



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**“OPTIMIZACIÓN DE LA SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE PARA LA
MOVILIDAD URBANA CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL E IOT”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero de Sistemas

AUTORES: AUCANCELA VITE WILMER ANTONIO
ARCE SOLANO MARCO ANTONIO
TUTOR: JOE FRAND LLERENA IZQUIERDO, ING., MSC.

Guayaquil – Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, WILMER ANTONIO AUCANCELA VITE con documento de identificación N° 0927544841 y MARCO ANTONIO ARCE SOLANO con documento de identificación N° 0931040570; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 12 de agosto del año 2024

Atentamente,



Wilmer Antonio Aucancela Vite

0927544841



Marco Antonio Arce Solano

0931040570

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, WILMER ANTONIO AUCANCELA VITE con documento de identificación N° 0927544841 y MARCO ANTONIO ARCE SOLANO con documento de identificación N° 0931040570, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “OPTIMIZACIÓN DE LA SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE PARA LA MOVILIDAD URBANA CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL E IOT”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero de Sistemas, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 12 agosto del año 2024

Atentamente,



Wilmer Antonio Aucancela Vite

0927544841



Marco Antonio Arce Solano

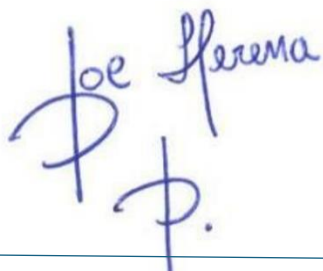
0931040570

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Joe Frand Llerena Izquierdo con documento de identificación N° 0914884879, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACIÓN DE LA SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE PARA LA MOVILIDAD URBANA CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL E IOT, realizado por WILMER ANTONIO AUCANCELA VITE con documento de identificación N° 0927544841 y MARCO ANTONIO ARCE SOLANO con documento de identificación N° 0931040570, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 12 agosto del año 2024

Atentamente,



Joe Frand Llerena Izquierdo

0914884879

DEDICATORIA

Dedicado a todos aquellos momentos de esfuerzo, sacrificio y perseverancia que me llevaron a este día tan especial. A mis padres y al Ec. Jan Topic por ser mi inspiración constante y por su apoyo incondicional a lo largo de este camino. A los docentes, por su apoyo y comprensión logramos superar los tiempos difíciles de la enfermedad que logre superar, gracias por su apoyo y comprensión.

Finalmente quiero dedicarle a mi abuelito Manuel Aucancela que está en el cielo por guiarme con sabiduría. Agradezco a todos aquellos que me motivaron cuando la meta parecía lejana debido a tantas dificultades que en la vida tuve que pasar por problemas médico. Esta culminación de carrera no es solo un diploma, sino el resultado de años de dedicación y motivación para continuar con la carrera profesional.

Wilmer Antonio Aucancela Vite

AGRADECIMIENTO

Quiero expresamente mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte proceso hacia la culminación de mi carrera universitaria. Mi gratitud se extiende a mis padres, cuyo apoyo es incondicional y cariño han sido mi mayor motivación. Agradezco al presidente de la compañía que labora actualmente por compartir la misma ideología del progreso y el crecimiento personal. Sobre todo, su apoyo económico me permitió realizar y llegar a cumplir mis sueños de ser profesional. Este logro no solo es mío, sino también de todos aquellos que creyeron en mí capacidad y las ganas de superarme día a día, dedico este éxito a toda mi familia.

Wilmer Antonio Aucancela Vite

DEDICATORIA

A mi esposa, a mi hija, a mis padres y a toda mi familia cuyo amor incondicional, paciencia y apoyo constante han sido mi mayor inspiración. Gracias por haber creído en mí en cada paso del camino y por darme las herramientas para alcanzar mis sueños.

A mis profesores, por su orientación. Su dedicación y compromiso con mi formación han sido cruciales para lograr este objetivo.

Finalmente, a mis abuelos que seguro están muy felices, también a mi querida madrina por ser un ejemplo de perseverancia y dedicación, y por estar siempre a mi lado con palabras de aliento y apoyo.

Este trabajo es el reflejo de todas las personas maravillosas que han contribuido a mi crecimiento personal y profesional. Gracias de corazón.

Marco Antonio Arce Solano

AGRADECIMIENTO

A mi esposa, a mi hija, a mis padres y a toda mi familia cuyo amor incondicional, paciencia y apoyo constante han sido mi mayor inspiración. Gracias por haber creído en mí en cada paso del camino y por darme las herramientas para alcanzar mis sueños.

A mis profesores, por su orientación. Su dedicación y compromiso con mi formación han sido cruciales para lograr este objetivo.

A mi compañero, colega y gran pana Wilmer, que desde hace mucho hemos sido grandes compañeros también es ejemplo de perseverancia y dedicación.

Finalmente, a mis abuelos que seguro están muy felices, también a mi querida madrina por ser un ejemplo de perseverancia y dedicación, y por estar siempre a mi lado con palabras de aliento y apoyo.

Este trabajo es el reflejo de todas las personas maravillosas que han contribuido a mi crecimiento personal y profesional. Gracias de corazón.

Marco Antonio Arce Solano

RESUMEN

La eficiencia de la movilidad urbana es un gran problema en las ciudades modernas debido al constante aumento del tráfico de vehículos. Este estudio presenta una arquitectura innovadora para la optimización de la semaforización inteligente en entornos urbanos utilizando Inteligencia Artificial (IA) y la Internet de las Cosas (IoT). El objetivo principal es desarrollar un modelo que mejore la movilidad urbana mediante la integración de sensores de flujo vehicular y detección de peatones, aprovechando las capacidades predictivas de las Redes Neuronales Recurrentes (RNN). Se realizó un análisis de la literatura para identificar los fundamentos y avances en movilidad urbana inteligente, seguido del diseño de una arquitectura de información escalable, flexible y segura. La evaluación comparativa del modelo propuesto, utilizando un Análisis Multi-Criterio (MCA), mostró que la arquitectura supera a otros enfoques en términos de desempeño, escalabilidad, robustez, y flexibilidad, concluyendo en su factibilidad para su posterior implementación en entornos con desafíos crecientes de movilidad urbana.

Palabras clave: semaforización inteligente, movilidad urbana, inteligencia artificial, Internet de las Cosas, optimización del tráfico.

ABSTRACT

Urban mobility efficiency is a major problem in modern cities due to the constant increase of vehicular traffic. This study presents an innovative architecture for the optimization of intelligent traffic signalization in urban environments using Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT). The main objective is to develop a model that improves urban mobility by integrating vehicular flow sensors and pedestrian detection, leveraging the predictive capabilities of Recurrent Neural Networks (RNN). A literature review was conducted to identify the fundamentals and advances in intelligent urban mobility, followed by the design of a scalable, flexible and secure information architecture. The comparative evaluation of the proposed model, using Multi-Criteria Analysis (MCA), showed that the architecture outperforms other approaches in terms of performance, scalability, robustness, and flexibility, concluding on its feasibility for further implementation in environments with increasing urban mobility challenges.

Keywords: smart traffic lights, urban mobility, artificial intelligence, Internet of Things, traffic optimization.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
3. METODOLOGÍA	15
4. RESULTADOS	18
5. DISCUSIÓN.....	26
6. CONCLUSIÓN	26
7. REFERENCIAS.....	28

1. INTRODUCCIÓN

La movilidad urbana eficiente es una necesidad e importante para el desarrollo sostenible y la calidad de vida en las ciudades modernas (Rui & Othengrafen, 2023). Con el aumento constante de vehículos y el crecimiento de las áreas urbanas, los desafíos relacionados con la congestión del tráfico, los largos tiempos de viaje y la contaminación ambiental se han multiplicado. Los sistemas de semaforización tradicionales, que operan con temporizadores, no están equipados para manejar los cambios de semáforos y complejidades del tráfico urbano convencional (Kulkarni et al., 2024). La falta de adaptabilidad resulta en frecuentes cuellos de botella, desperdicio de combustible y una mayor emisión de gases contaminantes, lo que afecta negativamente tanto a la economía como al medio ambiente (Salazar Guzmán, 2021; Santos et al., 2023).

Las ciudades alrededor del mundo buscan soluciones innovadoras para optimizar la gestión del tráfico y mejorar la eficiencia de sus redes de transporte. En este contexto, las tecnologías como la IA e IoT ofrecen una visión bastante prometedora para cubrir estos problemas (López-Chila et al., 2024; Meduri et al., 2023). La IA, con su capacidad para procesar y analizar grandes cantidades de datos, puede tomar patrones de tráfico y ajustar los tiempos de los semáforos en tiempo real, optimizando así el tráfico vehicular (Bharadiya, 2023). Por otro lado, el IoT permite extraer los datos en tiempo real a través de sensores instalados en las avenidas e intersecciones, entregando una visión precisa y actualizada de las condiciones del tráfico (Sharma & Atassi, 2023).

La semaforización inteligente no solo promete una mejora en la eficiencia del tráfico, sino una contribución a la sostenibilidad ambiental y la seguridad vial. Al reducir los tiempos de espera y optimizar el uso de la infraestructura vial, se pueden disminuir las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, al mismo tiempo que se mejora la experiencia de los usuarios de la red de transporte (Lv & Shang, 2023). A medida que las ciudades continúan creciendo y evolucionando, la adopción de tecnologías avanzadas para la gestión del tráfico se convierte en una necesidad imperativa para construir ciudades más inteligentes, sostenibles y habitables (Alam et al., 2024).

Este artículo se centra en el desarrollo de un modelo de optimización de la semaforización inteligente para la movilidad urbana con inteligencia artificial e IoT, mediante sensores de flujo vehicular y detección de peatones. Para ello, primero se analizan artículos científicos para conocer los fundamentos de la inteligencia artificial y los avances

relacionados con la movilidad urbana inteligente. A partir de esta revisión se diseña un modelo de arquitectura de información para la optimización de la movilidad urbana con inteligencia artificial e IoT. Luego se evalúa la arquitectura para posibles mejoras en el proceso de desarrollo de los sistemas mediante una tabla comparativa de nivel de factibilidad.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Inteligencia Artificial

La IA es una rama informática que busca resolver tareas tradicionales mediante sistemas que imitan la inteligencia humana. En ese sentido, los sistemas aplican el razonamiento y toman decisiones respecto a datos previamente percibidos. Dentro del ámbito de la movilidad urbana, la IA tiene un potencial significativo para mejorar la gestión del tráfico. Las redes neuronales son algoritmos de aprendizaje automático que forman parte de la IA y pueden analizar grandes volúmenes de datos de tráfico en tiempo real, identificar patrones y predecir congestiones futuras. Esto permite ajustar los tiempos de los semáforos de manera dinámica, optimizando el flujo vehicular y reduciendo los tiempos de espera (Abdullah et al., 2023).

Los modelos de redes neuronales, particularmente las redes neuronales recurrentes (RNN) y las redes neuronales convolucionales (CNN), se utilizan para procesar datos secuenciales y espaciales del tráfico. Estos modelos pueden aprender de datos históricos y en tiempo real para mejorar continuamente la precisión de sus predicciones. Por ejemplo, una RNN puede predecir el volumen de tráfico en una intersección específica a partir de los patrones observados en datos anteriores, mientras que una CNN puede analizar imágenes de cámaras de tráfico para identificar vehículos y medir su velocidad (Zhang et al., 2024).

Además, los algoritmos de optimización, como los algoritmos genéticos y los métodos de optimización estocástica, pueden aplicarse para encontrar la mejor configuración de tiempos de semáforos que minimice los tiempos de espera y maximice el flujo vehicular. Estos algoritmos simulan procesos evolutivos para generar soluciones óptimas a problemas complejos, adaptándose a las condiciones cambiantes del tráfico en tiempo real (Su et al., 2023).

2.2 Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la comunicación existente entre dispositivos que comparten una misma red y que proporcionan información a los usuarios respecto a los datos recopilados por estos dispositivos. En el contexto de la semaforización inteligente, el IoT juega un papel crucial al dar a conocer el estado del tráfico al instante en que se produce. Los sensores IoT, como detectores de proximidad, cámaras de vigilancia y sensores ambientales, se instalan en las intersecciones para monitorear el volumen de tráfico, la velocidad de los vehículos y las condiciones meteorológicas (Liu & Ke, 2023).

Estos sensores envían datos a una plataforma central, donde se procesan y analizan mediante algoritmos de IA. La capacidad de recopilar datos en tiempo real permite una gestión del tráfico más precisa y eficiente. Por ejemplo, los sensores de proximidad pueden detectar la cantidad de vehículos en una cola de semáforo y ajustar sus tiempos para evitar congestiones. Las cámaras de vigilancia con reconocimiento de matrículas pueden identificar vehículos en tiempo real, proporcionando datos adicionales sobre el flujo vehicular y permitiendo la detección de infracciones de tráfico (Howlader et al., 2024).

La infraestructura IoT también facilita la comunicación entre diferentes componentes del sistema de gestión del tráfico. Los semáforos inteligentes pueden intercomunicarse para sincronizar sus ciclos y mejorar el flujo vehicular en toda una red de intersecciones. Además, los datos recopilados por los sensores IoT pueden integrarse con otros sistemas de la ciudad, como los sistemas de transporte público y los vehículos conectados, creando un ecosistema de movilidad inteligente (Nigam et al., 2023).

2.3 Semaforización Inteligente

La semaforización inteligente aplica tecnologías que hacen eficiente la gestión del tráfico, gracias a su facilidad adaptativa. A diferencia de los sistemas tradicionales, que operan con ciclos fijos predefinidos, los semáforos inteligentes ajustan sus tiempos dependiendo de las condicionantes del tráfico real. Esto se logra mediante la integración de IA e IoT, que permiten una respuesta dinámica a las fluctuaciones del tráfico (Alsheikhy et al., 2023).

El sistema de semaforización inteligente se basa en una arquitectura de red donde los semáforos están conectados a una plataforma central de gestión del tráfico. Los datos recopilados por los sensores IoT se envían a esta plataforma, donde se analizan utilizando algoritmos de IA. Los resultados del análisis se utilizan para ajustar los tiempos de los semáforos, optimizando el flujo vehicular y reduciendo los tiempos de espera (De Oliveira et al., 2021).

La semaforización inteligente produce ventajas en cuanto a la eficiencia del tráfico y reducción de polución. Al minimizar los tiempos de espera y mantener un flujo vehicular constante, existe una disminución del combustible gastado por los automóviles y en consecuencia de los gases polutivos que generan. Además, la semaforización inteligente puede mejorar la seguridad vial al reducir la probabilidad de accidentes en las intersecciones (Gaikwad et al., 2023).

Los sistemas de semaforización inteligente también pueden adaptarse a diferentes contextos y necesidades. Por ejemplo, en áreas urbanas densamente pobladas, los semáforos inteligentes pueden identificar situaciones de emergencia y dar paso prioritario a vehículos como ambulancias, policías, bomberos, etc. de manera que el tráfico no colapse y los tiempos de respuesta ante emergencia sean los mínimos posibles. En áreas con alta contaminación, los semáforos inteligentes pueden ajustar sus ciclos para minimizar las emisiones de los vehículos detenidos (Younes et al., 2023).

3. METODOLOGÍA

Este estudio utiliza un enfoque cualitativo y es de carácter exploratorio, pues se analizan artículos científicos para conocer los fundamentos de la IA, IoT y los avances en movilidad urbana inteligente con relación a las tecnologías nombradas. A la vez, es un estudio descriptivo puesto que del diseño se pasa a la descripción del modelo de optimización de la semaforización inteligente.

3.1 Métodos y técnicas de Recopilación de datos empleadas

El método aplicado es una revisión sistemática de la literatura en la que se revisaron diferentes fuentes primarias y secundarias de la información en las bases de datos IEEE Xplore, Springer, Google Scholar y ScienceDirect. La cadena de búsqueda utilizada fue la siguiente: "inteligencia artificial" OR "IoT" AND "movilidad urbana" OR

"semaforización inteligente" OR "sensores de tráfico". Se consideraron artículos con fecha de publicación no mayor a los últimos 5 años a la fecha actual y en idioma inglés. En la tabla 1 se muestra la cantidad de artículos excluidos en de cada filtro. Se identificaron 1367 artículos en la búsqueda preliminar usando las palabras claves, de los cuales se descartaron 1226 después de evaluar títulos y resúmenes. En la segunda revisión se excluyeron 122 artículos cuyo contenido no contenía una metodología y objetivos claros, quedando 19 trabajos seleccionables para su análisis.

Tabla 1. Estudios identificados en la revisión de literatura

Preliminares	Excluidos primera revisión	Excluidos segunda revisión	Trabajos incluidos finales
1367	1226	122	19

En la figura 1 se visualizan las temáticas que se abordaron en la revisión de literatura realizada. Se encontró que el 29% de artículos se concentra en el análisis de modelos de inteligencia artificial para la predicción de flujo vehicular. Estos estudios analizan e implementan modelos de IA, utilizando algoritmos como RNN que son efectivos para capturar la dinámica temporal del tráfico al aprender de series de datos históricos y prever las condiciones futuras en intervalos de tiempo cortos (Awan et al., 2021). Otros estudios han empleado redes CNN combinadas con modelos de grafos para analizar los datos del tráfico y la topología de las carreteras, mejorando la precisión en la predicción del flujo vehicular al tener en cuenta la estructura espacial de la red de carreteras (Narmadha & Vijayakumar, 2023). Mientras tanto, el aprendizaje por refuerzo ha sido aplicado para optimizar la gestión de semáforos inteligentes, permitiendo que los agentes aprendan a tomar decisiones sobre la señalización en función del flujo de tráfico, minimizando tiempos de espera y mejorando el flujo general (Joo et al., 2020).

El 24% de estudios se concentran en la integración de IoT con sistemas de semaforización, abordando la incorporación de sensores, cámaras, y otros dispositivos IoT en sistemas de semaforización para recopilar datos en tiempo real y mejorar la toma de decisiones en la gestión del tráfico.

El 22% de estudios se centra en la optimización de algoritmos de control de semáforos, analizando algoritmos específicos para el control de semáforos, incluyendo técnicas como la optimización basada en flujo de tráfico, algoritmos genéticos, y métodos heurísticos.

El 16% de estudios evalúan el impacto de los sistemas de semaforización inteligente en la movilidad urbana y cómo estos son capaces de reducir la polución en el ambiente gracias a una adecuada gestión vehicular. Estos estudios analizan también la mejora producida a la calidad de vida de las personas asociada a la optimización del tráfico.

En tanto que el 9% de estudios aborda la temática de seguridad y protección de datos en sistemas inteligentes, explorando medidas para proteger la infraestructura y los datos del sistema contra ciberataques y garantizar la confiabilidad del sistema.

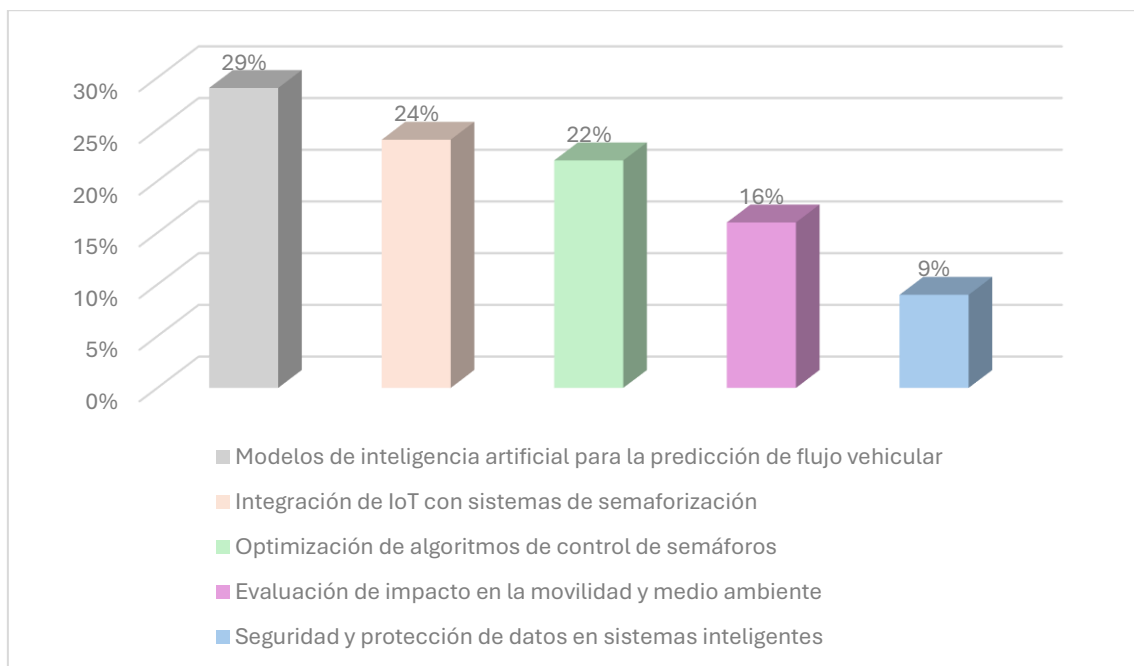


Figura 1. Temáticas abordadas en los estudios revisados de la literatura

3.2 Métodos y técnicas de Análisis de datos

Para el diseño del modelo se siguieron varios pasos. Se definieron los requisitos funcionales y no funcionales del sistema. Se seleccionaron las tecnologías que formarán parte del sistema: sensores IoT, algoritmos de IA y la infraestructura de comunicaciones. Luego se diseña el modelo de la arquitectura de información en diferentes capas. Para la construcción del modelo se aplicó la técnica del modelado de procesos que permite visualizar como los diferentes elementos interactúan entre sí para optimizar la movilidad urbana y la detección de movimiento.

Para la evaluación del modelo se utilizó la técnica de Análisis Multi-Criterio (MCA) para evaluar y comparar múltiples soluciones de semaforización inteligente basándose en diferentes criterios. La matriz de evaluación para comparar la arquitectura propuesta con

otras soluciones existentes en base a diferentes criterios se visualiza en la tabla 2. Se asignaron pesos a cada criterio de evaluación según su importancia relativa para la movilidad urbana inteligente, la suma de estos pesos suma 100%.

Tabla 2. Criterios de evaluación y pesos para el modelo propuesto

Criterio evaluado	Descripción	Peso
Desempeño	Velocidad de procesamiento y precisión en la predicción del tráfico.	0.30
Escalabilidad	Capacidad de expansión para incluir más sensores y nodos sin perder eficiencia.	0.20
Robustez	Resiliencia ante fallos, capacidad de recuperación, y estabilidad bajo condiciones adversas.	0.20
Costo-Beneficio	Relación entre el costo de implementación/mantenimiento y los beneficios en la movilidad urbana.	0.15
Flexibilidad	Facilidad para adaptar el sistema a diferentes contextos urbanos, normativas, o nuevas tecnologías.	0.10
Seguridad	Protección contra ciberataques y manejo seguro de datos sensibles.	0.05
Total		1

4. RESULTADOS

4.1 Modelo propuesto

Como se visualiza en la figura 2, el modelo cuenta con cuatro capas bien definidas: de percepción, de red, de procesamiento, de interfaz de usuario.

En la **capa de percepción** se encuentran sensores y dispositivos IoT para recopilar datos. Los sensores de vehículos detectan el flujo vehicular y transmiten datos al instante. Se utilizan sensores de presión que detectan el peso de los vehículos sobre la calzada para determinar la presencia y densidad del tráfico. Se usan sensores de proximidad LIDAR (Light Detection and Ranging) para medir distancias y detectar vehículos en movimiento, mediante un láser que emite pulsos.

Las cámaras de vigilancia con detección de movimiento capturan imágenes del tráfico para análisis visual y reconocimiento de matrículas (ANPR) y de peatones en los cruces. Los contadores de tráfico cuentan cada vehículo que atraviesa una intersección determinada y generan el total del conteo en un periodo de tiempo.

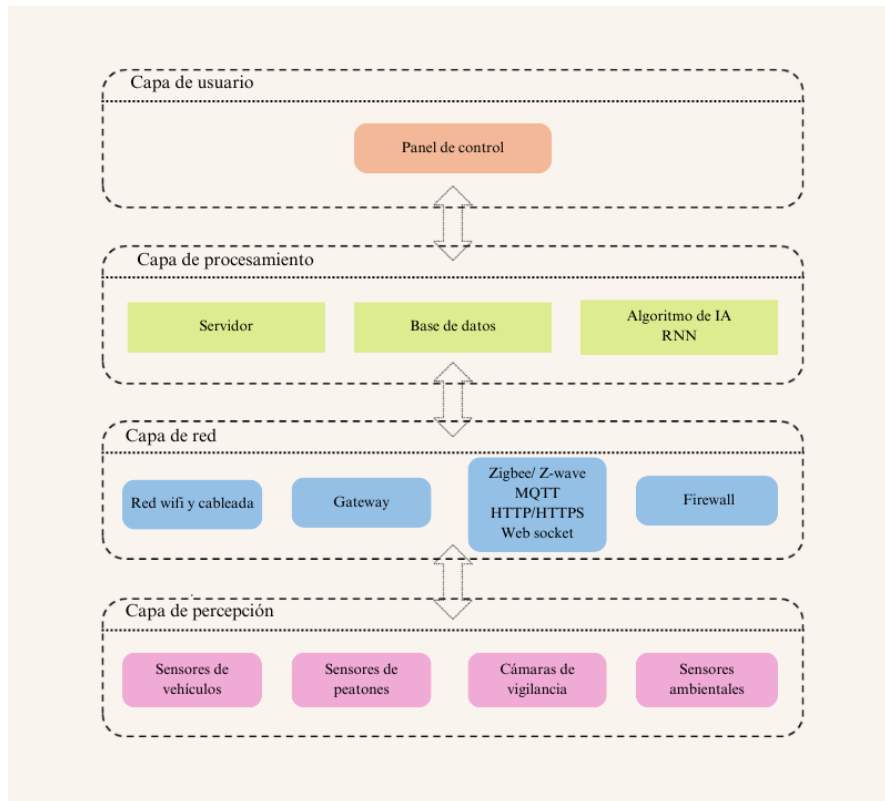


Figura 2. Modelo propuesto para optimización del flujo vehicular y detección de peatones

Se usan sensores infrarrojos para detectar la presencia y movimiento de peatones al identificar la radiación infrarroja emitida por sus cuerpos. Se usan sensores ultrasónicos para medir la distancia a objetos cercanos detectando peatones en los cruces.

Los sensores ambientales como sensores de luz y sensores de clima se usan para medir los niveles de iluminación para ajustar el brillo de las señales de tráfico y optimizar la visibilidad; también proporcionan datos sobre las condiciones meteorológicas que pueden afectar el tráfico, como lluvia intensa o niebla que pueden afectar la conducción.

La **capa de red** permite la transmisión de datos a través una infraestructura de comunicación. La infraestructura de comunicación se compone de una red inalámbrica y cableada. La red wifi permite la comunicación entre los sensores IoT incorporados. La red cableada con fibra óptica se utiliza en los centros de procesamiento de datos que requieren una conexión de alta velocidad y baja latencia. Se utiliza un gateway como intermediario entre los sensores IoT y la red central, traduciendo diferentes protocolos y formatos de datos.

La comunicación entre los diferentes componentes del modelo se da mediante varios protocolos. Zigbee y Z-Wave se usan como protocolos de red de malla para la

comunicación entre dispositivos IoT de corto alcance en áreas donde la densidad de dispositivos es alta. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) se utiliza para la transmisión de datos en entornos con conectividad limitada pero con alta latencia. HTTP/HTTPS para datos más voluminosos y con garantía de seguridad en las comunicaciones, especialmente en la interfaz de usuario. Web socket para la comunicación bidireccional entre servidores y clientes, de esta forma se podrá monitorear y controlar el estado del tráfico en tiempo real. Se añade un firewall para proteger la infraestructura de red de ataques cibernéticos y accesos no autorizados.

La **capa de procesamiento** se constituye de un servidor, una base de datos y un algoritmo de IA que es una RNN. El servidor procesa los datos recibidos de los sensores utilizando el algoritmo de IA, luego la base de datos almacena todos los datos recopilados históricamente y los resume en información para tomar decisiones.

El algoritmo de IA utilizado es una RNN que toma como entrada la densidad de tráfico a lo largo del tiempo, permitiendo que el sistema aprenda patrones en cómo el tráfico varía durante diferentes horas del día o en respuesta a eventos específicos. La red puede producir una salida en cada paso temporal, como la predicción del tráfico en el siguiente intervalo de tiempo, lo que permite ajustar los semáforos de manera proactiva. La red es capaz de capturar dependencias temporales a largo plazo, lo que significa que puede considerar cómo el estado del tráfico en un momento anterior podría afectar el estado futuro, algo fundamental para predecir congestiones o fluctuaciones en el flujo vehicular. Se utiliza un entrenamiento supervisado con un conjunto de datos históricos de tráfico, que incluye información sobre la densidad de vehículos, momentos del día en el que hay más tráfico y eventos especiales (como días festivos o emergencias) que pueden afectar el tráfico. La red se entrena hasta que las diferencias entre las predicciones de la RNN y los datos reales observados en el tráfico sean mínimas, utilizando una función de pérdida como el error cuadrático medio. Se ajusta el número de neuronas en la capa oculta para equilibrar la capacidad de la red de capturar patrones complejos sin caer en el sobreajuste. También se selecciona una tasa de aprendizaje adecuada para asegurar que el modelo converja de manera eficiente hacia un mínimo en la función de pérdida.

En la **capa de interfaz de usuario** se encuentra la aplicación desde la cual los operadores de tráfico pueden monitorear el sistema de semaforización.

La interacción entre los elementos de cada capa se da de la siguiente forma. Los sensores de la capa de percepción envían datos en tiempo real a través de la capa de red a los sistemas de procesamiento centralizados. Utiliza el protocolo de comunicación MQTT para enviar datos de manera eficiente y con bajo consumo de energía. Los datos recogidos por los sensores se envían a través de gateways, que actúan como intermediarios, traduciendo los protocolos de los sensores a un formato compatible con la red central.

La capa de procesamiento recibe los datos de la capa de percepción y los analiza utilizando el algoritmo de IA. Los datos, como la densidad de tráfico o la presencia de peatones, se procesan para generar patrones y tomar decisiones en tiempo real. Los datos crudos y procesados se almacenan para análisis posteriores, como la evaluación de patrones de tráfico a largo plazo o la mejora del algoritmo de IA.

La capa de aplicación utiliza los datos analizados para controlar los semáforos, ajustando los tiempos en función del flujo de tráfico y la presencia de peatones. Por ejemplo, si un sensor detecta una gran cantidad de vehículos en una dirección, el sistema puede prolongar la luz verde para facilitar el flujo. Los datos de la capa de percepción se muestran en la interfaz de usuario para que los operadores puedan supervisar el tráfico al instante en tiempo real, la operación de los semáforos y de ser necesario tomar el control manual del sistema, basándose en los datos proporcionados por los sensores.

El modelo propuesto cuenta con las características de funcionalidad, escalabilidad, seguridad, interoperabilidad, robustez y mantenibilidad. El sistema está diseñado cumplir con los requisitos de optimización del tráfico y detección de peatones, puede ser expandido o adaptado a diferentes entornos urbanos, es compatible con otros sistemas y/o tecnologías existentes, y es capaz de operar bajo diversas condiciones y recuperarse de fallos.

4.2 Evaluación de la arquitectura

La tabla 3 es el resultado del análisis de los multicriterio. Las comparaciones se realizaron con trabajos de otros autores revisados de la literatura. La columna Opción A corresponde al puntaje otorgado a la arquitectura propuesta en este estudio. La columna Opción B son los trabajos de otros autores. El puntaje para la arquitectura propuesta como para los trabajos de otros autores puede ir de 1 a 5 donde 1 es el rendimiento más bajo y 5 el más alto.

Los resultados de las comparaciones arrojaron mejores puntuaciones en cada uno de los criterios para la arquitectura propuesta, con excepción del criterio de costo beneficio. En consecuencia, el valor ponderado de las puntuaciones para el modelo propuesto es mayor (4.20) a los valores ponderados promediados encontrado en la literatura revisada (3.50).

La arquitectura propuesta utiliza una RNN la cual es efectiva para manejar problemas de series temporales, como la predicción del flujo vehicular. A diferencia de los modelos tradicionales que pueden tener dificultades para adaptarse a los cambios dinámicos en el tráfico, las RNN permiten una mayor precisión en las predicciones y una respuesta más rápida a las variaciones en el tráfico. Esto se traduce en una optimización más eficaz de los tiempos de semáforo, reduciendo significativamente la congestión vehicular. En comparación con otros enfoques basados en IA más simples o en reglas fijas, la arquitectura propuesta ofrece una mejora notable en la velocidad y precisión de la gestión del tráfico.

La arquitectura está diseñada con un enfoque modular, lo que facilita la integración de nuevos dispositivos IoT y sensores sin afectar el rendimiento del sistema. A medida que una ciudad crece o se implementan nuevos dispositivos, la arquitectura propuesta puede escalar de manera eficiente, soportando un mayor número de nodos y al instante en tiempo real volúmenes de datos de gran tamaño. Este nivel de escalabilidad es superior a las soluciones tradicionales que a menudo requieren una reconfiguración significativa o que sufren de una disminución en el rendimiento cuando se expanden.

Se incluye mecanismos de redundancia y recuperación que aseguran un alto nivel de robustez y confiabilidad. Esto significa que el sistema puede continuar operando de manera estable incluso ante fallos de componentes individuales o ataques cibernéticos. A diferencia de muchas implementaciones documentadas en la literatura, que pueden ser vulnerables a interrupciones, la propuesta está diseñada para mantener su estabilidad y funcionalidad bajo condiciones adversas, asegurando una operación continua y segura del sistema de semaforización inteligente.

Aunque la implementación inicial de la arquitectura propuesta puede implicar un costo mayor debido a la infraestructura IoT avanzada y el uso de IA, sin embargo, a largo plazo, se prevé que sea más rentable. La reducción de la congestión vehicular no solo mejora la movilidad urbana, sino que también disminuye los costos asociados con el tiempo perdido y el consumo de combustible. Además, la arquitectura modular reduce los costos de

mantenimiento y actualización, lo que la hace mejor en términos de costo-beneficio en comparación con sistemas que requieren inversiones frecuentes para mantenerse actualizados.

La arquitectura propuesta incorpora como medida de seguridad un firewall que busca proteger el sistema contra ciberataques y que los datos se mantengan íntegros. En algunos de los estudios de la literatura revisada, se usan métodos como los datos cifrados junto con la autenticación de dispositivos IoT para la detección de anomalía y protección frente a ciberataques. A futuro para mejorar los niveles de seguridad de la propuesta se puede hacer uso de estos métodos de protección.

Tabla 3. Comparativa de factibilidad del modelo propuesto

Criterio evaluado	Peso	Arquitectura propuesta	Valor ponderado	Valores ponderados promedio de estudios revisados	Comentarios	Factible	Referencias comparadas
Desempeño	0.30	5	1.5	1.2	La arquitectura propuesta utiliza una RNN, lo que mejora significativamente la precisión y la velocidad en comparación con otros enfoques basados en algoritmos más básicos.	Sí	(Balasubramanian et al., 2023; Barbosa et al., 2023; Cirianni et al., 2023; Damadam et al., 2022; Dikshit et al., 2023; Gaikwad et al., 2023; Jutury et al., 2023; Kulkarni et al., 2024; Liu & Ke, 2023; Maureen et al., 2023; Moumen et al., 2023; Taiwo et al., 2024)
Escalabilidad	0.20	4	0.8	0.6	La propuesta es más escalable debido a su diseño modular, por lo que se pueden adicionar más dispositivos IoT.	Sí	
Robustez	0.20	4	0.8	0.6	La mayoría de las soluciones presentan niveles similares de robustez, aunque la arquitectura propuesta incluye redundancias adicionales que mejoran la confiabilidad.	Sí	
Costo-Beneficio	0.15	3	0.45	0.6	La arquitectura propuesta, aunque inicialmente más	Sí	

					costosa, se prevé que sea más rentable a largo plazo debido a la reducción de costos operativos y de mantenimiento.	
Flexibilidad	0.10	5	0.5	0.3	La propuesta ofrece una mayor flexibilidad, especialmente en términos de adaptación a diferentes normativas y entornos urbanos debido a su arquitectura flexible y basada en IA avanzada.	Sí
Seguridad	0.05	3	0.15	0.20	En algunos de los estudios revisados se incluyen medidas de seguridad más avanzadas, los datos cifrados y la autenticación de dispositivos IoT,	Sí
Total	1		4.20	3.50		

5. DISCUSIÓN

En este estudio, se desarrolló y evaluó un modelo de optimización de la semaforización que utiliza técnicas de IA e IoT. Los resultados obtenidos muestran que la arquitectura propuesta mejoraría significativamente el desempeño en la gestión del tráfico urbano mientras ofrece ventajas principalmente en términos de escalabilidad, robustez y flexibilidad en comparación con otros modelos documentados en la literatura.

La propuesta de usar una RNN permite mejorar la precisión en la predicción del flujo vehicular, los tiempos de semáforo se sincronizan de forma eficiente y hay una reducción en los tiempos de espera y congestión vehicular. Lo anterior es consistente con estudios previos que sugieren que los modelos de IA, y en particular las RNN, son altamente efectivos para manejar problemas de series temporales como los que se encuentran en la gestión del tráfico urbano.

La comparación con la literatura revela que los estudios publicados se centraron en la implementación de modelos basados en IA más simples o enfoques híbridos que combinan IA con técnicas convencionales. Sin embargo, estos enfoques a menudo carecían de la flexibilidad y escalabilidad necesarias para adaptarse a diferentes entornos urbanos o para integrarse fácilmente con nuevos dispositivos IoT.

La capacidad del sistema para integrarse con dispositivos IoT adicionales abre la posibilidad de futuras expansiones y mejoras, como la integración con sistemas de gestión de transporte público o la incorporación de datos meteorológicos para ajustar los tiempos de semáforo en función de las condiciones climáticas.

A pesar de los resultados positivos, este estudio presenta limitaciones en cuanto a la evaluación del modelo, pues se realizó de manera subjetiva a partir del criterio de los investigadores, lo que podría no ser el reflejo completo de los diferentes contextos de un entorno urbano real. Otra limitación es que, aunque el sistema es escalable, su implementación inicial puede requerir una inversión significativa en infraestructura IoT y en la formación de los colaboradores en mantener el sistema.

6. CONCLUSIÓN

El análisis de la literatura científica permitió identificar que las tecnologías de IA, particularmente las RNN, gestionan el tráfico urbano de forma eficiente jugando un papel

crucial en la movilidad urbana. Los avances recientes en la integración de IA con IoT han demostrado ser efectivos en la predicción y optimización de flujos vehiculares, superando a los métodos tradicionales tanto en precisión como en eficiencia. Este análisis subraya la necesidad de adoptar enfoques basados en IA avanzada para enfrentar los desafíos actuales de la movilidad urbana.

El diseño del modelo de arquitectura de información desarrollado en este estudio ha demostrado ser una solución escalable y flexible para la optimización de la semaforización inteligente. La arquitectura propuesta integra de manera efectiva dispositivos IoT con algoritmos de IA, lo que permite una gestión dinámica y en tiempo real del tráfico urbano. Este enfoque modular no solo facilita la adaptación a diferentes entornos urbanos, sino que también permite la incorporación de futuras innovaciones tecnológicas, posicionando al modelo como una solución robusta para la movilidad urbana del futuro.

La evaluación comparativa de la arquitectura propuesta en términos de multicriterios en contraste con las soluciones documentadas en la literatura, ha revelado la factibilidad del modelo, demostrando ventajas competitivas principalmente en términos de desempeño, escalabilidad, robustez y flexibilidad lo que reafirma la viabilidad y efectividad del modelo propuesto para su implementación en contextos urbanos diversos.

7. REFERENCIAS

- Abdullah, S. M., Periyasamy, M., Kamaludeen, N. A., Towfek, S. K., Marappan, R., Kidambi Raju, S., Alharbi, A. H., & Khafaga, D. S. (2023). Optimizing Traffic Flow in Smart Cities: Soft GRU-Based Recurrent Neural Networks for Enhanced Congestion Prediction Using Deep Learning. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 5949, 15(7), 5949. <https://doi.org/10.3390/SU15075949>
- Alam, T., Gupta, R., Nasurudeen Ahamed, N., Ullah, A., & Almaghthwi, A. (2024). Smart mobility adoption in sustainable smart cities to establish a growing ecosystem: Challenges and opportunities. *MRS Energy and Sustainability*, 1–13. <https://doi.org/10.1557/S43581-024-00092-4/METRICS>
- Alsheikhy, A., Said, Y., & Shawly, T. (2023). An Intelligent Adaptive Dynamic Algorithm for a Smart Traffic System. *Computer Systems Science and Engineering*, 46(1), 1109–1126. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.035135>
- Awan, N., Ali, A., Khan, F., Zakarya, M., Alturki, R., Kundi, M., Alshehri, M. D., & Haleem, M. (2021). Modeling Dynamic Spatio-Temporal Correlations for Urban Traffic Flows Prediction. *IEEE Access*, 9, 26502–26511. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056926>
- Balasubramanian, S. B., Balaji, P., Munshi, A., Almukadi, W., Prabhu, T. N., Venkatachalam, K., & Abouhawwash, M. (2023). Machine learning based IoT system for secure traffic management and accident detection in smart cities. *PeerJ Computer Science*, 9, 1–25. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.1259/SUPP-1>
- Barbosa, R., Ogobuchi, O. D., Joy, O. O., Saadi, M., Rosa, R. L., Otaibi, S. Al, & Rodríguez, D. Z. (2023). IoT based real-time traffic monitoring system using images sensors by sparse deep learning algorithm. *Computer Communications*, 210, 321–330. <https://doi.org/10.1016/J.COMCOM.2023.08.007>
- Bharadiya, J. (2023). Artificial intelligence in transportation systems a critical review. *American Journal of Computing and and Engineering*, 6(1), 35–45. <https://www.ajpojournals.org/journals/index.php/AJCE/article/download/1487/1610>
- Cirianni, F. M. M., Comi, A., & Quattrone, A. (2023). Mobility Control Centre and Artificial Intelligence for Sustainable Urban Districts. *Information* 2023, Vol. 14, Page 581, 14(10), 581. <https://doi.org/10.3390/INFO14100581>
- Damadam, S., Zourbakhsh, M., Javidan, R., Cities, A. F.-S., & 2022, undefined. (2022). An intelligent IoT based traffic light management system: deep reinforcement learning. *Smart Cities*, 5(4), 1293–1311. <https://doi.org/10.3390/smartcities5040066>
- De Oliveira, L. F. P., Manera, L. T., & Luz, P. D. G. Da. (2021). Development of a Smart Traffic Light Control System with Real-Time Monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3384–3393. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3022392>
- Dikshit, S., Atiq, A., Shahid, M., Dwivedi, V., & Thusu, A. (2023). The Use of Artificial Intelligence to Optimize the Routing of Vehicles and Reduce Traffic Congestion in Urban Areas. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 10, 1–13. <https://doi.org/10.4108/EW.4613>
- Gaikwad, V., Holkar, A., Hande, T., Lokhande, P., & Badade, V. (2023). Smart traffic light system using internet of things. *Data Science and Intelligent Computing Techniques*, 795–808. <https://doi.org/10.56155/978-81-955020-2-8-68>

- Howlader, S. M. N., Khanom, S., Hossain, Md. M., Sarker, S., Mohammad, N., & Sarker, M. M. (2024). Real-Time Traffic Control Using IoT Nodes Based on Traffic Density Information. *2024 3rd International Conference on Sentiment Analysis and Deep Learning (ICSADL)*, 618–624. <https://doi.org/10.1109/ICSADL61749.2024.00106>
- Joo, H., Ahmed, S. H., & Lim, Y. (2020). Traffic signal control for smart cities using reinforcement learning. *Computer Communications*, 154, 324–330. <https://doi.org/10.1016/J.COMCOM.2020.03.005>
- Jutury, D., Kumar, N., Sachan, A., Daultani, Y., & Dhakad, N. (2023). Adaptive neuro-fuzzy enabled multi-mode traffic light control system for urban transport network. *Applied Intelligence*, 53(6), 7132–7153. <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03827-3>
- Kulkarni, A. R., Kumar, N., & Ramachandra Rao, K. (2024). 100 Years of the Ubiquitous Traffic Lights: An All-Round Review. *IETE Technical Review*, 41(2), 212–225. <https://doi.org/10.1080/02564602.2023.2238664>
- Liu, C., & Ke, L. (2023). Cloud assisted Internet of things intelligent transportation system and the traffic control system in the smart city. *Journal of Control and Decision*, 10(2), 174–187. <https://doi.org/10.1080/23307706.2021.2024460>
- López-Chila, R., Llerena-Izquierdo, J., Sumba-Nacipucha, N., & Cueva-Estrada, J. (2024). Artificial Intelligence in Higher Education: An Analysis of Existing Bibliometrics. *Education Sciences*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/educsci14010047>
- Ly, Z., & Shang, W. (2023). Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems: A comprehensive review. *Green Technologies and Sustainability*, 1(1), 100002. <https://doi.org/10.1016/J.GRETS.2022.100002>
- Maureen, A., Omede, E., Edith, O., & Deborah, O. (2023). A Framework for Smart City Model Enabled by Internet of Things (IoT). *Article in International Journal of Computer Applications*, 185(6), 6. <https://doi.org/10.5120/ijca2023922685>
- Meduri, K., Meduri, K., Nadella, G. S., Gonaygunta, H., & Meduri, S. S. (2023). Developing a Fog Computing-based AI Framework for Real-time Traffic Management and Optimization. *International Journal of Sustainable Development in Computing Science*, 5(4), 1–24. <https://www.ijsdcs.com/index.php/ijsdcs/article/view/517>
- Moumen, I., Abouchabaka, J., & Rafalia, N. (2023). Enhancing urban mobility: integration of IoT road traffic data and artificial intelligence in smart city environment. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 32(2), 985–993. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v32.i2.pp985-993>
- Narmadha, S., & Vijayakumar, V. (2023). Spatio-Temporal vehicle traffic flow prediction using multivariate CNN and LSTM model. *Materials Today: Proceedings*, 81(2), 826–833. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.04.249>
- Nigam, N., Singh, D. P., & Choudhary, J. (2023). A Review of Different Components of the Intelligent Traffic Management System (ITMS). *Symmetry* 2023, Vol. 15, Page 583, 15(3), 583. <https://doi.org/10.3390/SYM15030583>
- Rui, J., & Othengrafen, F. (2023). Examining the Role of Innovative Streets in Enhancing Urban Mobility and Livability for Sustainable Urban Transition: A Review. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 5709, 15(7), 5709. <https://doi.org/10.3390/SU15075709>

- Salazar Guzmán, B. J. (2021). *Desarrollo de una aplicación bajo android para el control y monitoreo de unidades vehiculares en la empresa TCPLUMESAL SA.*
- Santos, O., Ribeiro, F., Metrólho, J., & Dionísio, R. (2023). Using Smart Traffic Lights to Reduce CO2 Emissions and Improve Traffic Flow at Intersections: Simulation of an Intersection in a Small Portuguese City. *Applied System Innovation 2024, Vol. 7, Page 3, 7(1), 3.* <https://doi.org/10.3390/ASI7010003>
- Sharma, A., & Atassi, R. (2023). Intelligent Traffic Management using IoT and Machine Learning. *Journal of Intelligent Systems and Internet of Things (JISIoT), 08(02), 8–19.* <https://doi.org/10.54216/JISIoT.080201>
- Su, Z. C., Chow, A. H. F., Fang, C. L., Liang, E. M., & Zhong, R. X. (2023). Hierarchical control for stochastic network traffic with reinforcement learning. *Transportation Research Part B: Methodological, 167, 196–216.* <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2022.12.001>
- Taiwo, A. A., Nzeanorue, C. C., Ayanwunmi, S. O., Olanrewaju, S. A., Ajiboye, Q. O., Idowu, A. A., Hakeem, S., Nzeanorue, C. G., Agba, J. C., Dayo, F. P., Cornelius Enabulele, E., Stephen, V. I., Oyesanya, A., Ogbe, M. I., & Olusola, R. A. (2024). Intelligent transportation system leveraging Internet of Things (IoT) Technology for optimised traffic flow and smart urban mobility management. *Researchgate.Net.* <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.22.3.1886>
- Younes, M. B., Boukerche, A., & De Rango, F. (2023). SmartLight: A smart efficient traffic light scheduling algorithm for green road intersections. *Ad Hoc Networks, 140, 103061.* <https://doi.org/10.1016/J.ADHOC.2022.103061>
- Zhang, X., Wen, S., Yan, L., Feng, J., & Xia, Y. (2024). A Hybrid-Convolution Spatial–Temporal Recurrent Network For Traffic Flow Prediction. *The Computer Journal, 67(1), 236–252.* <https://doi.org/10.1093/COMJNL/BXAC171>