Omni 2.15 dBi
<b>Altura de antena</b>	15 m
<b>Frecuencia</b>	868 MHz
<b>Polarización</b>	Horizontal
<b>Longitud del feeder</b>	7 m
<b>Pérdidas del feeder</b>	1 dB
<b>Pérdidas pasivos</b>	1 dB
<b>Potencia</b>	20 dBm
<b>Características del receptor</b>	
<b>Antena</b>	LoRa Omni 2.15 dBi
<b>Altura de antena</b>	1.5 m
<b>Polarización</b>	Horizontal
<b>Longitud del feeder</b>	0.5 m
<b>Pérdidas del feeder</b>	0.5 dB
<b>Pérdidas pasivos</b>	0 dB
<b>S<sub>RX</sub></b>	-148 dBm
<b>Propiedades del método de cálculo</b>	
<b>Rec. UIT-R P.526-11</b>	Método basado en difracción. Válido para frecuencias mayores de 30 MHz. Empleado para servicios radioeléctricos en entornos rurales y mixtos. Se necesita de cartografía de media o alta resolución.
	Factor k: 1.333
	Margen de desvanecimiento: 0 dB
	Permitividad relativa: 30 tomado de Rec. UIT-R P.527-3
	Conductividad: 0.15 S/m tomado de Rec. UIT-R P.527-3
	Modelo de cálculo: obstáculo filo cuchillo.
<b>COST 231 Walfish-Ikegami</b>	Método determinístico válido para frecuencias de 800 MHz a 2 GHz. Recomendado para entornos urbanos en servicios móviles y acceso de banda ancha. Requiere cartografía urbana con información de edificios.
	Factor k: 1.333
	Margen de desvanecimiento: 0 dB
	Tipo de terreno: Ciudades de tamaño medio y entornos suburbanos con densidad moderada de vegetación.
	Pérdidas fijas en edificios: 12 dB

Tabla 3.13. Parámetros configurados en Xirio online.

Los métodos de cálculo presentados en la tabla 3.13, fueron escogidos porque son los que mejor se adaptan a las características del terreno. Cabe resaltar que, para obtener un resultado más acertado de la cobertura, se necesita de cartografía de media o alta resolución, y en algunos casos información del tipo de edificios





(estructura), datos con los que no se cuenta en esta prueba. Los resultados que Xirio online arrojó se presentan en las figuras 3.36 y 3.37.

Color	Rango	Descripción
Red	$[-110.00, -100.00]$ dBm	
Yellow	$[-100.00, -90.00]$ dBm	
Green	$[-90.00, \text{Infinity}]$ dBm	

Visualizar niveles de señal

Figura 3.35. Rangos de la señal.

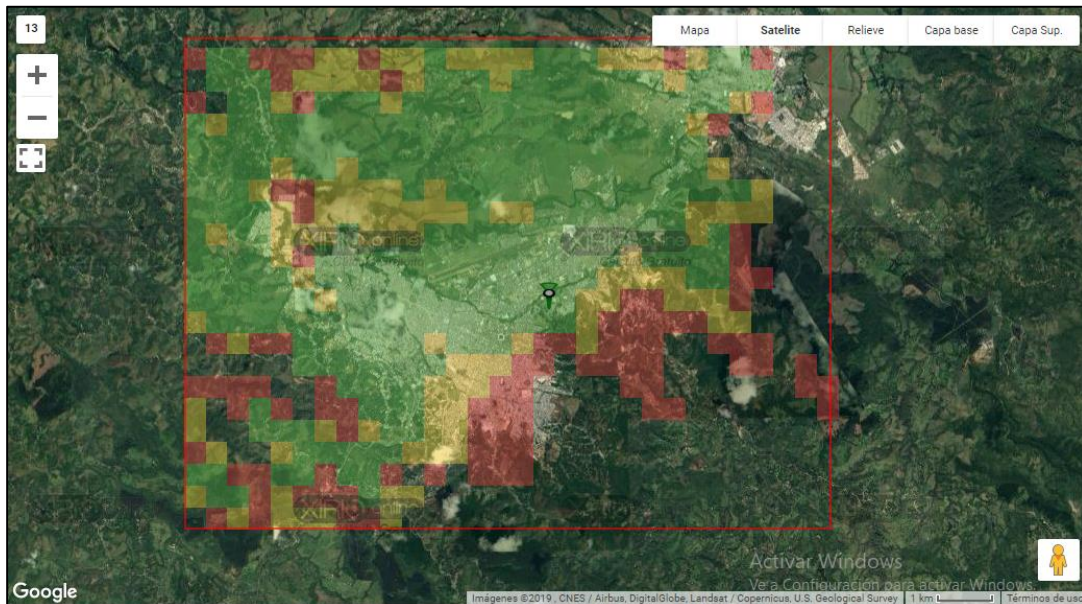


Figura 3.36. Cobertura de la OLG01 en Xirio online utilizando Rec. UIT-R P.526-11.

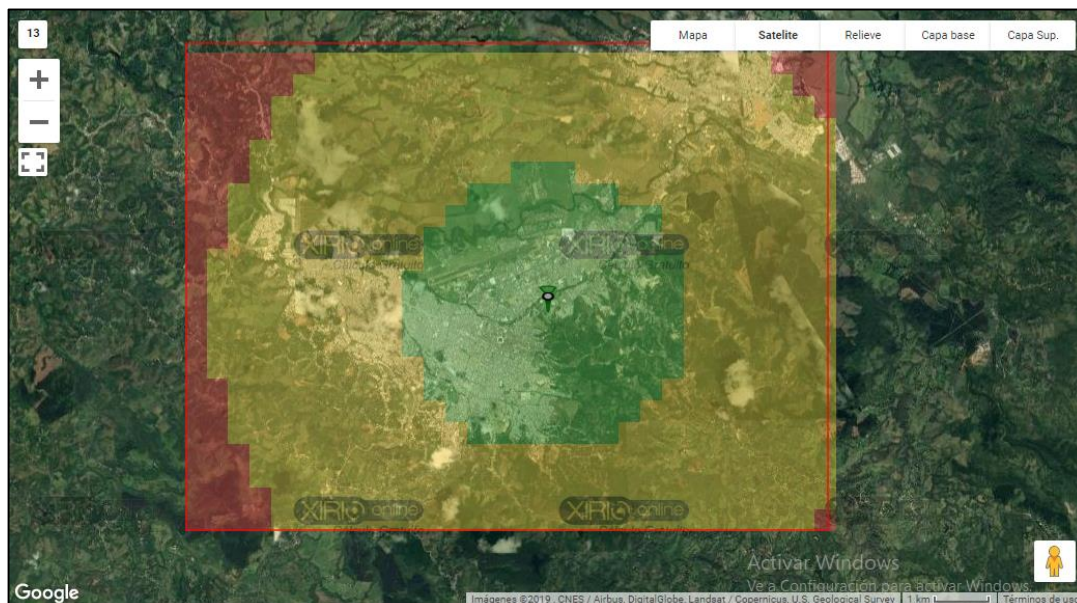


Figura 3.37. Cobertura de la OLG01 en Xirio online utilizando COST 231 Walfish-Ikegami.





En el caso experimental, se configuran los parámetros que se presentan en la tabla 3.14, los cuales fueron escogidos teniendo en cuenta las características de LoRa presentadas en el capítulo 2, siendo el SF, uno de los más importantes en cuanto al alcance de la comunicación, pues al aumentar este se obtiene un mayor rango de cobertura, pero la velocidad de transmisión de datos disminuye.

Radioenlace gateway LoRa – tarjeta LoRa/GPS	
SF	9, uno de los valores más altos permitidos por LoRa
BW	125 KHz
CR	4/5
Potencia de transmisión	20 dBm
Frecuencia de transmisión/recepción	868 MHz

Tabla 3.14. Características del radioenlace gateway LoRa - tarjeta LoRa/GPS.

La máxima cobertura experimental obtenida se aprecia en la figura 3.38.



Figura 3.38. Cobertura de la OLG01 con un SF de 9.

Teniendo en cuenta que un alto valor de SF provoca que la velocidad de transmisión de datos sea más lenta, se hace necesario realizar una prueba para conocer el rango de cobertura a un SF más bajo, y de esta manera aumentar la velocidad de transmisión de datos. Para este caso el SF establecido es de 7, que corresponde al que se configuró en las unidades que componen el sistema, razón por la cual el resultado de cobertura de esta prueba es igual al de la cobertura del prototipo como se aprecia en la figura 3.39.



Figura 3.39. Cobertura de la OLG01 con un SF de 7.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se aprecia que:

- Como solo se dispone de cartografía MDT (Modelo Digital de Terreno) la cual elimina digitalmente obstáculos, carreteras y vegetación y, no se cuenta con cartografía de media o alta resolución, en los casos donde se utilizó Xirio online el área de comunicación es mucho más amplia (brindando cobertura a toda la ciudad de Popayán) en comparación con los casos experimentales.
- El área de cobertura que muestra Xirio online es mayor a la especificada por los fabricantes de LoRa para entornos urbanos (2-5 Km), entre otras cosas porque esta herramienta no permite configurar parámetros como SF y BW que definen la sensibilidad del receptor y el alcance máximo de comunicación.
- En las figuras 3.38 y 3.39, se observa que el área de cobertura es mayor con un SF de 9 en comparación con un SF de 7, resaltando que para el SF más bajo los niveles de potencia de la señal recibidos fueron del orden de -70 dBm a -100 dBm, y para el SF más alto estos niveles estuvieron entre -90 dBm y -110 dBm, con lo que se corrobora que el SF si afecta la cobertura.

### 3.4.5. Refinamiento del Prototipo

Aspectos por mejorar:

- Evaluar el funcionamiento del prototipo cuando dos o más ambulancias se aproximan a la intersección.



- Implementar el prototipo en una intersección donde los parámetros de fiabilidad, retardo y cobertura puedan ser evaluados cuando la ambulancia viaja por todas las rutas.

Para cumplir con los aspectos mencionados, se necesita contar con más de una tarjeta LoRa/GPS (UaB), además de una intersección que posibilite una mejor visibilidad entre la UC y la UaB a través de las diferentes rutas; elementos con los que no se contaba, por tal razón el refinamiento del prototipo no se pudo llevar a cabo.

#### **3.4.6. Producto de Ingeniería**

Cuando se haya desarrollado el sistema final en base al prototipo, se prueba a fondo y se lleva a producción. Esta fase se deja para trabajos futuros.



## **CAPÍTULO 4: Conclusiones y Trabajos Futuros**

### **4.1. Introducción**

En el presente trabajo de grado se desarrolló un prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias bajo el concepto de ciudad inteligente, que permite reducir el tiempo de viaje de las ambulancias, haciendo uso de la tecnología LoRa integrada con Arduino. Para comprobar el correcto funcionamiento del prototipo se realizaron pruebas en un escenario específico de la ciudad de Popayán y se evaluaron parámetros como fiabilidad cobertura y retardo.

En este capítulo se presentan las conclusiones y posibles trabajos futuros que surgen a partir del trabajo de grado realizado, con el fin de dar continuidad al desarrollo de nuevos prototipos de gestión de movilidad semafórica para ambulancias.

### **4.2. Conclusiones**

A partir del trabajo realizado y la experiencia adquirida, se plantean las siguientes conclusiones:

1. Para el prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias existen varias tecnologías inalámbricas que permiten su desarrollo, algunas de estas fueron estudiadas en el capítulo 2, en el cual se concluyó que LoRa comparada con WiMAX, WiFi, Radio Trunking, Sistemas móviles celulares, Sistema propietario en 900 MHz y Sigfox , tiene una ventaja en cuanto a GPS incluido; por lo que resulta ser la más adecuada para el tipo de aplicaciones que requieren comunicaciones inalámbricas entre diferentes unidades que pueden o no estar en movimiento.
2. LoRa permite la configuración de los siguientes parámetros: factor de ensanchamiento (SF), ancho de banda (BW) y tasa de código (CR), los cuales afectan de manera directa la sensibilidad del receptor, la velocidad de transmisión de datos, la cobertura y la robustez del sistema frente a interferencias. Para el prototipo de gestión de movilidad semafórica, se concluye que la configuración más apropiada de estos parámetros al brindar una cobertura adecuada sin afectar significativamente la velocidad de transmisión de datos y la sensibilidad del receptor, es de: SF=7, BW=125 KHz y CR=4/5.



3. El funcionamiento del prototipo se evaluó mediante la fiabilidad y retardo del sistema, obteniendo como resultado una fiabilidad del 94% lo que indica que se hizo un control semafórico en casi la totalidad de las veces, brindando prioridad al carril por el que transita la ambulancia cuando se aproxima a la intersección, y un retardo máximo de 5 segundos considerado no crítico porque es menor en comparación con el tiempo empleado por la ambulancia para atravesar la intersección, si viajara a una velocidad de 80 Km/h.
4. Los resultados de la prueba de cobertura obtenidos experimentalmente sobre la ciudad de Popayán al instalar la gateway LoRa en la azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, arrojaron un rango aproximado al especificado por los fabricantes de LoRa para entornos urbanos (2 a 5 Km), aunque se presentaron pérdidas de la señal en algunas zonas debido a la presencia de obstáculos.
5. Con la realización de este trabajo de grado se demostró la viabilidad de usar la tecnología LoRa para el diseño e implementación de un prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias, esta tecnología permitió realizar comunicaciones a distancias alrededor de 2 Km, incluso con dispositivos en movimiento, con una velocidad de transmisión aceptable para una baja transferencia de datos. Además, aspectos como información de la cantidad promedio de tráfico acumulado en una intersección, ayudaron a establecer la distancia a la cual la ambulancia deber ser detectada para alcanzar a evacuarlo y las características del terreno influyeron en la ubicación de la unidad de control que determina la cobertura del sistema.

### **4.3. Trabajos Futuros**

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado pretenden ser la base para trabajos futuros, que busquen mejorar el prototipo planteado o desarrollar nuevos prototipos que sean más completos e innovadores y brindar así una solución más integra al problema de estudio. Para ello se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Ampliar la zona de cobertura, aumentando el número de intersecciones que se encuentren controladas por un sistema de gestión de movilidad semafórica para ambulancias, desarrollando además un mecanismo para evitar interferencias entre las unidades de control de diferentes intersecciones en caso de presentarse traslapes.
- Desarrollar una aplicación web en la que se pueda visualizar la mejor ruta para la ambulancia desde el lugar del incidente hasta el hospital más cercano, permitiendo además al equipo médico informar previamente sobre el



estado de salud del paciente al hospital, con el fin de que se tomen las medidas necesarias antes de la llegada del mismo al centro hospitalario.

- Utilizar una tecnología diferente de LoRa para la implementación de un prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias, bajo el concepto de ciudad inteligente, posteriormente evaluar el desempeño del sistema y comparar los resultados obtenidos con el prototipo del presente trabajo de grado.





## Referencias

- [1] El País. (2018). “El 68% de la población mundial vivirá en ciudades en 2050, dice la ONU”. [En línea]. Disponible en: <https://www.elpais.com.uy/vida-actual/poblacion-mundial-vivira-ciudades-dice-onu.html>
- [2] Smart Cities Council. (2018). “Smart Cities Readiness Guide”. [En línea]. Disponible en: <https://readinessguide.smartcitiescouncil.com/article/introduction-smart-cities?page=0%2C1>
- [3] A. R. Batista. “Ciudades inteligentes: seguridad, privacidad y acceso a la información pública”. *Suplemento de Derecho de Alta Tecnología - e/Dial.com*, Dic. 2014.
- [4] Series Y Supplement 45 UIT-T Y.4000 “Smart sustainable cities – An overview of smart sustainable cities and the role of information and communication technologies”. *UIT*, 2017.
- [5] European Innovation Partnership “What are smart cities?”. [En línea]. Disponible en: <http://www.ec.europa.eu/eip/smartcities>
- [6] J. I. Sánchez y F. J. García. “Gobierno y participación ciudadana en el nuevo modelo de ciudad, las TIC como herramienta en el desarrollo de la ciudad”. *Economía Industrial*, pp. 135–146, 2014.
- [7] M. Bouseka et al. “La ruta hacia las smart cities”. *Bid*, 2016.
- [8] IEEE Standards Association. (2019). “IEEE 802.16”. [En línea]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/search-results.html?q=IEEE+802.16>
- [9] M. Roodaki, K. Raahemifar y B. Raahemi. “Analysis of quality of services in LTE and mobile WiMAX”. *Comput. Electr. Eng.*, vol. 40, pp. 1508-1523, Jul. 2014.
- [10] A. S. Tanenbaum y D. J. Wetherall. “Redes de Computadoras”. 5a ed. *Estado de México, México: Pearson*, 2012.
- [11] IEEE 802.16. “IEEE 802.16 Published Standards and Drafts”. [En línea]. Disponible en: <http://www.ieee802.org/16/published.html>
- [12] IEEE Standards Association. (2019). “IEEE 802.11”. [En línea]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/search-results.html?q=IEEE+802.11>
- [13] J. J. Yunquera. “El estándar IEEE 802.11”, en *Diseño de una red WiFi para la E.S.I, Universidad de Sevilla*, pp. 36-51.
- [14] N. Ahmed, H. Rahman, y I. Hussain. “A comparison of 802.11ah and 802.15.4 for IoT”. *Department of Information Technology, North-Eastern Hill University, Shillong, India*, vol. 2, pp. 100–102, May. 2016.
- [15] S. Santi, L. Tian y J. Famaey. “IEEE 802.11ah restricted access window energy consumption model for NS-3”, en *Conf. Workshop on ns-3 (WNS3), Oporto, Portugal*, May. 2017.
- [16] WiFi Alliance. (2018). “WiFi HaLow”. [En línea]. Disponible en: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow>
- [17] A. Flores, R. Guerra y E. Knightly. “IEEE 802.11af: A standard for TV white space spectrum sharing”, en *IEEE Communications Magazine*, Oct. 2013.
- [18] J. M. Hernando, L. Tomás y J. Riera. “Sistemas de Radio telefonía móvil Privada”, en *Comunicaciones Móviles*. 3da ed. *Editorial universitaria Ramon Areces*, Jul. 2015.



- [19] M. Lopez, "Telefonía celular desde sus inicios hasta la actualidad". *Universidad Autónoma del Estado de México, México. Ensayo*, Ago. 2013.
- [20] M. Inzaurrealde, J. Isi y J. Garderes. (2010). "Telefonía celular". [En línea]. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/00291970620385388db75>
- [21] J. M. Huidobro. "SISTEMAS 3G Y 3.5G. UMTS Y HSPA.", en *Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE*. Editorial RA-MA, S.A, pp. 195- 202, Sep. 2014.
- [22] 3GPP. "Release 8". [En línea]. Disponible en: <https://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>
- [23] J. M. Huidobro. "SISTEMAS 4G. LTE", en *Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE*. Editorial RA-MA, S.A, pp. 257- 258, Sep. 2014.
- [24] N. Jaramillo, et al. "Tecnología 5G", en *Rev. Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, vol.8, pp. 41–45, Dic. 2017.
- [25] El Espectador. (2018). "La inminente revolución de la red 5G". [En línea]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/tecnologia/la-inminente-revolucion-de-la-red-5g-articulo-734108>
- [26] ECURED (2018). "Ubiquiti". [En línea]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Ubiquiti>
- [27] Ubiquiti Networks. (2018). "What is AirMax?". [En línea]. Disponible en: [https://dl.ubnt.com/AirMax\\_ppt.pdf](https://dl.ubnt.com/AirMax_ppt.pdf)
- [28] Aprendiendo Arduino. (2018). "Redes LPWAN". [En línea]. Disponible en: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/banda-ism/>
- [29] Sigfox. (2017, May). "Sigfox technical overview". [En línea]. Disponible en: <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- [30] Recomendación UIT-T Y.2060 "Descripción General de Internet de los Objetos". *UIT*, 2012.
- [31] (2018). "Semtech". [En línea]. Disponible en: <https://www.semtech.com/>
- [32] LoRa Alliance. (2018). "About LoRa Alliance". [En línea]. Disponible en: <https://loro-alliance.org/about-lora-alliance>
- [33] C. Fehri et al. "LoRa technology MAC layer operations and research issues", en *8th International Conference on Sustainable Energy Information Technology, SEIT. Porto, Portugal*, May. 2018.
- [34] LoRa Alliance. (2018). "What is the LoRaWAN specification?". [En línea]. Disponible en: <https://loro-alliance.org/about-lorawan>
- [35] U. Noreen, A. Bounceur y L. Clavier. "A Study of LoRa Low Power and Wide Area Network Technology", en *3rd International Conference on Advanced Technologies, Fez, Marruecos*, May. 2017
- [36] LoRaWAN. (2018). "¿Qué es LoRa y LoRaWAN?". [En línea]. Disponible en: <https://lorawan.es/>
- [37] RF Microwave. (2018). "Develop with LoRa for low-rate, long-range IoT applications". [En línea]. Disponible en: <https://www.mwee.com/design-center/develop-lora-low-rate-long-range-iot-applications>
- [38] R. M. Vozmediano, R. S. Montero, y J. C. Fabero. "Acceso múltiple y redes de área local". *Universidad Complutense de Madrid*. [En línea]. Disponible en: <http://www.fdi.ucm.es/profesor/rubensm/redes/Trasparencias/Tema%204.pdf>





f

- [39] A. Augustin, T. Clausen y W. Townsley. "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Network for the Internet of Things", en *Sensors*, Sep. 2016.
- [40] (2018). "Modulación LoRa: Long Range Modulation". [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/pruebas-de-laboratorio-de-la-modulaci%C3%B3n-lora/modulaci%C3%B3n-lora-4ad74cabd59e>
- [41] Semtech Corporation. (2015). LoRa™ Modulation Basics. [En línea]. Disponible en: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [42] J. Gallardo. "Estudio de un sistema CDMA-OFDM. Capítulo 3:CDMA. Principios Básicos". *Trabajo de Grado, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Sevilla, España*, pp. 50, Jun. 2006.
- [43] LoRa Alliance. (2018). "LoRaWAN security full end to end encryption for IoT Application providers". [En línea]. Disponible en: [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lora\\_alliance\\_security\\_whitepaper.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lora_alliance_security_whitepaper.pdf)
- [44] MegaPractical. Soluciones de Negocio (2017). "Top 5 Metodologías de Desarrollo de Software". [En línea]. Disponible en: <https://www.megapractical.com/blog-de-arquitectura-soa-y-desarrollo-de-software/metodologias-de-desarrollo-de-software>
- [45] CareerFoundry (2019). "What is a prototype?". [En línea]. Disponible en: <https://careerfoundry.com/en/blog/ux-design/design-thinking-stage-four-prototyping/#2-what-is-a-prototype>
- [46] Usability.gov (2019). "Prototyping". [En línea]. Disponible en: <https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/prototyping.html>
- [47] Formlabs (2019). "Ultimate Guide to Prototyping Tools for Hardware and Product Design". [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-prototyping-tools-for-hardware-and-product-design/>
- [48] T. Granollers. (2019). "Modelo de Proceso de la Ingeniería de la Usabilidad y de la Accesibilidad". *Universidad de Lleida*. [En línea]. Disponible en: [http://www.disenomovil.mobi/multimedia\\_un/05\\_wireframes/TesisTGranollers\\_PROTOTIPADO.pdf](http://www.disenomovil.mobi/multimedia_un/05_wireframes/TesisTGranollers_PROTOTIPADO.pdf) entre sus ventajas permite o tiende a resolver un conjunto de problemas y da una idea clara del proceso funcional del sistema
- [49] L. Baena. (2011). "Diseño y Prototipado". *Universidad Pontificia de Salamanca*. [En línea]. Disponible en: [http://www.colimbo.net/documentos/documentacion/fipo/IPO04-Disenno\\_y\\_prototipado.pdf](http://www.colimbo.net/documentos/documentacion/fipo/IPO04-Disenno_y_prototipado.pdf)
- [50] A. Campos (2019). "Metodología Prototipos". *Universidad Pontificia de Salamanca*. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/ajacj93/metodologia-y-prototipo>
- [51] Computer Notes (2019). "Prototyping Model in Software Engineering". [En línea]. Disponible en: <http://ecomputernotes.com/software-engineering/explain-prototyping-model>
- [52] (2007). "Modelo de Prototipos". [En línea]. Disponible en: <http://cflores334.blogspot.es/1192848180/>
- [53] Guru99 (2019). "Prototyping Model in Software Engineering: Methodology, Process, Approach". [En línea]. Disponible en: <https://www.guru99.com/software-engineering-prototyping-model.html>
- [54] EcuRed (2019). "Modelo de Prototipos". [En línea]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/Modelo\\_de\\_prototipos](https://www.ecured.cu/Modelo_de_prototipos)
- [55] Dragino. (2018, Feb 21). "LoRa GPS shield for arduino". [En línea].



- Disponible en: <http://www.dragino.com/products/lora/item/108-lora-gps-shield.html>, Feb 2011*
- [56] Arduino. (2018). "Arduino products". [En línea]. *Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>*
- [57] Arduino. (2018). "Arduino uno". [En línea]. *Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>*
- [58] I. Rodríguez. "Diseño e Implementación de aplicaciones basadas en GPS y GSM". *Trabajo de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI), Universidad de Sevilla, Sevilla, España.*
- [59] NMEA. "National Marine Electronics Association". [En línea]. *Disponible en: <https://www.nmea.org/>*
- [60] ARISTASUR. (2019). "Sistema de coordenadas geográficas: UTM". [En línea]. *Disponible en: <https://www.aristasur.com/contenido/sistema-de-coordenadas-geograficas-utm>*
- [61] Dragino. "LG01 LoRa gateway user manual". [En línea]. *Disponible en: [http://www.dragino.com/downloads/downloads/UserManual/LG01\\_LoRa\\_Gateway\\_User\\_Manual.pdf](http://www.dragino.com/downloads/downloads/UserManual/LG01_LoRa_Gateway_User_Manual.pdf)*
- [62] "Aprende a convertir coordenadas geográficas en UTM y UTM en geográficas". [En línea]. *Disponible en [https://www.academia.edu/9291952/Aprende\\_a\\_convertir\\_coordenadas\\_geograficas\\_en\\_UTM\\_y\\_UTM\\_en\\_geograficas](https://www.academia.edu/9291952/Aprende_a_convertir_coordenadas_geograficas_en_UTM_y_UTM_en_geograficas)*
- [63] Dragino. (2018, Feb 21). "LoRa shield for arduino". [En línea]. *Disponible en: <http://www.dragino.com/products/module/item/102-lora-shield.html>*
- [64] Recomendación UIT-R M.1224 "Vocabulario de Términos de las telecomunicaciones Móviles Internacionales -2000 (IMT-2000)". UIT, 1997.
- [65] Glosario Telecomunicaciones. (2018). "Retardo". [En línea]. *Disponible en: <https://glosarios.servidor-alicante.com/telecomunicaciones/retardo>*
- [66] Radio Comunicaciones. (2018). "Patrón de Radiación". [En línea]. *Disponible en: <http://www.radiocomunicaciones.net/radio/teoria-de-antenas/>*

**Prototipo de Gestión de Movilidad Semafórica para Ambulancias,  
Bajo el Concepto de Ciudad Inteligente**

**ANEXO A**

**Documento final de trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Deicy Rossana Mompotes Pizo  
Javier Alberto Muñoz Narvaez**

**Directora: Mag. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, 2019**

# Conversión de Coordenadas Geográficas a Cartesianas UTM

Para la conversión de coordenadas geográficas a cartesianas UTM se utilizaron las fórmulas de Coticchia-Surace, estas ecuaciones fueron planteadas por Alberto Coticchia y Luciano Surace en el "Bolletino di Geodesia e Science Affini", Num. 1 [62].

## A.1. Cálculos previos

### A.1.1. Sobre la geometría del elipsoide

Para los cálculos se necesitan el semi eje mayor y menor del elipsoide de Hayford

- Semieje mayor(a): 6378388.0
- Semieje menor (b): 6356911.946130

Se procede a calcular la excentricidad, la segunda excentricidad y el radio polar de curvatura:

- Excentricidad

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

- Segunda excentricidad

$$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$$

- Radio polar de la tierra

$$c = \frac{a^2}{b}$$

### A.1.2. Sobre la longitud y la latitud

La latitud y la longitud que están definidas en grados minutos y segundos se convierten a grados decimales y posteriormente a radianes, así:

- $Grados\ decimales = grados + \frac{minutos}{60} + \frac{segundos}{3600}$

- $Radianes = \frac{Grados\ decimales * \pi}{180}$

- Longitud en grados decimales: Xgd
- Latitud en grados decimales: Ygd
- Longitud en Radianes: x
- Latitud en Radianes: y

### A.1.3. Sobre el huso horario

En la proyección UTM se utiliza el cilindro transverso como superficie desarrollable, este se gira virtualmente para definir los diferentes husos que rodean la tierra, como se observa en la figura A.1

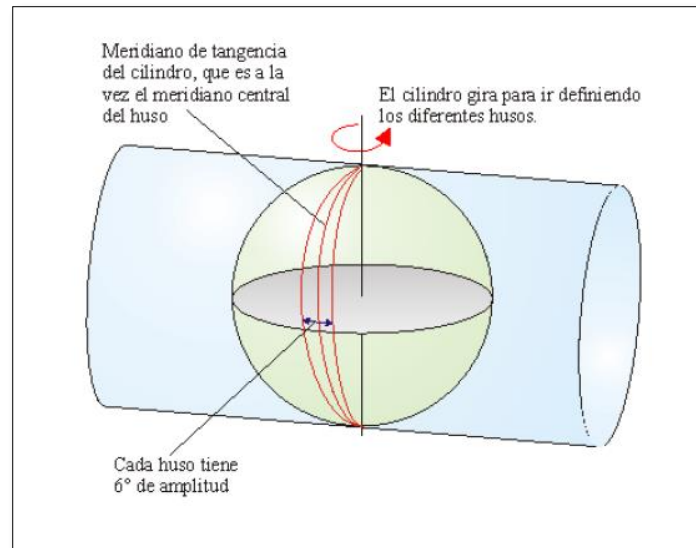


Figura A 1. Cilindro transverso. A.

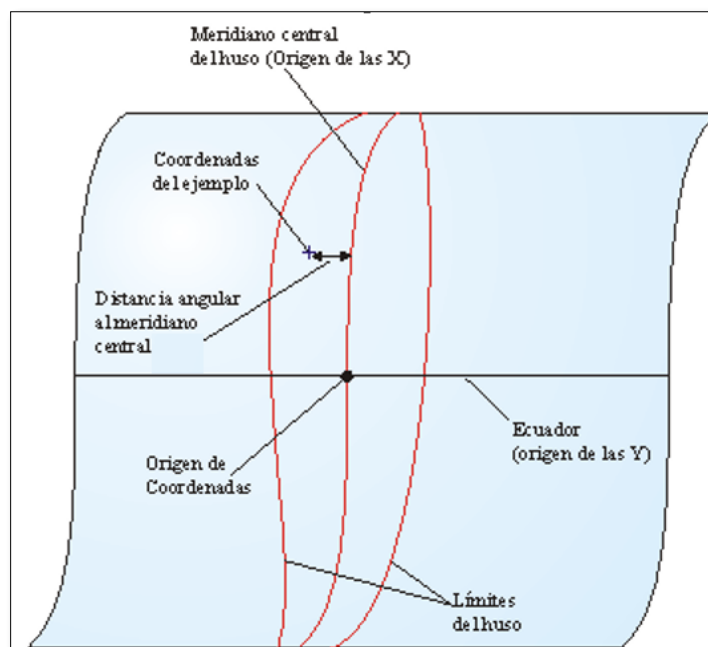


Figura A 2. Cilindro transverso. B.

Para evitar las coordenadas X negativas al lado izquierdo del meridiano central se suma la cantidad de 500000, y para evitar las coordenadas negativas del eje Y, que se encuentran al sur del Ecuador se suma el valor de 10000000

Se procede a hallar el huso o zona UTM:

- $Huso = \text{entero de } \left[ \frac{X_{gd}}{6} + 31 \right]$

El siguiente paso es encontrar el meridiano central del huso:

- $x_0 = (Huso * 6) - 183$

Ahora se calcula la distancia angular que existe entre la longitud del punto y el meridiano central del huso, como se aprecia en la figura A.2

- $\Delta x = x - \frac{x_0 * \pi}{180}$

## A.2. Fórmulas Coticchia-Surace para convertir las coordenadas geográficas a cartesianas UTM

- $A = \cos y * \text{sen } \Delta x$

- $E = \frac{1}{2} * \ln \frac{1+A}{1-A}$

- $\eta = \arctan \left[ \frac{\tan y}{\cos \Delta x} \right] - y$

- $v = \frac{c}{(1+e'^2 * \cos^2 y)^{\frac{1}{2}}} * 0.9996$

- $\mathcal{E} = \frac{e'^2}{2} * E^2 * \cos^2 y$

- $A_1 = \text{sen}(2y)$

- $A_2 = A_1 * \cos^2 y$

- $J_2 = y + \frac{A_1}{2}$

- $J_4 = \frac{3 * J_2 + A_2}{4}$

- $J_6 = \frac{5 * J_4 + A_2 * \cos^2 y}{3}$

- $\alpha = \frac{3}{4} * e'^2$

- $\beta = \frac{5}{3} * \alpha^2$

- $\gamma = \frac{35}{27} * \alpha^3$

- $B_0 = 0.9996 * c * (y - \alpha * J_2 + \beta * J_4 - \gamma * J_6)$

Finalmente se hallan las coordenadas UTM

- $X_{UTM} = E * v * \left(1 + \frac{\epsilon}{3}\right) + 500000$

- $Y_{UTM} = \eta * v * (1 + \epsilon) + B_0$

Si la latitud se encuentra en el hemisferio sur del Ecuador se suma el valor de 10000000, así:

- $Y_{UTM} = \eta * v * (1 + \epsilon) + B_0 + 10000000$



**Prototipo de Gestión de Movilidad Semafórica para Ambulancias,  
Bajo el Concepto de Ciudad Inteligente**

**ANEXO B**

**Documento final de trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Deicy Rossana Mompotes Pizo  
Javier Alberto Muñoz Narvaez**

**Directora: Mag. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, 2019**

# Configuración de Xirio Online para las pruebas de Cobertura del Sistema.

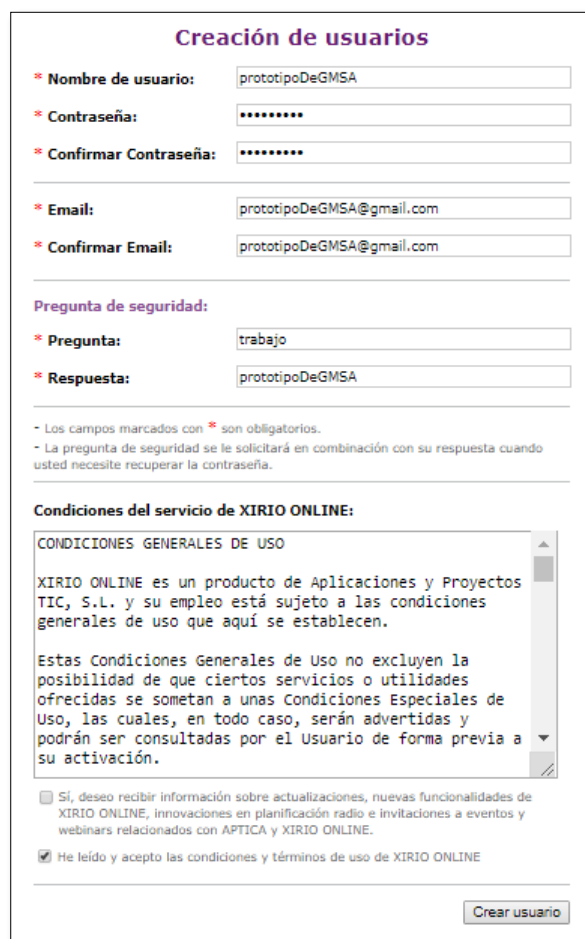
## B.1. Presentación

El anexo B presenta cómo se utiliza la herramienta de Xirio Online para realizar cálculos radioeléctricos, en este caso se usa para determinar la cobertura del sistema (establecida por la gateway LoRa).

## B.2. Procedimientos

A continuación, se muestran los pasos requeridos para determinar la cobertura del sistema de forma teórica:

Paso 1. Para iniciar, en la página principal de Xirio se selecciona la opción de PlanningTool, se registra un nuevo usuario y se inicia sesión, como se indica en las figuras B.1 y B.2 respectivamente.



The image shows a web form titled "Creación de usuarios" (User Creation). It contains several input fields for user registration:

- \* Nombre de usuario:** Input field containing "prototipoDeGMSA".
- \* Contraseña:** Password input field with masked characters.
- \* Confirmar Contraseña:** Confirm password input field with masked characters.
- \* Email:** Input field containing "prototipoDeGMSA@gmail.com".
- \* Confirmar Email:** Confirm email input field containing "prototipoDeGMSA@gmail.com".
- Pregunta de seguridad:**
  - \* Pregunta:** Input field containing "trabajo".
  - \* Respuesta:** Input field containing "prototipoDeGMSA".

Below the fields, there are two lines of explanatory text:

- Los campos marcados con \* son obligatorios.
- La pregunta de seguridad se le solicitará en combinación con su respuesta cuando usted necesite recuperar la contraseña.

Next is a section titled "Condiciones del servicio de XIRIO ONLINE:" which includes a scrollable text area with the following content:

CONDICIONES GENERALES DE USO

XIRIO ONLINE es un producto de Aplicaciones y Proyectos TIC, S.L. y su empleo está sujeto a las condiciones generales de uso que aquí se establecen.

Estas Condiciones Generales de Uso no excluyen la posibilidad de que ciertos servicios o utilidades ofrecidas se sometan a unas Condiciones Especiales de Uso, las cuales, en todo caso, serán advertidas y podrán ser consultadas por el Usuario de forma previa a su activación.

At the bottom of this section, there are two checkboxes:

- Sí, deseo recibir información sobre actualizaciones, nuevas funcionalidades de XIRIO ONLINE, innovaciones en planificación radio e invitaciones a eventos y webinars relacionados con APTICA y XIRIO ONLINE.
- He leído y acepto las condiciones y términos de uso de XIRIO ONLINE.

A "Crear usuario" button is located at the bottom right of the form.

Figura B 1. Creación un nuevo usuario en Xirio Online.



Figura B 2. Inicio de sesión en Xirio Online.

Paso 2. Después de ingresar a la herramienta, se procede a crear un nuevo estudio y se configuran todos los aspectos requeridos.

Paso 3. Al crear un nuevo estudio, el primer requisito es seleccionar la tecnología, en este caso LoRaWAN, como se muestra en la figura B.3.

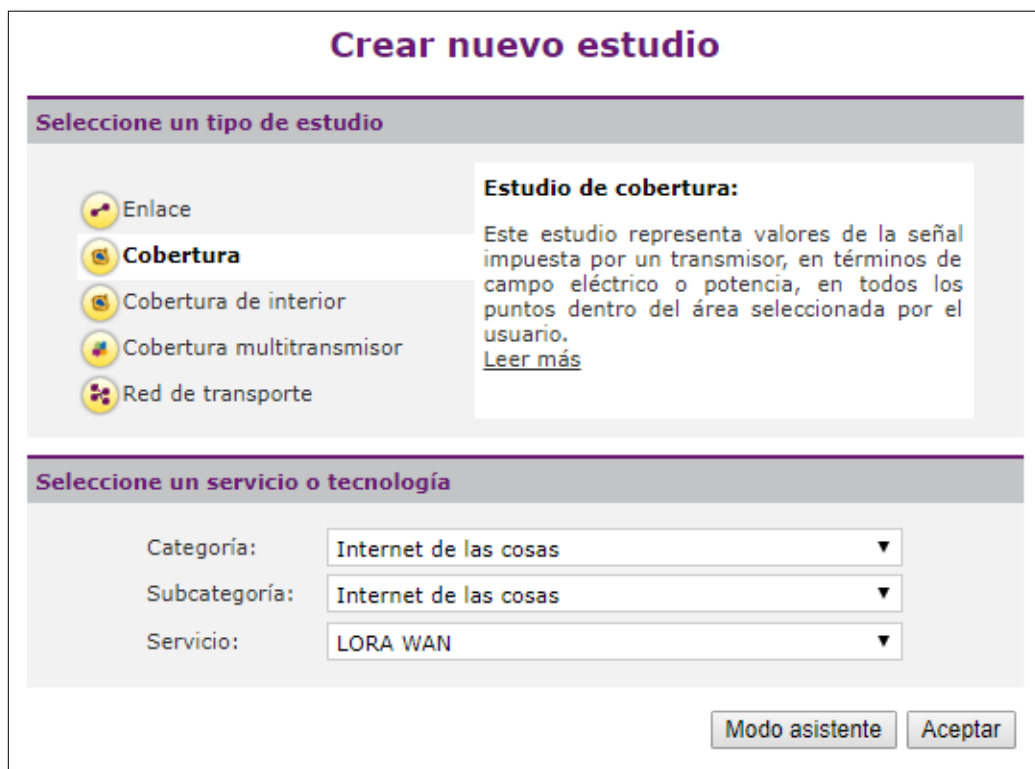


Figura B 3. Selección de tecnología en Xirio Online.

Paso 4. Seguidamente se da un nombre al estudio.

Paso 5. Luego se configura la ubicación del transmisor, en este caso se selecciona el lugar en donde se encuentra la OLG01 (unidad de control del sistema).

### Nombre y ubicación del transmisor

**Transmisor**

**Nombre:**

Identifica el transmisor en XIRIO ONLINE.

---

**Coordenadas**

**Latitud:**

**Longitud:**

Figura B 4. Ubicación del transmisor en Xirio Online.

Paso 6. Se realizan las configuraciones del transmisor como se observa en la figura B.5.

### Configuración de parámetros de transmisión

**Parámetros de transmisión** [Ayuda ?](#)

Los parámetros de radio del transmisor se han configurado automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio. Es conveniente que revise y personalice los mismos.

**Antena:**

**Altura antena:**  m

**Orientación:**  [0,359]

**Inclinación:**  [-90,90]

---

**Frecuencias de transmisión**

Frecuencias
868.000 MHz

**Polarización:**  ▼

---

**Feeder:**

**Longitud del feeder:**  m

**Pérdidas del feeder:**  dB

**Pérdidas pasivos:**  dB

---

**Potencia:**  dBm ▼

Figura B 5. Configuración del transmisor en Xirio Online.

Paso 7. Se configuran los parámetros de recepción, estos se presentan en la figura B.6.

### Configuración de parámetros de recepción

[Ayuda ?](#)

**Parámetros de recepción**

Los parámetros de recepción se han configurado automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio. Es conveniente que revise y personalice los mismos.

**Antena:**  📄 ✖ 🔄

**Altura antena:**  m

---

**Polarización:**  ▼

---

**Feeder:**  ➕ 🔄

**Longitud del feeder:**  m

**Pérdidas del feeder:**  dB 📄

**Pérdidas pasivos:**  dB

---

**Umbral recepción:**  Campo  Potencia

dBm ▼

Figura B 6. Configuración del receptor en Xirio Online.

Paso 8. Se selecciona y configura el método de cálculo, en este caso se utiliza la Rec. UIT-R P.526-11 y se aprecia en la figuras B.7 y B.8.

### Método de cálculo

**Nombre:**

**Método de propagación:**  ▼

📄 Método determinístico basado en difracción. Válido para frecuencias mayores de 30 MHz. Empleado en todos los servicios radioeléctricos en entornos rurales y mixtos siempre que se disponga de cartografía de media o alta resolución.

**Resolución:**  m/pixel

---

#### Parámetros básicos

**Cálculo automático de factor K**

**Factor K:**  📄

**Margen de desvanecimiento:**  dB

---

#### Propiedades de Rec. UIT-R P.526

**Modelo de cálculo:**  ▼

---

**Características eléctricas de la superficie de la Tierra:**

**Permitividad relativa:**

**Conductividad:**  S/m

Figura B 7. Configuración método de cálculo en Xirio Online A.

**Propiedades de Rec. UIT-R P.526**

Modelo de cálculo: Automático

**Características eléctricas de la superficie de la Tierra:**

Permitividad relativa: 30

Conductividad: 0.15 S/m

Corrección empírica: C = 10 + 0.04 D

---

**Penetración en edificios**

No aplicar  
 No calcular en edificios  
 Calcular sólo en azoteas  
 Pérdidas fijas en edificios  
 Receptor ubicado en el interior del edificio

Pérdidas fijas: 12 dB

Tipo de cálculo: Pérdidas menos restrictivas

Pérdidas horizontales: 0.6 dB/m

Pérdidas verticales: 5 dB/piso

Metros por piso: 3 m

Receptor ubicado en el piso: 0

Si la altura del receptor es mayor que la del edificio se considerará que el receptor está ubicado en la azotea.


Figura B 8. Configuración método de cálculo en Xirio Online B.


Paso 9. Se establece el área de cálculo y se define los rangos de señal.

### Configuración de área de cálculo




**Área de cálculo**

**i** El área de cálculo define los puntos donde se va a realizar el cálculo de señal recibida. Puede introducir manualmente las coordenadas de este área o dibujarla directamente sobre el visor.

 Dibujar sobre el visor el área de cálculo

 Actualizar posición del área sobre el visor

	Latitud	Longitud
Esquina NorOeste	02°27'16.95"N	076°36'16.64"W
Esquina SurEste	02°26'29.95"N	076°35'08.50"W

[< Anterior](#)
[> Siguiente](#)
[> Cancelar](#)

Figura B 9. Configuración área de cálculo en Xirio Online.



Figura B 10. Configuración rangos de señal en Xirio Online.

Paso 10. Finalmente se realiza el cálculo del estudio y se obtiene el resultado que se observa en la figura B.11.

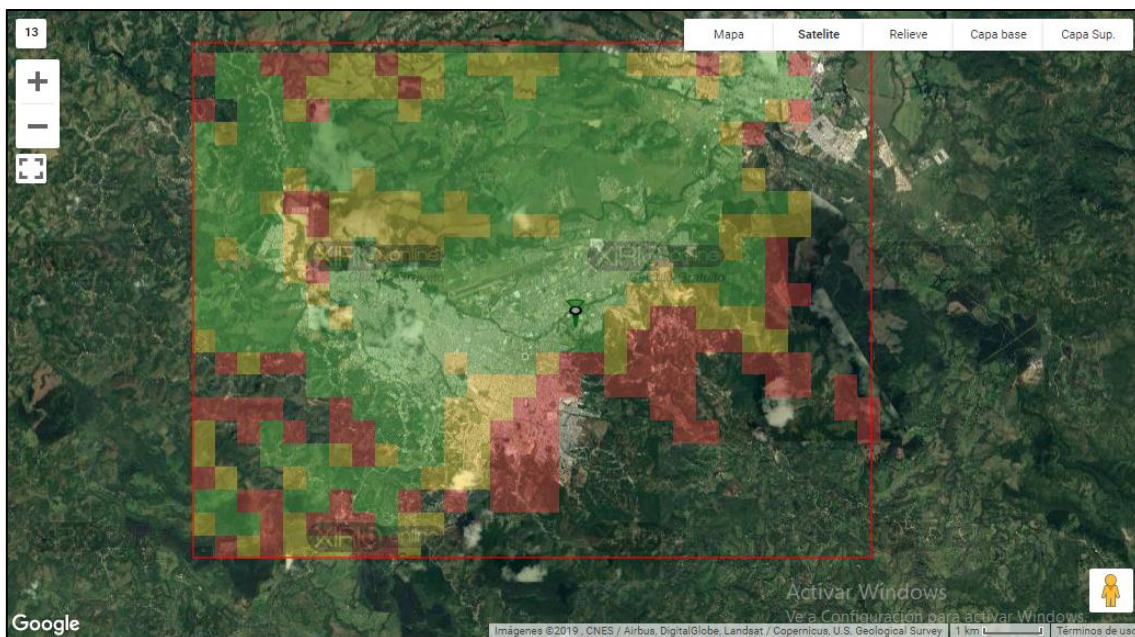


Figura B 11. Cálculo del estudio en Xirio Online.



**Prototipo de Gestión de Movilidad Semafórica para Ambulancias,  
Bajo el Concepto de Ciudad Inteligente**

**ANEXO C**

**Documento final de trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Deicy Rossana Mompotes Pizo  
Javier Alberto Muñoz Narvaez**

**Directora: Mag. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, 2019**

# Manual de Configuración de la OLG01.

## C.1. Presentación

El prototipo de gestión de movilidad semafórica para ambulancias cuenta con un nodo central encargado de realizar el mayor número de tareas, este corresponde a la gateway OLG01, para su uso se realizan una serie de configuraciones las cuales se muestran en este anexo.

## C.2. Procedimientos

A continuación, se presenta cómo se configuró la OLG01 para implementarla en el prototipo.

1. Conectar vía Ethernet al PoE para el suministro de corriente y desde este al computador que controla esta unidad, como se muestra en la figura C.1.

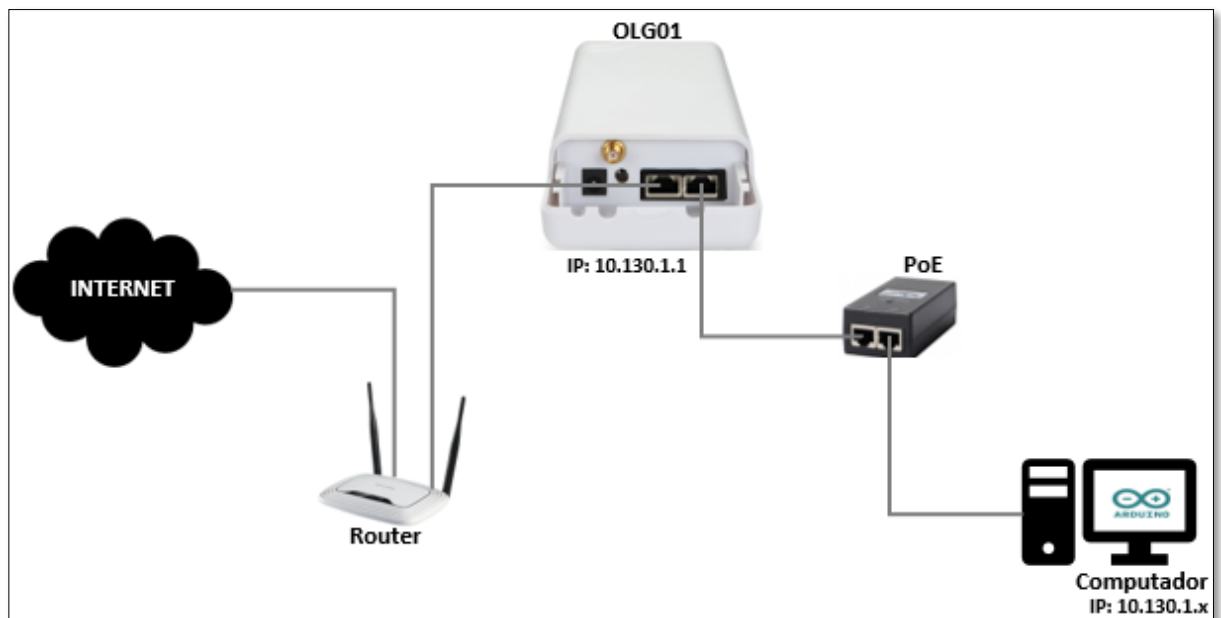


Figura C 1. Conexión OLG01.

2. Descargar y configurar arduino IDE en el computador que controla esta unidad:
  - Descargar arduino IDE desde el sitio oficial: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
  - Una vez instalado, haciendo clic en Archivo -> Preferencias, se añade en gestor de URLs adicionales de tarjetas la URL:

[http://www.dragino.com/downloads/downloads/YunShield/package\\_dragino\\_yun\\_test\\_index.json](http://www.dragino.com/downloads/downloads/YunShield/package_dragino_yun_test_index.json)  
Este proceso se presenta en las imágenes C.2 y C.3.

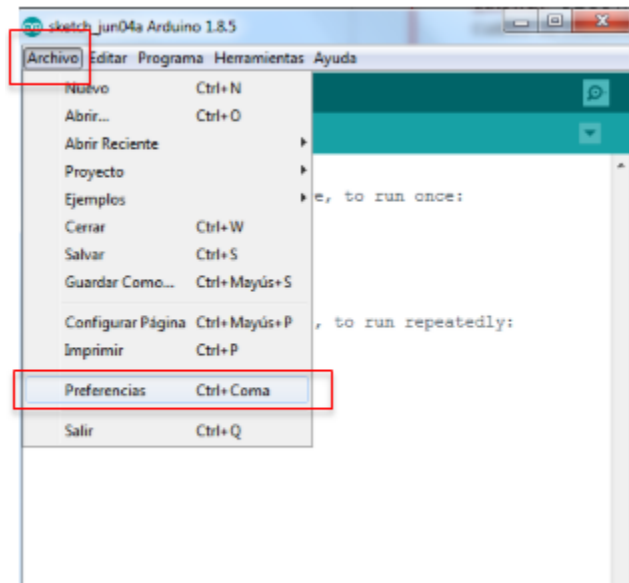


Figura C 2. Acceso a preferencias en arduino.

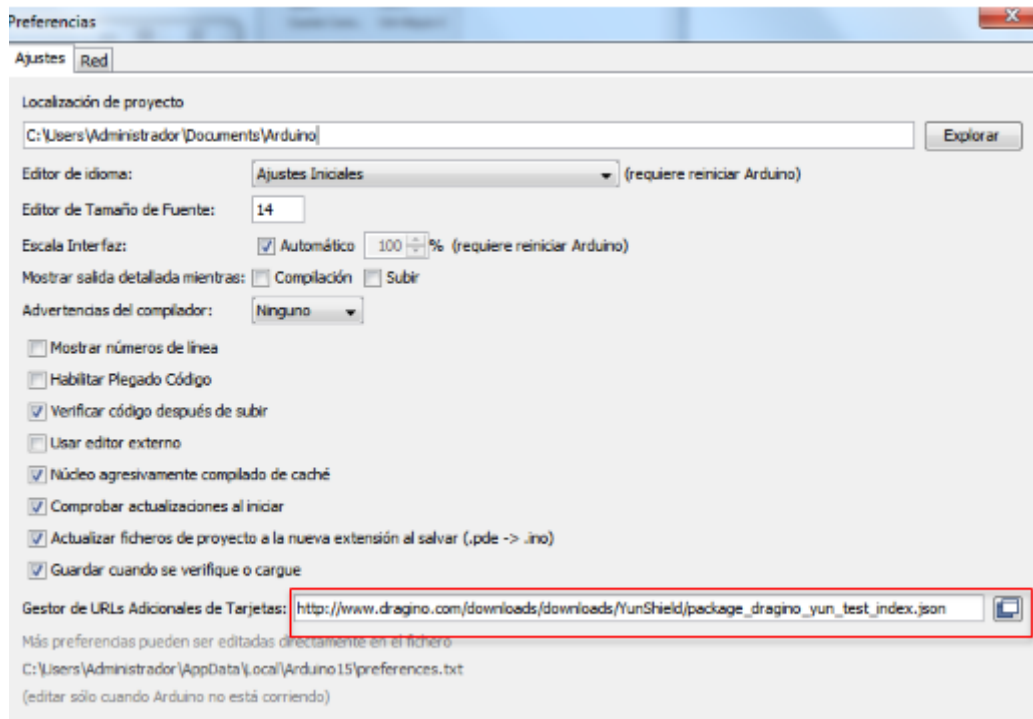


Figura C 3. Añadir nueva URL en gestor de URLs adicionales de tarjetas de arduino.

- Luego hacer clic en Herramientas -> Placa -> Gestor de tarjetas, e instalar la tarjeta Dragino como se muestra en las figuras C.4 y C.5.

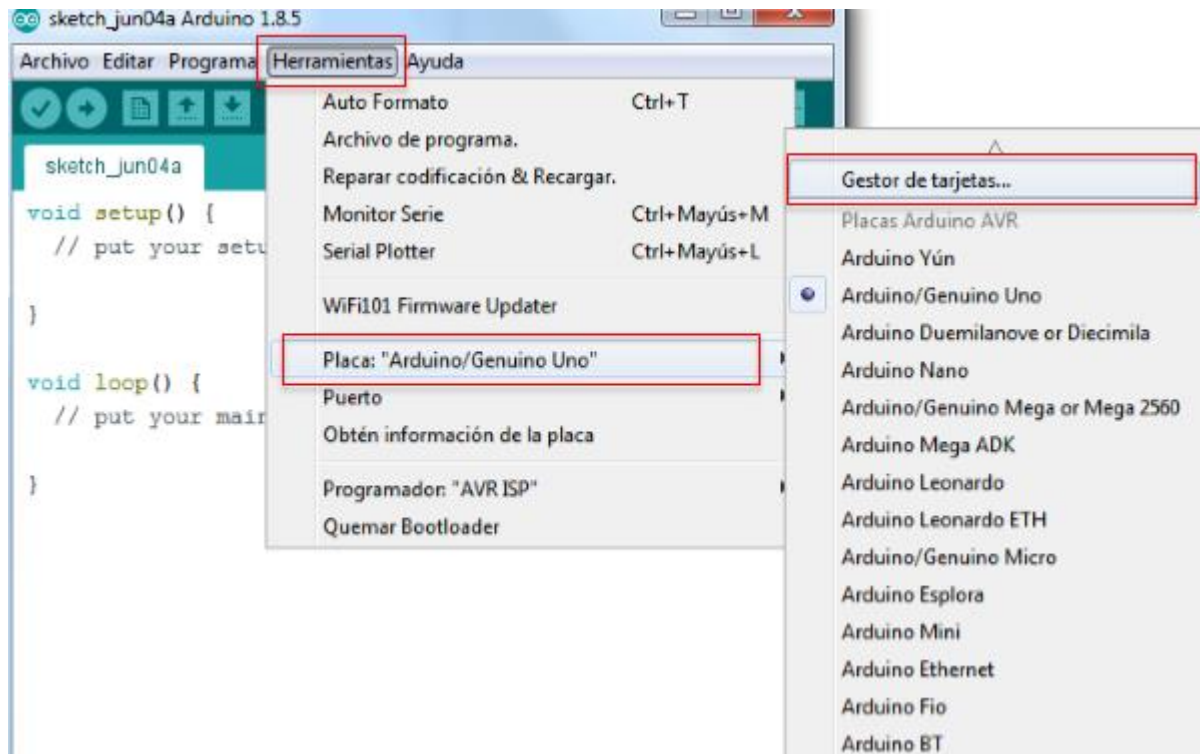


Figura C 4. Selección del gestor de tarjetas de arduino.

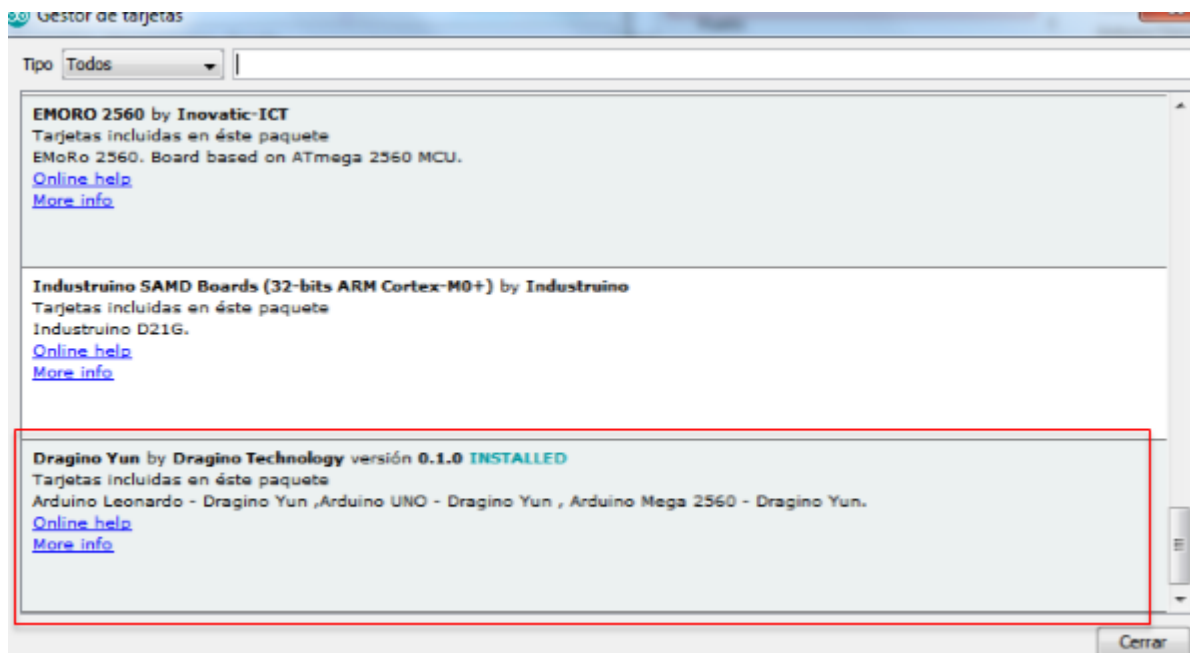


Figura C 5. Instalación tarjeta Dragino Yun en arduino.

- Después de instalar la tarjeta Dragino, en la sección de placas de arduino se observan las diferentes tarjetas, en este caso se selecciona la Dragino Yun-UNO or LG01/OLG01 como se aprecia en la figura C.6.

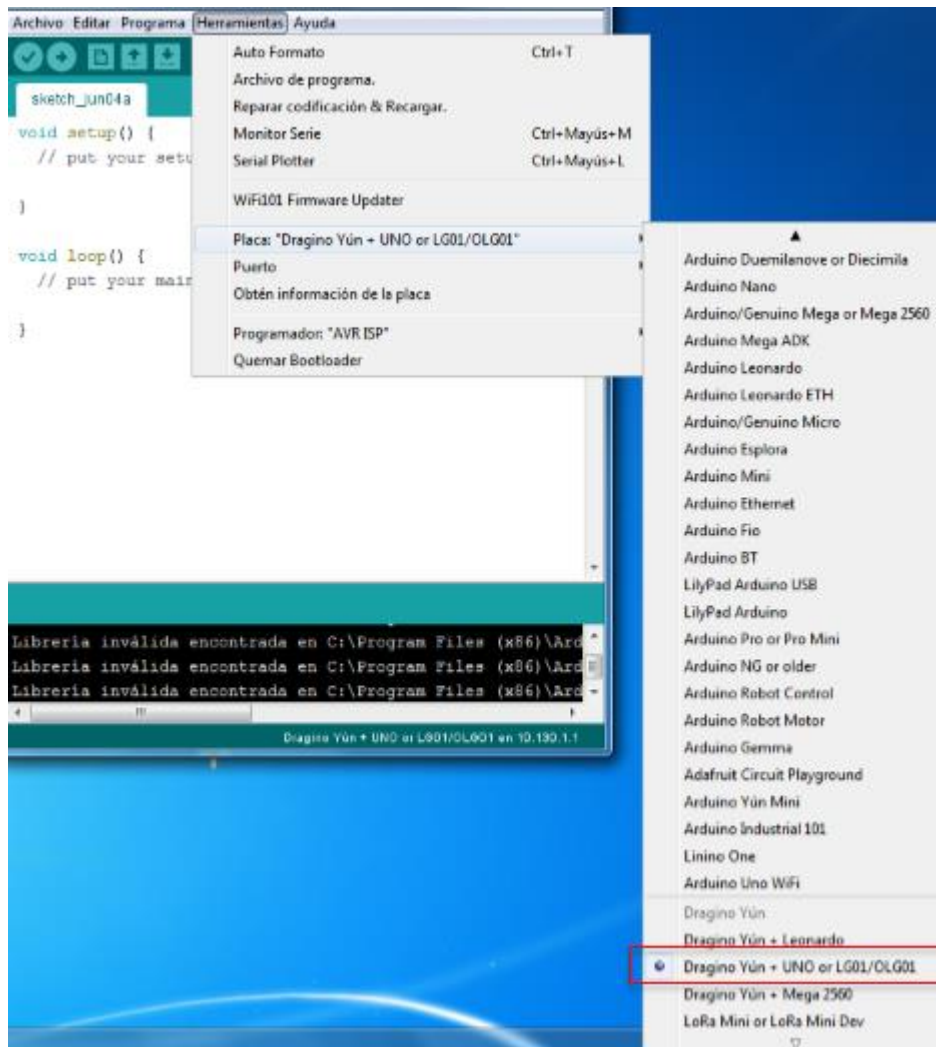


Figura C 6. Selección Dragino Yun-UNO or LG01/OLG01 en arduino.

- Finalmente, para subir los códigos a la OLG01, se selecciona el puerto correcto como se muestra en la figura C.7, en este caso se escoge el que trae por defecto que es el 10.130.1.1.

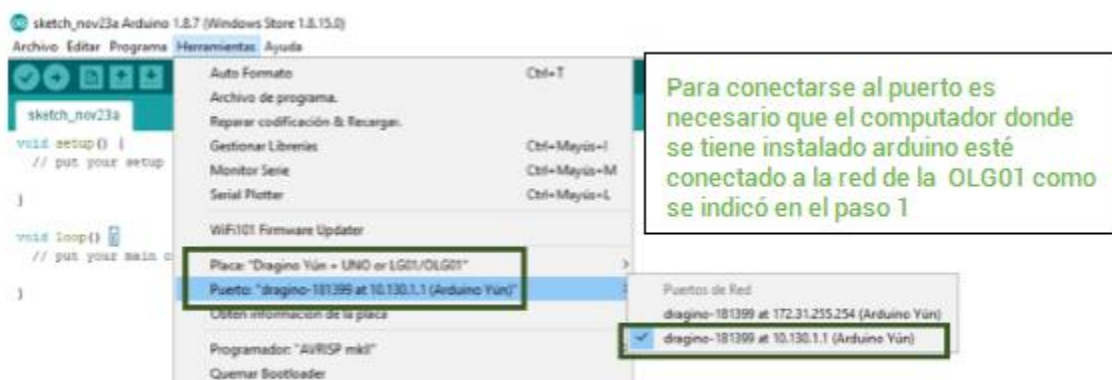


Figura C 7. Selección puerto 10.130.1.1 en arduino.