**Anexo A. Revisión sistemática de la literatura mediante la metodología PRISMA (anexo al documento del Anteproyecto)**

**Nombre del anteproyecto:** Sistema de control de tráfico en cruces de vías con semáforos, mediante inteligencia artificial, basado en servicios de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

**1. Descripción del documento**

Este documento presenta en detalle la revisión sistemática de la literatura que se realizó para el anteproyecto, haciendo uso de la metodología PRISMA [1]. PRISMA se utiliza para mejorar la presentación de informes relacionados con revisiones sistemáticas y meta-análisis. Se determinó PRISMA como guía adecuada para nuestro trabajo, considerando el orden que propone y la estandarización de sus fases. Las fases de PRISMA que se utilizaron fueron: la identificación, selección, elección e inclusión. Con esta revisión se buscaba identificar los diferentes enfoques empleados para el desarrollo de sistemas o servicios que estén relacionados con el control de los tiempos de semaforización de manera óptima, las tecnologías utilizadas (identificando entre otras el tipo de herramienta de Inteligencia a implementar), la arquitectura ITS o servicios en los que se basaron y el contexto, un país desarrollado o un país en desarrollo (América Latina o similar). El proceso que se llevó a cabo en cada una de las fases de la metodología se detalla a continuación.

**2. Procedimiento y resultados en cada una de las fases de la metodología**

**2.1. Fase de identificación**

En la fase de identificación, se realizó una búsqueda en la literatura en relación con los siguientes temas:

Servicios ITS (Sistemas de Transporte Inteligente) y sus arquitecturas, servicios de control inteligente de semaforización y el uso inteligencia artificial en la toma de decisiones.

Se hicieron búsquedas en tres bases de datos: IEEE, Science Direct, y EBSCO. Se utilizó una cadena de búsqueda en las bases de datos, que fue construida en torno a un grupo de palabras clave:

* Términos relacionados con movilidad (por ejemplo, *tráfico*)
* Los términos utilizados en la literatura acerca del control de tráfico (por ejemplo, *control de tráfico, semáforos*).
* Condiciones para sistemas inteligentes de transporte, servicios ITS y las arquitecturas utilizadas (por ejemplo, *Sistemas Inteligentes de Transporte*, *arquitecturas ITS*, *servicios ITS*).
* Condiciones para las tecnologías utilizadas actualmente (por ejemplo, *inteligencia artificial*).

En la estructura de la cadena utilizada para llevar a cabo las búsquedas se utilizaron operadores lógicos, tratando de obtener una precisión adecuada en cada una de las bases de datos.

Como resultado se obtuvo la siguiente cadena “**(Traffic control OR traffic lights OR ((intelligent transportation system) AND traffic)) AND artificial intelligence AND time**”, la cual fue utilizada en el proceso de búsqueda inicial en las bases de datos, y con la cual se encontró un total de 3.295 resultados, los cuales se dividen de la siguiente manera: 433 de EBSCO, 1.699 de IEEE y 1163 de Science Direct.

Una vez que se obtuvieron los resultados totales de las consultas, se aplicaron algunos filtros en las consultas obtenidas, tales como el año de publicación, que determinó que no podía ser inferior a 2015. También se consideró el tipo de publicación, teniendo en cuenta únicamente los artículos procedentes de conferencias o revistas (en los casos que la base de datos permite realizar este tipo de filtro). Al final del proceso de identificación, la aplicación de los filtros mencionados anteriormente, se obtuvieron 1.780 resultados de las bases de datos.

Finalmente, se realizó la adición de 2 documentos (a los obtenidos previamente) provenientes del repositorio de trabajos de grado de estudiantes de la FIET (Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones) de la Universidad del Cauca. Estos documentos, al igual que los anteriores pasarán por una serie de filtros y análisis para determinar su inclusión o no inclusión dentro del estado del arte de este trabajo.

**2.2. Fase de proyección**

En la fase de filtrado y selección, se realizó como primera instancia la eliminación de documentos que estuvieran repetidos en las bases de datos elegidas para la revisión sistemática. El número total de documentos que se eliminaron por estar duplicados (incluyendo otras fuentes) fueron 86 documentos. Los 1694 documentos resultantes se revisaron inicialmente por el título, de los cuales resultaron 172 documentos. Por último a estos 172 documentos y a los 2 documentos de las fuentes externas, se les realizó una revisión del resumen resumen (o *abstract*) y las conclusiones para identificar si los documentos tenían relación directa con el objeto de la revisión. Al final de esta etapa, se obtuvo un total de 46 documentos los cuales pasaron a la siguiente etapa.

**2.3. Fase de elección**

En esta fase, se realizó una revisión del artículo completo de los 46 documentos que se obtuvieron de la anterior fase. Para lo cual se definieron los siguientes criterios de elegibilidad:

* Los documentos deben estar relacionados con el control de tráfico. Se descartaron las soluciones que no tuvieran relación con señales de tráfico.
* Los documentos relacionados con técnicas de inteligencia artificial para alguna solución de movilidad, se incluyeron en el estudio.
* Los documentos que se relacionaron con vehículos autónomos se descartaron porque en el contexto de nuestra investigación (ciudades intermedias de los países de América Latina), no aplican este tipo de soluciones para el control de tráfico.
* Se descartaron los documentos (relacionados con sistemas o servicios) que no presentaron datos suficientes en relación con el diseño o implementación de servicio ITS.
* Se descartaron documentos con soluciones relacionadas con el aviso anticipado de información de tráfico al usuario como por ejemplo waze y otras herramientas relacionadas.

El total de documentos obtenidos al final de esta etapa fue de 26.

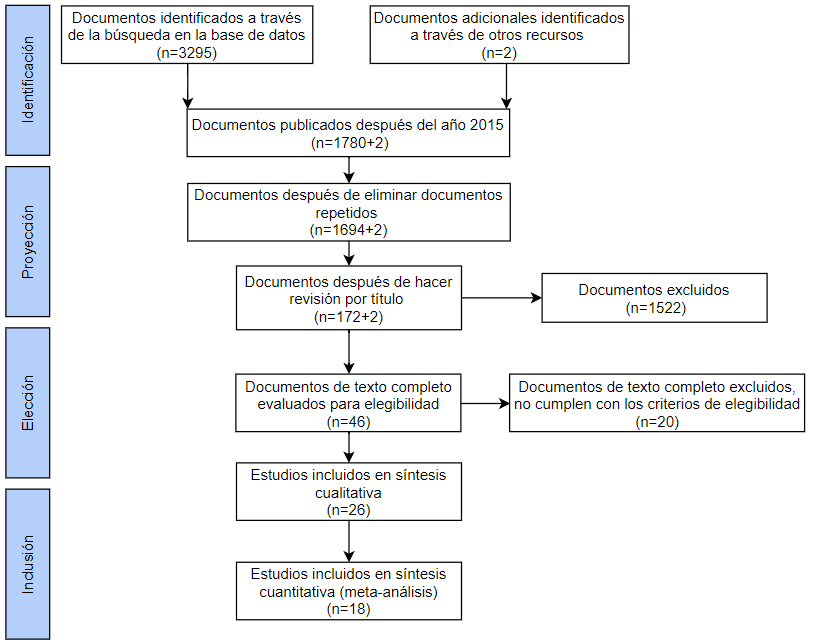
**2.4. Fase de inclusión**

En la última fase, los 26 documentos (obtenidos como resultado de la fase anterior) fueron revisados ​​con el fin de clasificarlos. Establecer algunas similitudes entre los documentos revisados, se determinaron las siguientes cuatro clasificaciones:

* Documentos relacionados exclusivamente con servicios o sistemas para el control inteligente del tiempo de semaforización.
* Documentos relacionados con el diseño o la implementación de servicios de movilidad mediante ITS que no tienen relación directa con el control de semaforización.
* Documentos relacionados con metodologías, modelos, análisis, algoritmos, dispositivos y estudios relacionados con el conteo y control del tiempo de semaforización.
* Documentos relacionados con tecnologías de IA implementadas en servicios de movilidad, que no se puedan incluir en ninguno de los grupos anteriores.

En esta fase de inclusión se hizo una síntesis cualitativa de los cuatro grupos de documentos mencionados y finalmente una síntesis cuantitativa del primer y tercer grupo, los cuales se pudieron comparar con ciertos parámetros.

La **figura 1** que se presenta a continuación, resume el proceso llevado a cabo en cada etapa y los documentos resultantes en cada una de ellas.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de la aplicación de PRISMA.

**3. Resultados de la revisión cualitativa y cuantitativa de la fase de inclusión.**

Los documentos seleccionados se dividen en los 4 grupos mencionados anteriormente, a continuación se realiza una síntesis cualitativa de dichos grupos para entender de mejor manera cómo se agrupan los documentos revisados e incluidos finalmente en el estado del arte y una síntesis cuantitativa para la cual se seleccionan el grupo 1 y 3 que es donde se facilitó identificar parámetros de comparación.

Para elegir los parámetros de comparación, fue necesario tener en cuenta la información más relevante que podría brindar cada documento para el desarrollo de nuestro proyecto. Se tuvo en cuenta el modelo o la técnica implementada ya que esto nos ayudará en la toma de una decisión sobre alguna de estas, para la realización del sistema de recomendación de tiempos de semaforización. También consideramos de utilidad conocer el sistema de monitoreo (si tienen) que fue implementado, con el fin de conocer el tipo de dispositivos utilizados para esta labor y poder determinar qué sistema nos permite realizar un adecuado monitoreo del flujo vehicular.

Se consideró también relevante dentro de estos parámetros, el tipo de implementación del sistema, para determinar si se llegó solo a un diseño, a una simulación, o se realizaron experimentos. Otro parámetro importante en la comparación de los documentos incluidos en esta síntesis es el contexto ya que con base en esta información podemos saber si los sistemas utilizados en los trabajos investigados pueden ser viables en ciudades de países en desarrollo en las cuales se requieren soluciones robustas a un bajo costo.

Finalmente, un parámetro que consideramos clave fue el uso o no uso de un *dataset,* principalmente porque esto nos dice si utilizaron datos tomados previamente del entorno, utilizan datos de otros proyectos o hacen uso de datos tomados de forma dinámica. Esto con el fin de determinar la mejor forma de hacerlo en nuestro proyecto.

**3.1. Servicios o sistemas para el control inteligente del tiempo de semaforización.**

En los documentos incluidos en este grupo se presentan varias opciones de sistemas o servicios de control de cruces semaforizados utilizados en la toma de decisión sobre el tiempo que debe asignarse a cada semáforos para optimizar el flujo vehicular. Cuatro de los once documentos (36.36%) se refieren a soluciones centradas en el uso de aprendizaje reforzado (*Reinforcement Learning o RL*), lo cual evidencia que es uno de los modelos más implementados en este tipo de proyectos actualmente y debe ser tenido en cuenta como una de las opciones a utilizar en nuestro trabajo. Los demás documentos se refieren a otros modelos de aprendizaje de máquina. Solo tres de los once documentos utilizan algún tipo de monitoreo de tráfico para la toma de datos, los otros documentos utilizan procesos estocásticos para generar los datos.

Todos los documentos incluidos en este grupo utilizan algún simulador para validar el sistema desarrollado y verificar que genere alguna mejoría sobre el flujo vehicular de un cruce específico. Por lo cual se evidencia la importancia de realizar una validación del sistema propuesto y los tiempos respectivos en una herramienta de simulación, que permita identificar si efectivamente se puede lograr una mejora en el flujo vehicular.

Siete de los once documentos (63.63%) son desarrollados en contexto de ciudades metropolitanas, lo que significa que no consideran las particulares condiciones que tienen las ciudades intermedias, de esa forma nuestro trabajo toma relevancia porque las ciudades intermedias sufren de estos problemas de movilidad pero las soluciones presentadas no toman en cuenta las limitaciones económicas que poseen a la hora de invertir en este tipo de proyectos. Tres de los once documentos (27.27%) no definen un contexto en específico, ya que el desarrollo lo hacen de forma teórica, por lo que no se tiene certeza del costo de implementación y su validez para el contexto que buscamos desarrollar nuestro proyecto.

Solo en cuatro de los once documentos (36.36%) se maneja un *dataset*, lo cual es algo que nos parece importante resaltar, ya que en nuestra investigación requerimos la selección de un *dataset* ya sea de una investigación previa (tomándolo para el análisis o ajustándolo) o capturando la información a partir de imágenes o video de tráfico.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Autor/año** | **Modelo o tecnología** | **Sistema monitoreo** | **Tipo de implementación** | **contexto** | **dataset** |
| Umut Özkaya y Levent Seyfi / 2016 | Fuzzy logic | No utiliza | Simulación | No definido | Si |
| Małecki Krzysztof / 2016 | GreenLine algorithm, Genetic algorithm, DMB | No utiliza | Simulación, cellular automata | Ciudades metropolitanas | No |
| Mohammad Aslani, Stefan Seipel, and Marco Wiering / 2018 | Reinforcement learning | No utiliza | Simulación | Ciudades metropolitanas | No |
| Wade Gendersa, Saiedeh Razavia / 2018 | Reinforcement learning | No utiliza | Simulación | Ciudades metropolitanas | No |
| Liza L. Lemos, Ana L. C. Bazzan / 2018 | Multiagent Reinforcement learning | No utiliza | Simulación | No definido | No |
| Mădălin-Dorin Pop / 2018 | Genetic algorithm | Red de sensores | Simulación | No definido | Si |
| N.R. Yusupbekov, A.R. Marakhimov, H.Z. Igamberdiev, Sh.X. Umarov / 2016 | Soft-computing Fuzzy Logic | No utiliza | Simulación | Ciudad metropolitana | No |
| Ricardo García, María L. López, María Teresa Sánchez, Julio Alberto López / 2019 | Memetic algorithms | No utiliza | Simulación | Ciudades Intermedias | Si |
| Patrick Manniona, Jim Duggana, Enda Howleya / 2015 | Parallel Learning | No utiliza | Simulación | Ciudad metropolitana | No |
| Mohammad Aslania, Mohammad Saadi Mesgaria / 2017 | Reinforcement learning /controladores A-CAT | Red de sensores | Simulación | Ciudad metropolitana | Si |
| R. Sanchez-Iborra, J. F. Ingles-Romero, G. Domenech-Asensi, J.L. Moreno-Cegarra, Maria Cano / 2016 | Proactive intelligent system | Cámaras | Simulación | Ciudades Metropolitanas | No |

**Tabla 1.** Descripción cuantitativa grupo 1.

**3.2. Diseño o la implementación de servicios de movilidad mediante ITS que no tienen relación directa con el control de semaforización.**

Los documentos incluidos en este segundo grupo presentan soluciones relacionadas a movilidad y que implementan alguna arquitectura ITS, a fin de comprobar la correcta implementación, de forma que las soluciones sean escalables y compatibles con otras soluciones de movilidad, que permitan mejorar de forma conjunta los problemas de movilidad encontrados previamente. Dos de los cuatro documentos (50%) proponen la utilización de otros modelos de aprendizaje de máquina como redes neuronales o HMM (Hidden Markov Models), siendo estas tecnologías las menos mencionadas en los documentos a los cuales se les hizo una revisión completa.

Uno de los cuatro documentos propone un sistema de control para cruces semaforizados donde se les asigna prioridad a los carriles donde se encuentre una ambulancia durante el traslado de un paciente, haciendo uso de tecnologías de bajo costo como LoRa, es un proyecto que a pesar de no tener relación directa, podría complementar nuestro proyecto para hacer más efectivo el traslado de un paciente y reducir la congestión vehicular en un cruce. Uno de los cuatro documentos propone un sistema que utiliza el GPS de los vehículos para brindar una mejor ruta a los usuarios a fin de reducir la congestión en una sola vía. El problema con esta solución en el contexto de las ciudades intermedias es que no todos los vehículos cuentan con esta tecnología.

**3.3. Metodologías, modelos, análisis, algoritmos, dispositivos y estudios relacionados con el conteo y control del tiempo de semaforización.**

En los documentos que se clasificaron en este grupo se presentan las metodologías, modelos, análisis, algoritmos, dispositivos y estudios relacionados con el conteo y control del tiempo de semaforización. Tres de los siete documentos (42.85%) Están relacionados con el uso de *Reinforcement learning* como tecnología para brindar solución a los problemas de tráfico. Este tipo de tecnología es una de las más implementadas, ya que el aprendizaje por refuerzo es un modelo que no se entrena con la respuesta correcta sino que este agente toma decisiones por sí mismo, las cuales serán recompensadas o no, según el objetivo que se busque y es lo más acertado para un sistema de recomendación de tiempos de semaforización ya que necesitamos que el sistema brinde soluciones que entre más reduzcan el flujo vehicular serán más recompensadas.

Cinco de los siete documentos utilizan software de simulación para validar su trabajo, donde se puede decir que todos lograron cumplir el objetivo de mejorar el tráfico vehicular, uno de los siete realiza un cuasi experimento el cual no brinda mucha información con respecto a si el modelo trabajado es eficiente en un entorno real, y el uno de los siete documentos (14.28%) no realiza ninguna simulación. Cuatro de los siete documentos (57.14%) son desarrollados en un contexto de ciudades metropolitanas ya que implementan tecnologías de alto costo que otras ciudades no se pueden permitir. dos de los siete documentos (28.57%) no tienen un contexto definido. Por último, uno de los siete documentos (14.28%) se basa en ciudades intermedias y se podría implementar en ciudades de Colombia específicamente Popayán que es la ciudad que será tomada como modelo.

Solo uno de los siete documentos (14.28%) hace uso de un *dataset*,los demás simulan el tráfico o lo reemplazan por funciones probabilísticas. Con lo cual se resalta nuestra investigación, en la cual se utilizará un *dataset* para su posterior análisis por parte del algoritmo de ML.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Autor/año** | **Modelo o tecnología** | **Sistema monitoreo** | **Tipo de implementación** | **contexto** | **dataset** |
| Cristina Vilarinho, José Pedro Tavares, Rosaldo J. F. Rossetti / 2017 | Multi-Agent Systems | Sin especificar | Simulación | Ciudad metropolitana | No |
| Yizhe Wang , Xiaoguang Yang , Hailun Liang , and Yangdong Liu / 2018 | Reinforcement learning | No | No | Ciudad metropolitana | No |
| Sahar Araghi, Abbas Khosravi, Douglas Creighton / 2014 | Q-learning, neural network, fuzzy logic | No | Simulación | Ciudad metropolitana | No |
| K.-L. A. Yau, M. H. Ling / 2017 | Reinforcement learning | No | Simulación | No definido | Sí |
| Juan Sebastian Bohorquez, David Fernando Quiñones / 2020 | Entrenamiento en cascada | Cámaras | Cuasi experimento | Ciudades intermedias | No |
| Sabeur Elkosantini Ahmed Frikha / 2015 | Fusión de datos de múltiples | Detectores múltiples | Simulación | No definido | No |
| Junchen Jin, Xiaoliang Ma / 2017 | Multi-Agent Systems | Sensores de monitoreo | Simulación | Ciudad metropolitana | No |

**Tabla 2.** Descripción cuantitativa grupo 3.

**3.4. Tecnologías de IA implementadas en servicios de movilidad, que no se puedan incluir en ninguno de los grupos anteriores.**

Los documentos de este grupo presentan tecnologías de inteligencia artificial para servicios de movilidad pero que no tienen relación directa con el control de tiempos de semaforización. Estos documentos presentan otras soluciones o alternativas para mejorar la movilidad como pueden ser la predicción de densidad de tráfico para tomar una mejor decisión en que rutas tomar o también sistemas que detecten incidentes de tráfico lo más rápido posible para realizar una respuesta rápida y evitar la congestión en las vías. Algunas de las tecnologías utilizadas en estos documentos son las redes neuronales, una nueva tecnología emergente que usa la integración de multi agent system (MAS) y swarm intelligence (SI), por lo tanto puede ser considerado como subcampo de inteligencia computacional (CI) y KNODET un Framework para minar datos de GPS. Y si bien no tienen mucha relación con nuestro trabajo se pueden tener en cuenta para trabajos posteriores o complementarios.

**4. Documentos que se determinaron incluir en el estado del arte.**

Se deciden incluir 19 documentos al estado del arte, de los 26 a los que se les realizó una síntesis cualitativa y cuantitativa en la revisión sistemática, ya que estos brindan una base de información adecuadamente relacionada al proyecto que buscamos desarrollar.

Del grupo de documentos relacionados exclusivamente con servicios o sistemas para el control inteligente del tiempo de semaforización decidimos descartar del estado del arte los siguientes documentos, ya que a pesar de contar con algunas características de este grupo, tienen algunas diferencias importantes respecto a las definidas para nuestra propuesta.

* A Novel Fuzzy Logic Model For Intelligent Traffic Systems [2].
* Combining adaptation at supply and demand levels in microscopic traffic simulation: a multiagent learning approach [3].
* Application of soft-computing technologies to the traffic control system design problems [4].
* Adaptive traffic signal control with actor-critic methods in a real-world traffic network with different traffic disruption events [5].

Del grupo de documentos relacionados con el diseño o la implementación de servicios de movilidad mediante ITS que no tienen relación directa con el control de semaforización decidimos descartar del estado del arte los siguientes documentos, ya que tienen enfoques considerablemente diferentes al propósito de nuestro trabajo, como por ejemplo la búsqueda de optimización de tiempos por medio de sensores en tiempo real que midan la cantidad de personas en las calles, o teorías muy poco conocidas o manejadas en trabajos relacionados.

* Intelligent Traffic Lights: Green Time Period Negotiation [6]
* Decision fusion for signalized intersection control [7]

Del grupo de documentos relacionados con tecnologías de IA implementadas en servicios de movilidad, que no se pudieron incluir en ninguno de los grupos anteriores, decidimos descartar del estado del arte el siguiente documento, ya que a pesar de presentar un modelo de IA (inteligencia artificial), este es utilizado para la calibración de algoritmos de detección de incidentes, lo que se aleja considerablemente de la idea de nuestro proyecto.

* Traffic volume responsive incident detection [8]

**5. Conclusiones generadas con la revisión sistemática**

* Aunque existen una gran cantidad trabajos relacionados con búsqueda de soluciones en la movilidad, muy pocos trabajos están basados en arquitecturas ITS o proponen alguna. Estas arquitecturas nos permiten mejorar la interoperabilidad y estandarización de los servicios de movilidad en una ciudad o en un país..
* La mayoría de los trabajos estudiados realizan pruebas de concepto usando datos simulados o *datasets* brindados por entidades de tráfico de su localidad, lo cual es un aspecto que hemos tenido en cuenta en nuestra propuesta..
* Muy pocos trabajos dejan de lado el software de simulación de tráfico como SUMO o AnyLogic para validar los resultados de su trabajo por lo que indica que estas herramientas son de gran valor para poder generar conclusiones sobre los trabajos realizados.
* Para desarrollar un sistema de monitoreo de tráfico eficiente, la mejor manera es utilizando cámaras gestionadas por microcontroladores (o tarjetas microcontroladas) y utilizando la visión de máquina (de herramientas como por ejemplo OpenCV). Esta es una tecnología no intrusiva en la infraestructura de tráfico, que dependiendo del número de dispositivos requeridos puede resultar que genere un costo beneficio adecuado.
* La mayoría de los documentos revisados usan *Reinforcement Learning* RL como tecnología de *machine learning* para realizar control de tráfico o servicios de movilidad relacionados, ya que es la técnica que mejor se ajusta éste tipo de requerimientos. Sin embargo se debe considerar que esta tecnología requiere de un monitoreo de tráfico permanente, lo que puede llegar a incrementar los costos de implementación de un sistema de éste tipo.

**6. Referencias**

[1] Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J .; Altman DG El Grupo PRISMA (2009).

Información artículos preferidos para revisiones sistemáticas y meta-análisis: La Declaración

PRISMA. PLoS Med 6 (7).

[2] U. Ozkaya and L. Seyfi, A Novel Fuzzy Logic Model For Intelligent Traffic Systems. Turquía, 2016.

[3] L. Lemos and A. Bazzan, Combining adaptation at supply and demand levels in microscopic traffic simulation: a multiagent learning approach. Porto Alegre, Brasil: Elsevier Ltd, 2019.

[4] N. Yusupbekov, A. Marakhimov, H. Igamberdiev and S. Umarov, Application of soft-computing technologies to the traffic control system design problems. Taskent, Uzbekistán: Elsevier B.V, 2016.

[5] M. Aslani, M. Saadi Mesgaria and M. Wiering, Adaptive traffic signal control with actor-critic methods in a real-world traffic network with different traffic disruption events. Elsevier Ltd, 2017.

[6] C. Vilarinho, J. Tavares and R. Rossetti, Intelligent Traffic Lights: Green Time Period Negotiation. Estambul, Turquía, 2016.

[7] S. Elkosantini and A. Frikha, Decision fusion for signalized intersection control, 44th ed. Kybernetes, 2015.

[8] E. Nathanail, P. Kouros and P. Kopelias, Traffic volume responsive incident detection. Volos, Grecia: Elsevier B.V, 2017.