

**FRAMEWORK CONCEPTUAL PARA EL CONTROL VEHICULAR EN EL  
MUNICIPIO DE BUCARAMANGA BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS**

**EDWARD JAVIER PAEZ MANRRIQUE  
JAIME ALBERTO SANDOVAL SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA – UNAB  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS  
PROYECTO DE GRADO I  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA  
BUCARAMANGA, MAYO 31 DE 2019**

**FRAMEWORK CONCEPTUAL PARA EL CONTROL VEHICULAR EN EL  
MUNICIPIO DE BUCARAMANGA BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS**

**EDWARD JAVIER PAEZ MANRRIQUE  
JAIME ALBERTO SANDOVAL SANDOVAL**

**Proyecto de Trabajo de Grado de Ingeniería de Sistemas**

**Director:  
Diana Teresa Parra Sánchez**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA – UNAB  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS  
PROYECTO DE GRADO I  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA  
BUCARAMANGA, MAYO 31 DE 2019**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
3. OBJETIVOS .....	10
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	10
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
4. MARCO REFERENCIAL .....	11
4.1 MARCO CONCEPTUAL .....	11
4.2 MARCO TEÓRICO .....	12
4.3 ESTADO DEL ARTE .....	18
4.4 MARCO LEGAL .....	27
5. METODOLOGÍA.....	29
6. RESULTADOS OBTENIDOS .....	30
6.1 ESTADO DEL ARTE SOBRE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS DE INTERNET DE LAS COSAS PARA EL CONTROL VEHICULAR .....	30
6.2 DIAGNÓSTICO SOBRE EL CONTROL VEHICULAR EN EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA .....	31
6.3 FRAMEWORK CONCEPTUAL PARA EL CONTROL VEHICULAR BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS .....	56
7. DISCUSIÓN .....	77
8. CONCLUSIONES.....	79
9. TRABAJO FUTURO .....	80
REFERENCIAS.....	81

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Parque automotor de Bucaramanga .....	7
Figura 2. Evolución histórica del parque automotor .....	8
Figura 3. La nueva dimensión que introduce Internet de los objetos .....	13
Figura 4. Descripción técnica de Internet of Things .....	13
Figura 5. Documentos por año .....	18
Figura 6. Documentación por país .....	19
Figura 7. Documentación por disciplina.....	19
Figura 8. Parque Automotor de Bucaramanga .....	34
Figura 9. Incremento de Camionetas .....	35
Figura 10. Incremento motocicletas .....	36
Figura 11. Parque automotor en Bucaramanga .....	37
Figura 12. Total semáforos Bucaramanga .....	37
Figura 13. Puntos de alta congestión .....	41
Figura 14. Congestionamientos viales .....	42
Figura 15. Georreferenciación de los puntos de alta congestión.....	44
Figura 16. Recorridos Las Palmas-UNAB .....	48
Figura 17. Víctimas fatales de accidentes 2010-2016.....	50
Figura 18. OCIT C .....	52
Figura 19. LIDAR.....	53
Figura 20. Simulación.....	57
Figura 21. Configuración de los nodos.....	58
Figura 22. Configuración de la intersección .....	59
Figura 23. Configuración del volumen .....	60
Figura 24. Configuración de los tiempos de semáforos .....	61
Figura 25. Configuración del detector .....	62
Figura 26. Simulación en acción .....	63
Figura 27. Información de la simulación .....	63
Figura 28. Comparación retrasos/Tiempos entre semáforo preprogramado y el actuador coordinado.....	64
Figura 29. Comparación del flujo vehicular entre semáforo preprogramado y el actuador coordinado.....	64
Figura 30. Comparación de las emisiones entre semáforo preprogramado y el actuador coordinado.....	65
Figura 31. Raspberry Pi 3.....	66
Figura 32. Arduino UNO .....	66
Figura 33. Cobertura 3G en Bucaramanga .....	72
Figura 34. Framework de Internet de las Cosas.....	76

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Términos Internet of Things.....	14
Tabla 2. Clasificación de dominios de aplicaciones de ciudades inteligentes .....	16
Tabla 3. Términos de Smart Cities .....	17
Tabla 4. Análisis Estado del Arte.....	20
Tabla 5. Análisis de documentos recuperados.....	24
Tabla 6. Automóvil por año.....	33
Tabla 7. Incremento de Camionetas en el municipio de Bucaramanga.....	34
Tabla 8. Incremento de Motocicletas en el municipio de Bucaramanga.....	35
Tabla 9. Total, incremento parque automotor.....	36
Tabla 10. Señales registradas.....	38
Tabla 11. Señalización atendida .....	39
Tabla 12. Reposición.....	40
Tabla 13. Indicadores de gestión .....	40
Tabla 14. Promedio de velocidad febrero.....	41
Tabla 15. Promedio de velocidad abril .....	41
Tabla 16. Puntos de alta congestión .....	43
Tabla 17. Factor de uso de la vía .....	44
Tabla 18 Factor de uso de la vía (Velocidades superiores a 25 Km/h) .....	45
Tabla 19. Tiempos semáforo Carrera 27 con Calle 56.....	45
Tabla 20. Mediciones de ruido ambiental .....	46
Tabla 21. Recorridos UNAB & UIS.....	47
Tabla 22. Accidentalidad 2015-2016.....	49
Tabla 23. Comparativo de víctimas .....	49
Tabla 24. Comparación entre Arduino UNO y Raspberry Pi 3 .....	67
Tabla 25. Características de Seeeduino LoRaWAN.....	67
Tabla 26. Características de ATSAMD21G18 .....	68
Tabla 27. Características de LoRaWAN Gateway.....	69
Tabla 28. Diferencias entre LoRa y Zigbee .....	71

## 1. INTRODUCCIÓN

*Internet of Things* es una tendencia tecnológica que cada día va ganando más fuerza, la cual se basa en la conexión de “objetos” a Internet, los cuales poseen atributos tanto físicos como virtuales. El objetivo de esto es que los “objetos” sean participantes activos en los procesos de recolección de datos del medio en el cual fueron desplegados (International Telecommunication Union, 2014). Una de las aplicaciones de *Internet of Things* que ha tenido un impacto positivo, principalmente en el contexto de *Smart Cities*, está relacionado con el control vehicular, a partir del uso de semáforos inteligentes, los cuales obtienen datos a través de sensores o sistemas de cámaras implementados en las vías de la ciudad, haciendo uso de algoritmos.

El estado de Utah, al oeste de los EE.UU., implementó un sistema estatal automático para la medición de datos de su red de señales de tráfico en tiempo real (Miguel Pérez, 2015). Este sistema emplea una red de cámaras de vídeo, radares y *loops* para adquirir datos sobre el flujo de vehículos o la velocidad media del tráfico de forma global. La información es enviada por medio de una red de fibra óptica al centro de operaciones de tráfico, donde un algoritmo de cálculo proporciona a los ingenieros los datos necesarios para monitorizar la frecuencia de los cambios a verde y sincronizar los ajustes de forma conjunta con el resto de semáforos de cada intersección de vías: *“los resultados del estudio arrojaron datos reveladores que estiman una reducción de las congestiones de tráfico de hasta el 40 por ciento, así como una reducción de los accidentes mortales por choques en intersecciones de vías de hasta el 50 por ciento”* (Miguel Pérez, 2015).

En Colombia, y específicamente en el municipio de Bucaramanga se han evidenciado problemáticas relacionadas con congestión vehicular, lo que ha generado inconformidad por parte de los ciudadanos. Esto se debe a que la infraestructura vial no tiene la capacidad para soportar el incremento acelerado del parque automotor. En cuanto a infraestructura tecnológica, se cuenta con semáforos tradicionales, para controlar el tránsito de la ciudad. Sin embargo, este tipo de solución no es suficiente, puesto que, en puntos críticos de la ciudad, en algunas horas, los agentes de tránsito son quienes efectúan maniobras para controlar el tránsito. En Bucaramanga, a diciembre de 2017, se registra un parque automotor de 202.225 vehículos como se puede observar en la Figura 1 (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017b).

Parque automotor de Bucaramanga		
Clase	Cantidad	Porcentaje
Automóvil	94046	46,51%
Bus	1374	0,68%
Buseta	679	0,34%
Camión	7791	3,85%
Camioneta	34706	17,16%
Campero	16705	8,26%
Microbús	695	0,34%
T Camión	2216	1,10%
Volqueta	1683	0,83%
Motocicleta	40855	20,20%
Maq. Agrícola	53	0,03%
Maq. Industrial	48	0,02%
Maq. Construcción	1072	0,53%
Minibús	0	0,00%
Semi Remolque	153	0,08%
Remolque	69	0,03%
Motocarro	52	0,03%
Cuatrimoto	28	0,01%
Motociclo	0	0,00%
Total	202225	100%

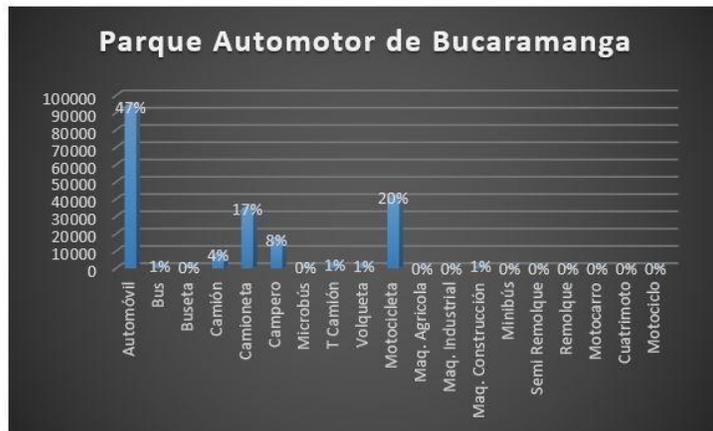


Figura 1. Parque automotor de Bucaramanga

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017)

Tomando en consideración, que uno de los objetivos del Gobierno Local es convertir a Bucaramanga en ciudad inteligente (Alcaldía de Bucaramanga, 2017), se ha establecido el desarrollo de un proyecto de Trabajo de Grado en Ingeniería de Sistemas, orientado a la creación de un *framework* conceptual que incorpore dispositivos, tecnologías, protocolos y aplicaciones requeridas para atender la problemática en el Municipio de Bucaramanga, relacionada con los altos niveles de flujo vehicular. Para tal fin, se tomará como punto de partida la revisión documental en diferentes bases de datos académicas para la identificación de soluciones tecnológicas existentes a nivel mundial, así como el desarrollo de un diagnóstico sobre el flujo vehicular en el contexto seleccionado, los cuales serán base para la definición del *framework* conceptual.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los semáforos tradicionales, tienen por objetivo regular el tránsito vehicular en las intersecciones. Estos semáforos, están compuestos esencialmente por tres faros programados para que proyecten durante un tiempo determinado un haz de luz de colores verde, amarillo y rojo sin importar la cantidad de vehículos que transiten (Carolina Escobar, 2016). Actualmente los semáforos son el sistema de control vehicular más importante en las vías y han sido modificados para que conforme avanza el tiempo estos puedan cumplir sus labores de la mejor manera posible. Sin embargo, el constante incremento del flujo vehicular está sobre pasando la capacidad de control de estos, por lo cual se requieren nuevas soluciones tecnológicas, que pueden ser apoyadas por ejemplo desde Internet de las Cosas.

De los factores que han contribuido a que los semáforos tradicionales no estén desempeñando su función como lo hacían antes, es el increíble aumento de parque automotor que se ha venido registrando a lo largo de los años. Según El Runt<sup>1</sup> en Diciembre del 2017 se registró que en el país circulaban 13'637.592 vehículos (Registro Único Nacional de Tránsito, 2017). Tomando en consideración que la cantidad de habitantes en Colombia según el reporte del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), registró en Diciembre del 2017 49.834.240 habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2017), se evidencia que en promedio en Colombia, por cada tres habitantes es registrado un vehículo. Consecuentemente, los problemas de congestión vehicular van incrementando por el aumento de la adquisición de vehículos, lo cual se aprecia en la Figura 2.

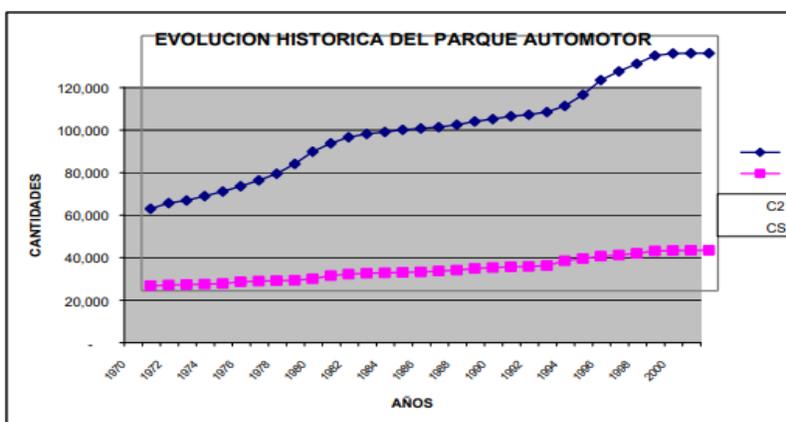


Figura 2. Evolución histórica del parque automotor  
Fuente: Tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2000)

<sup>1</sup> Registro Único Nacional de Tránsito, funciona como una gran base de datos centralizada que contiene información sobre todos los vehículos en el país, todos los conductores de vehículos, entre muchos otros datos.

En diciembre de 2017, fueron registrados un total de 202.225 vehículos en el municipio de Bucaramanga, del cual el 20% del parque automotor corresponde a motocicletas; una gran cantidad comparada con el total de vehículos que es del 47% incluyendo desde particulares hasta taxis. Este sobrecargo de motocicletas genera diversos problemas desde piratería hasta accidentes vehiculares, y también contribuye a la congestión vehicular ya que los motociclistas en general son imprudentes a la hora de conducir (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017b).

Otros de los factores que han contribuido a que los actuales sistemas de control de tráfico no estén rindiendo como antes, es que son variables estáticas que no tienen en cuenta los cambios del entorno. La falta de inversión en la infraestructura vial del país y el crecimiento constante de vehículos exige que se dé una ampliación a las vías que permita un mayor flujo vehicular. La inversión en infraestructura vial en Colombia a lo largo del 2017 fue de casi 7,8 billones de pesos (David Riaño Valencia, 2017) lo cual fue algo muy positivo para el país ya que contribuyó con el incremento del 1,5 del Producto Interno Bruto (PIB) Nacional (Portafolio, 2017) y se crearon carreteras que ayudaron a conectar diferentes sitios con los cuales antes no había forma de llegar y se mejoraron las actuales, facilitando la movilidad y ayudando a la disminución de accidentes vehiculares. Sin embargo, en las ciudades donde el espacio es reducido y el flujo vehicular es mayor no se pueden dar ampliaciones de la vía con facilidad y en estas es donde los problemas de congestión vehicular son mayores. En las áreas metropolitanas se deben buscar otras soluciones que contribuyan al mejoramiento del flujo vehicular.

Se han implementado normas para tratar de apaciguar estos problemas de tránsito que son tan frecuentes. Como, por ejemplo, el pico y placa. Esta norma de tránsito impone una restricción de circulación obligatoria en el área urbana a vehículos privados tipo automóvil y de servicio público en horarios "pico" (horarios con mayor afluencia de tráfico), dependiendo del último número de placa el automóvil, pretendiendo reducir con ella el colapso circulatorio que se forma en tales horas. Dentro de su aplicación, cada cierto mes se rota el día de restricción de acuerdo al número de placa del vehículo (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2018b). Existen otras normas tales como, la restricción a vehículos de carga pesada, señales de parada para mejorar la circulación, control al mal estacionamiento en plenas calles, contraflujo que consta en habilitar un carril para que sea usado en sentido contrario, siempre y cuando existan más carriles, garantizando el tránsito en ambos sentidos (El comercio, 2009).

Lo anterior, da origen a la siguiente pregunta de investigación: *¿De qué manera las soluciones tecnológicas de Internet de las Cosas pueden contribuir al mejoramiento del flujo vehicular en el Municipio de Bucaramanga?*

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un *framework* conceptual para el control vehicular basado en Internet de las Cosas.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un estado del arte sobre soluciones tecnológicas de Internet de las Cosas para el control vehicular.
- Realizar un diagnóstico sobre el control vehicular en el municipio de Bucaramanga.
- Diseñar un *framework* conceptual para el control vehicular en el municipio de Bucaramanga basado en Internet de las Cosas.

## 4. MARCO REFERENCIAL

En esta sección son presentados el marco conceptual, marco teórico, marco legal y estado del arte del Proyecto de Investigación.

### 4.1 MARCO CONCEPTUAL

El contexto teórico del proyecto se desarrolla en los siguientes conceptos fundamentales: *Internet of Things*, *Smart City*, *Traffic control* y *Framework*.

*Internet of Things* (IoT). Infraestructura de red global dinámica que posee la capacidad de autoconfiguración, se basa en protocolos de comunicación donde las “cosas” tienen identidad, atributos físicos y virtuales, poseen interfaces inteligentes y se integran en la red de información. Lo que se pretende con IoT es que las “Cosas” se conviertan en participantes activos en los procesos y puedan comunicarse e interactuar entre ellos y con el medio ambiente, y puedan reaccionar de forma autónoma a los eventos del “mundo físico” e influyan en él mediante procesos que desencadenen acciones y creen servicios con o sin intervención humana directa (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a).

*Smart City*. Ciudad que monitorea el estado de su infraestructura: carreteras, puentes, semáforos, rieles, metros, aeropuertos, energía, recursos, edificaciones de gran importancia, entre otros. De esta forma se pueden optimizar los recursos y planear las actividades de mantenimiento y monitorear los aspectos de seguridad mientras se incrementa el servicio a sus ciudadanos. Consiste en una ciudad interconectada y diseñada para la recolección de datos en vivo a través de sensores, medidores, dispositivos implantados, la web, teléfonos inteligentes y otros sistemas similares que permitan esta obtención de datos que también pueden incluir redes sociales como redes de sensores humanos. Todo con el objetivo de mejorar las decisiones operativas (Nam & Pardo, 2011).

*Traffic control*. En los últimos años los fabricantes automotrices han introducido tecnologías sofisticadas de control vehicular para mejorar la seguridad en las vías, la eficiencia en el consumo de combustible de los vehículos y el nivel de comodidad de los conductores, entre otras cosas. Estas nuevas tecnologías son, a veces, llamadas Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (*Advanced Driver Assistance Systems* ADAS). Estos sistemas usan la tecnología de los sensores, tales como el radar automotriz que ha sido desarrollado específicamente para su uso en automotores. Ellos tienen un efecto positivo en la seguridad vial y en la gestión del tránsito por medio de la ayuda a los conductores para que mantengan una velocidad y una distancia seguras, para que permanezcan dentro de los carriles y para que eviten maniobras de sobrepaso inseguras. Los beneficios pueden ser ampliados aún más si los vehículos individuales se comunican continuamente con

otros o con la infraestructura vial, los así llamados vehículos "conectados" (Asociación Mundial de Carreteras, 2018).

*Framework conceptual: "Red o plano de conceptos interconectados que juntos proporcionan una comprensión integral de uno o varios fenómenos"* (Jabareen, 2009).

## 4.2 MARCO TEÓRICO

A continuación, es presentado el marco teórico del proyecto, donde se explica a mayor profundidad los términos empleados para la búsqueda de documentos relacionados con el tema de estudio, a saber: *Internet of Things, Smart Cities, Traffic Control y, Smart Traffic Light*.

*Concepto y características de Internet de las cosas.*

*Internet of Things*, se basa en la recolección de datos mediante distintas tecnologías de acceso a Internet, los cuales son procesados para la generación de reportes que contribuyen en la toma de decisiones. IoT aprovecha el reconocimiento, la recolección de datos, el procesamiento y la comunicación, asegurando el cumplimiento de requisitos de seguridad y privacidad (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a).

*Internet of Things*, añade la dimensión "Comunicación con cualquier objeto" a las tecnologías de la información y las comunicaciones, que ofrecen a los usuarios comunicación "en todo instante" y "en cualquier lugar" (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a). En la Figura 3, es presentada la nueva dimensión que introduce Internet de las Cosas.

- Comunicación en cualquier instante: en movimiento, de noche, de día.
- Comunicación en cualquier lugar: en exteriores, en interiores (lejos del computador), en el computador.
- Comunicación con cualquier objeto: entre computadoras, entre humanos (sin computador), de humano a objeto (mediante un equipo genérico), entre objetos.

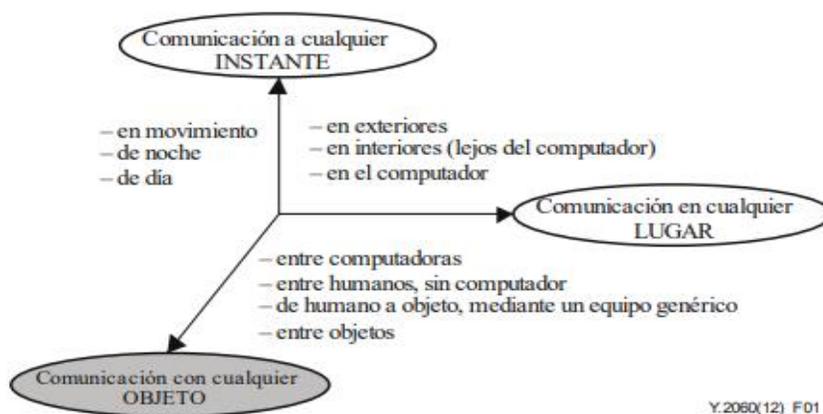


Figura 3. La nueva dimensión que introduce Internet de los objetos  
 Fuente: Tomado de (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a)

Cuando se habla de objetos se hace referencia a los objetos del mundo físico, los cuales son detectables y configurables, o también a objetos del mundo de la información, los cuales son integrados a redes de comunicación. En estos objetos se pueden almacenar, procesar y acceder a esta información (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a).

La Figura 4, muestra una descripción técnica de Internet de las Cosas. La descripción técnica de IoT según la UIT: *“Un objeto físico puede estar representado en el mundo de la información por una o varios objetos virtuales (correspondencia), pero el objeto virtual también puede existir sin tener asociada ningún objeto físico”* (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a). Básicamente un dispositivo puede ser representado en varios objetos virtuales y un objeto virtual puede existir sin un objeto físico.

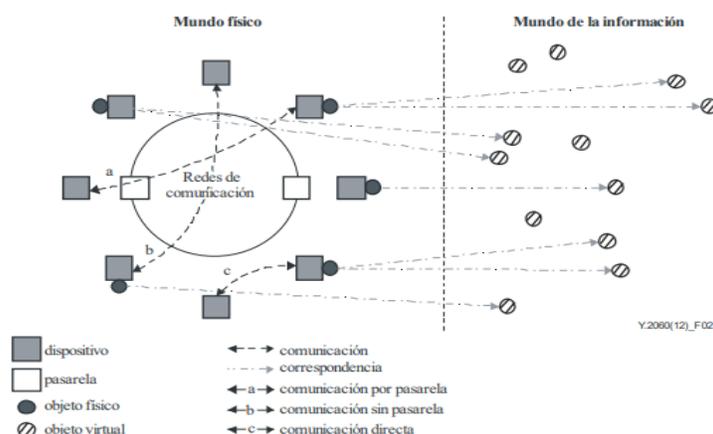


Figura 4. Descripción técnica de *Internet of Things*  
 Fuente: Tomado de (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a)

Entre las características fundamentales de IoT se encuentran (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a):

- Interconectividad: Todo se puede encontrar vinculado con la infraestructura mundial de la información y la comunicación.
- Servicios relacionados con objetos: IoT permite proporcionar servicios relacionados con los objetos, como protección de la privacidad y coherencia entre los objetos físicos y sus correspondientes objetos virtuales.
- Heterogeneidad: Los dispositivos en IoT son heterogéneos puesto que se basa en diferentes plataformas de hardware y redes. que interactúan con otros dispositivos o plataformas por medio de redes diversas.
- Cambios dinámicos: El estado de los dispositivos cambia constantemente, puede pasar de inactivo a activo al instante, así como la ubicación, la velocidad y el número de dispositivos.
- Escala enorme: El número de dispositivos que se manejan y se comunican entre sí, puede ser incluso mayor que la cantidad de dispositivos conectados a Internet.

En la Tabla 1, son presentados los términos relacionados con *Internet of Things*, consultados en el Tesouro de la IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017):

Tabla 1. Términos Internet of Things

<i>Internet of Things</i>	
<i>UF</i>	<i>IOE; IOT; Internet of everything; Internet of vehicles</i>
<i>BT</i>	<i>Internet</i>
<i>RT</i>	<i>Bar codes; Cyber-physical systems; Object detection; Radiofrequency</i>
Fuente: Basado en (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017)	

### *Concepto y características de Smart Cities*

Tener un concepto de *Smart City* es de gran relevancia para poder entender su alcance y contenido. Hasta el momento no se tiene una definición concreta de *Smart City* sin embargo se tienen diferentes definiciones dadas desde diversos puntos de vista. Es complicado tener la definición formal, porque una *Smart City* puede llegar a ser tan simple como una sola función implementada a un determinado grupo de ciudadanos, o tan complicada como un proceso completo de la administración gubernamental que representa los esfuerzos de reestructuración (Yin et al., 2015).

A continuación, es presentada la definición de *Smart City* desde diferentes perspectivas.

Infraestructura técnica: Harrison *et al.*, definieron una *Smart City* como “una ciudad instrumentada, interconectada e inteligente. Esta definición enfatiza la conexión de

*las infraestructuras físicas, TIC, sociales y empresariales de una ciudad*” (Harrison et al., 2010).

Aplicación de dominio: Giffinger & Gudrun presentaron un concepto representativo de *Smart City* desde un punto de vista de aplicación de dominio, para ello identificaron seis características con las cuales se define y evalúa una *Smart City*: economía, personas, gobierno, movilidad, medio ambiente y vida” (Giffinger & Gudrun, 2010).

Integración de sistema: Dirks y Keeling definieron una *Smart City* como “*la integración orgánica de los sistemas y su interrelación para hacer que los sistemas de sistemas sean más inteligentes*” (Dirks & Keeling, 2009).

Procesamiento de datos: Harrison et al., definió una *Smart City* como “*una instrumentación que permite la captura e integración de datos reales en tiempo real a través de sensores*” (Harrison et al., 2010).

*Revisión de los dominios de aplicación:*

Neirotti et al., enumeraron los dominios de aplicación relevantes para el desarrollo urbano. Después dividieron los dominios de aplicación en dominios duros y blandos, de acuerdo con la importancia que tienen los sistemas como tecnologías habilitadoras clave. Los dominios duros son los entornos de la ciudad en los que el fomento de la sostenibilidad se basa en el despliegue de sistemas de TIC, junto con la intervención de políticas y la planificación urbana adecuada, como edificios, redes de energía, recursos naturales, el medio ambiente y el transporte. Los dominios blandos son las áreas en las que los sistemas TIC tienen un rol limitado y no están necesariamente destinados a procesar e integrar información en tiempo real. Finalmente, plantearon siete dominios de *Smart City*: recursos naturales y energía, transporte y movilidad, edificios, vivienda, gobierno, economía y personas (Neirotti, De Marco, Corinna Cagliano, Mangano, & Scorrano, 2014; Yin et al., 2015).

En la Tabla 2 se pueden encontrar los dominios y subdominios de *Smart Cities*.

Tabla 2. Clasificación de dominios de aplicaciones de ciudades inteligentes

Dominio	Sub-dominio	Descripción
Gobierno (más eficiente)	Gobierno electrónico Gobierno transparente Servicio público Seguridad Pública Monitoreo de la ciudad Respuesta de emergencia	Mejorar la eficiencia interna y externa del gobierno; permitir que los ciudadanos y otras organizaciones relevantes accedan a documentos y políticas oficiales; garantizar que los servicios públicos funcionen de manera eficiente; supervisión y gestión de la seguridad pública; Respondiendo rápidamente y eficazmente en situaciones de emergencia.
Ciudadano (más feliz)	Transporte público Tráfico inteligente Turismo Entretenimiento Cuidado de la salud Educación Consumo Cohesión social	Viajar y moverse de manera más eficiente; acceso a información contextual, precisa y en tiempo real en la vida diaria; servicios públicos esenciales de alta calidad, como educación, salud y deporte; Enriqueciendo actividades de tiempo libre, comunicando y compartiendo más con otros.
Negocio (más próspero)	Administración de Empresas Logística Cadena de suministro Transacción Anuncio Innovación Espíritu emprendedor Agricultura	Mejora de la eficiencia y calidad entre la gestión; el uso de plataformas y métodos de logística y cadena de suministro más eficientes; publicidad más amplia y precisa, ampliando socios comerciales y clientes; Facilitando el emprendimiento y la inversión; mejorar la actividad empresarial en una ciudad, como producción, comercio, agricultura y consultoría; fomentando la innovación.
Medio Ambiente (más sustentable)	Red inteligente Energía renovable Administración del Agua Gestión de residuos Control de polución Edificio Alojamiento Comunidad Espacio público	Suministro de energía y suministros de agua más sostenibles, económicos y seguros, teniendo en cuenta el comportamiento de los ciudadanos; utilizando más energía verde o renovable; reciclaje y tratamiento de residuos de manera eficiente y segura; reducir y prevenir la contaminación en la ciudad; Ofreciendo movilidad, telecomunicaciones, información y todas las demás instalaciones en diferentes espacios de la ciudad.
Fuente: Tomado de (Yin et al., 2015)		

En la Tabla 3, son presentados los términos relacionados con *Smart Cities*, consultados en el Tesoro de la IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017).

Tabla 3. Términos de Smart Cities

<i>Smart Cities</i>	
<i>BT</i>	<i>Intelligent structures; Urban areas</i>
<i>RT</i>	<i>Buildings; Construction industry; Cyber-physical systems</i>
Fuente: (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017)	

### *Traffic control / traffic monitoring*

Un servicio de *Smart City* que puede ser implementado mediante Internet de las Cosas, consiste en monitorear la congestión del tráfico de una ciudad. A pesar de que los sistemas de monitoreo de tráfico basados en cámaras ya se encuentran disponibles e implementados en diversas ciudades, {a comunicación generalizada puede proporcionar una fuente de información más densa. El monitoreo del tráfico se puede dar mediante la utilización de las capacidades de detección y el GPS (*Global Positioning System*) instalados en los vehículos modernos. También es posible adoptar medidores de calidad del aire y sensores acústicos a lo largo de una carretera. Esta información es de mucha importancia para las autoridades municipales para disciplinar el tráfico y enviar a los oficiales cuando sea necesario y los ciudadanos para programar mejor un viaje al centro de la ciudad (Zanella, Bui, Castellani, Vangelista, & Zorzi, 2014).

### *Smart Traffic Light*

El diseño del sistema de *Smart Traffic Light* es un tema de investigación activa. Investigadores de todo el mundo crean nuevos enfoques y sistemas innovadores para dar solución a este problema. Los modelos basados en ecuaciones matemáticas se aplican para evaluar el tiempo de espera del automóvil en un cruce, el número de automóviles en la cola de espera, la extensión de los automóviles en espera a lo largo del carril, los intervalos de tiempo óptimos para las luces del semáforo que mejor se ajusten a las situaciones en la vía. La dependencia mutua entre las intersecciones cercanas conduce a una formulación de parámetros complicados. Por lo cual, hallar una solución dinámica, coherente y conveniente es muy complicado. Investigadores de diferentes disciplinas están colaborando para encontrar soluciones factibles que reduzcan la congestión del tráfico. Por lo cual, constantemente se proponen diversas metodologías en la literatura y son implementadas muchas técnicas aprovechando los avances tecnológicos de los microcomputadores, los dispositivos y sensores fabricados recientemente y los algoritmos innovadores que modelan, en la medida de lo posible, la complicación de los semáforos (Ghazal, ElKhatib, Chahine, & Kherfan, 2016).

### 4.3 ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del estado del arte, se hizo una revisión de la literatura utilizando las siguientes palabras claves: *Internet of Things*, *Smart Cities*, *Traffic Control* y *Smart Traffic Light*. El rango de búsqueda fue delimitado entre el período 2014-2018, con un total de 20 documentos recuperados.

En la Figura 5, los documentos recuperados son presentados según su año de publicación. Es posible observar que en el año 2017 la cantidad de documentos es superior en comparación con los años anteriores lo cual evidencia un aumento en el interés o relevancia del área de estudio. Para el año 2018, se recuperaron tres (3) documentos.

Año	Documentos
2018	3
2017	10
2016	4
2015	1
2014	2



Figura 5. Documentos por año

Al organizar los documentos por país de origen, es posible observar que India cuenta con el mayor número de documentos con un total de ocho (8) documentos publicados, relacionados con la temática de estudio (ver Figura 6).

País	Documentos
Malaysia	1
India	8
England	1
Jordan	1
Czech Republic	1
China	3
Singapur	1
Japón	1
EE. UU	2
Ukraine	1

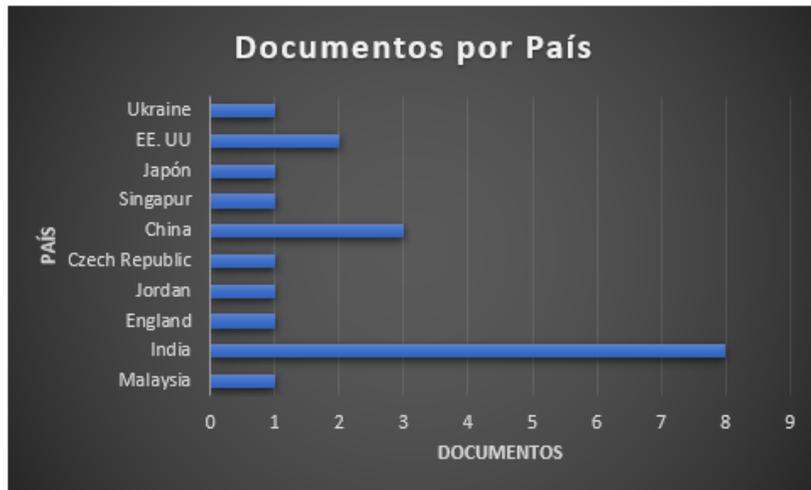


Figura 6. Documentación por país

Los documentos recuperados, fueron clasificados según la disciplina. Se tiene que el 45% de los documentos consultados, son Artículos de Ciencias de la decisión, gestión tecnológica y gestión de operaciones (ver Figura 7).

Disciplina	Documentos
Innovation	6
Decision Sciences, technology Management & Operations Mangement	9
Management, Strategy, and Organizational Behavior	2
Information Systems and Information Technology	3

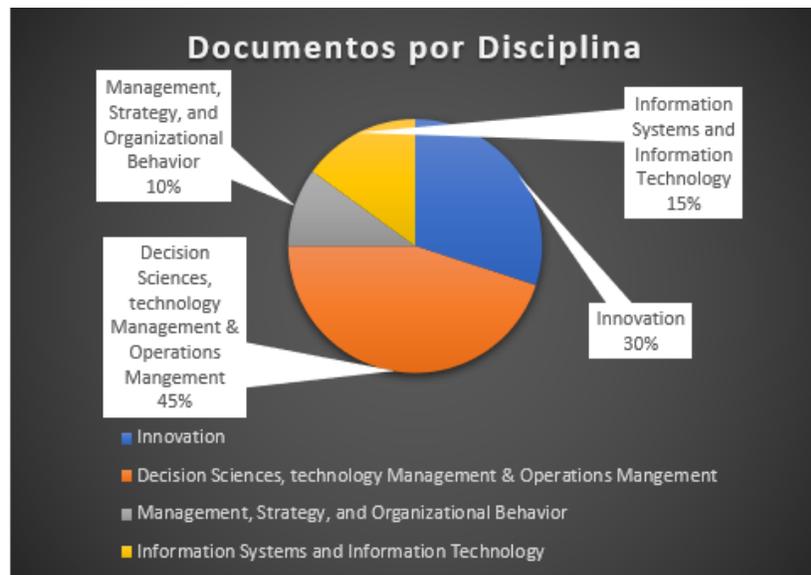


Figura 7. Documentación por disciplina

Los criterios de búsqueda para llevar a cabo el proceso de revisión de la literatura se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis Estado del Arte

Bases de Datos Consultadas	IEEE explore
Cantidad de referencias recuperadas	IEEE explore: 20
Fecha de Búsqueda	Enero 20 2019
Criterios de búsqueda	Rango de Fecha de la búsqueda: 2014 y 2018
	Pertinencia con el tema de investigación: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Internet of things</i></li> <li>• <i>Cloud computing</i></li> <li>• <i>Smart cities</i></li> <li>• <i>Traffic control</i></li> <li>• <i>Smart traffic light</i></li> </ul>
	Documentos en inglés, publicados en revistas científicas o actas de conferencias

A continuación, es presentada una síntesis de los documentos hallados en la literatura, relacionados con el tema de investigación:

*Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing:* Los autores mencionan que la congestión vehicular aumenta rápidamente gracias a la adquisición de vehículos. Para ello, plantean el procesamiento de video del *feed* en vivo que se puede obtener de cámaras de vigilancia. Finalmente, mencionan la implementación de un mecanismo de retroalimentación de los semáforos donde la densidad del tráfico también se tendría en cuenta en el proceso de toma de decisiones (Kanungo, Sharma, & Singla, 2014).

*Smart traffic light in terms of the cognitive road traffic management system (CTMS) based on the Internet of Things:* Los autores proponen un sistema de gestión de tráfico cognitivo (CTMS) enfocado a *Internet of Things* y la integración de un semáforo inteligente con la finalidad de optimizar los procesos de la gestión de tráfico, resaltando que el factor humano es una variable que afecta el funcionamiento de los semáforos actuales, la cual no es tomada en cuenta para la elaboración de su proyecto puesto que es una variable inconstante (Miz & Hahanov, 2014).

*Smart autonomous traffic light switching by traffic density measurement through sensors:* Los autores mencionan que para minimizar el viaje y aumentar la seguridad de los servicios ambulatorios, se debe implementar una tecnología próspera para el sistema de tráfico. Este artículo presenta un cambio de semáforo dinámico basado en la densidad del tráfico, el cual reduce el tiempo promedio de espera de los vehículos en el cruce. Comparado con el sistema tradicional de ciclo fijo, este sistema vendría a ser el más pertinente para la complejidad de la congestión vehicular actual (Jagadeesh, Suba, Karthik, & Yokesh, 2015).

*Smart Traffic Lights: A First Parallel Computing Approach:* Los autores presentan el problema asociado a la programación de los semáforos. En primer lugar, proponen

un enfoque basado en el algoritmo *Diferencial Evolution*. Varias variantes del algoritmo se prueban para distinguir las más competitivas. Además, estudian versiones paralelas para mejorar la eficiencia y resolver instancias grandes y realistas. Este enfoque se evalúa en dos escenarios diferentes: Málaga y París (Souravlias, Luque, Alba, & Parsopoulos, 2016).

*Agent based monitoring for smart cities: Application to traffic lights*: Los autores propusieron un modelo que se basa en sistemas multi-agente y procesamiento de eventos complejos. Este esquema de control tiene como objetivo mejorar el tiempo de luz verde a fin de reducir el tiempo de espera de los vehículos, especialmente si la carretera está vacía, y para reducir la congestión en los cruces. El modelo desarrollado se evalúa y analiza utilizando diferentes métricas y escenarios (Elchamaa, Dafflon, Ouzrout, & Gechter, 2016).

*A Belief Rule Base Approach for Smart Traffic Lights*: Los autores propusieron un enfoque basado en los datos de reglas particulares de semáforos inteligentes. La idea principal de este enfoque es utilizar datos de tráfico históricos para predecir el flujo de tráfico y luego determinar la estrategia de control de los semáforos en términos del flujo de tráfico previsto y las condiciones del camino, usando un método simple para controlar el semáforo en función de la prioridad (Lin, Li, Chen, Fu, & Chi, 2016).

*The Method of Controlling Traffic Paths in IoT-based Software Defined Network*: Los autores mencionan la implementación de un método para configurar las rutas de tráfico en una red basada en SDN (*Software Defined Networking*) presentando la información de las rutas. El usuario puede seleccionar la ruta más adecuada para el en la lista de las rutas (Kim, Jun, & Kim, 2016).

*Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN*. Los autores analizaron la implementación de la tecnología LoRaWAN, la cual permite el acceso a múltiples sensores para tener una detección precisa de la cantidad de vehículos en la vía. Esta tecnología se caracteriza por requerir poca potencia para funcionar, por lo tanto, un bajo consumo de energía, ya que los sistemas actuales implementados solo cuentan con un sensor al final de la vía lo cual no proporciona un informe preciso (Nor, Zaman, & Mubdi, 2017).

*Intelligent traffic light control for congestion management for smart city development*: Los autores comentan que se han implementado diferentes técnicas para el control de los semáforos inteligentes y para la predicción del tráfico. En este trabajo, los autores plantearon la utilización de la red neuronal de *Hopfield* para obtener una secuencia óptima para los semáforos y también el uso de algoritmos evolutivos como lo es el algoritmo genético, para obtener un tiempo verde más óptimo basado en el tiempo del ciclo (Gupta, Kumar, Reddy, & Panigrahi, 2017).

*Smart traffic light control using fuzzy logic and wireless sensor network.* Los autores mencionan la problemática relacionada con el incremento del parque automotor, lo que genera aumento de la congestión vehicular. Para ello describen el diseño y la implementación de un semáforo inteligente mediante el uso de un controlador de lógica difusa y la red de sensores inalámbricos, con lo cual se recopilan datos en tiempo real. El controlador de lógica difusa se encarga de tomar la decisión del carril al cual se le debe dar prioridad y un algoritmo de enrutamiento que asigna dinámicamente la luz verde (Hawi, Okeyo, & Kimwele, 2017).

*Smart Controlling for Traffic Light Time:* Los autores explican las distintas formas de controlar el tiempo de los semáforos: (i) Manualmente, requiere de una persona capacitada para monitorear los vehículos y controlar su flujo, y por lo tanto se requiere la mano de obra del hombre y se produce un proceso de control no preciso y, (ii) Automática, la cual se centra en un algoritmo automático para controlar el tiempo de los semáforos basado en el procesamiento de imágenes que se recolectan del semáforo. Siguiendo el algoritmo propuesto, se utilizan dos técnicas de inteligencia artificial las cuales son redes neuronales artificiales y controlador de lógica difusa con operaciones básicas de procesamiento de imágenes, para contar el número de automóviles en el semáforo y controlar su tiempo (Zaid, Suhweil, & Yaman, 2017).

*TRADER: Traffic Light Phases Aware Driving for Reduced Traffic Congestion in Smart Cities.* Los autores estudiaron la eficiencia de las tecnologías de comunicación para reducir el tiempo de viaje en las ciudades inteligentes. Específicamente, el documento se centra en el desarrollo de una solución que aprovecha la infraestructura existente en el lado de la carretera y las tecnologías de comunicación instaladas en los vehículos (Rhodes & Djahel, 2017).

*Intelligent Traffic Light Control Using Distributed Multi-Agent Q Learning:* Los autores presentan el uso de inteligencia artificial, proponiendo una solución inteligente de control para los semáforos mediante el uso de agentes múltiples. La solución no solo considera el tráfico vehicular, sino también el tráfico peatonal, usando el monitoreo dinámico y la recopilación de longitudes de cola de vehículos y peatones en cada intersección (Liu, Liu, & Chen, 2017).

*IoT based traffic light control system using Raspberry Pi:* Los autores presentaron la implementación de un sistema de control de tráfico basado en IoT, en el cual los tiempos de las señales se actualizan en función de la cantidad de vehículos. El sistema consiste en la implementación de un módulo WiFi que transmite la cantidad de vehículos, al próximo semáforo (Basil & Sawant, 2017).

*A Review of IoT device for Traffic Management System:* Los autores realizaron una revisión sobre los distintos dispositivos que han sido empleados para el mejoramiento del flujo vehicular basados en IoT (Soni & Saraswat, 2017).

*Employing Cyber-Physical Systems: Dynamic Traffic Light Control at Road Intersections:* Los autores proponen el uso de una red de sensores que recopilan datos del tráfico (DTLC), y algoritmos de baja sobrecarga que regulan y optimizan el flujo vehicular y los tiempos de espera (Younis & Moayeri, 2017).

*Internet of Things based adaptive traffic management system as a part of Intelligent Transportation System (ITS):* Los autores proponen un sistema de tráfico adaptativo que monitorea distintos carriles, y un semáforo inteligente que analiza los datos obtenidos para dar una luz verde óptima, adicional a eso se enfocan en el cuidado del medio ambiente y en el despacho de vehículos de emergencia (Dubey, Lakhani, Dave, & Patoliya, 2017).

*IOT based Smart Traffic Light Control System:* Los autores proponen el uso de un controlador ANFIS en Arduino UNO que está conectado a una cámara que registra las condiciones de tráfico, utilizando la nube como almacenamiento. La imagen se analiza utilizando el controlador ANFIS, y la señal apropiada es enviada al semáforo (George, George, & George, 2018).

*Density Based Smart Traffic System with Real Time Data Analysis Using IoT:* Los autores propusieron el desarrollo de un sistema de tráfico basado en *Internet of Things* para el mejoramiento del flujo vehicular y que ayude al desarrollo de una ciudad inteligente. El sistema propuesto cuenta con sensores de ultrasonido que calcula la densidad de automóviles con un sistema de procesamiento de imágenes operando en una Raspberry Pi. El sistema dinámico asigna diferentes niveles de tráfico dependiendo de los datos tomados en tiempo real y almacenados en la nube (Nafea, Jacob, Nair, & Paul, 2018).

*An enhanced EAB algorithm to reduce RACH congestion due to IoT traffic in LTE-A networks:* Los autores presentaron una propuesta basada en la implementación de un algoritmo EAB (*Extended Access Barring*) que supervisa de forma proactiva la congestión en la red y evita la restricción colectiva de los dispositivos. El algoritmo fue evaluado en función de diversas medidas, como la tasa de éxito, la demora promedio y el retroceso promedio (Giluka, Priyadarshi, Kumar, Franklin, & Tamma, 2018).

En la Tabla 5, son presentados los documentos seleccionados.

Tabla 5. Análisis de documentos recuperados

Titulo	Tipo	Objetivo	Tecnología / Protocolos	Dispositivos
<i>Smart traffic light in terms of the cognitive road traffic management system (CTMS) based on the Internet of Things</i> (Miz & Hahanov, 2014)	Acta de conferencia	Describir un sistema de gestión de tráfico cognitivo (CTMS) basado en el enfoque de Internet de las cosas.	<i>Big Data, Open Data, Cloud computing.</i>	Semáforos.
<i>Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing</i> (Kanungo et al., 2014)	Acta de conferencia	Simular y optimizar el control del tráfico para adaptarse mejor a la creciente demanda.	TCP, WIFI.	Red definida por software.
<i>Smart autonomous traffic light switching by traffic density measurement through sensors</i> (Jagadeesh et al., 2015)	Acta de conferencia	Desarrollar e implementar el sistema de semáforo basado en sensores con control dinámico.	TCP, WIFI, Ethernet.	Sensors IR, Microcontroller, Semáforos.
<i>Smart Traffic Lights: A First Parallel Computing Approach</i> (Souravlias et al., 2016)	Acta de conferencia	Desarrollar una solución al problema de programación de semáforos utilizando Evolución Diferencial e investigar los beneficios del paralelismo en este problema complejo.	WIFI.	Micro-simulator SUMO, Semáforos.
<i>A Belief Rule Base Approach for Smart Traffic Lights</i> (Lin et al., 2016)	Acta de conferencia	Desarrollar un enfoque basado en las reglas de creencias basadas en datos para semáforos inteligentes.	WIFI.	Semáforos.
<i>Agent based monitoring for smart cities: Application to traffic lights</i> (Elchamaa et al., 2016)	Acta de conferencia	Proponer un modelo auto adaptativo para semáforos de regulación inteligente.	TCP, WIFI.	Sensors with dynamic control, Sensores Cps, Semáforos.

Titulo	Tipo	Objetivo	Tecnología / Protocolos	Dispositivos
<i>The Method of Controlling Traffic Paths in IoT-based Software Defined Network</i> (Kim et al., 2016)	Acta de conferencia	Proporcionar un método para la administración de la red que puede aplicarse a la configuración de rutas de tráfico y funciones de nodos incluidos en las rutas en una red definida por software.	<i>Cloud Computing.</i>	Red definida por software.
<i>Intelligent traffic light control for congestion management for smart city development</i> (Gupta et al., 2017)	Acta de conferencia	Emplear HNN para controlar la secuencia de semáforos en una intersección y para controlar la secuencia de luces para una sola intersección con los nodos interconectados.	Cloud Computing.	Red definida por software.
Smart traffic light control using fuzzy logic and wireless sensor network (Hawi et al., 2017)	Acta de conferencia	Utilizar sistemas inteligentes para tomar decisiones de enrutamiento de tráfico con el potencial de mejorar la gestión del tráfico de vehículos.	Wireless, RF Wireless transmisión.	Semáforos.
<i>Smart controlling for traffic light time</i> (Zaid et al., 2017)	Acta de conferencia	Desarrollar un algoritmo automático para controlar el tiempo del semáforo según las técnicas de inteligencia artificial y la imagen de los automóviles en los semáforos.	<i>Cloud Computing.</i>	Red definida por software.
<i>Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN</i> (Nor et al., 2017)	Acta de conferencia	Emplear varios sensores para controlar el número de vehículos a lo largo de la carretera y poder estimar el nivel de congestión.	WIFI, LoRaWAN.	Sensores, Semáforos, Cámaras, microcontrolador LoRaWAN W/GPS de Seeeduno, Raspberry Pi.
<i>Intelligent Traffic Light Control Using Distributed Multi-Agent Q Learning</i> (Liu et al., 2017)	Acta de conferencia	Proponer y aplicar tecnologías IoT para el control del semáforo, para mejorar la eficiencia del sistema de	<i>Cloud Computing, IoT.</i>	Red definida por software.

Titulo	Tipo	Objetivo	Tecnología / Protocolos	Dispositivos
		carreteras de la ciudad inteligente.		
<i>TRADER: Traffic Light Phases Aware Driving for Reduced Traffic Congestion in Smart Cities</i> (Rhodes & Djahel, 2017)	Acta de conferencia	Proponer un mecanismo simple pero eficiente para reducir el tiempo total de viaje de los vehículos en ciudades inteligentes.	WIFI, V2X, Wireless.	Semáforos, SUMO y TraCI, TLC.
<i>IoT based traffic light control system using Raspberry Pi</i> (Basil & Sawant, 2017)	Acta de conferencia	Implementar un sistema de control de tráfico basado en IoT en el que los tiempos de señal se actualicen según el conteo de vehículos.	WIFI, IoT.	Cámaras, Semáforos, Raspberry PI.
<i>A Review of IoT devices for Traffic Management System</i> (Soni & Saraswat, 2017)	Acta de conferencia	Realizar una búsqueda de los diferentes dispositivos implementados para el mejoramiento de la congestión vehicular.	<i>Cloud Computing.</i>	Cámaras, Semáforos, Raspberry PI, sensores, Arduino.
<i>Internet of Things based adaptive traffic management system as a part of Intelligent Transportation System (ITS)</i> (Dubey et al., 2017)	Acta de conferencia	Diseñar e implementar un sistema de tráfico que se adapte a la naturaleza del tráfico en los carriles respectivos.	<i>Internet of Things, Big Data.</i>	Intel Galileo Gen 2 Board, Arduino Duemilanove Board, Ultrasonic sensor, SD Card.
<i>Employing Cyber-Physical Systems: Dynamic Traffic Light Control at Road Intersections</i> (Younis & Moayeri, 2017)	Artículo	Proponer un nuevo marco dinámico de control de TL (DTLC) en las intersecciones de carreteras.	CPS.	Raspberry Pi 3, Piezoelectric sensor.
<i>An enhanced EAB algorithm to reduce RACH congestion due to IoT traffic in LTE-A networks</i> (Giluka et al., 2018)	Acta de conferencia	Proponer un algoritmo EAB que monitorea proactivamente la congestión en la red y evita la restricción colectiva de los dispositivos IoT.	LTE-A, IoT, WIFI.	Red definida por software.

Titulo	Tipo	Objetivo	Tecnología / Protocolos	Dispositivos
<i>Density Based Smart Traffic System with Real Time Data Analysis Using IoT</i> (Nafea et al., 2018)	Acta de conferencia	Desarrollar un sistema de tráfico conveniente que permita un movimiento suave de automóviles que ayude a construir una ciudad más inteligente.	<i>Cloud Computing, IoT.</i>	Raspberry Pi, Ultrasound sensors, Infrared sensors, Camera Module, Inductive Loop Detector.
<i>IOT based Smart Traffic Light Control System</i> (George et al., 2018)	Acta de conferencia	Implementación de una cámara para capturar el tráfico en la vía. La imagen se analiza utilizando el controlador ANFIS y se envía la señal apropiada al semáforo.	Wi-Fi.	ArduCAM Shield, Arduino UNO, EYE-FI.

#### 4.4 MARCO LEGAL

A continuación, son presentadas las bases legales tanto nacionales como internacionales en comunicación y transporte, en las que se sustentan el proyecto.

Recomendación Y.2060: Descripción general de Internet de los Objetos. *“Presenta los términos generales de Internet de los Objetos (IoT). Aclara el concepto y el alcance de IoT, se identifican las características fundamentales y los requisitos de alto nivel de IoT y se describe el modelo de referencia IoT”* (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012a).

Legislación 769 del 2002: Contiene todas las normas las cuales regulan las normas de circulación de peatones, conductores, ciclistas, motociclistas, agentes de tránsito que estén en las vías públicas o privadas. Así como las normas a proceder de las autoridades de tránsito (Ministerio de Transporte, 2002).

CONPES 3547: Política Nacional Logística: *“Contiene las estrategias para el desarrollo del sistema logístico nacional y su apoyo efectivo al incremento de competitividad y productividad”* (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2008).

Legislación 336 de 1996: *“La cual reconoce el carácter del servicio público, al estado se le reconoce como regulador y reglamenta el transporte privado”* (Ministerio de Transporte, 1996).

Legislación 711 ANE: *“Establecen que el espectro electromagnético es un bien público que forma parte de Colombia y pertenece a la Nación”* (Agencia Nacional del Espectro, 2016).

## 5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto de Trabajo de Grado, se definieron tres etapas principales, relacionadas estrechamente con los objetivos específicos del proyecto. A continuación, son presentadas las actividades asociadas con cada una de las etapas.

**Etapas 1:** Elaboración de un estado del arte sobre soluciones tecnológicas de Internet de las Cosas para el control vehicular.

Las actividades que fueron realizadas:

1. Búsqueda de documentos en bases de datos académicas.
2. Identificación de las tecnologías, protocolos y dispositivos usados para el control vehicular.
3. Síntesis de revisión de literatura.
4. Documentación de resultados.

**Etapas 2:** Realización de un diagnóstico sobre el control vehicular en el Municipio de Bucaramanga.

Las actividades que fueron realizadas:

5. Búsqueda de información relacionada con el control vehicular en el Municipio de Bucaramanga.
6. Identificación de los actores relacionados con el control vehicular en el Municipio de Bucaramanga.
7. Identificación de la normatividad existente con el control vehicular en el Municipio de Bucaramanga.
8. Análisis de la situación existente en el Municipio de Bucaramanga respecto a control vehicular.
9. Documentación de resultados.

**Etapas 3:** Diseño de un *framework* conceptual para el control vehicular en el Municipio de Bucaramanga basado en Internet de las Cosas.

Las actividades que fueron realizadas:

10. Diseño del *framework* conceptual de la solución tecnológica de Internet de las Cosas.
11. Análisis del *framework* conceptual diseñado.
12. Documentación de resultados.

## 6. RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección son presentados los resultados del Proyecto de Trabajo de Grado.

### 6.1 ESTADO DEL ARTE SOBRE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS DE INTERNET DE LAS COSAS PARA EL CONTROL VEHICULAR

La revisión de la literatura efectuada permitió recuperar una serie de documentos que sirvieron de base para el desarrollo del Trabajo de Grado, en los cuales se identificaron soluciones tecnológicas que abordan la problemática del control vehicular en ciudades.

Respecto a las tecnologías de acceso a Internet empleadas, Wi-Fi es la de mayor uso en las soluciones tecnológicas estudiadas (Jagadeesh et al., 2015; Kim et al., 2016; Lin et al., 2016), debido a sus características para el despliegue de soluciones en ambientes *outdoor* respecto a otras tecnologías inalámbricas. Wi-Fi tiene un radio de señal de hasta 90 metros en lugares cerrados y puede llegar hasta el triple en lugares abiertos. También permite la conexión de múltiples dispositivos, debido a que el enrutador transforma la información digital en ondas de radio que se transmiten por el aire. Posteriormente, los decodificadores del dispositivo receptor vuelven a transformar las ondas de radio en señales digitales, que son interpretadas por el microprocesador del equipo para permitir la conexión a Internet. Wi-Fi ofrece compatibilidad, puesto que los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n tienen aceptación internacional debido a que las bandas no licenciadas o de uso libre en este caso 2,4 GHz no requieren permiso especial de las autoridades o el regulador de telecomunicaciones para poder usarse, está disponible casi universalmente y ofrecen velocidades de hasta 11 Mbit/s, 54 Mbit/s y 300 Mbit/s (José & Torres, 2016).

En una de las soluciones planteadas, se hizo uso del protocolo *LoRaWAN*, el cual es un protocolo de red de área amplia de baja potencia diseñado para conectar dispositivos operados por batería a Internet. El protocolo admite comunicaciones bidireccionales seguras, móviles y de bajo costo para Internet de las Cosas. El protocolo *LoRaWAN* permite un bajo consumo de energía y está diseñado para escalar desde una única instalación de pasarela hasta grandes redes globales con miles de millones de dispositivos. También permite soporte para operaciones redundantes y geolocalización. En el documento "*Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN*" (Nor et al., 2017), se muestra una solución planteada con la implementación de este protocolo, la cual mediante la ubicación de sensores a lo largo de la vía, busca obtener una cifra exacta sobre la cantidad de vehículos que circulan en esta, y con la información conocer el nivel de congestión.

En el documento, “*A review of IoT devices for traffic management system*” (Soni & Saraswat, 2017), es presentado un resumen de los dispositivos empleados para el despliegue de soluciones tecnológicas de Internet de las Cosas para el control vehicular. La recolección de datos en la vía, está a cargo de dispositivos tales como: sensores de ultrasonido los cuales miden la distancia mediante el uso de ondas ultrasónicas y sensores infrarrojos los cuales son capaces de medir la radiación electromagnética infrarroja de los cuerpos en su campo de visión (Dubey et al., 2017; Nor et al., 2017). Otro de los dispositivos el cual presenta un modo de recolección de datos novedoso son las cámaras. Mediante estas se puede obtener la captura de imágenes en tiempo real y mediante el algoritmo implementado obtener un reconocimiento de imagen, el cual permite conocer la cantidad de vehículos en la vía (Basil & Sawant, 2017; George et al., 2018).

Otro de los factores a tomar en consideración en el desarrollo de soluciones tecnológicas para el control vehicular es el algoritmo implementado en los semáforos inteligentes, el cual, dependiendo de las variables de entrada, puede llegar a tener mayor precisión al momento de brindar la luz óptima, dependiendo del flujo vehicular en la vía. Se puede apreciar que varios documentos se centraron principalmente en la creación del algoritmo, y no en la elaboración de prototipos funcionales (Gupta et al., 2017; Souravlias et al., 2016; Zaid et al., 2017). Por ejemplo en el documento “*Smart controlling for traffic light time*” (Zaid et al., 2017), es presentado el desarrollo de un algoritmo que controla el tiempo del semáforo en función de técnicas de inteligencia artificial y las imágenes obtenidas de los automóviles en las paradas de los semáforos.

Con la realización del estado de arte, se pudo evidenciar, que el tema de control vehicular, más específicamente el de semáforos inteligentes, es un tema de interés para la sociedad actual, esto debido a que aún no se ha dado una solución óptima para todos los contratiempos posibles que puedan llegar a ocurrir en la vía. Este problema debe ser abordado desde diferentes áreas del conocimiento para obtener el mejor resultado posible. En el presente trabajo de grado se abordará esta problemática desde la ingeniería de Sistemas, en el cual se busca plantear las bases, para el desarrollo de una solución basada en internet de las cosas, para el control del flujo vehicular en las vías, por ende, se realizó la búsqueda con el objetivo de conocer las diferentes alternativas tecnológicas planteadas.

## 6.2 DIAGNÓSTICO SOBRE EL CONTROL VEHICULAR EN EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA

A continuación, será presentado el diagnóstico, sobre el control vehicular en el municipio de Bucaramanga, a partir de lo consultado en páginas Web gubernamentales, prensa local, entre otros. Dicho diagnóstico está basado en información publicada por entidades como: el Ministerio de Transporte, el Registro Único de Nacional de Transporte, la Alcaldía de Bucaramanga, y la Dirección de Tránsito de Bucaramanga; quienes proporcionan datos e información sobre la

movilidad y el control de tráfico en la ciudad de Bucaramanga, a saber: el parque automotor, semaforización, infraestructura y movilidad. Esta información fue recolectada y analizada, para comprender el estado de la ciudad con respecto al control de tráfico.

### **Ministerio de transporte**

Una de las fuentes consultadas, fue la página Web<sup>2</sup> e informes del Ministerio de Transporte, que tiene como objetivo principal:

“Formular y adoptar las políticas, planes, programas, proyectos y regulación económica en materia de transporte, tránsito e infraestructura de los modos de transporte carretero, marítimo, fluvial, férreo y aéreo y la regulación técnica en materia de transporte y tránsito de los modos carretero, marítimo, fluvial y férreo” (Ministerio de transporte, 2019).

El Ministerio de Transporte es una fuente muy útil, ya que para realizar el diagnóstico se deben conocer las políticas, normatividad, tecnologías, y recursos con los que se trabajan y con los que se piensan trabajar a futuro.

### **Registro Único Nacional de Transporte (RUNT)**

Es el gran cerebro donde se consolidan y administran de manera organizada y eficiente todos los datos referentes al sector de tránsito y transporte (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019a).

La cantidad de flujo vehicular en las vías es una de las variables esenciales para la elaboración del proyecto, por esto, la página Web del RUNT<sup>3</sup> hace parte de las fuentes indispensables para cumplir el objetivo, ya que contiene información sobre registros de accidentes, de automotores y normatividad.

### **Alcaldía de Bucaramanga**

La Alcaldía forma parte de lo que se conoce como la Organización del Poder Municipal, la cual cumple la función de administrar los recursos del municipio correspondiente en este caso al que se hace referencia Bucaramanga y hacer cumplir las leyes del Gobierno (Alcaldía de Bucaramanga, 2019).

Es de vital importancia para el diagnóstico, tener en cuenta a esta organización ya que es la encargada de aprobar o no los proyectos municipales y aportar los recursos para la realización. Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de la

---

<sup>2</sup> Disponible en: Fuente (Ministerio de transporte, 2019).

<sup>3</sup> Disponible en: Fuente (RUNT, 2019).

alcaldía de Bucaramanga es precisamente convertir a esta en una ciudad inteligente se ha decidido realizar este trabajo de grado (Alcaldía de Bucaramanga, 2017).

Toda la información necesaria se puede encontrar en el portal Web de la Alcaldía de Bucaramanga<sup>4</sup>.

### **Dirección de Tránsito de Bucaramanga (DTB)**

Entidad encargada de definir, formular y regular las políticas de transporte, tránsito y su infraestructura mediante la articulación de las entidades que integran el sector (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019a). Una de las principales fuentes de información ya que de esta se obtuvieron datos exactos y verídicos referentes a el parque automotor, ciclovía, semaforización, planes de seguridad vial, entre otros (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019a).

En esta, se muestran la cantidad de semáforos que se encuentran activados en el municipio de Bucaramanga, así como su localización y las intersecciones semaforizadas. La información fue obtenida por medio de la página Web de la Dirección de Tránsito de Bucaramanga<sup>5</sup>.

### **Parque automotor en el municipio de Bucaramanga**

Entre las estadísticas que posee la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, existe una medición significativa para tener en cuenta, ya que es el factor que más influye en el sistema de movilidad de la ciudad. Fueron hallados informes a partir del año 2012 hasta el 2017, de los cuales se recolectaron datos únicamente sobre el parque automotor de la ciudad de Bucaramanga, donde se presentan la cantidad de unidades que se encuentran registrados por cada tipo de vehículo existente, así como su porcentaje (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c). Dicha información será presentada a continuación:

En la Tabla 6 está plasmado el incremento de la cantidad de automóviles que se ha registrado en el municipio de Bucaramanga. Se puede notar que el mayor incremento registrado fue en 2014, con un 7.45% (pasando de 82954 a 89134 vehículos).

Tabla 6. Automóvil por año

<b>Año</b>	<b>Automóviles</b>	<b>Porcentaje de incremento</b>
2017	94046	1.1453953
2016	92981	1.17517764
2015	91901	3.10431485

<sup>4</sup> Disponible en: Fuente (Alcaldía de Bucaramanga, 2019).

<sup>5</sup> Disponible en: Fuente (Dirección de Tránsito de Bucaramanga, 2019).

<b>Año</b>	<b>Automóviles</b>	<b>Porcentaje de incremento</b>
2014	89134	7.449912
2013	82954	2.51612744
2012	80918	

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

En la Figura 8, se puede apreciar el incremento de la cantidad de vehículos registrados a través de los años. Cabe resaltar que a partir del 2015 el incremento de cantidad de vehículos no es elevado.

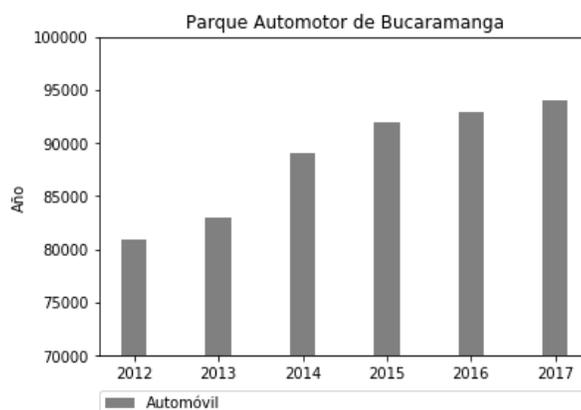


Figura 8. Parque Automotor de Bucaramanga

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

Con respecto a las camionetas, y al igual que con la Tabla 7, se puede ver un mayor incremento en el año 2014. Esta vez fue del 15.54%, en contraposición en el 2016 hubo un porcentaje menor en comparación con los demás años.

Tabla 7. Incremento de Camionetas en el municipio de Bucaramanga

<b>Año</b>	<b>Camionetas</b>	<b>Porcentaje de incremento</b>
2017	34706	4.82662801
2016	33108	2.57776676
2015	32276	6.23045782
2014	30383	15.5466819
2013	26295	4.93235963
2012	25059	

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

En la Figura 9, se ve reflejado gráficamente el crecimiento de las cantidades de camionetas a través de los años.

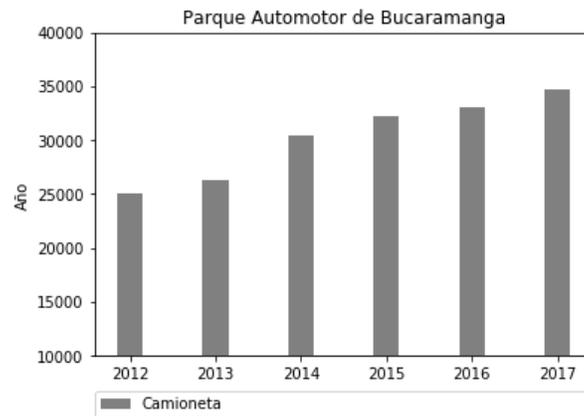


Figura 9. Incremento de Camionetas

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

La Tabla 8 perteneciente a las motocicletas, muestra un pico de crecimiento en los años 2014 y 2015, aumentando la cantidad registrada en más de 4000 unidades de motocicletas en esos años, aunque se normaliza el crecimiento posteriormente. Sin embargo, el incremento de la cantidad de motocicletas en el municipio de Bucaramanga es elevado, llegando a su punto más alto con un 13.5%.

Tabla 8. Incremento de Motocicletas en el municipio de Bucaramanga

Año	Motocicletas	Porcentaje
2017	40855	9.49267011
2016	37313	9.39020815
2015	34110	13.1155696
2014	30155	13.5012045
2013	26568	4.91647909
2012	25323	

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

La Figura 10, presenta la cantidad de motocicletas registradas en los últimos años en el municipio de Bucaramanga.

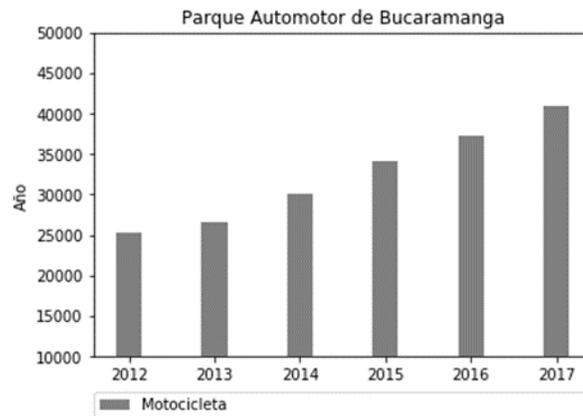


Figura 10. Incremento motocicletas

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

El parque automotor del municipio de Bucaramanga pasó de tener 159.521 vehículos a 202.240 vehículos registrados, una cifra que aumentó 42.719 unidades durante un periodo de 6 años, lo cual indica que tal cifra es un factor decisivo para el mal funcionamiento del flujo vehicular.

En la Tabla 9, se ve el crecimiento total del parque automotor del municipio de Bucaramanga durante 6 años, donde al igual que con las tablas anteriores, el año 2014 presenta el mayor incremento del parque automotor.

Tabla 9. Total, incremento parque automotor

Año	Total	Porcentaje
2017	202240.465	3.47843174
2016	195442.143	3.20788647
2015	189367.45	5.05618624
2014	180253.498	9.47718981
2013	164649.365	3.21485257
2012	159521	

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

La Figura 11 muestra gráficamente el crecimiento del parque automotor.

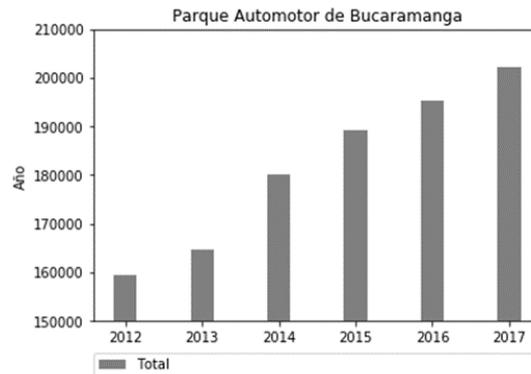


Figura 11. Parque automotor en Bucaramanga  
 Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019c)

La movilidad en la ciudad se ha ido ralentizando a lo largo de los años, generando problemas de movilidad, accidentes de tránsito, trancones y problemas de circulación para los servicios de emergencias, y la principal causa es el crecimiento excesivo que ha tenido el parque automotor, ya que la infraestructura vial no está optimizada para la cantidad de automóviles que hay en la actualidad, por esta razón, los entes encargados del control han intentado generar planes que mejoren la circulación de automóviles, tales como: el pico y placa, la restricción a vehículos pesados, aumento de señales de tránsito, control al mal estacionamiento y el contraflujo.

### Semáforos en el municipio de Bucaramanga

Actualmente en Bucaramanga se encuentran registrados 888 semáforos, que realizan su función de control vehicular en las 173 intersecciones más transitadas de la ciudad. Estos semáforos se pueden apreciar en la Figura 12. A continuación, es presentado un resumen de la administración de los semáforos en el municipio de Bucaramanga (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2018a).

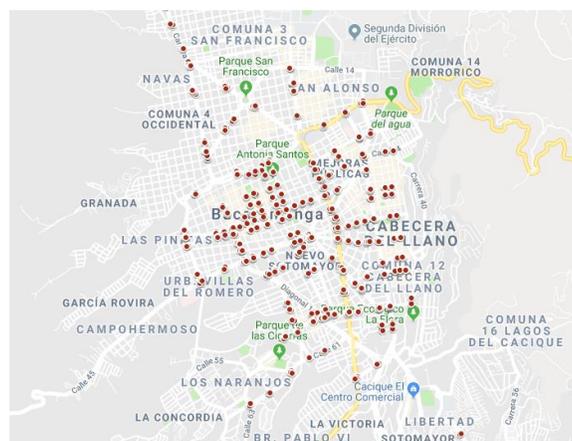


Figura 12. Total semáforos Bucaramanga  
 Fuente: Tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2019b)

En el año 2015, se realizaron una serie de actividades con el objetivo de hacer un mantenimiento a la red de semáforos, de acuerdo con el programa de sostenibilidad urbana. Para entonces la meta era mantener 172 intersecciones en buen estado (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2018a). Las actividades realizadas fueron:

- Reposición de Bombillas.
- Cambio de materiales y elementos en los equipos y demás infraestructura de semaforización.
- Cambio de Módulos Electrónicos.
- Planeamiento de Tráfico.
- Instalación de materiales y elementos para optimizar el funcionamiento de los equipos de control central y local.
- Revisión, reparación o construcción de nuevas acometidas.
- Diagnóstico y reparación oportuna de los equipos de control local o central.
- Instalación de Cableado y Ductería.
- Instalación de Postes y Semáforos (por deterioro o accidentes).
- Retiro de Cable y Ductería (en caso de supresión).
- Retiro de Postes y Semáforos (en caso de supresión).
- Reposición de Equipos de Control.
- Revisiones y pruebas técnicas.
- Poda de árboles.
- Varios: Labores técnicas complementarias al sistema de semaforización o relacionadas con la central de semáforos o la sede administrativa de la entidad.

Entre las actividades realizadas, cabe mencionar las acciones de mejoramiento de las señales de tránsito en 17 diferentes comunas de la ciudad, tales como: mantenimiento, implementación y modificación de los diferentes tipos de señales, así como todos los registros, inventario y la consolidación de los resultados obtenidos. En la Tabla 10 están plasmados los resultados de los mantenimientos realizados en esos cuatro años anteriores.

Tabla 10. Señales registradas

<b>Señalización vertical ejecutada</b>			
<b>Año</b>	<b>Nueva</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>Repuesto</b>
2012	83	100%	-
2013	932	100%	78
2014	92	100%	672
2015	238	100%	446
Total	1345	100%	1196
Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2018a)			

La meta para el año 2016, fue actualizar el 100% de la red semafórica del municipio de Bucaramanga, de modo que se realizó mantenimiento, reparación y adaptación de equipos de control local. Se especifica que en la calle 36 y entre las carreras 13 y 17 se adelantó un proceso técnico de semáforos de policarbonato e iluminación led, para la reposición de estos. En cuanto al mantenimiento preventivo se alcanzó el 100% de la meta, y con respecto al funcionamiento promedio de los semáforos, se alcanzó el 98.24%.

Las metas puntuales en lugares críticos de la ciudad, en donde se presenta gran accidentalidad se muestran en la Tabla 11. En esta se puede visualizar que, durante los meses de septiembre a noviembre, 18.823 señales se perciben en un funcionamiento activo de la ciudad.

Tabla 11. Señalización atendida

<b>Descripción</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Total</b>
Nueva	92	2753.9	749.58	3595.48
Mantenida	6713.14	3518.59	4995.82	15227.55
Total	6805.14	6272.49	5745.4	18823.03

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2018a)

Durante el mismo año, se realizó la implementación completa de un sistema georreferenciado de la red semafórica de la ciudad, consolidando así información e inventario de las señales de tránsito a través del Software Qgis, un sistema de información geográfica y de código abierto que permite una visualización del mapa (QGIS, 2019).

Para el año 2017, se propusieron las metas de actualizar el 100% la red semafórica, y la actualización del sistema de georreferenciado, de las cuales se llegó a superar la actualización en un 103%. En cuanto la georreferenciación se completó satisfactoriamente.

En esta ocasión se presenta el trabajo realizado con mayor profundidad a comparación de los años anteriores. Con respecto al proceso técnico que se adelantó el año anterior sobre la reposición de los semáforos, en el 2017 el proyecto se concretó satisfactoriamente, realizando estas labores en los corredores viales de la Carrera 27 entre Calles 14 y 67, Calle 36 entre Carreras 18 y 33, y Calle 56 entre Carreras 15 y 36, de la ciudad de Bucaramanga. A demás de esto, se realizó la atención a solicitudes y peticiones, en las que se pedían actividades como: reparación, presencia y control vial, implementación de reductores, entre muchas otras, más de 2000 actividades fueron realizadas. Con respecto al sistema georreferenciado, se realizó una serie de actualizaciones de la red semafórica de la ciudad.

En el año 2018, se realizaron labores de mantenimiento preventivo en la red semafórica de la ciudad, se atendieron algunas de las solicitudes realizadas, y se implementaron 24 reductores en la ciudad, se efectuó seguimiento en algunos sectores para tener en cuenta posibles actividades a realizar.

En la Tabla 12, se aprecia el resumen del total de reposiciones de bombillas para semáforos, consolidado de enero a diciembre de 2018.

Tabla 12. Reposición

<b>Reposición de Bombillas</b>		
Bombillas Halógenas	727	Unidades
Bombillas Incandescentes	134	Unidades
Total de Bombillas cambiadas	851	Unidades
Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2018a)		

En la Tabla 13, se evidencia el promedio de indicadores de gestión de semaforización y señalización, vigencia 2018

Tabla 13. Indicadores de gestión

<b>Ítem</b>	<b>Descripción de indicador</b>	<b>Promedio %</b>
1	Mantenimiento semaforización	99.44%
2	Funcionamiento semaforización	99.71%
3	Señalización horizontal	732.31%
4	Señalización vertical	135.42%
Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2018a)		

El sistema de georreferenciación fue actualizado con el ingreso de nuevas señales de tránsito instaladas, y el inventario de la red semafórica existente.

Todas las labores realizadas estos últimos años, están pensadas para mejorar la movilidad, seguridad y comodidad vial en el municipio de Bucaramanga, el sistema de información, georreferenciado tiene como fin la identificación de la red del sistema semafórico, georreferenciación de todas las intersecciones semaforizadas de la ciudad, y la correcta práctica de mantenimiento preventivo del mismo.

### **La movilidad en el municipio de Bucaramanga**

La Dirección de Tránsito de Bucaramanga, realizó un estudio técnico sobre el tráfico de la ciudad, en el cual se muestran los puntos de tráfico críticos, en donde el flujo de vehículos se hace lento (Dirección de tránsito de Bucaramanga, 2017). A continuación, es presentado un resumen.



Lugar	Hora	Autos	Buses	Motos
Calle 34, carrera 15; 16	11:20-12:00 m	9	8	10
Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)				

Cuando se comparan las Tablas 14 y 15, el estudio evidencia que la implementación del pico y placa de cinco dígitos en el mes de febrero permite un mayor flujo de tráfico, ya que se reducen las velocidades promedio de los vehículos. Por el contrario, durante el mes de abril se realizó el mismo estudio, pero sin la implementación del pico y placa, y el resultado fue que los promedios de velocidad se reducen a casi la mitad con respecto al mes de febrero, pasando de 19, 17, 12 y 9 a 34, 34, 19 y 17 km/h en promedio general en las cuatro calles de la zona centro estudiadas, siendo estos lugares unos puntos críticos, por lo tanto la implementación del pico y placa genera una mejora en la movilidad.

Adicionalmente, el estudio muestra el mapa con las congestiones viales durante las horas de la tarde sin el pico y placa. Como se puede ver en la Figura 14, la zona del Centro presenta un incremento de retrasos vehiculares del 65%.

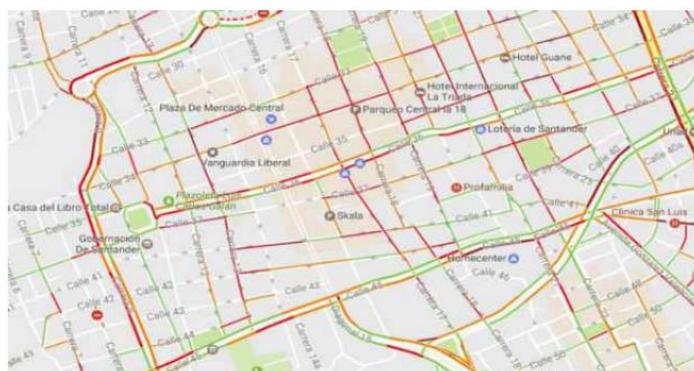


Figura 14. Congestionamientos viales

Fuente: Tomado de (Dirección de tránsito de Bucaramanga, 2017)

## Estructuración de medidas para el mejoramiento de la movilidad en Bucaramanga

En el año 2017 la Dirección de Tránsito de Bucaramanga realizó un estudio sobre los factores que influyen en la movilidad de la ciudad. Se va a tener en cuenta este estudio para la realización del diagnóstico, ya que se presenta una información completa y veraz, que sirve como complemento para la información que se posee y que es vital, para evaluar la importancia de la implementación de nuevas tendencias y tecnologías para el mejoramiento de la movilidad de la ciudad, entre otras cosas (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a).

## Estudio de velocidades:

Una de las consecuencias del aumento del parque automotor, es la alta congestión y los atascos viales que se generan, sobre todo en las horas con mayor intensidad de movilidad. La dirección de tránsito de Bucaramanga, en el estudio mencionado anteriormente, realizó lecturas de las velocidades en diferentes puntos críticos de la ciudad.

### Puntos con velocidades menores a 25 Km/h:

A partir de los resultados de las lecturas realizadas, se determinó que la zona del centro es la que más presenta ralentizaciones en el tránsito, a excepción de la Carrera 9, Calle 45, Av. Quebrada seca y Carrera 19, que presentan velocidades que superan los 25 Km/h, y se determinaron 8 puntos que presentan velocidades inferiores a los 25 Km/h. En la Tabla 16 se puede ver, que las velocidades promedio de esas vías son bastante bajas, como es el caso de la Carrera 18 con calle 41 que presenta el flujo más lento con 12 Km/h, por donde transitan tan solo 49 vehículos durante ese espacio de tiempo, lo cual ocasiona numerosos problemas, por ejemplo, la contaminación del medio ambiente.

Tabla 16. Puntos de alta congestión

Intersección	Hora	Autos	Buses	Metrolínea	Motos	Camiones	Promedio Km/h
Calle 34 con Carrera 18	8:00-9:00 am	26	24	-	29	22	25
Carrera 18 con Calle 41	4:00-5:00 pm	13	11	-	15	10	12
Carrera 16 con Calle 34	6:00-7:00 pm	11	9	-	17	16	13
Carrera 17 con Calle 36	6:00-7:00 pm	16	15	-	15	17	14
Carrera 18 con Calle 34	6:00-7:00 pm	29	26	-	33	25	25
Carrera 14 con Calle 35	5:00-6:00 pm	26	17	-	26	16	21
Calle 36 con carrera 17	5:00-6:00 pm	23	20	33.5	23	17	23
Calle 33 con Carrera 12	6:00-7:00 pm	17	17	-	20	16	18

Fuente: Tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

En la Figura 15, se puede apreciar el mapa con el promedio de las velocidades en los puntos críticos del centro representados en las vías.

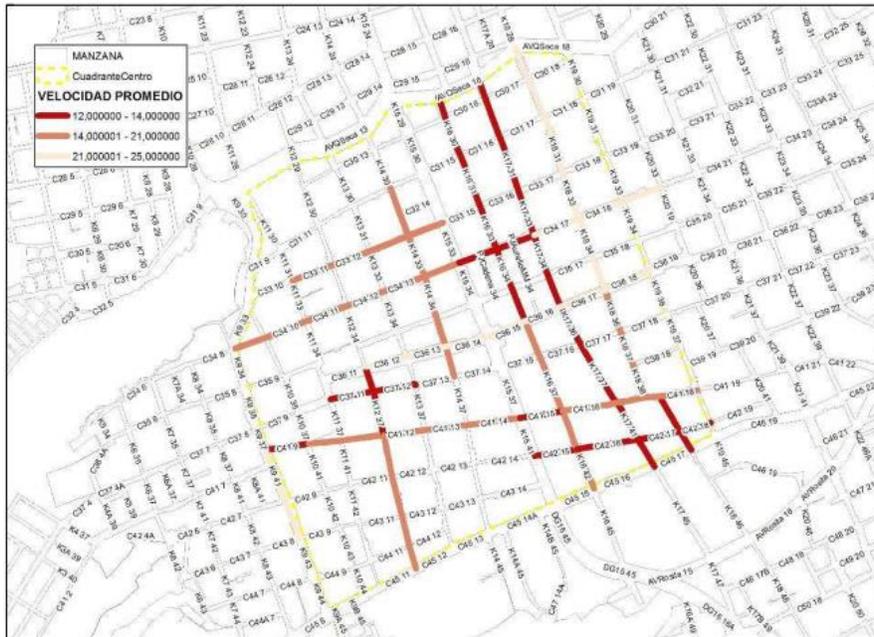


Figura 15. Georreferenciación de los puntos de alta congestión  
 Fuente: tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

La Tabla 17, muestra la cantidad de vehículos que transitan en los mismos puntos mencionados anteriormente durante una hora, así como el número de vehículos que permanecen en la vía durante cierto tiempo.

Tabla 17. Factor de uso de la vía

Promedio de velocidad	Número de vehículos	Tiempo (Minutos)	Tasa de flujo en Veh/h	Factor de uso de la vía
Calle 34 con Carrera 18	67	3	1340	12%
Carrera 18 con Calle 41	128	5	1536	28%
Carrera 16 con Calle 34	118	5	1416	28%
Carrera 17 con Calle 36	115	5	1380	15%
Carrera 18 con Calle 34	95	4	1425	19%
Carrera 14 con Calle 35	97	4	1455	21%
Calle 36 con Carrera 17	88	4	1320	10%
Calle 33 con Carrera 12	109	5	1308	9%

Fuente: Tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

Como se aprecia en la Tabla 18, la cantidad de vehículos que transitan por esos puntos es elevada, llegando al punto de superar la capacidad que esas vías deberían soportar. Los porcentajes indican cuál es ese exceso sobre el 100%. Por ejemplo, para la Carrera 18 con Calle 41, la cantidad de vehículos para la que fue diseñada es de unos 1200 aproximadamente, pero la cantidad que realmente transitan son alrededor de 1536 vehículos, es decir, 128 cada 5 minutos.

Tabla 18 Factor de uso de la vía (Velocidades superiores a 25 Km/h)

Promedio de velocidad	Número de vehículos	Tiempo (Minutos)	Tasa de flujo en Veh/h	Factor de uso de la vía
Av. Q. Seca con Carrera 12	53.8	5	653	-46%
Calle 45 con Carrera 1 W	60	4	893	-26%
Carrera 9 con Calle 41	73	5	966	-20%
Carrera 19 con Calle 35	57	5	684	-43%

Fuente: Tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

Haciendo la comparación de las Tablas 17 y 18, se percibe una diferencia del nivel de uso de la vía. Para el caso de la Tabla 18, el número de vehículos no supera el 100% de la capacidad que tiene la vía, por lo que las tasas de flujo vehicular disminuyen considerablemente, afirmando así que esos ocho puntos seleccionados son los más críticos de la ciudad, sobre todo en horas pico.

Tiempos de los semáforos:

Actualmente en los semáforos de la ciudad, se manejan unos tiempos que suponen un mayor flujo vehicular a diferentes horas del día. Estos tiempos son diferentes también para los distintos puntos de la ciudad, ya que no todos tienen el mismo flujo, por lo que los planes se estructuran de manera diferente, tanto para los puntos principales de la ciudad, como para la hora del día. Cabe recalcar que para cada intersección había siete (7) planes de ciclo distintos. Un ejemplo de esos planes es el de la Carrera 27 con Calle 56, lo cual está representado en la Tabla 19, donde es presentada la cantidad de segundos que se le da a cada semáforo para que opere. Cada plan consta de cierta cantidad de segundos en total, por lo que se reparte ese tiempo en los semáforos con sentido contrario que hay en la intersección, es decir, se tiene un límite de 60 segundos a cada par de semáforos. En la mayoría de los casos, los tiempos no superan los límites establecidos, ya que se deja una franja de tiempo, para que los últimos vehículos puedan circular sin causar un accidente. De la misma manera, se presenta para todas las intersecciones viales de la ciudad de Bucaramanga.

Tabla 19. Tiempos semáforo Carrera 27 con Calle 56

Planes	Carrera 27 con Calle 56			
	Sentidos Viales			
	1	2	3	4
Plan 1 (60 Seg.)	28	28	21	21
Plan 2 (75 Seg.)	37	37	27	27
Plan 3 (90 Seg.)	37	37	42	42
Plan 4 (120 Seg.)	54	54	55	55

Planes	Carrera 27 con Calle 56			
	Sentidos Viales			
	1	2	3	4
Plan 5 (120 Seg.)	62	62	47	47
Plan 6 (90 Seg.)	48	48	31	31
Plan 9 (90 Seg.)	48	48	31	31

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

Según la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, estos tiempos que fueron establecidos, buscan optimizar los flujos vehiculares, dejando más tiempo la luz verde en algunos sentidos, para que la mayor cantidad de vehículos puedan transitar (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a).

Ruido ambiental:

Una consecuencia evidente de los flujos vehiculares lentos; es la cantidad de ruido que estos emiten, lo cual sin duda es algo preocupante para los transeúntes de la ciudad de Bucaramanga. La Dirección de Tránsito de Bucaramanga en este estudio, realizó un monitoreo de varios puntos de la ciudad con un flujo normal (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a).

Según Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019), en la Resolución 627 de Abril del 2006 (Ministerio de Ambiente, 2006), el máximo ruido que es permisible es de 80 dB. En la Tabla 20, están plasmados los resultados de las lecturas. Se aprecia que dos orientaciones de las ocho intersecciones superan la cifra establecida.

Tabla 20. Mediciones de ruido ambiental

Sitio	Hora	N	O	S	W	Vertical	Laeq Total	Norma
Carrera 17 calle 56	6:53	75,3	75	75,3	75,1	75,2	75,2	80
Carrera 9 calle 45	7:23	78,6	78,6	77,3	76,4	77,8	77,7	80
Carrera 21 calle 55	7:54	76,9	77,4	76,3	75,9	75,1	76,3	80
Av. La Rosita Cra. 23	8:20	73,5	72,7	72,7	73,5	78,3	74,1	80
Carrera 33 calle 45	11:22	75,8	76,5	76,1	77,8	80,1	77,3	80
Carrera 27 calle 36	11:51	78,4	77,5	77,2	78,4	80,6	78,4	80
Carrera 27 calle 56	12:36	78,9	79,5	77,7	78,6	76,9	78,3	80
Carrera 33 calle 56	13:01	77,9	78,5	77,7	76,7	76,5	77,5	80

Convenciones:

Fuente: Tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

Estudio de recorridos y concentración vehicular:

Con el objetivo de recolectar y procesar información con respecto a las rutas y los tiempos, se realizaron 24 recorridos en las vías más transitadas de la ciudad por parte de la Dirección de Tránsito de Bucaramanga (Dirección de Tránsito

Bucaramanga, 2017a). La información recolectada fue tabulada y presentada. Se escogieron las rutas relacionadas con la Universidad Autónoma de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander para presentarlas a continuación.

En la Tabla 21, se encuentra la información obtenida del estudio, se realizaron un total de tres rutas para cada recorrido, de las cuales algunas tenían más distancia que otras, por lo que los promedios de los precios y las distancias se alteran bastante. Un claro ejemplo es de la ruta Las Palmas a la UNAB, en la que el primer recorrido es de tan solo 1.2 km y el valor de la carrera es de \$5000, en la tabla se aprecia que el promedio es elevado ya que los otros dos recorridos son de 2.5 km por lo que el valor de la carrera se duplica.

Tabla 21. Recorridos UNAB & UIS

Origen	Destino	Recorrido promedio en Taxi (km)	Unidades en taxímetro	Valor promedio de la carrera (COP)	Valor promedio de la unidad por recorrido (COP)
Gobernación	UIS	3.55	96	6132	63.87
Gobernación	UNAB	3.82	102	6560	64.31
La Triada	UIS	2.72	87	5245	60.29
La Triada	UNAB	3.23	96	5951	61.99
C.C.C. Cuarta E	UIS	3.48	106	7192	67.85
C.C.C. Cuarta E	UNAB	1.27	83	6367	76.71
Las Palmas	UIS	3	91	5919	65.04
Las Palmas	UNAB	1.79	83	8847	106.59

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

En la Figura 16, se encuentran los tres recorridos realizados para la ruta Las Palmas a la UNAB, en dónde la ruta amarilla es de 1.2 km, la azul de 2.64 km y la roja de 2.53 km.

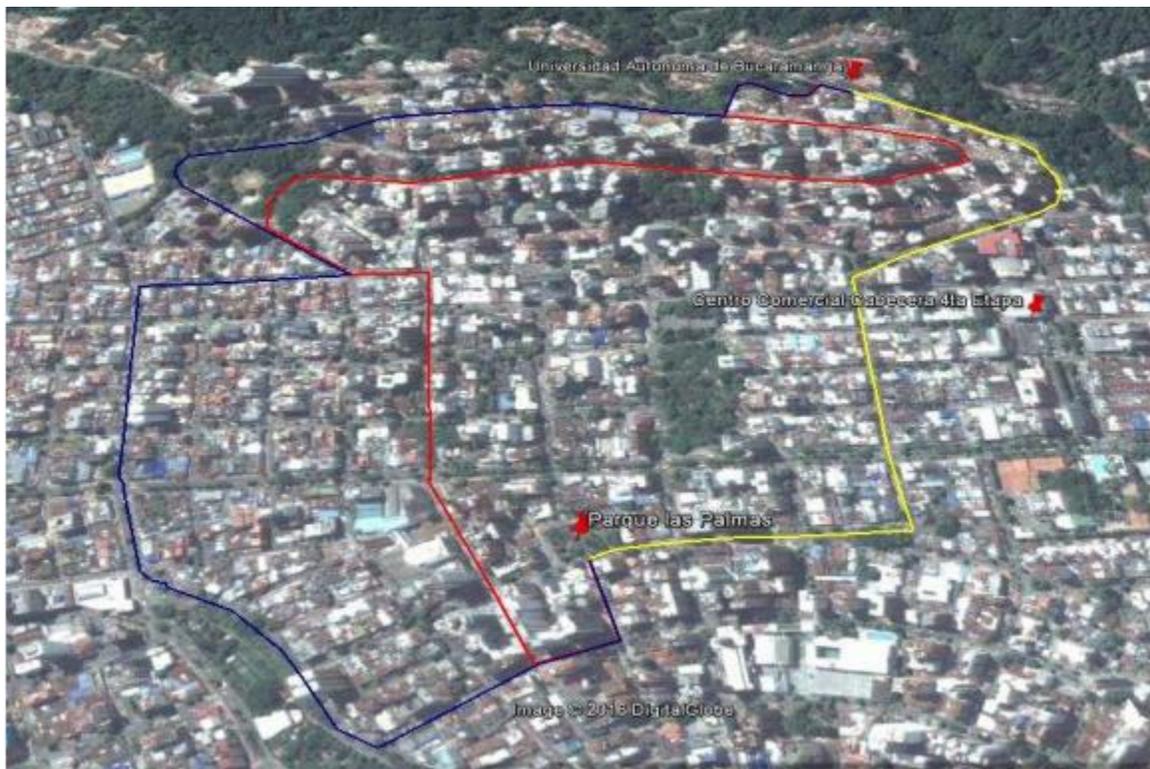


Figura 16. Recorridos Las Palmas-UNAB  
Fuente: Tomado de (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

Para el año 2017 en la ciudad de Bucaramanga, se encuentran registrados 108 estacionamientos en la zona Centro, y 21 en la zona de Cabecera, con lo cual no hay el espacio suficiente para la demanda de vehículos que esas zonas suelen tener, adicionalmente muchos de estos parqueaderos no poseen un lugar físico. Esto sumado a que la infraestructura de la malla vial no puede soportar el tránsito, ya que se debe tener en cuenta que un gran porcentaje de los circundantes hace parte de los municipios pertenecientes al área metropolitana de la ciudad, lo cual representa un problema para las concentraciones vehiculares que tiene la ciudad y, por tanto, para el flujo de tráfico de esta (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a).

#### Accidentalidad:

La principal consecuencia del mal flujo vehicular es la accidentalidad, por tal razón es muy importante que se resalte este problema. Según la *World Health Organization* (WHO)<sup>6</sup>, 3500 personas fallecen al día en las carreteras y 1.25 millones al año, de los cuales los principalmente afectados son los niños, ancianos, ciclistas y peatones, que son normalmente denominados “usuarios vulnerables de la vía pública” (World Health Organization, 2017).

<sup>6</sup> Disponible en: Fuente (World Health Organization, 2019).

Gracias al estudio realizado por la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, se tienen datos estadísticos de la accidentalidad que se presenta en la ciudad de Bucaramanga (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a). En la Tabla 22 se presentan los datos de accidentes de tránsito y la comparación de dichos datos entre los años 2015 y 2016, en la cual se evidencia que la diferencia es poca y no existe ni mejora ni empeoramiento.

Tabla 22. Accidentalidad 2015-2016

<b>Accidentalidad comparativa de enero a diciembre (2015-2016)</b>				
Clase de accidente	Año 2015	Año 2016	Diferencia	% DIF
Accidentes con víctimas fatales	51	68	12	33%
Accidentes con lesionados	1708	1704	-4	0.20%
Accidentes solo daños	2014	1968	-46	-2%
Total	3773	3740	-33	-1%
<b>Víctimas fatales y lesionados en accidentes</b>				
Víctimas en accidentes	54	75	21	39%
Personas lesionadas en accidentes	2617	2629	12	0%

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

Al momento de tipificar las víctimas de los accidentes se obtiene la Tabla 23, en donde queda en evidencia que los denominados “usuarios vulnerables de la vía pública” son normalmente víctimas fatales de tales accidentes. El 40% de las víctimas son motociclistas, otro 40% son peatones, 12% son pasajeros de motos, y el 8% restante son pasajeros de otros vehículos, conductores y ciclistas.

Tabla 23. Comparativo de víctimas

<b>Comparativo víctimas año 2015-2016</b>		
Condición de la víctima	Año 2015	Año 2016
Motociclista	25	30
Peatón	20	30
Pasajero moto	5	9
Ciclista	3	1
Pasajero moto	0	3
Conductor	0	2
Pasajero	1	0
Total	54	75

Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

La Figura 17 muestra las víctimas de accidentes de tránsito desde el año 2010 hasta el 2016. En los años 2014 y 2015 el número de víctimas fatales disminuyó, pero dicha cifra aumentó nuevamente en el año 2016.



Figura 17. Víctimas fatales de accidentes 2010-2016  
Fuente: Basado en (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a)

Soluciones parciales a los problemas:

La Dirección de Tránsito Bucaramanga en el estudio realizado, ha planteado tres soluciones parciales a los problemas de tránsito de la ciudad, que son: restricción de pico y placa de dos dígitos, restricción de pico y placa de cuatro dígitos y restricción de pico y placa general más restricción en la zona centro. Dichas alternativas serán expuestas a continuación (Dirección de Tránsito Bucaramanga, 2017a):

Alternativa 1.

Esta primera solución se trata de una restricción de pico y placa para vehículos particulares. Su horario es de 5:00 am a 8:00 pm de lunes a viernes. Sin embargo, se considera que la zona Centro y la zona Cabecera tiene un alto flujo de vehículos, por lo que en estos lugares en el horario de 5:00 am a 9:00 am y de 4:00 pm a 8:00 pm se aplica la restricción de cuatro dígitos.

Alternativa 2.

En esta solución se aplica la restricción de pico y placa de cuatro dígitos, en el horario de 5:00 am a las 9:00 am y de 4:00 pm a 8:00 pm. Este plan se efectúa en el área urbana a excepción de los barrios de la comuna Norte y la comuna Nororiental, el anillo vial y entre Café Madrid y Puente Palenque.

### Alternativa 3.

Esta alternativa posee dos partes: la primera aplica la restricción de pico y placa de dos dígitos, en el horario de 5:00 am a las 9:00 am y de 4:00 pm a 8:00 pm, y al igual que en la alternativa 2 se efectúa en el área urbana de la ciudad a excepción de los barrios de la comuna Norte y la comuna Nororiental, el anillo vial y entre Café Madrid y Puente Palenque.

La segunda parte es la restricción en la zona Centro desde las carreras 9 y 19 hasta la calle 45 y la avenida Quebrada Seca. Se aplica restricción de pico y placa de cinco dígitos con número par cuando la fecha es par y viceversa, de lunes a viernes, en el horario de 5:00 am a 8:00 pm, esto con el fin de aplacar el flujo vehicular ya que esta zona no posee una infraestructura vial que soporte tal flujo.

Para evaluar el uso de los semáforos inteligentes, desde una perspectiva más cercana, se tomó como referencia para el diagnóstico, ciudades colombianas las cuales estén apostando por esta solución tecnológica, empezando por la capital de Colombia; Bogotá, la cual se encuentra alrededor de unas 8 horas de Bucaramanga y donde el pasado 28 de marzo, se ha llevado a cabo la implementación de un sistema de control de tráfico en algunas de sus intersecciones, dando paso a la modernización de los semáforos en la capital del país.

El proyecto inició desde el 31 de agosto del 2018, y del cual se espera que entre mayo y agosto del 2020 se establezca la operación previa a la entrega final del SSI (Sistema de SemafORIZACIÓN Inteligente) a la Secretaría Distrital de Movilidad (Conexión Capital, 2019).

Los controladores instalados para el SSI cuentan con características como:

“Capacidad de almacenamiento de varios planes de señales (manejo de hasta 32 grupos de señales, capacidad de conexión de sensores vehiculares, capacidad de implementación de preferencia semafórica y manejo en los diferentes modos de operación como planes fijos horarios, modo actuado/micro regulación, de selección dinámica de planes/responsivo y modo adaptativo centralizado” (Conexión Capital, 2019).

Con el protocolo de comunicación establecido para el proyecto del SSI, los controladores instalados se comunicarán con la central de semafORIZACIÓN, instalada en el CGT (Confederación General del Trabajo) de la Secretaría Distrital de Movilidad, mediante el protocolo de comunicación abierto OCIT (Interfaz de comunicación abierta para sistemas de control de tráfico en carretera, de centro a centro) (Group, 2018). El funcionamiento del protocolo OCIT es presentado en la Figura 18.

“Estos controladores de última generación permiten la conectividad con sensores en las intersecciones y a partir de esto, la toma de decisiones desde el computador central de la Secretaría de Movilidad en cuanto a los tiempos de verde que van a estar funcionando en las intersecciones” (Estupiñán, 2019).

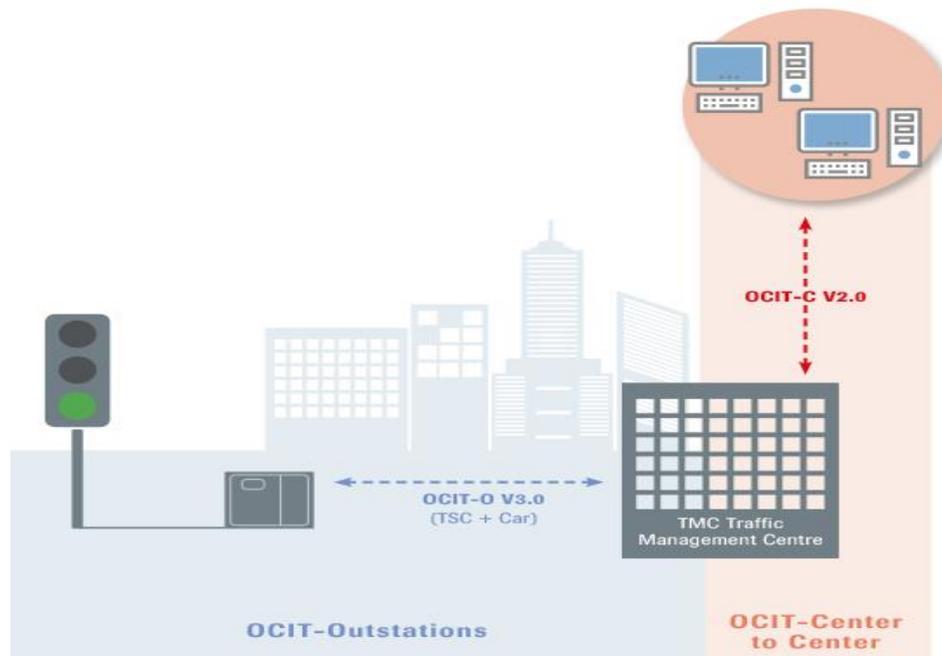


Figura 18. OCIT C  
Fuente: Tomado de (Group, 2018)

Dentro de las ventajas que se pueden encontrar en el SSI están (Estupiñán, 2019):

- Un 30 % de ahorro en el tiempo promedio de viajes en algunas zonas de la ciudad.
- Regulación del tránsito.
- Recopila información para dar prioridad dependiendo de los actores: peatones, ciclistas y vehículos motorizados.
- Lectura del tráfico en tiempo real permitiendo regular los tiempos de luz verde de acuerdo con el flujo vehicular de manera dinámica.
- La ciudad podrá liberar una parte importante del pie de fuerza de la Policía de Tránsito, que actualmente se dedica a agilizar el tráfico dada la condición obsoleta de los semáforos existentes.
- El sistema se constituirá en una herramienta útil para el manejo del tráfico en medio de la construcción de múltiples obras de movilidad que la ciudad vivirá en los próximos años.
- Se contará con una gran central automatizada para la operación que estará asociada al Centro de Gestión de Tránsito de la ciudad.

- Nunca dejará de funcionar como pasa en este momento cuando se presenta un corte de luz. Todos los semáforos van a tener una batería que les va a permitir operar un par de horas adicionales así haya una falla en el suministro de energía.

La ciudad de Medellín también hace parte de las ciudades colombianas que han empezado a apostar por esta tecnología. En marzo de este año, EPM presentó el proyecto piloto, utilizando Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (IA). Esto se hará mediante la implementación de dos semáforos inteligentes, a los cuales se les ha instalado un sensor llamado “LIDAR” (Detección y rango de imágenes láser) que es capaz de monitorear el tráfico en 3D y en tiempo real (ver Figura 19) (Osorio, 2019).

Pero la gran novedad de este sistema no radica en que monitoree en tiempo real, sino que, mediante los datos recolectados, se podrán tomar medidas automáticas que podrán darle más flujo a una vía o a otra, según se amerite, es decir, no se necesita que alguien lo esté operando.

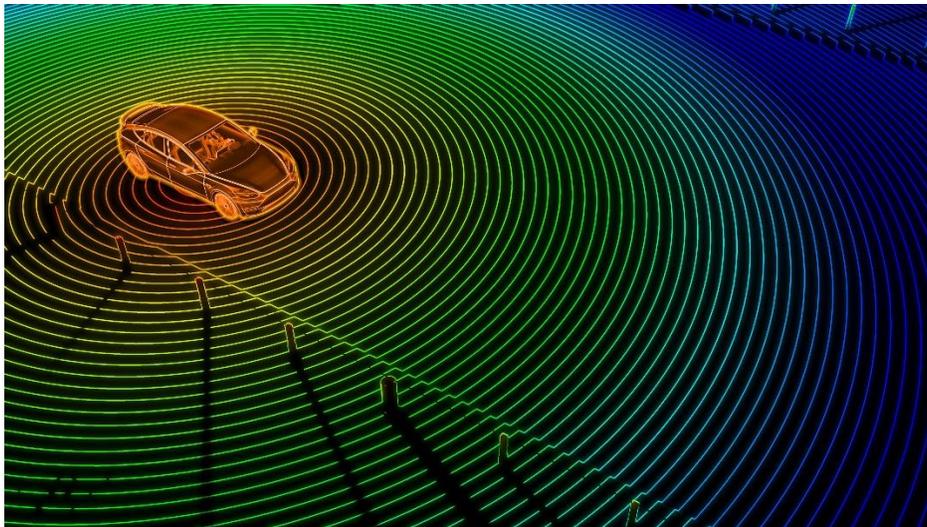


Figura 19. LIDAR  
Fuente: Tomado de (Phononic, 2019)

La implementación apenas es una prueba piloto, la cual consta de dos sensores instalados en la vía. Por motivos de seguridad, no se conoce en qué lugar exacto de la ciudad fueron ubicados. Lo que sí se saben es que están en “dos sitios de mucho tráfico” (Orrego, 2019).

Para evaluar su rendimiento el piloto del proyecto tendrá una duración de seis meses y luego se evaluará su continuidad, se espera que estos semáforos puedan optimizar los tiempos entre un 5 y un 10 % (Osorio, 2019).

En síntesis, Bucaramanga es una ciudad que ha tenido un enorme crecimiento a través de los años, como consecuencia de esto, se han generado numerosos problemas, ya que el crecimiento del parque automotor que se ha venido dando en los últimos 10 años, y sumado a que en la ciudad circulan los vehículos del Área Metropolitana de Bucaramanga, de los cuales 674331 vehículos hacen parte, conlleva a que la infraestructura vial se quede obsoleta, y que la cantidad de vehículos que circulan a diario superen el 100% del límite de capacidad de la mayoría de vías, sobre todo en las zonas Centro y Cabecera que suelen ser las más transitadas.

Como consecuencias que generan este problema está principalmente el daño a la salud del ciudadano, que se puede ver afectada de diferentes maneras. La más preocupante es la accidentalidad, que lastimosamente cobra vidas de muchas personas, y que es una cifra que debería disminuir, ya que los accidentes de tránsito hacen parte de las 10 principales causas de muerte en el mundo según la WHO (World Health Organization, 2018). Otra forma que afecta la salud y que es muy preocupante es la alta contaminación que la movilidad genera. Lamentablemente en muchas ciudades, el parque automotor es el principal causante de contaminación, y en pro del cuidado al medio ambiente, lo mejor es minimizar tiempos de viaje para que los vehículos emitan menos gases tóxicos. La alta contaminación auditiva, que ya casi supera los 80db, el estrés que pueden generar los trancones y el flujo vehicular lento, y muchas lesiones causadas por pequeños accidentes son otras de las consecuencias que la movilidad puede llegar a genera.

Por otro lado, la Alcaldía de Bucaramanga llevó a cabo varios proyectos para mejorar la movilidad. Según la entidad, el problema se soluciona expandiendo el alcance del servicio de Metrolínea, expandir y crear más portales en lugares donde el medio de transporte aun no llegue. También se está promoviendo el uso de la bicicleta, por lo que se adelantan obras de construcción de ciclorrutas a corto, mediano y largo plazo, comenzando por un corredor de 20 km y proyectándose para el 2030, una serie de corredores que conformarán 150 km, lo cual es una importante inversión. Adicionalmente se efectuó una iniciativa de peatonalización en algunas vías descuidadas de la ciudad como; la Calle de los Estudiantes, alrededor del Instituto Municipal de Cultura, El Tierrero, y la carrera 20 entre las calles 33 y 36, en dónde ahora el paso peatonal se ha restaurado.

A pesar de todo el esfuerzo realizado por las entidades encargadas, tales como: regulaciones, campañas o actividades educativas, construcción de obras viales, restricción vehicular, planes de tiempos de semáforos y todas las medidas que se han llevado a cabo, no parece haber una mejora significativa con respecto a la movilidad vehicular de la ciudad, porque solo se ha llegado a tener una solución parcial y no una definitiva, por tal razón es ideal realizar el diseño de tal solución, para que todos estos problemas sean solucionados, y la movilidad tenga un excelente desempeño, para que la ciudad de Bucaramanga siga siendo una de las ciudades más avanzadas de Colombia.

## **Normatividad**

En Colombia, hay una serie de normas que se encargan de regir el comportamiento de la sociedad con respecto al tráfico vehicular, de esa manera se previene cualquier tipo de inconveniente que se pueda presentar en las vías del país.

El Ministerio de Transporte (Ministerio de transporte, 2019) y el Registro Único Nacional de Tránsito (Tránsito Registro Único Nacional de, 2019) presentan las reglamentaciones que deben ser tomadas en consideración por los ciudadanos. Las normativas que presentan estas entidades son:

Las resoluciones, que son unas medidas decretadas por el Ministerio de Transporte y sirven para reforzar las leyes o complementarlas.

Los decretos, son normas o reglamentos generalmente administrativos, pero de rango menor a las leyes.

La ley, es una norma jurídica totalmente general, es decir, comprende a todo aquel que intervenga sin ningún tipo de exclusión, puede establecer derechos y deberes, y en caso de no ser cumplida se puede castigar la infracción legalmente.

Las circulares, es la normativa de menor rango y cumple con funciones normativas más formales.

### 6.3 FRAMEWORK CONCEPTUAL PARA EL CONTROL VEHICULAR BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS

A continuación, en esta sección será presentado el diseño del *framework* conceptual propuesto, en el cual se podrán apreciar los dispositivos, tecnologías y protocolos requeridos para el diseño y posterior implementación de un sistema de control vehicular. La solución que se ofrece para dar fin a la problemática que genera la congestión vehicular, es la implementación de una serie de semáforos autónomos en las intersecciones semaforizadas de la ciudad, los cuales funcionan haciendo una lectura del flujo vehicular en las carreteras. Los datos obtenidos de las vías serán analizados por un algoritmo que defina los tiempos óptimos de luz para cada semáforo en la intersección, de modo que el flujo vehicular en las vías sea el más adecuado.

Antes de comenzar con el diseño de la solución tecnológica, se procedió a realizar una serie de simulaciones en el software de *Synchro Studio*<sup>7</sup>, el cual es un software de análisis de tráfico, capaz de modelar y simular de una manera precisa diferentes tipos de control de tráfico. Ofrece la posibilidad de configurar una amplia cantidad de variables que de una u otra forma afectan la movilidad, tales como: Cantidad de vehículos (dato del que dependen otras variables como la capacidad máxima de la vía o de la intersección), velocidad de los vehículos, peatones que cruzan las calles, paradas de bus, parqueaderos, diferentes tipos de intersecciones (controladas por semáforo, controladas con señal de Pare, rotondas, intersecciones con prioridad de paso, con separación espacial, etc.), características de las vías (ángulo, número de carriles, señales de tránsito, dirección, etc.), tipos de vehículos que transitan (es decir; en algunas calles pueden pasar buses mientras que en otras no), entre otras variables (Trafficware a CUBIC Company, 2017).

Para la simulación se tomó en cuenta la Zona Centro de Bucaramanga, entre la calle 36 y la calle 34 desde la carrera 16 hasta la carrera 18, que hacen parte de los puntos con mayor congestión de la ciudad, se procuró configurar la simulación lo más real posible, basados en la información obtenida en el diagnóstico realizado. En cuanto a la infraestructura de la Zona, se utilizó *Google Maps*<sup>8</sup> y su herramienta para medir las distancias, para las longitudes de las vías y de la zona en general, a partir del mismo medio se obtuvo la información acerca de elementos de control o señalizaciones tanto verticales como horizontales.

En total se realizaron cuatro simulaciones:

---

<sup>7</sup> Disponible en: <https://www.trafficware.com/synchro.html>

<sup>8</sup> Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Cra.+18+%233432/@7.1190071,-73.1246644,18z/data=!4m6!3m5!1s0x8e683fd7ead1d0c1:0xe4911ab61ee161d0!4b1!8m2!3d7.1199264!4d-73.1244937?hl=es-MX>

- La primera fue con los semáforos tradicionales, los cuales están previamente programados.
- La segunda fue con un tipo de semáforo actuador simple, en el cual el tiempo de cada ciclo depende de las condiciones de tránsito y cada intersección actúa por separado.
- La tercera se trata de un semáforo actuador semi coordinado, el cual da prioridad de luz verde por defecto a las calles principales, y los detectores actúan en las calles secundarias de manera tal de que cuando la cola sea lo suficientemente grande dará la luz verde.
- La última simulación se realizó con el semáforo actuador coordinado, el cual opera haciendo lectura del tráfico y adicional a eso comparte la información de flujo con las demás intersecciones semaforizadas.

Por otro lado, en las intersecciones que no se encuentran semaforizadas, hacen uso de otras señales. En el caso de la zona seleccionada, se poseen señales de Pare, las cuales se pueden ver como puntos rojos en la Figura 20, que corresponde a la simulación realizada. En la Figura 18 se puede apreciar la interfaz del programa *Synchro Studio*, y parte de las funciones que ofrece, así como el diseño realizado de las vías.

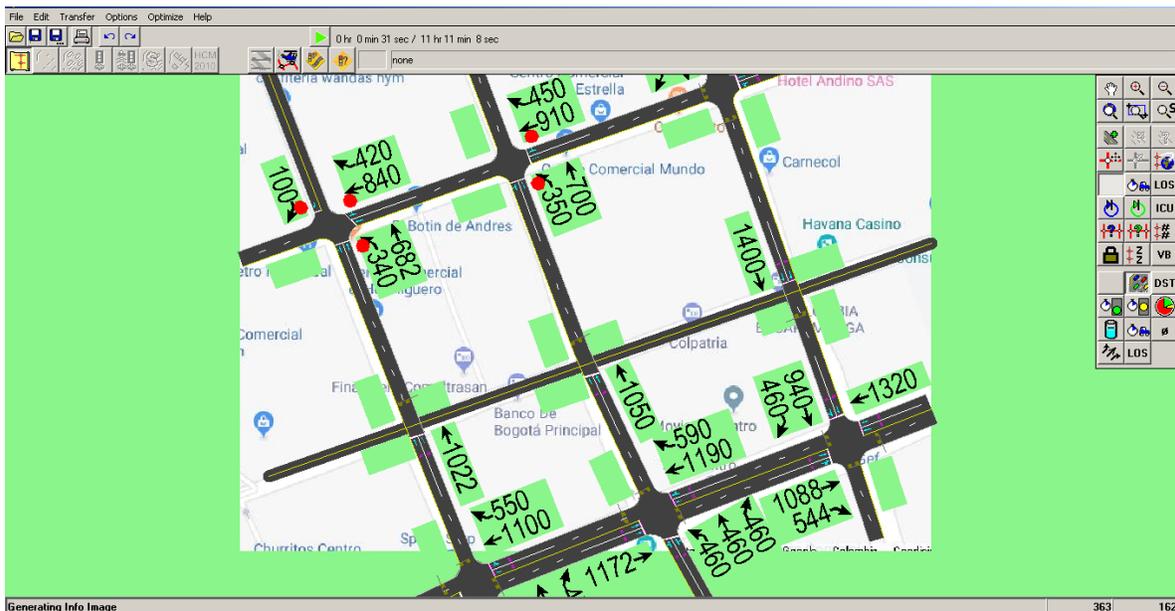


Figura 20. Simulación  
Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

Las configuraciones aplicables, se deben atribuir para cada calle y nodo de la simulación, de manera tal que el sistema funcione correctamente, es decir, que los datos de salida de una calle concuerden con los de entrada de otra, y de esa manera con cada variable. A continuación, serán presentadas las configuraciones esenciales de un nodo seleccionado, y de las calles que lo componen. En la Figura

21, se puede apreciar la configuración que se aplicó con respecto a dos nodos de la simulación, en la cual elementos como el número de identificación, la posición del nodo, y el tipo de señal que se usa, son configurados en primera instancia. En la parte izquierda se encuentra un nodo que solamente posee señales de Pare en la intersección, por lo que su configuración ya estaría completa. En cuanto a la parte derecha, esta tabla pertenece a un nodo con semáforos actuadores coordinados, por lo que su configuración se expande al tratarse de dichos semáforos.

NODE SETTINGS	
Node #	
Zone:	
X East (m):	241.9
Y North (m):	95.9
Z Elevation (m):	0.0
Description	
Control Type	Unsig
Max v/c Ratio:	1.46
Intersection Delay (s):	159.0
Intersection LOS:	F
ICU:	0.82
ICU LOS:	D

NODE SETTINGS	
Node #	ξ
Zone:	
X East (m):	389.7
Y North (m):	-34.5
Z Elevation (m):	0.0
Description	
Control Type	Actd-Coord
Cycle Length (s):	40.0
Lock Timings:	<input type="checkbox"/>
Optimize Cycle Length:	Optimize
Optimize Splits:	Optimize
Actuated Cycle(s):	40.0
Natural Cycle(s):	100.0
Max v/c Ratio:	1.31
Intersection Delay (s):	99.2
Intersection LOS:	F
ICU:	0.99
ICU LOS:	F
Offset (s):	0.0
Referenced to:	Begin of Green
Reference Phase:	2+6 - Unassigned
Master Intersection:	<input type="checkbox"/>
Yield Point:	Single
Mandatory Stop On Yellow:	<input type="checkbox"/>

Figura 21. Configuración de los nodos  
 Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

Hay otras configuraciones que se pueden aplicar, como es el caso de las carreteras, en la que se insertan datos como: la cantidad de vehículos por hora para cada calle, la distancia que se debe recorrer, la velocidad de los automóviles, y principalmente las características de la calle, las cuales son: los sentidos de movilización, los sentidos de orientación con respecto al nodo, los giros permitidos y los casos en los

que se puede girar aun cuando el semáforo se encuentre en rojo, tal como se ve en la Figura 22.

LANE SETTINGS	EBL			WBL			NBL			SBL		
	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR
Lanes and Sharing (#RL)	↑↑			↑↑			↑↑					
Traffic Volume (vph)	1172	0	0	1190	590	460	460	460	0	0	0	
Street Name												
Link Distance (m)	89.9			100.4			53.0			76.6		
Links Speed (km/h)	50			50			50			50		
Set Arterial Name and Speed	EB			WB			NB			SB		
Travel Time (s)	6.5			7.2			3.8			5.5		
Ideal Satd. Flow (vphpl)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	
Lane Width (m)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	
Grade (%)	0			0			0			0		
Area Type CBD	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		
Storage Length (m)	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		
Storage Lanes (#)												
Right Turn Channelized			None			None			None			
Curb Radius (m)												
Add Lanes (#)												
Lane Utilization Factor	1.00	0.95	1.00	1.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1.00	1.00	
Right Turn Factor		1.000			0.950			0.950				
Left Turn Factor (prot)		1.000			1.000			0.984				
Saturated Flow Rate (prot)		3539			3362			3308				
Left Turn Factor (perm)		1.000			1.000			0.984				
Right Ped Bike Factor		1.000			1.000			1.000				
Left Ped Factor		1.000			1.000			1.000				
Saturated Flow Rate (perm)		3539			3362			3308				
Right Turn on Red?			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Saturated Flow Rate (RTOR)		0			213			14				
Link Is Hidden	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		
Hide Name in Node Title	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		

Figura 22. Configuración de la intersección  
Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

Otra configuración importante de una intersección es el volumen, en la cual son aplicadas variables como: la cantidad de vehículos (previamente configurada), cantidad de peatones que cruzan las calles, bicicletas en la vía, y factores de parqueo y paradas de buses. Esta información se aprecia en la Figura 23.

VOLUME SETTINGS	EBL			WBL			NBL			SBL		
	EBT	EBR		WBT	WBR		NBT	NBR		SBT	SBR	
Lanes and Sharing (#RL)	↑↑			↑↑			↑↑					
Traffic Volume (vph)	0	1172	0	0	1190	590	460	460	460	0	0	0
Conflicting Peds. (#/hr)	30	—	35	25	—	30	35	—	20	25	—	25
Conflicting Bicycles (#/hr)	—	—	15	—	—	15	—	—	15	—	—	15
Peak Hour Factor	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Growth Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Heavy Vehicles (%)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Bus Blockages (#/hr)	0	5	0	0	5	0	0	5	0	0	0	0
Adj. Parking Lane?	<input type="checkbox"/>											
Parking Maneuvers (#/hr)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Traffic from mid-block (%)	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—
Link OD Volumes	— EB			— WB			—			— SB		
Adjusted Flow (vph)	0	1274	0	0	1293	641	500	500	500	0	0	0
Traffic in shared lane (%)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lane Group Flow (vph)	0	1274	0	0	1934	0	0	1500	0	0	0	0

Figura 23. Configuración del volumen  
Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

Por parte de los semáforos de la intersección, se aplica una configuración básica inicial del sistema, en el que variables de los tiempos para cada luz pueden ser modificadas. En adelante el factor de uso de la vía interfiere con el sistema, haciendo que el semáforo opere según las lecturas que haga el detector (véase la Figura 24).

TIMING SETTINGS									
Lanes and Sharing (#RL)		↑↑			↑↑			↑↑	
Traffic Volume (vph)	0	1172	0	0	1190	590	460	460	460
Turn Type							Perm		
Protected Phases		4			8			2	
Permitted Phases							2		
Detector Phases		4			8		2	2	
Switch Phase		0			0		0	0	
Leading Detector (m)		10.0			10.0			10.0	
Trailing Detector (m)		0.0			0.0			0.0	
Minimum Initial (s)		4.0			4.0		4.0	4.0	
Minimum Split (s)		20.0			20.0		20.0	20.0	
Total Split (s)		20.0			20.0		20.0	20.0	
Yellow Time (s)		3.5			3.5		3.5	3.5	
All-Red Time (s)		0.5			0.5		0.5	0.5	
Lost Time Adjust (s)		0.0			0.0			0.0	
Lagging Phase?									
Allow Lead/Lag Optimize?									
Recall Mode		None			None		C-Max	C-Max	
Actuated Effct. Green (s)		16.0			16.0			16.0	
Actuated g/C Ratio		0.40			0.40			0.40	
Volume to Capacity Ratio		0.92			1.37			1.17	
Control Delay (s)		17.4			183.4			104.1	
Queue Delay (s)		0.0			0.0			0.0	
Total Delay (s)		17.4			183.4			104.1	

Figura 24. Configuración de los tiempos de semáforos  
Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

Para que el sistema inteligente de semáforos funcione es fundamental el uso de un detector. En la Figura 25 se puede ver la configuración que se aplicó con respecto a tal dispositivo, en donde se tuvo en cuenta la distancia que hay entre el detector y el nodo, y las características del mismo (posición, tamaño, tipo, cola y retrasos). Para cada calle se encuentran dos detectores ya que, al tratarse de doble calzada, se necesita tal cantidad, y cada detector posee sus propias características.

DETECTOR SETTINGS				
	→ EBT	← WBT	↑ NBT	↓ SBT
Lanes and Sharing (#RL)		↑↓	↑↓	
Traffic Volume (vph)	1172	1190	460	0
Number of Detectors (#)	2	2	2	2
Detector Phases	4	8	2	None
Switch Phase	0	0	0	0
Leading Detector (m)	10.0	10.0	10.0	10.0
Trailing Detector (m)	0.0	0.0	0.0	0.0
Detector Template	Thru	Thru	Thru	Thru
Add/Update Template				
Detector 1 Position (m)	0.0	0.0	0.0	0.0
Detector 1 Size (m)	0.6	0.6	0.6	0.6
Detector 1 Type	Cl+Ex	Cl+Ex	Cl+Ex	Cl+Ex
Detector 1 Channels				
Detector 1 Extend	0.0	0.0	0.0	0.0
Detector 1 Queue	0.0	0.0	0.0	0.0
Detector 1 Delay	0.0	0.0	0.0	0.0
Detector 2 Position (m)	9.4	9.4	9.4	9.4
Detector 2 Size (m)	0.6	0.6	0.6	0.6
Detector 2 Type	Cl+Ex	Cl+Ex	Cl+Ex	Cl+Ex
Detector 2 Channels				
Detector 2 Extend	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 25. Configuración del detector  
Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

La Figura 26 muestra la simulación en actuación. Se aprecian los vehículos en las vías y los semáforos haciendo control del flujo. En medio de la simulación, se pueden conocer aspectos que van ocurriendo en la misma, tal y como lo enseña la Figura 27, la cual muestra la información que pertenece a uno de los vehículos. Tal información es: la identificación del vehículo, hacia a donde va, de donde viene, que tipo de vehículo es, entre otros. También se puede apreciar información de los semáforos como: que luz funciona en ese momento y su respectivo tiempo, y la información variable del nodo.

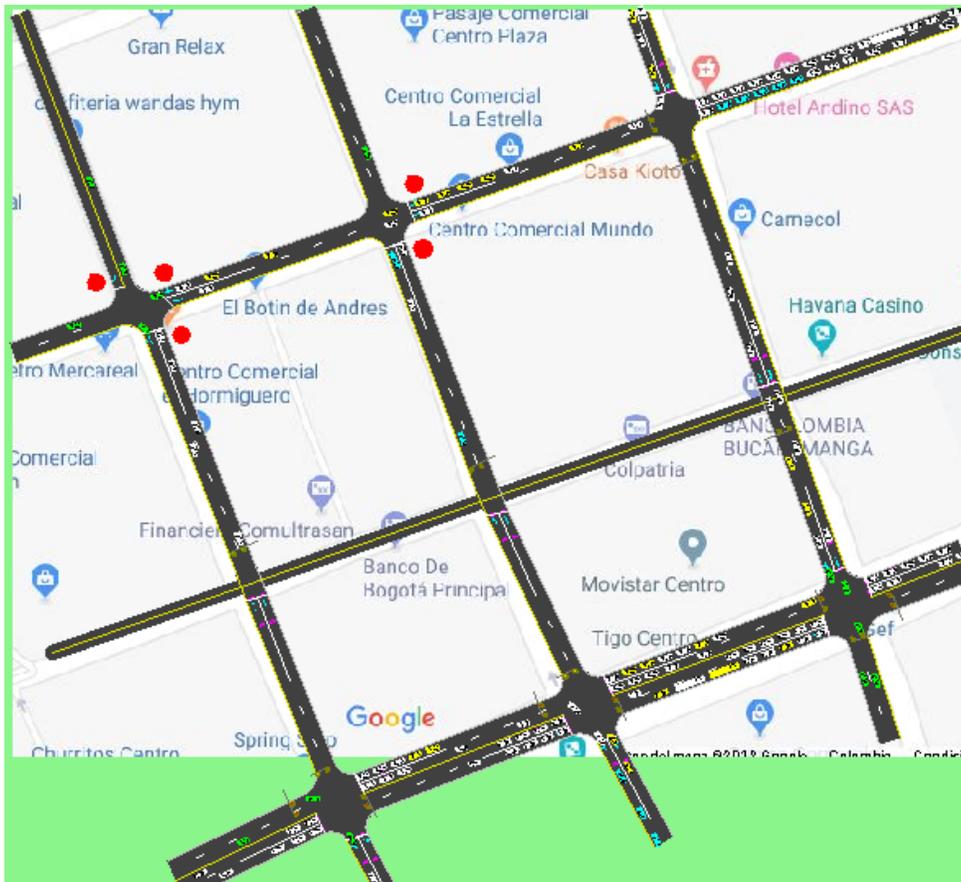


Figura 26. Simulación en acción  
 Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

Ph	Dir	Time	Mn	FO	Rcl	Gap	Ped
2	NBTL	0.5	4	16	Crd		

Int:8 CL:40 Clk:16.5  
 Calls: 2\_4\_8 Ped Calls: \_\_\_\_\_

Vehicle ID#:	34	Next Turn:	Right
Vehicle Type:	Truck SU	2nd Turn:	Exit
Driver Type:	2	Speed (m/s):	0.0
Node:	17	Accel (m/s <sup>2</sup> ):	-0.1
Upstream Node:	8	Current Lane:	2
Dist to SBar (m):	31.9	Dest Lane:	2

Figura 27. Información de la simulación  
 Fuente: Basado en (Trafficware a CUBIC Company, 2017)

Después de que se realizaran las respectivas simulaciones, se recuperó una serie de datos que se generaron en diez minutos de simulación en formato texto, con las características globales de la simulación, así como las características para cada intersección. De las simulaciones realizadas solamente se tuvieron en cuenta dos para ser expuestas, las cuales representan la mayor diferencia que existe entre los tipos principales de semáforos. A continuación, será presentado el análisis de los

datos obtenidos y las principales diferencias entre el semáforo tradicional y el semáforo actuador coordinado.

En la Figura 28, se aprecia la diferencia que hay entre los retrasos del flujo vehicular de los dos tipos de semáforos, en primera instancia se tiene el retraso total, el cual disminuyó un 12.93%, pasando de 49.5 a 43.1 horas, así como el total de los retrasos de las velocidades por parte de los vehículos el cual pasó de 162.6 a 136.6 segundos, y el tiempo de viaje también disminuye 6.2 horas. Se aprecia un aumento con respecto a las velocidades a pesar de que el promedio de estas se mantiene.

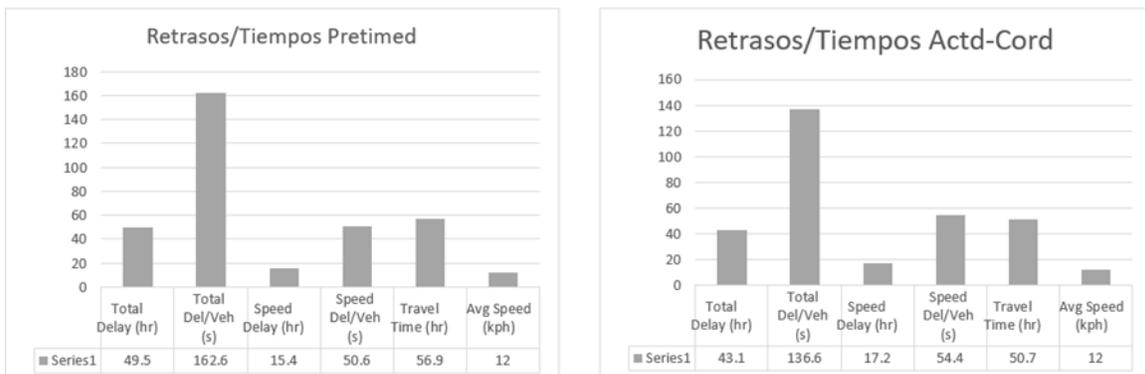


Figura 28. Comparación retrasos/Tiempos entre semáforo preprogramado y el actuador coordinado

El flujo vehicular mejora significativamente al hacer uso del semáforo actuador coordinado. Como se aprecia en la Figura 29, los vehículos que entran y salen de cada calle aumentan, 25 y 41 unidades respectivamente, es decir, en solo 10 minutos de funcionamiento, permite el paso a mayor cantidad de vehículos en comparación con el semáforo tradicional.

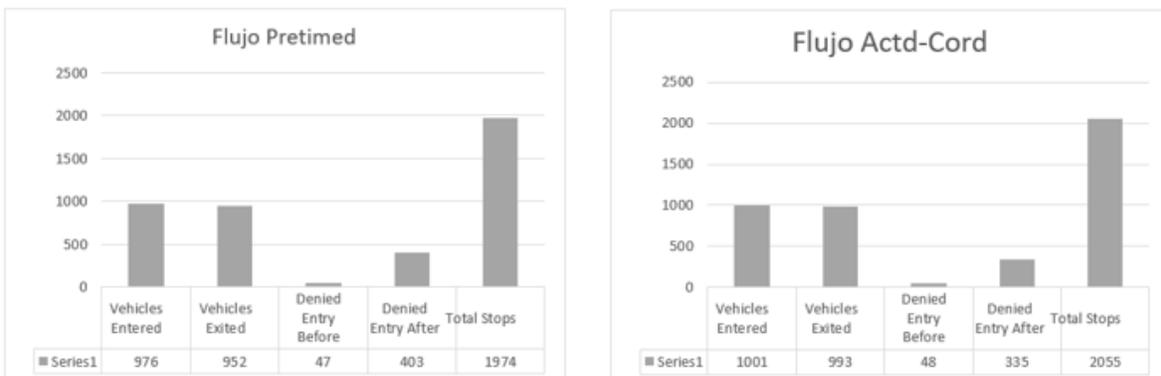


Figura 29. Comparación del flujo vehicular entre semáforo preprogramado y el actuador coordinado

Otros resultados positivos obtenidos son los factores de contaminación, los cuales se ven reducidos con el uso de los semáforos actuadores coordinados. Emisiones de hidrocarburos, de monóxido de carbono y de óxidos de nitrógeno pasaron de

129, 5245 y 466 a 118, 4890 y 433 gramos respectivamente. En cuanto el uso de gasolina también se reduce en 5.5 L aproximadamente (ver Figura 30).

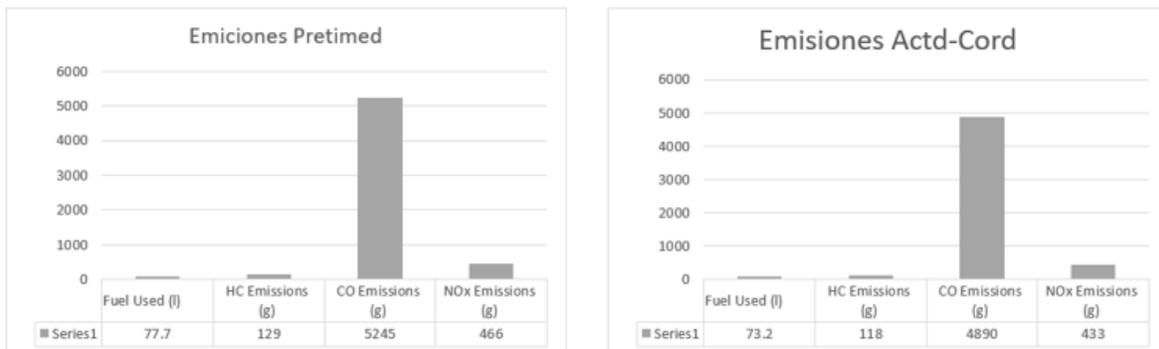


Figura 30. Comparación de las emisiones entre semáforo preprogramado y el actuador coordinado

De la misma manera que con los semáforos actuadores coordinados, las demás simulaciones presentaban resultados favorables, por lo que se podría concluir que, aplicando cualquier tipo de solución, el sistema obtendrá una mejora, lo que da paso a la propuesta de solución tecnología de Internet de las Cosas para el control vehicular.

Para la elaboración del framework conceptual para el control vehicular, se tuvieron en cuenta cuatro capas: Aplicación, Servicio, Comunicación y Física. Para cada caso se exponen las diferentes opciones que se pueden utilizar para la implementación de la solución, basados en lo que se recolectó en la revisión de la literatura sobre soluciones tecnológicas y las diferentes maneras que se encontraron de abordar esta problemática junto a las tecnologías utilizadas, y adicional de otras consultas que se realizaron, también teniendo en cuenta los resultados obtenidos del diagnóstico realizado y finalmente de las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. De esa manera serán escogidas las opciones que se consideran pertinentes.

La base de una solución tecnológica de Internet de las Cosas son los dispositivos que se utilizan para el funcionamiento de esta, por ende, la capa Física es fundamental. Se trata de equipos capaces de comunicar, detectar, almacenar y procesar datos, y que además tienen la capacidad de estar interconectados alámbrica o inalámbricamente a otros dispositivos para una correcta comunicación (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012b). Para un sistema inteligente de semáforos se precisan diferentes dispositivos. A continuación, se presentan las dos placas que son más usadas por poseer las capacidades anteriormente mencionadas, se hará una descripción técnica de ambas y posteriormente una diferenciación para seleccionar la que se considere pertinente.

Raspberry Pi 3: Es una placa de computador de tercera generación de Raspberry que ofrece una gran potencia de procesamiento, posee un procesador ARM Cortex-

A53 de 64 bit con cuatro núcleos y con una velocidad de reloj de 1.2 GHz, su GPU (Unidad de Procesamiento Gráfico) es una Open GL (*Open Graphics Library*) Es 2.0, con 1 GB de memoria RAM (Memoria de Acceso Aleatorio), entre las conexiones que tiene se encuentran: 40 pines, 4 puertos USB (*Universal Serial Bus*), puertos de HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*), salida de audio y video, puerto de cámara, puerto para pantalla, entrada de tarjetas micro SD (*Secure Digital*) y entrada de micro USB para la carga. Soporta los sistemas operativos: Raspbian (Una distribución de GNU/Linux), Fedora, Arch, Linux<sup>9</sup> entre otros (ver Figura 31) (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2019).



Figura 31. Raspberry Pi 3  
Fuente: Tomado de (Raspberry Pi Foundation, 2019)

Arduino UNO: Es una tarjeta basada en el microcontrolador ATmega328, posee 14 pines, conector para energía, SRAM (*Static Random Access Memory*) de 2 KB, memoria de 32 KB, su voltaje de operación es de 5V. En otras versiones como en el Arduino Leonardo las características mejoran, como el aumento a 20 pines y en la cantidad de memoria SRAM y de almacenamiento, pero la velocidad de procesamiento se mantiene en 16 MHz para ambos modelos (ver Figura 32) (Arduino, 2019a).



Figura 32. Arduino UNO  
Fuente: Tomado de (Arduino, 2019b)

<sup>9</sup> Distribuciones de Linux gratuitas y de código abierto, disponible en: <https://getfedora.org/es/>, <https://www.archlinux.org/>

Las diferencias que hay entre la placa de Arduino UNO y Raspberry Pi 3 se pueden apreciar en la Tabla 24, donde se ve que la placa de Raspberry ofrece una mayor potencia y grandes capacidades, pero considerando la función para la que se va a emplear, las capacidades del Arduino UNO logran satisfacer tal trabajo, como ya se ha demostrado en el documento “*IOT based Smart Traffic Light Control System*” (George et al., 2018), en donde la placa es empleada.

Tabla 24. Comparación entre Arduino UNO y Raspberry Pi 3

Características	Arduino	Raspberry Pi 3
Microcontrolador	ATmega328P, 8 bit @ 20MHz	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz
Voltaje de operación	5V	5V
I/O Pines digitales	14	40
Corriente de entrada	20 mA	2.5 A
Memoria flash	32 KB	Puerto para tarjeta Micro SD
SRAM	2 KB	1 GB
Velocidad del reloj	16 MHz	1.4 GHz
Largo	68.6 mm	85 mm
Ancho	53.4 mm	56 mm
Fuente: Tomado de (Raspberry Pi Foundation, 2019); (Arduino, 2019b)		

Arduino NANO: Esta tarjeta ofrece casi el mismo rendimiento que el Arduino UNO, incluyendo cambios en el conector de carga. En este modelo es un USB Mini-B, pero sacrifica un conector directo a la carga (Arduino, 2019a). Esta placa fue tomada en cuenta para ser la encargada de enviar los datos recopilados de una vía al nodo para su posterior operación, sin embargo, la placa que se propone para el *framework* es Seeedduino LoRaWAN W/GPS ya que trabaja con el protocolo también propuesto.

Seeedduino LoRaWAN W/GPS es una placa de Arduino con la conexión al protocolo LoRaWAN de clase A/C, funciona con el microcontrolador ATSAM21G18, permite la conexión a múltiples sensores y actuadores y es compatible con diferentes módulos, tiene gestión de batería con entrada USB para la carga, y puede almacenar carga para varios meses, las demás características se pueden encontrar en la Tabla 25 (Seeed Studio, 2019).

Tabla 25. Características de Seeedduino LoRaWAN

Característica	Valor
Microcontrolador	ATSAMD21G18, ARM Cortex M0 + de 32 bits
Tensión de funcionamiento	3.3V
Pernos digitales de E / S	20
PWM Pins	Todos menos los pines 2 y 7
UART	2 (Nativo y Programación)
Clavijas de entrada analógica	6 canales ADC de 12 bits

Característica	Valor
Pernos de salida analógica	1, DAC de 10 bits
Interrupciones externas	Todos los pines excepto el pin 4.
Corriente DC por Pin de E / S	7 mA
Memoria flash	256 KB
SRAM	32 KB
Velocidad de reloj	48 MHz
Longitud	68 mm
Anchura	53 mm
Peso	19.6g (sin GPS), 19.9 (con GPS)
Fuente: Tomado de (Seeed Studio, 2019)	

El microcontrolador seleccionado es ATSAM21G18, el cual está basado en ARM Cortex M0 + de 32 bits, y que se caracteriza por un bajo consumo energético y alto rendimiento, la velocidad máxima del CPU es de 48 MHz, 32 KB de SRAM y 256 KB de memoria flash, es ideal para soluciones IoT (Microchip Technology Inc, 2019). En la Tabla 26 se presentan las características.

Tabla 26. Características de ATSAM21G18

Nombre	Valor
Velocidad máxima de la CPU MHz	48
Tamaño de la memoria del programa (KB)	256
SRAM (KB)	32
Flash Auxiliar (KB)	0.064
Rango de temperatura (C)	-40 a 85
Rango de voltaje de operación (V)	1,62 a 3,63
Canales de acceso directo a la memoria	12
SPI	6
I2C	6
Hardware Touch Peripheral	PTC
Pin Periférico Select / Pin Muxing	Sí
Número de módulos USB	1
Interfaz USB	A toda velocidad
Entrada ADC ( <i>Analog-to-Digital Converter</i> )	14
Resolución máxima de ADC (bits)	12
Frecuencia máxima de muestreo ADC (ksps)	350
Captura de entrada	6
Comparación de salida autónoma / PWM ( <i>Pulse-Width Modulation</i> ) estándar	6
Canales de control de motor PWM	14
Temporizadores digitales de 16 bits máximo	5
Puerto paralelo	GPIO
Número de comparadores	2
Oscilador interno	32 KHz, 32 KHz ULP, 8 MHz
Hardware RTCC ( <i>Responding to Climate Change</i> ) / RTC ( <i>Real Time Clock</i> )	Sí
Max I / O Pins	38
Pincount	48

Nombre	Valor
Baja potencia	Sí
Fuente: Tomado de (Microchip Technology Inc, 2019)	

Por el lado de los sensores existe una amplia gama que suelen ser utilizados para control de tráfico, tales como: cámaras, sensores de presión, infrarrojo y ultrasonido. Para esta solución, el sensor que se recomienda es el módulo Sonar:bit, que mide la distancia por ultrasonido, el rango es de 4 cm a 4 m, la frecuencia con la que trabaja es de 40 Hz, con un voltaje de 3.3 V o 5, funciona enviando una onda de sonido, contabilizando el tiempo de viaje de la onda de ida y vuelta, se puede medir la distancia a través de una simple fórmula: Tiempo de viaje multiplicado por la velocidad del sonido (340M/s) dividido entre 2. Es ideal para detectar si un vehículo pasa en frente al sensor, de manera tal de que contabilice cada vez que un vehículo cambie la distancia que hay entre el sensor y la carretera (Elecfreaks, 2019).

LoRaWAN Gateway – Base Station (3G – GPS) es una puerta de enlace diseñada para implementar la red LoRaWAN en soluciones IoT, se comunica a través de 3G con el servidor. IoT Factory ofrece una plataforma de gestión para los dispositivos con alertas, informes y APIs (*Application Programming Interface*) (IOT Factory, 2018). En la Tabla 27 se presentan las características del Gateway.

Tabla 27. Características de LoRaWAN Gateway

Característica	Valor
Conectividad de datos	3G, Ethernet
Caja tamaño	IP67 al aire libre 165 x 110 x 40mm
Temperatura de funcionamiento	-40 / + 85 ° C
Montaje	apoyo masivo
Poder	POE pasivo 4,5 (+) 7,8 (-) 15W
Antena externa	Conector SMA
Cobertura	Hasta 15 km.
Frecuencia	863 - 870 MHz, 923 MHz (AS923)
Canales LoRa	8
El consumo de energía	Max 5W
Salida de potencia	Hasta 500 mW (27 dBm)
Fuente: Tomado de (IOT Factory, 2018)	

Para el caso de que ocurran fallas eléctricas, se propone el uso de una batería que sea capaz de alimentar el sistema por algún tiempo, por ejemplo la batería ADAFR-1566, la cual tiene una capacidad de 10000 mAh que proporciona 2 salidas de 5V, posee la capacidad de alimentar un teléfono celular, y se recomienda ser empleado en soluciones tecnológicas donde se emplean placas como Raspberry y Arduino (Adafruit Industries, 2019).

Para la capa de Comunicación se tienen en cuenta los protocolos que son utilizados para las soluciones de Internet de las Cosas, pero al tratarse de una solución

*Outdoor* es pertinente enfocarse en protocolos de comunicación que permitan un emparejamiento de largas distancias, por tal motivo protocolos como: Bluetooth, RFID (*Radio Frequency Identification*), NFC (*Near field communication*) entre otros, no fueron tomados en cuenta para el diseño del *framework* conceptual, además por un alto consumo energético en algunos casos.

A continuación, son presentados algunas tecnologías de acceso que se tuvieron en cuenta ya que pueden ser de utilidad para el despliegue de la solución propuesta:

El estándar IEEE 802.15.4 es un protocolo que en su versión original se caracteriza por un bajo costo y consumo energético aunque con baja velocidad de transferencia, que es de 250 kbit/s, las bandas que este protocolo puede usar son: 868, 915 y 2450 MHz, pero lo que hace importante el estándar es que es usado por otros estándares que resultan ser útiles para el sistema (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016). Uno de ellos es 6LoWPAN, que añade algunas características al estándar, utiliza IPv6 permitiendo conectar múltiples objetos. Otro estándar es ZigBee, que se caracteriza por ser una red de baja potencia y gran cobertura, opera en las bandas 2.4 GHz, 915 MHz y 868 MHz, su tasa de transferencia es de hasta 2.4 GHz. Además, se pueden usar diferentes topologías como: en malla, árbol y estrella, lo que para un sistema de semáforos se puede llegar a utilizar las tres (Zigbee Alliance, 2019a).

Realizando una comparación entre ZigBee y Wi-Fi-WABE, ZigBee ofrece más bandas de frecuencia, pero un envío de datos menor, siendo de 27 MB/s para el caso de Wi-Fi-WABE, también el rango y el ancho de banda es menor, sin embargo, no se considera necesario ese aumento ya que los datos a utilizar no son de gran tamaño y su costo es reducido (Wave Wifi, 2019).

Se tomó en consideración LoRaWAN, un protocolo de baja potencia, pero con una gran área de cobertura, la cual opera con una topología de estrella y bajo el estándar IEEE 802.15.4g, se comunica a través de 3G. Es implementado en "*Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN*" (Nor et al., 2017). En la Tabla 28 se expone las características de los protocolos LoRaWAN y Zigbee, en donde se demuestra que LoRa puede ser de mayor utilidad por cuestión del alcance, ya que el ambiente puede llegar a interferir con la comunicación, por lo que el alcance que esta tecnología ofrece puede sobreponerse ante una situación así, además de otras características que favorecen la solución.

Tabla 28. Diferencias entre LoRa y Zigbee

Tipo	LoRaWAN	Zigbee
Bandas de frecuencia	863 a 870 MHz, 902 a 928 MHz, 779 a 787 MHz	868 MHz, 915 MHz, 2450 MHz
Distancia de cobertura	2-5 Km (áreas urbanas), 15 Km (áreas suburbanas)	10 a 100 metros
El consumo de energía	Muy bajo	Bajo
Técnica de modulación	Modulación LoRa (modulación CSS <sup>10</sup> ), FSK <sup>11</sup> o GFSK <sup>12</sup>	BPSK, modulación OQPSK <sup>13</sup> . También utiliza la técnica DSSS para convertir bits a chips.
Velocidad de datos	0.3 a 22 Kbps (modulación LoRa) y 100 Kbps (usando GFSK)	20 kbps (banda de 868 MHz), 40Kbps (banda de 915 MHz), 250 kbps (banda de 2450 MHz)
Red de arquitectura	Consiste en la puerta de enlace LoRa, servidores y dispositivos finales.	Consta de coordinador, enrutadores y dispositivos finales.
Pila de protocolos	Consta de RF, PHY, MAC, capas de aplicación.	Consta de RF, PHY, MAC, red y seguridad, capas de aplicación.
Capa física	Utiliza el esquema de modulación como se mencionó anteriormente e incorpora capacidades de corrección de errores. Agrega un preámbulo para fines de sincronización. Utiliza el encabezado PHC CRC, así como el marco completo CRC <sup>14</sup> .	Hay dos capas físicas a saber. 868/915 MHz (usa BPSK, forma de pulso coseno elevado) y 2450 MHz (usa OQPSK, forma de pulso de onda sinusoidal)
Aplicaciones	Utilizado como red de área amplia	Utilizado como LR-WPAN, es decir, red de área personal inalámbrica de baja velocidad
Estándar / Alianza	IEEE 802.15.4g, Alianza LoRa	IEEE 802.15.4 (define PHY y MAC), Zigbee Alliance (define redes, seguridad y capas de aplicación)
Fuente: Basado en (LoRa Alliance, 2019); (Zigbee Alliance, 2019b)		

Por la ventaja que ofrece LoRaWAN en cuanto a la amplitud de área que tiene la capacidad de cubrir, se considera que, para el caso del control vehicular, puede ser de mayor utilidad que Zigbee, ya que la mayoría de las carreteras superan el límite

<sup>10</sup> "CSS es el lenguaje para describir la presentación de las páginas web, incluidos los colores, el diseño y las fuentes" (World Wide Web Consortium, 2016).

<sup>11</sup> "Sistema de modulación digital en el que cada bit o grupo de bits produce una variación determinada de la frecuencia de la onda portadora" (Real Academia de Ingeniería, 2014a).

<sup>12</sup> "Es un método de modulación para la comunicación digital que se encuentra en muchos estándares" (Gerez, n.d.)

<sup>13</sup> "BPSK y QPSK son un esquema de modulación de fase simple pero significativo" (Nptel, 2014)

<sup>14</sup> "Comprobación en el receptor de la validez de un bloque de datos recibidos mediante el análisis de unos bits redundantes añadidos a ese bloque en el transmisor" (Real Academia de Ingeniería, 2014b).

de distancia de este protocolo sin contar con los obstáculos que puedan intervenir. Por esta razón LoRaWAN es el protocolo propuesto para la capa de Comunicación de nuestro *framework* conceptual.

3G es la tercera generación de una tecnología móvil de transferencia de datos inalámbrica, con una velocidad de transferencia de 384 Kbps. La ITU estableció el estándar IMT-2000, en el cual se desarrolló mediante UMTS (*Universal Mobile Telephone System*), el cual aumenta las tasas de transferencia de datos. UMTS posee tres capas: servicios, control y conectividad, en donde se gestionan los servicios, mejora de procedimientos, dinamizar las capacidades, transmisión de datos y tráfico de voz. En tema de seguridad, la red 3G permite la autenticación de la red a la que esté conectada, y utiliza el cifrado por bloques KASUMI (Diego Rojas Zagals, 2009). En la Figura 33 se muestra la cobertura de la red 3G en la ciudad de Bucaramanga proporcionada por la empresa Claro, se puede ver que prácticamente toda la ciudad cuenta con total cobertura de la red (Claro Colombia, 2019)



Figura 33. Cobertura 3G en Bucaramanga  
Fuente: Tomado de (Claro Colombia, 2019)

Por parte de la capa de Servicio se evaluó que tipo de protocolo de comunicación funciona con respecto al sector de transporte. Se tuvieron en cuenta diferentes protocolos; NTCIP es un protocolo estandarizado el cual tiene la capacidad de controlar el tráfico a través de las señales de tránsito. Este estándar ofrece ventajas como permitir la conexión con dispositivos de diferentes proveedores, la codificación y transporte de los datos, también permite la interoperabilidad que es la capacidad de intercambiar información entre múltiples dispositivos (NEMA, 2019).

El protocolo SCATS ofrece una amplia gama de ventajas, tiene la capacidad de actuar según el ambiente, es decir, se adecua según el clima, accidentes de tránsito

y eventos públicos, su funcionamiento se basa en la recolección de datos, transporte, y control de las señales, y trata de mejorar paradas, retrasos y tiempos de las rutas, sin embargo no puede operar de una manera sencilla con dispositivos de diferentes proveedores (Tyco, 2019).

ZigBee es un estándar de comunicaciones basado en IEEE 802.15.4 que también ofrece un protocolo de control semafórico, ofrece seguridad y alta duración de la batería, puede estar conectada a 65000 nodos con posibilidad de uso de diferentes topologías, aunque su transferencia de datos es baja y rango de cobertura corto (Zigbee Alliance, 2019a).

MIV y MOVA son protocolos que actúan con la estrategia de determinar la luz verde solamente en cada intersección, ignorando las demás. En el caso de MIV solamente agrega tiempo a la luz verde de una carretera mientras que MOVA hace el cálculo constante para optimizar los tiempos, lo cual es más ventajoso. Caso contrario lo hace el protocolo SCOOT, que mide el tráfico tanto de entrada como de salida, cada ajuste de tiempo que se crea el sistema lo adapta (TLR, 2019).

Lo ideal es crear un protocolo de control propio, pero a priori sería pertinente utilizar algún protocolo ya estandarizado, en este caso se resalta la buena operabilidad y los bajos costos que los anteriores protocolos tienen como característica en común, y aunque algunas tengan desventajas considerables, no dejan de ser rentables. Los anteriores protocolos son usados en grandes ciudades del mundo.

Cloud Computing, es un medio el cual permite el acceso a un conjunto compartido de recursos informáticos configurables (por ejemplo: redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios). Dentro de las características de Cloud Computing podemos encontrar (Mell & Grance, 2011).

- Elasticidad y escalabilidad: Cloud Computing brinda la capacidad de expandir y reducir los recursos de acuerdo con sus requisitos de servicio específicos.
- Pago por uso: paga por los servicios en la nube solo cuando los usa.
- Bajo demanda: como invoca los servicios en la nube solo cuando los necesita, no son partes permanentes de su infraestructura de TI.
- Capacidad de recuperación: la capacidad de recuperación de una oferta de servicios en la nube puede aislar completamente la falla de los recursos de almacenamiento y servidor de los usuarios de la nube.
- Capacidad múltiple: los proveedores de servicios de nube pública a menudo pueden alojar los servicios de nube para múltiples usuarios dentro de la misma infraestructura.
- Movimiento de la carga de trabajo: los proveedores de Cloud Computing pueden migrar las cargas de trabajo entre servidores.

Para el proyecto se hará uso de *Cloud Computing*, para albergar los datos recolectados y a su vez ser analizados mediante el algoritmo implementado.

Algoritmo Auto-Organizante, las intersecciones correspondientes responden al estado de tráfico actual y se coordinan para generar un flujo vehicular eficiente. El algoritmo funciona tomando en cuenta las siguientes opciones (Gershenson, 2012).

- En cada intervalo de tiempo, agregar a un contador el número de vehículos que se acercan a un semáforo en rojo, a una distancia D. Cuando el contador excede un umbral N, cambio de luces. (Reiniciar contador con cambio de luces.)
- Los semáforos deben de permanecer en verde por un tiempo mínimo U.
- Si pocos vehículos (M o menos, pero más de cero) están por cruzar una luz verde a una distancia corta R, no hacer cambio de luces.
- Si no hay vehículo que se acerque a una luz verde a una distancia D y por lo menos un vehículo se acerca a la luz roja a una distancia D, cambio de luces.
- Si hay un vehículo detenido a una distancia corta E pasando una luz verde, cambio de luces.
- Si hay vehículos detenidos en ambas direcciones a una distancia corta E pasando la intersección, cambio a ambas en rojo.
- Cuando una dirección se libere, cambio de luces a verde en esa dirección.
- Desfase:

$$w_j = \text{floor} \left( (x - y) \bmod \frac{T}{2} \right) + 0.5$$

Inicializar:

$$\sigma_j = \text{green}(\text{vertical}), \text{green}(\text{horizontal}) \text{ si no es así } \left( (x - y) \bmod T \right) + 0.5 \geq \frac{T}{2}$$

Dentro de los beneficios de este método podemos encontrar, adaptación, mejora eficiencia en problemas de espacio no estacionario, tráfico, método de control de semáforos novedoso, sencillo, viable y de gran impacto potencial en la ciudadanía.

La capa de aplicación en la que se encuentran las aplicaciones del usuario. Desde las aplicaciones para los hogares sobre el uso de recursos (agua, gas, luz), hasta las aplicaciones logísticas para los sectores empresariales, que optimicen los recursos y el tiempo de procesamiento. Cualquier aplicación, doméstica o industrial, que haga uso de dispositivos conectados (IoT) se incluye en esta capa.

Para realizar el monitoreo y control de la capa de aplicación, se define la elaboración de una Aplicación Web en la que se permita visualizar los datos que circulan y en caso de ser necesario, permita el ajuste o configuración del sistema.

La aplicación Web estará conectada con el sistema de semáforos y consta de tres capas, la capa de navegación, la cual se utilizan para mostrar los datos requeridos

por el usuario, dependiendo de cómo el programador haya decidido mostrarlos, para esta capa se usa un tipo de lenguaje especial en este caso HTML (*Hyper Text Markup Language*) es un estándar que sirve de referencia del software que conecta con la elaboración de páginas web, Puesto que ya se ha trabajado con este lenguaje y se tiene conocimiento de este.

La capa de servidor existe múltiples lenguajes de programación, pero en este caso se trabajará con Java el cual es un lenguaje de programación de propósito general, concurrente, orientado a objetos, diseñado específicamente para tener tan pocas dependencias de implementación como fuera posible, y del cual se tienen buenas bases. Y por último la capa de persistencia en la cual los datos se almacenan sistemáticamente para su posterior uso.

En resumen, el *framework* conceptual cuenta con cuatro capas: la capa física, de comunicación, de servicios y de aplicación. En cuanto a la capa física está compuesta por un Arduino UNO encargado del manejo de las variables como el conteo de automóviles y los tiempos de luz, una placa Seeduino LoRaWAN que realiza el conteo de vehículos, un sensor de ultrasonido que realiza la lectura de las vías, LoRaWAN Gateway que funcionará como puerta de enlace para la transferencia de datos y los semáforos de la intersección. Los datos obtenidos por los sensores pasan a la capa de comunicación, la cual presenta la conexión entre las placas por medio del protocolo LoRaWAN y se encarga de enviar el conteo del flujo vehicular a la capa de servicios. Para la capa de servicios se propone el algoritmo de semáforos Auto-organizables, para analizar las cantidades de vehículos en las colas y determinar los tiempos de luz para cada semáforo de la intersección, el algoritmo estará trabajando en el servidor en la nube que se comunica a través de la red 3G con el sistema y que sirve como almacenaje y procesamiento. Finalmente, en la capa de aplicación, se propone una aplicación web la cual ofrezca un monitoreo de las variables y del funcionamiento del semáforo, y en caso de existir algún fallo sea reportado para su posterior ajuste, que permita realizar configuraciones al sistema cuando sean necesarias, y que muestre el estado de los componentes y de la batería. En la Figura 34 es presentado el *framework* conceptual propuesto como solución de internet de las Cosas para el control vehicular en el municipio de Bucaramanga.

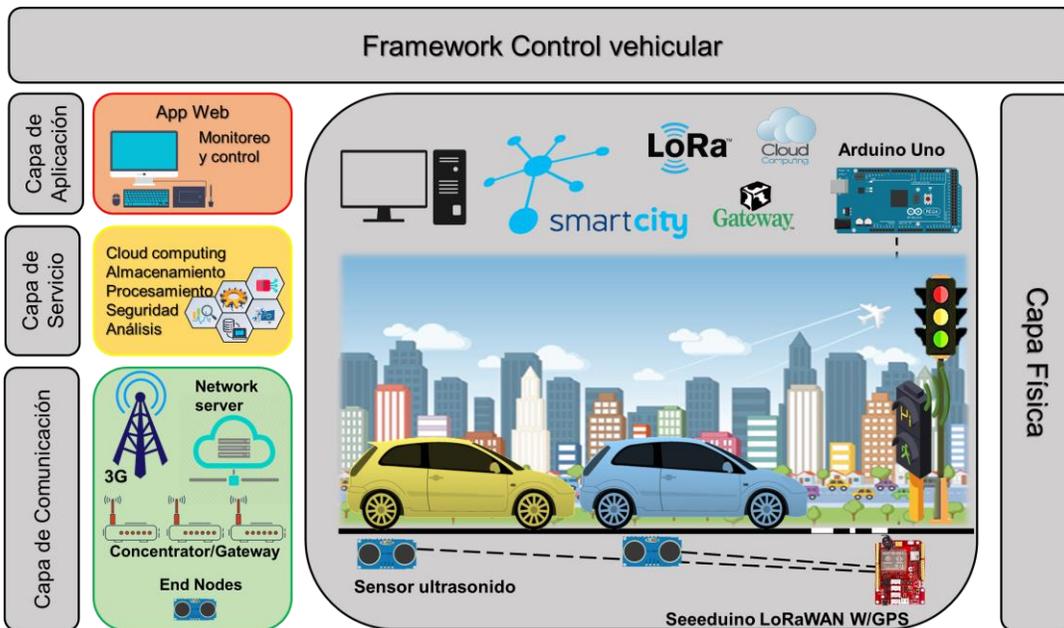


Figura 34. Framework de Internet de las Cosas

## 7. DISCUSIÓN

Este trabajo de grado, tuvo como propósito identificar los diferentes dispositivos, protocolos y tecnologías, implementados a la hora de proponer una solución tecnológica alternativa para el control vehicular. Con los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del estado del arte, se puede evidenciar que el uso de nuevas tecnologías. en este caso *Internet of Things* genera un gran aporte para el subdominio de control vehicular.

Se resalta que el tema de investigación es vigente y se proyecta a futuro, sin embargo, no existe una solución definitiva a la problemática para los diferentes contextos, por lo que generar nuevas alternativas orientadas a cada contexto resulta mejor por el momento, debido a que las condiciones de Bucaramanga son diferentes a otras en donde se ha aplicado algún tipo de solución.

En la elaboración del diagnóstico se puede evidenciar la magnitud de la problemática generada a partir de la congestión vehicular, y como el municipio ha decidido afrontarla, sin embargo, todos los esfuerzos se ven reducidos con el crecimiento acelerado del parque automotor. Los problemas generados por esta congestión no solo solo dificultan la llegada al lugar de destino, sino que trae consigo otros problemas, dentro de los cuales se encuentran:

1. El incremento del Dióxido de Carbono e Hidrocarburos en la ciudad lo cual genera problemas de salud a los ciudadanos.
2. La contaminación auditiva.
3. Los retrasos generados a ambulancias, bomberos y patrullas de policía, las cuales necesitan llegar lo antes posible a los lugares de emergencia.
4. La accidentalidad, la cual se da a partir de la impaciencia de los conductores a la hora de querer llegar rápido a sus destinos, subiéndose a andenes o tratando de adelantar a otros vehículos.
5. Mayores gastos de combustible y desgaste del vehículo.

Como se puede apreciar, no solo el problema radica en llegar tarde al destino, y es evidente que este problema se está dando en muchos lugares debido al crecimiento de la población, por lo cual el tema es de gran interés y son muchas las soluciones que se han planteado. Estos estudios previos son de gran importancia para el desarrollo del *framework* propuesto.

Existen algunas limitaciones que no son posibles de abordar con lo propuesto, comenzando con la cultura ciudadana, el paradigma de Colombia es complicado de cambiar de manera tal de que el comportamiento del flujo vehicular sea ideal, sin embargo puede ser pertinente que el ciudadano sea educado para que tome conciencia de un cambio significativo en la sociedad, que el civismo, la solidaridad,

la tolerancia, el respeto y la convivencia pacífica, sean ahora las cualidades que se vean reflejadas en las calles.

Otro problema es la infraestructura vial de la ciudad. Existen algunos puntos en donde el ancho de las carreteras no puede soportar algunos vehículos, o donde el flujo vehicular supera la capacidad de las intersecciones. Un ejemplo bastante claro es la zona Centro, que resulta ser la más transitada de la ciudad, pero su infraestructura vial no fue construida para tal crecimiento de la ciudad.

Con la elaboración del *framework*, se pueden apreciar las capas de aplicación, servicios, comunicación y física, con la información referente a tecnologías, protocolos y dispositivos los cuales serán la base para la implementación de semáforos inteligentes los cuales contribuyan con el mejoramiento del flujo vehicular en el área metropolitana de Bucaramanga.

## 8. CONCLUSIONES

El objetivo principal del presente trabajo de grado era la realización de un *framework* conceptual, en el cual se expusieran las tecnologías, dispositivos y protocolos óptimos para el funcionamiento de un sistema de control vehicular basado en *Internet of Things* en el municipio de Bucaramanga.

Para la búsqueda de los diferentes dispositivos, así como protocolos y tecnologías, se realizó un estado del arte en el cual se pueden apreciar diferentes soluciones tecnológicas para el control vehicular, mediante el análisis realizado a estos trabajos, fue elaborado el *framework*.

La solución que se plantea mediante el *framework* para dar fin a la problemática que genera la congestión vehicular en el municipio de Bucaramanga, es la implementación de una serie de semáforos autónomos en las intersecciones semaforizadas de la ciudad, los cuales funcionan haciendo una lectura del flujo vehicular en las carreteras mediante sensores ultrasónicos. Los datos obtenidos de las vías son enviados mediante el Seeduino LoRaWAN por medio del protocolo LoRaWAN al Arduino UNO, donde la información será analizada por medio de un algoritmo que defina los tiempos más óptimos de luz en un servidor en la nube, para cada semáforo en la intersección, de este modo el flujo vehicular en las vías será mayor.

Para sustentar el uso de nuevas tecnologías para el control vehicular en el municipio de Bucaramanga se realizaron simulaciones mediante el software *Synchro Studio* las cuales se pueden encontrar en el objetivo 3, obteniendo resultados favorables en el transcurso de las simulaciones.

## 9. TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, para el proyecto de grado realizado, se pretende el desarrollo de un prototipo funcional para poner a prueba lo planteado en el *framework* y de este modo conocer el rendimiento óptimo del diseño o los fallos que se puedan presentar y de los cuales se permita un aprovechamiento de la información para el mejoramiento del diseño y así conseguir un producto completamente eficiente de cara a una posible implementación para una *Smart City* en la ciudad de Bucaramanga. También como trabajo futuro, se pretende la elaboración de un modelo matemático propio, el cual sea implementado en el prototipo funcional, y que permita un mejor aprovechamiento de los datos recolectados en la vía y mediante este algoritmo conseguir un control de los tiempos de luz óptimos para un mejor flujo vehicular. Otra posible opción, es la de crear diferentes diseños los cuales se adapten a los diferentes tipos de carreteras, puesto que no todas las intersecciones son iguales.

## REFERENCIAS

- Adafruit Industries. (2019). USB Battery Pack for Raspberry Pi. Retrieved May 24, 2019, from <https://www.adafruit.com/product/1566>
- Agencia Nacional del Espectro. (2016). Resolución 711 de 2016 ANE - Agencia Nacional del Espectro.
- Alcaldía de Bucaramanga. (2017). En Expo MiPyme Digital Santander, Alcaldía expuso cómo convertir a Bucaramanga en una ciudad inteligente – Alcaldía.
- Alcaldía de Bucaramanga. (2019). Alcaldía de Bucaramanga. Retrieved April 24, 2019, from <https://www.bucaramanga.gov.co/Inicio/>
- Arduino. (2019a). Arduino Products. Retrieved from <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
- Arduino. (2019b). Arduino Uno Rev3. Retrieved May 23, 2019, from <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Asociación Mundial de Carreteras. (2018). Control Vehicular | RNO/ITS - Asociación Mundial de Carreteras (AIPCR).
- Basil, E., & Sawant, S. D. (2017). IoT based traffic light control system using Raspberry Pi. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (pp. 1078–1081). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389604>
- Carolina Escobar. (2016). ¿Cómo funcionan los semáforos? - Unininos / Red de las preguntas / Máquinas y energía - Universidad EAFIT.
- Claro Colombia. (2019). Consulta la cobertura de los servicios móviles de Claro Colombia. Retrieved May 30, 2019, from <https://www.claro.com.co/personas/soporte/mapas-de-cobertura/>
- Conexión Capital. (2019). Bogotá estrena el primer sistema de semáforo inteligente | Conexión Capital.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2008). Conpes 3527.
- David Riaño Valencia. (2017). Avances de Colombia en infraestructura vial - Otras Ciudades - Colombia - ELTIEMPO.COM.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2017). Reloj de población.
- Diego Rojas Zagals. (2009). *Telefonía móvil 3G*. Retrieved from [http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo322/1s09/project/reports/telefonía móvil 3G.pdf](http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo322/1s09/project/reports/telefonía%20móvil%203G.pdf)
- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2000). Análisis parque automotor.
- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2017a). *Estructuración de medidas para el mejoramiento de la movilidad en Bucaramanga*. Bucaramanga. Retrieved from <http://transitobucaramanga.gov.co/files/2017/direccion/estructuracion-de-medidas-para-mejorar-la-movilidad-en-bucaramanga-2017.pdf>
- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2017b). *parque automotor oficial, público particular Área Metropolitana de Bucaramanga*.
- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2018a). Informes de Gestión. Retrieved January 30, 2019, from [http://www.transitobucaramanga.gov.co/informes\\_de\\_gestion.php](http://www.transitobucaramanga.gov.co/informes_de_gestion.php)
- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2018b). Pico y Placa. Retrieved January 31, 2019, from [http://www.transitobucaramanga.gov.co/pico\\_y\\_placa.php](http://www.transitobucaramanga.gov.co/pico_y_placa.php)

- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2019a). Dirección de Tránsito de Bucaramanga.
- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2019b). Georreferenciación planeamiento vial - Google My Maps. Retrieved February 20, 2019, from <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1v8q8W3ptjvVYgSPLdRSD5GcE95c&ll=7.110731122920073%2C-73.1174434628274&z=15>
- Dirección de Tránsito Bucaramanga. (2019c). Parque Automotor. Retrieved January 30, 2019, from <http://www.transitobucaramanga.gov.co/parque-automotor.php>
- Dirección de tránsito de Bucaramanga. (2017). *Simulación centro de Bucaramanga*. Bucaramanga. Retrieved from <http://transitobucaramanga.gov.co/files/2017/direccion/EstudioTecnicoDeLaZonaCentroDeBucaramanga.pdf>
- Dirección de Tránsito de Bucaramanga. (2019). Dirección de Tránsito de Bucaramanga. Retrieved April 24, 2019, from <https://www.transitobucaramanga.gov.co/>
- Dirks, S., & Keeling, M. (2009). *A vision of smarter cities: How cities can lead the way into a prosperous and sustainable future*. IBM Global Business Services.
- Dubey, A., Lakhani, M., Dave, S., & Patoliya, J. J. (2017). Internet of Things based adaptive traffic management system as a part of Intelligent Transportation System (ITS). In *2017 International Conference on Soft Computing and its Engineering Applications (icSoftComp)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSOFTCOMP.2017.8280081>
- El comercio. (2009). 6 medidas para mejorar el tránsito | El Comercio.
- Elchamama, R., Dafflon, B., Ouzrout, Y., & Gechter, F. (2016). Agent based monitoring for smart cities: Application to traffic lights. In *2016 10th International Conference on Software, Knowledge, Information Management & Applications (SKIMA)* (pp. 292–297). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SKIMA.2016.7916235>
- Elecfreaks. (2019). Sonar:bit for micro:bit Ultrasonic Sensor Distance Measuring. Retrieved May 24, 2019, from <https://www.elecfreaks.com/store/sonar-bit-for-micro-bit-ultrasonic-sensor-distance-measuring-3v-5v.html>
- Estupiñán, K. (2019). Así funcionarán los semáforos inteligentes en Bogotá.
- George, A. M., George, V. I., & George, M. A. (2018). IOT based Smart Traffic Light Control System. In *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT)* (pp. 148–151). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2018.8574285>
- Gerez, S. H. (n.d.). *Implementation of Digital Signal Processing: Some Background on GFSK Modulation*. Retrieved from <http://wwwhome.ewi.utwente.nl/~gerezsh/vlsidsp/index.html>
- Gershenson, C. (2012). *Semáforos Auto-organizantes*. Retrieved from <http://turing.iimas.unam.mx/~cgg/teach/>
- Ghazal, B., ElKhatib, K., Chahine, K., & Kherfan, M. (2016). Smart traffic light control system. In *2016 Third International Conference on Electrical, Electronics, Computer Engineering and their Applications (EECEA)* (pp. 140–145). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EECEA.2016.7470780>
- Giffinger, R., & Gudrun, H. (2010). Smart cities ranking: an effective instrument for

- the positioning of the cities? *ACE: Architecture, City and Environment*, 4(12), 7–26. <https://doi.org/10.5821/ace.v4i12.2483>
- Giluka, M. K., Priyadarshi, T., Kumar, S., Franklin, A. A., & Tamma, B. R. (2018). An enhanced EAB algorithm to reduce RACH congestion due to IoT traffic in LTE-A networks. In *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 395–400). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355156>
- Group, O. D. (2018). OCIT-C / OCIT.
- Gupta, V., Kumar, R., Reddy, K. S., & Panigrahi, B. K. (2017). Intelligent traffic light control for congestion management for smart city development. In *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TENCONSpring.2017.8070077>
- Harrison, C., Eckman, B., Hamilton, R., Hartswick, P., Kalagnanam, J., Paraszczak, J., & Williams, P. (2010). Foundations for Smarter Cities. *IBM Journal of Research and Development*, 54(4), 1–16. <https://doi.org/10.1147/JRD.2010.2048257>
- Hawi, R., Okeyo, G., & Kimwele, M. (2017). Smart traffic light control using fuzzy logic and wireless sensor network. In *2017 Computing Conference* (pp. 450–460). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SAI.2017.8252137>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2016). *802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7460875>
- International Telecommunication Union. (2014). *Y.3500 : Information technology - Cloud computing - Overview and vocabulary*.
- IOT Factory. (2018). LoRaWAN Gateway – Base Station (3G – GPS). Retrieved May 30, 2019, from <https://iotfactory.eu/products/iot-sensors/lorawan-gateway-base-station-3g-gps/>
- Jabareen, Y. (2009). Building a Conceptual Framework: Philosophy, Definitions, and Procedure. *International Journal of Qualitative Methods*, 8(4).
- Jagadeesh, Y. M., Suba, G. M., Karthik, S., & Yokesh, K. (2015). Smart autonomous traffic light switching by traffic density measurement through sensors. In *2015 International Conference on Computers, Communications, and Systems (ICCCS)* (pp. 123–126). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCOMS.2015.7562885>
- José, J., & Torres, Y. (2016). *CAPÍTULO 3 EL ESTÁNDAR IEEE 802.11 3.1 INTRODUCCIÓN*.
- Kanungo, A., Sharma, A., & Singla, C. (2014). Smart Traffic Lights Switching and Traffic Density Calculation using Video Processing. In *2014 recent advances in Engineering and computational sciences (RAECS)* (pp. 1–6).
- Kim, E. J., Jun, J. A., & Kim, N.-S. (2016). The Method of Controlling Traffic Paths in IoT-based Software Defined Network. *2016 IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/UEMCON.2016.7777824>
- Lin, Y.-Q., Li, M., Chen, X.-C., Fu, Y.-G., & Chi, Z.-W. (2016). A Belief Rule Base Approach for Smart Traffic Lights. In *2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)* (pp. 460–463). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCID.2016.1113>
- Liu, Y., Liu, L., & Chen, W.-P. (2017). *Intelligent Traffic Light Control Using*

- Distributed Multi-agent Q Learning.*
- LoRa Alliance. (2019). LoRaWAN para desarrolladores. Retrieved May 23, 2019, from <https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers>
- Mell, P., & Grance, T. (2011). *The NIST Definition of Cloud Computing Recommendations of the National Institute of Standards and Technology.* <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>
- Microchip Technology Inc. (2019). ATSAM21G18 - Microcontroladores SAM de 32 bits. Retrieved May 23, 2019, from <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATsam21g18>
- Miguel Pérez. (2015). Señales inteligentes mejoran el tráfico en las ciudades | Foro Económico Mundial.
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2006). *Resolución Número 627.* Retrieved from [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrban/a/pdf/emisiones\\_atmosfericas\\_contaminantes/norma\\_ruido/Resolucion\\_627\\_de\\_2006\\_-\\_Norma\\_nacional\\_de\\_emision\\_de\\_ruido.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrban/a/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/norma_ruido/Resolucion_627_de_2006_-_Norma_nacional_de_emision_de_ruido.pdf)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved February 27, 2019, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php>
- Ministerio de transporte. (2019). Ministerio de transporte. Retrieved April 24, 2019, from <https://www.mintransporte.gov.co/>
- Ministerio de Transporte. (1996). Conpes 3489.
- Ministerio de Transporte. (2002). LEY 769 DE 2002.
- Miz, V., & Hahanov, V. (2014). Smart traffic light in terms of the cognitive road traffic management system (CTMS) based on the Internet of Things. In *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2014.7027102>
- Nafea, H. J., Jacob, S. M., Nair, N., & Paul, J. J. (2018). Density Based Smart Traffic System with Real Time Data Analysis Using IoT. In *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCTCT.2018.8551108>
- Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Conceptualizing Smart City with Dimensions of Technology, People, and Institutions. In *Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference: Digital Government Innovation in Challenging Times* (pp. 282–291). <https://doi.org/10.1145/2037556.2037602>
- Neirotti, P., De Marco, A., Corinna Cagliano, A., Mangano, G., & Scorrano, F. (2014). Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 38, 25–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.12.010>
- NEMA. (2019). NTCIP. Retrieved May 12, 2019, from <https://www.ntcip.org/>
- Nor, R. F. A. M., Zaman, F. H. K., & Mubdi, S. (2017). Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN. In *2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)* (pp. 132–137). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2017.8070582>
- Nptel. (2014). *Module 5 Carrier Modulation.* Retrieved from <https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT Kharagpur/Digi Comm/pdf-m-5/m5l24.pdf>
- Orrego, A. (2019). Medellín estrena dos semáforos inteligentes: ¿para qué sirven?

- Osorio, M. (2019). Prueban semáforos inteligentes en Medellín - Medellín - Colombia - ELTIEMPO.COM.
- Phononic. (2019). Cooling in LiDAR Applications - Phononic.
- Portafolio. (2017). Infraestructura le aportaría hasta 5,3% al PIB de Colombia | Infraestructura | Economía | Portafolio.
- QGIS. (2019). Bienvenido al proyecto QGIS! Retrieved January 31, 2019, from <https://qgis.org/es/site/index.html>
- Raspberry Pi Foundation. (2019). Raspberry Pi 3 Model B – Raspberry Pi. Retrieved May 21, 2019, from <https://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-3-model-b/#c-find-reseller>
- RASPBERRY PI FOUNDATION. (2019). Raspberry Pi. Retrieved May 13, 2019, from <https://www.raspberrypi.org/>
- Real Academia de Ingeniería. (2014a). modulación por desplazamiento de frecuencia. Retrieved May 27, 2019, from <http://diccionario.raing.es/es/lema/modulación-por-desplazamiento-de-frecuencia>
- Real Academia de Ingeniería. (2014b). verificación por redundancia cíclica. Retrieved May 27, 2019, from <http://diccionario.raing.es/es/lema/verificación-por-redundancia-cíclica>
- Registro Único Nacional de Tránsito. (2017). Parque automotor a Diciembre 2017 | RUNT.
- Rhodes, C., & Djahel, S. (2017). TRADER:Traffic Light Phases Aware Driving for Reduced Traffic Congestion in Smart Cities. In *2017 International Smart Cities Conference (ISC2)* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISC2.2017.8090783>
- RUNT. (2019). RUNT. Retrieved April 24, 2019, from <https://www.runt.com.co/>
- Seeed Studio. (2019). Seeeduino LoRaWAN W / GPS. Retrieved May 23, 2019, from <https://www.seeedstudio.com/Seeeduino-LoRaWAN-W-GPS-p-2781.html>
- Soni, N. B., & Saraswat, J. (2017). A review of IoT devices for traffic management system. In *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)* (pp. 1052–1055). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISS1.2017.8389341>
- Souravlias, D., Luque, G., Alba, E., & Parsopoulos, K. E. (2016). Smart Traffic Lights: A First Parallel Computing Approach. In *2016 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS)* (pp. 229–236). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INCoS.2016.72>
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2017). *2017 IEEE Thesaurus - Version 1.0*.
- TLR. (2019). SCOOT. Retrieved May 13, 2019, from <https://trlsoftware.com/products/traffic-control/scoot/>
- Trafficware a CUBIC Company. (2017). Synchro Studio. Retrieved November 13, 2018, from <https://www.trafficware.com/synchro.html>
- Tránsito Registro Único Nacional de. (2019). Registro Único Nacional de Tránsito.
- Tyco. (2019). SCATS. Retrieved May 12, 2019, from <http://www.tyco-its.com/products-and-services/urban-traffic-control/scats>
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2012a). *UIT-T Y.2060 (06/2012) Descripción general de Internet de los objetos. Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT*.

- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2012b). Y.2060 Visión general de la Internet de las cosas. Retrieved November 5, 2018, from <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-l/es>
- Wave Wifi. (2019). Wave Wifi Technology - Boat Wifi Antenna Florida. Retrieved May 13, 2019, from <https://www.wavewifi.com/services/wave-wifi-technology/>
- World Health Organization. (2017). WHO | Accidentes de tránsito. Retrieved May 1, 2019, from [https://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_traffic/es/](https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_traffic/es/)
- World Health Organization. (2018). Las 10 principales causas de defunción. Retrieved May 1, 2019, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- World Health Organization. (2019). World Health Organization. Retrieved May 1, 2019, from <https://www.who.int/>
- World Wide Web Consortium. (2016). HTML & CSS. Retrieved May 27, 2019, from <https://www.w3.org/standards/webdesign/htmlcss#whatcss>
- Yin, C., Xiong, Z., Chen, H., Wang, J., Cooper, D., & Bertrand, D. (2015). A Literature Survey On Smart Cities. *Science China Information Sciences*, 58(10), 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11432-015-5397-4>
- Younis, O., & Moayeri, N. (2017). Employing Cyber-Physical Systems: Dynamic Traffic Light Control at Road Intersections. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), 2286–2296. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2765243>
- Zaid, A. A., Suhweil, Y., & Yaman, M. Al. (2017). Smart controlling for traffic light time. In *2017 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AEECT.2017.8257768>
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32.
- Zigbee Alliance. (2019a). Zigbee. Retrieved May 13, 2019, from <https://www.zigbee.org/>
- Zigbee Alliance. (2019b). Zigbee 3.0. Retrieved May 23, 2019, from <https://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/zigbee-3-0/>