

Arquitectura distribuida modular para el control inteligente del tráfico

Pedro Uribe-Chavert^a, Juan-Luis Posadas-Yagüe^b, Patricia Balbastre^b, Jose-Luis Poza-Lujan^{b, *}

^aEscuela de Doctorado, Universitat Politècnica de València. Edificio 7B y 7E, Camino de vera, sn, 46022 Valencia, España.

^bInstituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València. Edificio 8G, Camino de vera, sn, 46022 Valencia, España.

To cite this article: Uribe-Chavert, P., Posadas-Yagüe, J.-L., Balbastre, P., Poza-Lujan, J.-L. 2023. Modular distributed architecture for intelligent traffic control. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 20, 56-67. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17068>

Resumen

La gestión de la movilidad de personas y vehículos es un aspecto de continuo estudio debido a la relevancia que tiene en la contribución a la polución. El control de los semáforos determina las colas que en los cruces se pueden formar. Habitualmente este control no está adaptado al tráfico existente en un momento concreto, dado que la adaptación implica conocer los peatones y vehículos que se encuentran circulando en cada momento. Para resolver este problema, en el artículo se propone el uso de unos dispositivos inteligentes modulares que permiten detectar los vehículos y cambiar los tiempos de acceso al cruce dependiendo de las circunstancias. Para validar el sistema se ha realizado una simulación generando cargas en MatLab y simulando el control con Simulink. Se ha simulado un ciclo de semáforo con tiempos fijos y se ha comparado con ciclos de tiempos variables en función de la carga de peatones y de vehículos. En el artículo se proponen los indicadores Op y Sat como método de medición de la optimización del algoritmo de control sobre el estado del cruce. Por medio de dichos indicadores se ha comprobado que en el mejor de los casos es posible optimizar en un 50 % el tiempo de espera de forma casi independiente de la carga de tráfico.

Palabras clave: Sistemas distribuidos, Control inteligente, Control de tráfico, Sistemas urbanos.

Modular distributed architecture for intelligent traffic control

Abstract

The management of people and vehicles mobility is an aspect of continuous study due to its contribution to pollution. Traffic light control determines the queues that can form at crossroads. Usually, this control is not adapted to the existing traffic at a specific time since the adaptation implies knowing the pedestrians and vehicles circulating at all times. This article proposes using modular intelligent devices that allow vehicles to be detected and access times to the intersection to be changed depending on the circumstances. A simulation has been carried out generating loads in MatLab and simulating the control with Simulink. A traffic light cycle with fixed times has been simulated and compared with cycles with varying service times depending on a load of pedestrians and vehicles. In the article, the Op and Sat indicators are proposed to measure the optimisation of the control algorithm on the crossing state. Using these indicators, it has been shown that it is possible to optimise the waiting time by 50 %, almost independently of the traffic load in the best case.

Keywords: Distributed systems, Intelligent control, Traffic control, Urban systems.

1. Introducción

El Objetivo 11 de Desarrollo Sostenible se centra en asegurar el desarrollo tanto de entornos como de ciudades sosteni-

bles (Sachs, 2012). Un entorno inteligente sostenible significa emplear la inteligencia para lograr que el consumo de dicho entorno sea compatible con los recursos disponibles (Griggs et al., 2013).. Entre los servicios necesarios en las ciudades, la gestión

*Autor para correspondencia: jopolu@upv.es

de la movilidad de personas y de vehículos cobra especial importancia debido a ser un servicio necesario para la actividad diaria. Un tráfico optimizado implica un menor consumo de combustible, en el caso de los vehículos, y consiguientemente una menor emisión de gases de efecto invernadero (Banister, 2011). La optimización del tráfico de vehículos se logra cuando todos los vehículos esperan el mínimo tiempo posible en un semáforo. Para minimizar el tiempo de espera se debe reducir la longitud de la cola de vehículos formada cuando el paso no está permitido. Por lo tanto, el control del tiempo de paso de un semáforo es un compromiso entre vaciar de vehículos de la cola propia y no vaciar vehículos, generando cola, para que otros vehículos accedan al cruce desde otras direcciones. Sin embargo ante cambios en el flujo de vehículos, tanto en el sentido favorecido, como en el de los perjudicados puede generar problemas de esperas innecesarias consecuencia de los semáforos en rojo sin que en el cruce hayan vehículos para acceder desde los semáforos en verde (Chen and Chang, 2016). Estos problemas pueden solucionarse si se conocen las longitudes de colas de vehículos que desean acceder a un cruce, y se permite variar el tiempo en rojo de los semáforos que dan acceso a los cruces.

El objetivo del trabajo presentado en el artículo es disminuir los tiempos de espera de los vehículos y peatones en un semáforo para disminuir emisiones contaminantes. La disminución de los tiempos de espera se obtiene variando los tiempos de servicio del semáforo en función del tamaño de la cola de vehículos.

La propuesta principal del artículo es un sistema distribuido de control inteligente basado en una arquitectura de dispositivos modulares con comunicación en el ámbito del Edge, Fog y Cloud. El artículo se organiza de la siguiente forma. La siguiente sección revisa los modelos actuales de sistemas de gestión inteligente del tráfico en entornos urbanos. En la sección 3 se presenta la arquitectura propuesta describiendo sus elementos y el paradigma de comunicación empleado. A continuación en la sección 4 se desarrolla el caso de estudio consistente en un cruce de tráfico de vehículos con peatones donde la arquitectura propuesta permite aplicar diferentes algoritmos de control para mejorar los tiempos empleados por los vehículos y peatones en atravesar el cruce. En la sección 5 se presentan los resultados obtenidos realizando diferentes simulaciones que miden la mejora obtenida con el uso de la arquitectura propuesta. Finalmente se presentan las conclusiones y vías de investigación en mejoras que la arquitectura permite.

2. Estado actual

El control inteligente del tráfico de vehículos y personas está ligado a la implementación física del que se disponga, es decir, de qué sensores, controladores y actuadores estén disponibles y dónde estén ubicados. En lo que respecta a sensores disponibles estos pueden estar tanto en las vías como en los vehículos. En lo que respecta a las vías, estas pueden disponer de sensores para detectar vehículos o viandantes. Estos sensores están conectados a los controladores que, a su vez, suelen estar interconectados empleando cualquier modelo de sistema de control distribuido o DCS, por las siglas en inglés de Distributed Control System. En los casos más avanzados se puede detectar velocidades, tamaños e incluso tipos de vehículos

o comportamiento de grupos de viandantes. En lo que respecta a vehículos, estos pueden disponer de sensores de posición, velocidad y comunicar entre ellos todos los datos para auto gestionar el tráfico. Este aspecto es el tratado ampliamente en las redes vehiculares, o VANET por las siglas en inglés de Vehicular Ad-hoc NETWORKS.

En lo que respecta a actuadores, los semáforos en el caso que nos ocupa, generalmente están disponibles en las vías, aunque también se da el caso de poder regular directamente en los vehículos. El primer caso, semáforos en vías, se corresponde con la situación actual de control de tráfico y es conocida como RTL, de las siglas en inglés de Real Traffic Lights. En el segundo caso, control del tráfico en el vehículo, se trata de los sistemas conocidos como semáforos virtuales o VTL por las siglas en inglés de Virtual Traffic Lights. La infraestructura disponible determinará la estrategia de control de tráfico a implementar. En el caso del estudio presentado en este artículo se trata de un sistema de control de tráfico clásico (RTL) implementado en un sistema de control distribuido (DCS) entre los elementos de la vía, o I2I, de las siglas en inglés de Infrastructure to Infrastructure.

La aplicación de sistemas inteligentes al tráfico de vehículos, también conocido como TMS, por las siglas en inglés de Traffic Management System, y personas en las ciudades puede tener diferentes aspectos en los que aplicarse. Entre los aspectos más habituales de estos sistemas están la evitación de los atascos, la optimización del tiempo de tránsito, la resolución de atascos ya formados para estabilizar el tráfico o el servicio a vehículos en emergencia (De Souza et al., 2017). Este artículo presenta la optimización del tiempo de tránsito mediante el uso de la arquitectura propuesta, para lo cual es especialmente apropiado evitar la congestión del tráfico. Para prevenir la congestión es necesario realizar algún tipo de planificación de la gestión del tráfico. La planificación implica estimar el tráfico en un plazo de tiempo futuro, generalmente corto para poder reaccionar. La estimación del tráfico puede estar basada en datos históricos (Burguillo-Rial et al., 2012) o en datos sensoriales, o en una combinación de ambas fuentes de datos. Con los datos de que dispone el sistema, se aplica una política de control. Esta política es clave, puesto que es la responsable de gestionar el movimiento de vehículos y usuarios. La tendencia, por tanto, es la auto organización de la gestión del tráfico (Lämmer and Helbing, 2008) basándose en alguna de las políticas de control existentes.

La comparación de los diferentes algoritmos de optimización puede realizarse mediante simulaciones cambiando los tiempos de duración de los semáforos y calculando los tiempos de cola (Wen, 2008). Asimismo, también es conveniente medir el movimiento de los vehículos y peatones ante los cambios en los tiempos de los semáforos. Algunos de los parámetros de movimiento medidos se basan en la velocidad, distancia entre vehículos, tiempos de espera, aceleración y frenado, etc. En función de estas variables se obtienen los tiempos de conducción y de detención en caso de congestión del tráfico (Jang and Lin, 2018). En general, la mayoría de algoritmos buscan reducir el tiempo de congestión, por lo que los tiempos de espera en un semáforo son considerados entre los parámetros más importantes para medir la optimización proporcionada por un sistema de control (Al-qutwani and Wang, 2019).

En lo que al modelo de implementación software del modelo de control, existen una gran cantidad de sistemas de control inteligente de tráfico basados en diferentes paradigmas como redes neuronales (Liang et al., 2018), lógica difusa (Hartanti et al., 2019) o sistemas basados en agentes (Płaczek, 2014).

Respecto a las arquitecturas empleadas, la mayoría de los trabajos están basados en una arquitectura centralizada. La arquitectura centralizada hace que todo el control pase por un supervisor principal conectado a distintos nodos centrales a su vez conectados con diferentes dispositivos. El nodo supervisor puede ser un sistema de control y gestión de nodos (Mahoor et al., 2017) o también puede ser un sistema que se conecta con la nube como en (Jang and Lin, 2018).

Cabe destacar que el sistema centralizado controlado por la nube se conecta mediante cloud con el nodo central. A su vez, estos nodos centrales se conectan con otros nodos centrales en lo que es el fog. Y por último, cada nodo se conecta con sus propios dispositivos (por ejemplo semáforos) mediante el edge.

Por otro lado, las arquitecturas descentralizadas o distribuidas se basan básicamente en que cada nodo puede decidir por sí mismo y comunicar tanto sus acciones como sus datos al resto de los nodos. El artículo (Navarro et al., 2018) se basa en una arquitectura distribuida de los distintos sensores conectados a un mismo enrutador.

Un ejemplo de arquitectura descentralizada usando, en este caso WSN (Wireless Sensor Network) y agentes, se presenta en el artículo (Tubaishat et al., 2007)

La tendencia es extender los sensores y actuadores a los vehículos, lo cual implica que las arquitecturas deben ser capaces de dar soporte a los sistemas VTLs basados en VANETs. Las arquitecturas deben permitir que, por ejemplo, un dato de un sensor pueda estar disponible para un elemento muy lejano en espacio, por ejemplo en el otro lado de la ciudad, y en el tiempo, dato histórico para prever una incidencia. Por tanto, para cubrir aspectos como un control descentralizado y desacoplado los elementos deberán ser capaces de poder comunicarse tanto con los cercanos como aquellos que estén en otros lugares de la ciudad.

A partir de las premisas presentadas anteriormente, en la siguiente sección se pasará a presentar la arquitectura que dará soporte al sistema de control inteligente de tráfico.

3. Propuesta de arquitectura

Los elementos que componen la arquitectura se presentan desde el nivel más cercano al Edge (módulos de control) hasta los elementos que agrupan dichos módulos (Dispositivos Inteligentes).

3.1. Módulos de control

En la arquitectura presentada, el elemento más cercano al entorno real de funcionamiento es el módulo de control (Simarro Fernández et al., 2016). Este módulo se define como el elemento que tiene tanto una conexión directa con los sensores y actuadores como una capacidad mínima de procesamiento que facilita la inteligencia y de comunicación incluso con elementos distantes. Los componentes de un módulo de control se muestran en la Figura 1. Como elemento básico de la arquitectura, un módulo de control puede disponer de un solo sensor,

por ejemplo en (Hernández Bel, 2020), entre otros, se presenta un módulo de control con un sensor de ultrasonidos que, a partir del procesamiento proporciona una aproximación de la velocidad y longitud de un vehículo. Un elemento de control puede estar integrado solo por actuadores, por ejemplo en (Uribe Chavert, 2020) se presenta un módulo de control con tres luces LED que actúan a modo de semáforo. En todos los casos el módulo de control se distingue no por el sensor o actuador concreto, sino por la funcionalidad que proporciona, desde el punto de vista de un servicio.

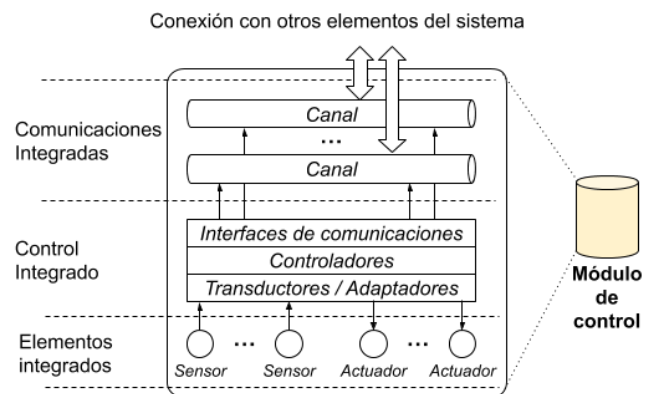


Figura 1: Composición de módulo de control con los sensores y actuadores interconectados internamente y con el exterior. El controlador proporciona un mínimo de inteligencia embebida que podría hacer que elemento disponga de una mínima autonomía.

El módulo de control dispone de los transductores y adaptadores para los sensores y actuadores que contenga. El componente de procesamiento es responsable de la parte inteligente a partir de la cual es posible realizar algunas acciones autónomas. La información de los sensores es ofrecida a través de uno o más canales de comunicación. Así mismo es posible recibir señales para los actuadores a través de alguno de los canales de comunicación disponibles.

3.2. Dispositivos inteligentes

Para disponer de elementos con un cierto nivel de inteligencia y que compartan el mismo área de control, se dispone del dispositivo inteligente. Un dispositivo inteligente se compone de un conjunto de módulos de control interconectados entre ellos. Dado que los módulos de control disponen de una mínima capacidad de procesamiento, el conjunto de módulos de control permite aportar cierto grado de inteligencia al sistema (Figura 2). Un dispositivo inteligente, por tanto, es un dispositivo que, por medio de servicios, proporciona información y capacidad de actuación en un rango de operación. Cuando un dispositivo inteligente ofrece su operatividad, es decir la de los módulos de control que lo componen, en forma de servicios, se habla de recursos inteligentes, ampliamente tratados en (Poza-Lujan et al., 2020). El recurso inteligente proporciona unos servicios que se forman combinando las funcionalidades ofrecidas por los módulos de control que lo componen. El hecho de que los canales de comunicación sean comunes tanto para comunicar los módulos de control entre sí, como para comunicar los dispositivos inteligentes, hace que los datos de un módulo de control

estén disponibles más allá del recurso inteligente al que pertenece. Por ejemplo, un módulo con un sensor de detección de vehículos, avisa a un módulo de iluminación para que facilite el tránsito. La información de la detección del vehículo también se puede enviar a otros dispositivos inteligentes del área de control, por ejemplo un semáforo para que tenga en cuenta el vehículo y favorezca el paso del mismo. Asimismo, un módulo de control de un recurso inteligente puede enviar mensajes a servidores ubicados en la nube, si comparten el canal.

3.3. De las áreas de control a la nube

Los rangos de operación de diversos dispositivos inteligentes pueden solaparse debido a que actúan en el mismo espacio. Por ejemplo, varias farolas pueden estar iluminando un cruce que, a su vez, está regulado por varios semáforos. Cuando varios dispositivos inteligentes tienen rangos de operación compartidos, pueden agruparse en un área de control. El área de control implica que los dispositivos inteligentes están fuertemente acoplados en datos de interés y, consecuentemente, en las conexiones entre ellos. En la Figura 2 se muestran las áreas de control ubicadas en la zona del Fog, dado que los dispositivos que componen dichas áreas de control son la conexión del sistema con el entorno real, o el Edge como se señalaba en la revisión del entorno.

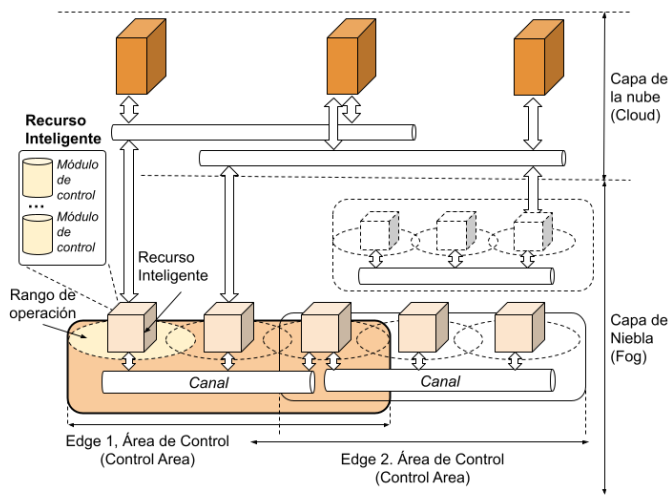


Figura 2: Arquitectura completa compuesta por los dispositivos inteligentes conectados fuertemente al compartir misión. En el ámbito de los recursos inteligentes, se define el rango de operación. Este rango de operación es dependiente de los sensores y actuadores de cada módulo de control. El área de control se define como el conjunto de rangos de operación de los dispositivos inteligentes que comparten misiones.

Un aspecto que distingue a la arquitectura propuesta de las arquitecturas jerárquicas es que un mismo recurso inteligente puede actuar en diversas áreas de control simultáneamente. Asimismo, los dispositivos inteligentes pueden conectar con la nube directamente, o a través de otros dispositivos inteligentes.

4. Caso de estudio

4.1. Modelado del entorno

El caso de estudio consiste en aplicar la arquitectura de control propuesta en un entorno urbano basado en un cruce de

calle de vehículos con peatones. El objetivo del caso de estudio es comprobar la hipótesis de mejora que se obtiene en un control basado en la comunicación de la información entre los dispositivos o dispositivos inteligentes frente a un control automático donde no hay comunicación. Los entornos urbanos tienen una variabilidad muy grande de flujo de vehículos y transeúntes, lo que permite evaluar con diferentes cargas la optimización del control de tráfico. El escenario escogido consiste en una única calle de vehículos de un solo sentido con paso de peatones en ambos sentidos. La simplicidad del mismo permitirá observar los cambios en las distintas políticas de control aplicadas y escalar extrapolando los resultados a otros escenarios más complejos (Beaver et al., 2020). La Figura 3 muestra el escenario y los elementos de la arquitectura que lo componen. Los peatones circularán del punto *a* al punto *b* y viceversa, mientras que los vehículos circularán desde el punto *A* al punto *B*.

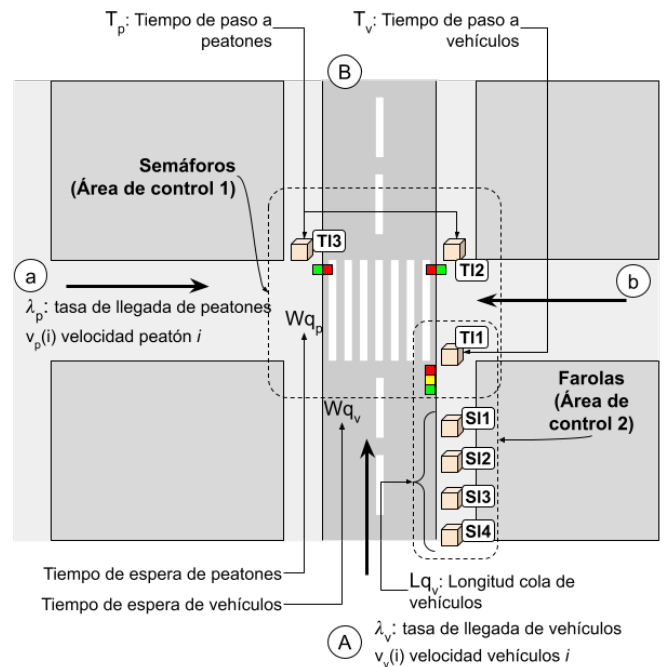
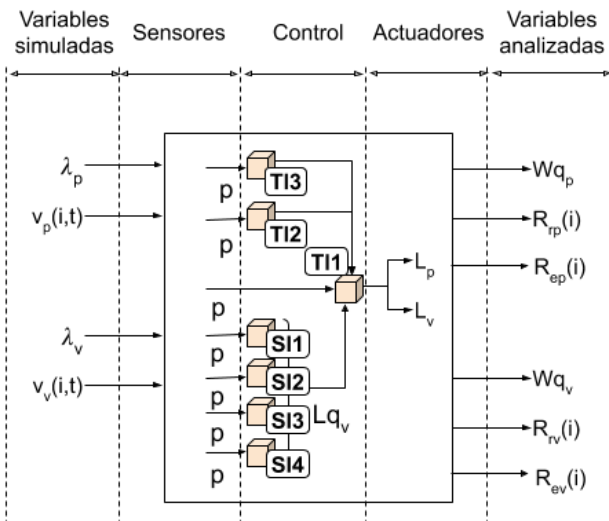


Figura 3: Escenario del caso de estudio: cruce de calle peatonal con una vía para vehículos. Los semáforos que controlan vehículos y peatones son los dispositivos T11, T12, y T13. Al tener una misión común (regular el cruce) estos tres dispositivos forman un área de control. En este escenario se han incluido dispositivos de detección de vehículos instalados en farolas (SI1..SI4) que proporcionan la velocidad de los vehículos, al tener la misma misión (detección de velocidad) estos dispositivos inteligentes conforman un área de control.

Para comprobar el efecto de la carga de tráfico en el cruce, se variará la tasas promedio de acceso a las calles, tanto de los vehículos (λ_v) como de los peatones (λ_p). Además de la cantidad de tráfico, también se considera la velocidad para cada vehículo *i* en cada instante *t* ($v_v(i, t)$) o peatón *i* en cada instante *t* ($v_p(i, t)$). El tiempo de paso esperado de cada vehículo $R_{ev}(i)$ y de cada peatón $R_{ep}(i)$, se obtiene a partir de la velocidad en la que entra en su correspondiente calle suponiendo que no se detendrá en el cruce. Mientras que el tiempo de paso real ($R_{rp}(i)$ para peatones y $R_{rv}(i)$ para vehículos) dependerá de si se detiene o no en el cruce y, por tanto, del algoritmo de control empleado. Se supone que un vehículo o peatón no irá más

rápido de su velocidad de entrada en la calle, lo que supone que $R_{ep}(i) \leq R_{rp}(i)$ para peatones y $R_{ev}(i) \leq R_{rv}(i)$ para vehículos. Los parámetros que los dispositivos inteligentes considerarán como entradas en los algoritmos de control serán: los tiempos de espera de vehículos $Wq_v(i)$ y peatones $Wq_p(i)$ y las longitudes de cola de vehículos en espera Lq_v y peatones en espera Lq_p . Estos algoritmos actuarán realizando los cambios de color (rojo, amarillo y verde) tanto del semáforo de vehículos (L_v) como de peatones (L_p) determinando así los tiempos disponibles para pasar los peatones (T_p) y los vehículos (T_v). La Figura 4 muestra el resumen de las variables utilizadas para las simulación, así como las variables analizadas por los diferentes algoritmos de control que, dinámicamente, podrán adaptarse a las circunstancias del entorno.



λ_p	Tasa de llegada de peatones
$v_p(i,t)$	Velocidad de llegada del peatón i en el tiempo t
λ_v	Tasa de llegada de vehículos
$v_v(i,t)$	Velocidad de llegada del vehículo i en el tiempo t
p	Detector de presencia
Lq_v	Longitud de cola de vehículos
L_p	Luz semáforo de peatones: stop/go/clear
L_v	Luz semáforo de vehículos abierto: stop/go/clear
$Wq_p(i)$	Tiempo total de espera en cola del peatón i
$R_{rp}(i)$	Tiempo total de paso real del peatón i
$R_{ep}(i)$	Tiempo total de paso esperado del peatón i
$Wq_v(i)$	Tiempo total de espera en cola del vehículo i
$R_{rv}(i)$	Tiempo total de paso real del vehículo i
$R_{ev}(i)$	Tiempo total de paso esperado del vehículo i

Figura 4: Escenario.

El algoritmo de control más eficiente será aquel que consiga menores tiempos de paso tanto para la mayor parte de los vehículos como para de los peatones.

Esta eficiencia está relacionada con el tiempo de espera y este tiempo, a su vez, con las longitudes de las colas. El control actúa directamente regulando los semáforos mediante el ajuste de la duración de sus tres estados que se repiten secuencial y cíclicamente: (1) 'estado verde' que indica que se puede transitar; (2) 'estado ámbar' (para vehículos) o 'estado verde intermitente' (para peatones) que indica el cambio en breve al 'estado rojo'; (3) 'estado rojo' que indica que no se puede transitar. El ciclo de un semáforo es la suma de los tiempos de sus tres estados. Asumiremos que cada ciclo comienza con el 'estado verde'. La eficiencia del algoritmo de control utilizado se calculará obteniendo la variación existente entre las longitudes de cola en cada instante mediante el parámetro Op calculado con la siguiente ecuación 1:

$$Op = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Lq_i - \bar{L}q)^2} \quad (1)$$

Siendo n : el número total de ciclos, Lq_i la longitud de cola al comienzo del ciclo i , y $\bar{L}q$ el promedio de la longitud de cola al comienzo de cada ciclo. Cuanto mayor sea Op , mayor será la diferencia entre $\bar{L}q$ y Lq_i y menor rendimiento se obtiene. Consecuentemente, un valor cercano a cero implica que las colas han sido constantes durante toda la actuación del algoritmo de control. Esto implica que el tiempo de espera es similar para todos los vehículos por lo que se optimiza la distribución del tráfico, evitando que la cola saturate y se propicie la creación de atascos. Si el tamaño de cola al comienzo de cada 'estado verde' es constante implica que la cola no se incrementa en cada ciclo y por lo tanto el tráfico es fluido. Por otro lado, la saturación Sat (ecuación 2) es el porcentaje de veces en el que la cola acaba con al menos un vehículo o peatón sin llegar a cruzar, debido a que la cola generada no ha podido vaciarse durante el 'estado verde'.

$$Sat = 1 - \frac{\bar{L}q_{end.red} - \bar{L}q_{start.red}}{\bar{L}q_{end.red}} \quad (2)$$

Siendo, $\bar{L}q_{end.red} - \bar{L}q_{start.red}$ el incremento del promedio de la longitud de cola durante el 'estado rojo', $\bar{L}q_{start.red}$ el promedio de la longitud de cola al comienzo del 'estado rojo', y $\bar{L}q_{end.red}$ el promedio de la longitud de cola al final del 'estado rojo' que coincide con el promedio de la longitud de cola al comienzo del siguiente ciclo ($\bar{L}q$). El semáforo no estará saturado si la longitud de cola es cero al comienzo del 'estado rojo', es decir, durante el 'estado verde' han podido cruzar todos los vehículos o peatones de la cola. En el caso de que la cola fuera nula tanto al comienzo como al final del 'estado rojo', el sistema tendría que tratarlo de diferente manera siendo ideal que se mantuviera el 'estado rojo' hasta que se dispusiese de una cola no nula. Cuando la longitud de cola al comienzo del 'estado rojo' comienza a ser no nula, significa que el semáforo empieza a saturarse pues durante el 'estado verde' no han podido cruzar todos los vehículos o peatones de la cola. Lógicamente, cuanto mayor sea la tasa de entrada, más posibilidad de saturación. La saturación (Sat) medirá si el incremento de la cola producido durante el 'estado rojo' es absorbido o no durante el 'estado verde' mientras que la eficiencia (Op) medirá si dicho incremento es o no constante. El algoritmo de control óptimo ajustará dinámicamente la duración de los estados de los semáforos para que no se saturen,

consiguiendo así que el tiempo máximo de espera de cualquier vehículo o peatón no supere el tiempo del 'estado rojo', e intentará mantener unas colas constantes de manera que dicho tiempo máximo de espera sea el menor posible.

4.2. Implementación

Como ya se ha descrito, este cruce tiene un semáforo de vehículos y dos de peatones, uno a cada lado del paso correspondiente. Para implementar el sistema basándose en la arquitectura presentada, se dispondrá de un recurso inteligente por dispositivo. Los dispositivos modulares se basan en sensores de bajo coste, presentados en (Uribe Chavert, 2020).

La aplicación de esta arquitectura modular en los semáforos implica unas ciertas ventajas. Una de ellas es que, ante posibles fallos en el sistema, es mucho más sencillo y barato el cambio. La modularidad del sistema es una gran ventaja. Esto es debido a que se pueden añadir y eliminar los sensores y actuadores dependiendo de las necesidades del momento sin necesidad de aumentar la programación. No es necesario el uso de un sistema centralizado colocado cerca del control debido a que, gracias a que cada sistema se controla por si solo, con un pequeño control en cada semáforo es suficiente. Se dispondrá de semáforos de peatones para cruzar en cualquiera de los dos sentidos ($S_{p_{ab}}$ y $S_{p_{ba}}$) aunque el control de ambos será el mismo. También se tendrá un dispositivo para el control de semáforos de vehículos $S_{v_{AB}}$. Para la detección de vehículos y estimación de las colas existen diferentes alternativas. Habitualmente se emplean sensores de masas metálicas situados fijos en un punto de la calle a partir del cual estimar la cola de vehículos (Liu et al., 2009). Este método implica disponer de una estimación que precisa el uso de un sensor fijo instalado en el propio asfalto. Otros métodos usan las tecnologías emergentes de conexión entre vehículos para estimar las colas (Tiaprasert et al., 2015). En este caso, se precisa que un buen volumen de vehículos estén conectados para poder estimar dicha longitud. La aparición de las arquitecturas de IoT conectadas a la nube, permiten realizar estimaciones muy valiosas combinando tanto sensores fijos con la información proporcionada por las redes vehiculares (Gao et al., 2020). La arquitectura presentada intenta distribuir al máximo la inteligencia sin necesidad de la nube. Esto hace que en el caso del sistema presentado, para conocer la longitud de la cola de vehículos se dispondrá de una serie de dispositivos de detección de vehículos a lo largo de la calle en sentido de los puntos A a B. Estos dispositivos están basados en el trabajo de (Poza-Lujan et al., 2021) donde se emplean sensores de ultrasonidos de bajo coste para la detección de un vehículo y estimación tanto de la longitud como la velocidad del mismo. Este tipo de dispositivo se ha escogido debido a que es de coste bajo, modular y están emplazados en dispositivos del área de control común en el Edge.

4.3. Algoritmos de control

Un cruce puede considerarse un recurso al que intentan acceder usuarios desde dos vías diferentes. Los tipos de usuarios que intentan acceder son también diferentes, aunque para el caso del control, basta con conocer la frecuencia de acceso y velocidades concretas de cada usuario. En este caso, se ha considerado el tipo de usuario peatón y vehículo para representar usuarios de poco tamaño, individuales a velocidades reducidas

(peatones) y usuarios de mayor tamaño a velocidades más elevadas (vehículos). En primer lugar se analizarán los tiempos con los que trabajarán los algoritmos y a continuación se describirán los algoritmos empleados.

4.3.1. Tiempos a controlar

El control del cruce, considerado como un recurso al que acceden los usuarios antes mencionados, implica diferentes tiempos, o fases. La Figura 5 muestra dichos tiempos. Principalmente cada vía tiene un tiempo en el que se puede pasar ($T_{p_{go}}$, para el caso de peatones y $T_{v_{go}}$ para el caso de los vehículos) y otro en el que el paso no está permitido ($T_{p_{stop}}$, para el caso de peatones y $T_{v_{stop}}$ para el caso de los vehículos). La secuencia de la fase de *stop* y la fase de *go* es lo que se conoce como ciclo del semáforo.

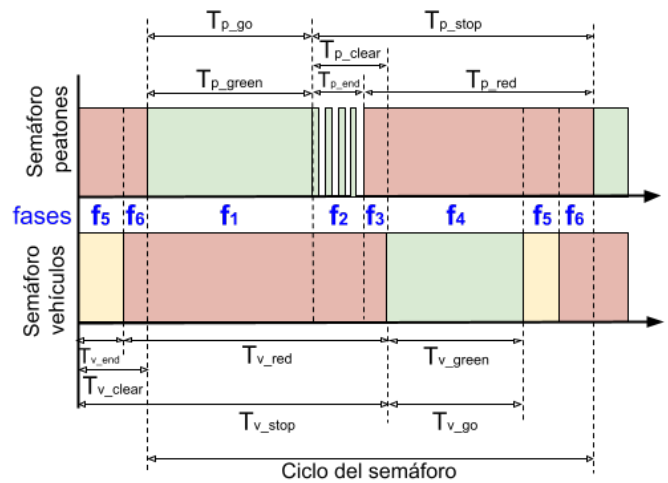


Figura 5: Tiempos involucrados en los ciclos de semáforos. Estos tiempos son sobre los que los módulos de control correspondientes a los semáforos actuarán dependiendo del algoritmo de control implementado.

El tiempo de paso, coincide con el tiempo en que las luces de paso permanecen activas. Sin embargo, el tiempo de stop incluye un tiempo inicial, conocido como fase de despeje T_{clear} , en el que el tráfico está detenido en ambos sentidos. Este tiempo de despeje implica un tiempo de advertencia T_{end} a los usuarios, verde intermitente para peatones, o luz ámbar para los vehículos, y un tiempo de cortesía, que no siempre se emplea, en el que coinciden las luces rojas de ambas calles. Lo que siempre se cumple es que $T_{clear} \geq T_{end}$. Estos tiempos, normalmente también son fijos y no tienen en consideración si la misión de las luces es necesaria, por ejemplo si no hay peatones o vehículos en el cruce. En una implementación básica, estos tiempos están programados y constituyen un ciclo de duración constante. Sin embargo, la posibilidad de poder variar dinámicamente los tiempos de paso T_{go} y de detención T_{stop} , permitirá optimizar los tiempos de tránsito tanto de peatones, como de vehículos. Para la optimización, se deberá contar con los datos provenientes de los sensores disponibles. A partir de la información obtenida de dichos datos, se tomarán decisiones relacionadas con las duraciones de tiempos de cada fase. Estas duraciones vienen determinadas por diferentes datos, lo que conformarán las diferentes políticas de control. Tal como se muestra en la Figura 3, se tiene información acerca de la

existencia de peatones y vehículos en espera de paso. Además, en el caso de los vehículos, también se tiene la información de la longitud de la cola de espera. Las políticas de control actúan en función de la existencia de peatones, o vehículos esperando, el paso. Además, se deberán considerar unas restricciones de prioridad y tiempo. La restricción de prioridad se aplica para que en igualdad de condiciones si peatones o vehículos deben pasar, quienes serán los que irán primero. La restricción temporal se aplica cuando, a pesar de la prioridad, se debe dar servicio a peatones o vehículos, evitando que un tipo de usuario acapare el cruce. A continuación se detallan los algoritmos de control implementados a partir de las consideraciones previas.

4.3.2. Algoritmo de control basado en tiempos fijos

El control de tiempos fijos implica que todos los tiempos mostrados en la Figura 5 están prefijados. Este control no precisa de datos de sensores ya que únicamente emplea el tiempo como elemento de cambio entre fases del ciclo del semáforo. Consecuentemente, es un control sencillo en el que el dispositivo de control solo debe llevar el conteo de tiempos para cambiar de fase y accionar las luces adecuadamente tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Tabla de estados del semáforo con control de tiempos fijos.

Fase actual	Lp	Lv	t	Fase Siguiete
1	green	red	Tp_{green}	2
2	end	red	Tp_{end}	3
3	red	red	$Tp_{court.}$	4
4	red	green	Tv_{green}	5
5	red	end	Tv_{end}	6
6	red	red	$Tv_{court.}$	1

La configuración de tiempos sólo es necesario realizarse una vez. Solamente es necesaria una sincronización de relojes, por lo que la comunicación entre dispositivos es mínima. Evidentemente, este tipo de control solo es adecuado cuando se tienen tasas de llegada de peatones (λ_p) y de vehículos (λ_v) constantes, y se ha logrado sintonizar adecuadamente los tiempos a dichas tasas. Sin embargo, dichas tasas varían a lo largo de un día, además de ser dependientes del día de la semana o del año. Actualmente, algunos sistemas de control hacen una adaptación de los tiempos de las fases, y consecuentemente de los ciclos, teniendo en cuenta la hora del día y la fecha. Sin embargo, esta adaptación está basada en observaciones históricas del tráfico o directamente en una estimación del mismo.

4.3.3. Algoritmo de control basado en tiempos variables

El objetivo es adecuar dinámicamente los tiempos de las fases a las variaciones de las tasas de llegada de peatones (λ_p) y de vehículos (λ_v) teniendo en cuenta las restricciones de prioridad y temporales establecidas. Todo ello sin necesidad de disponer de un control centralizado. La mayor fluidez de tránsito en un semáforo se obtiene cuando el semáforo está siempre en verde pero, lógicamente, debido a esto aumentará la cola del semáforo que está en rojo. Por ello es necesario establecer un equilibrio entre las prioridades para el flujo de tránsito. Se necesitará un tiempo mínimo en el que el semáforo estará en verde que permita vaciar la posible cola generada y un tiempo máximo en el

que el semáforo puede estar en rojo en el cual el usuario tendrá que estar esperando a que el semáforo cambie de estado. La longitud de cola se usará posteriormente para indicar el número máximo de usuarios que pueden llegar a esperar en un semáforo para evitar que se sature.

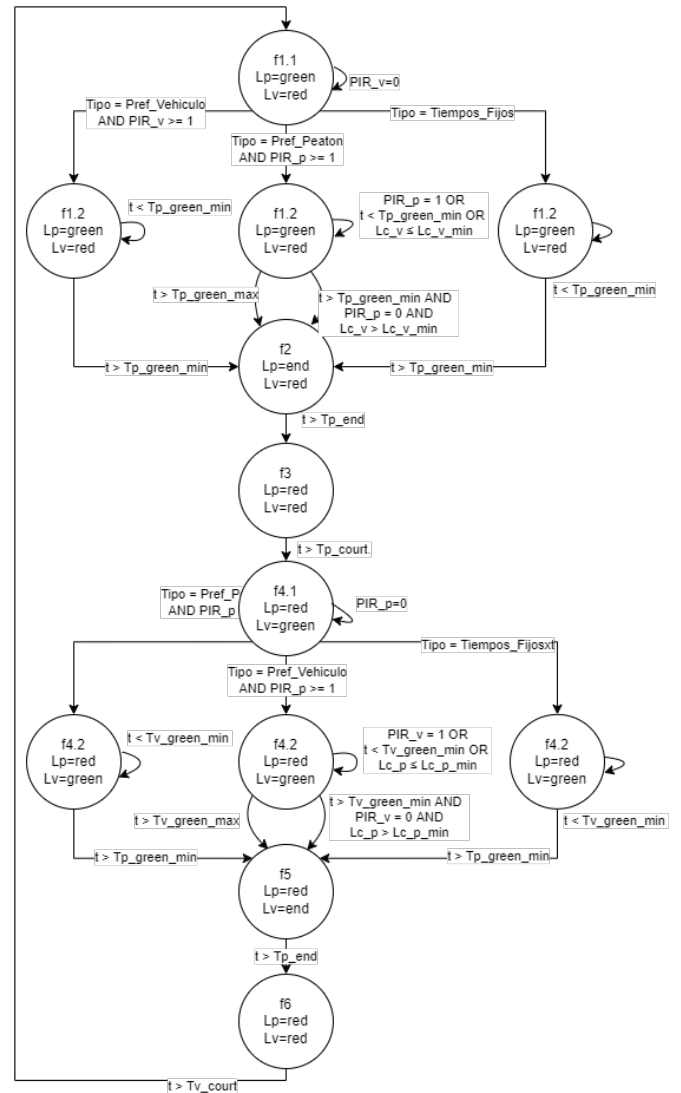


Figura 6: Diagrama estados de los algoritmos de control implementados. El diagrama muestra los tres algoritmos de control testados ya que el siguiente paso de la investigación consiste en que el algoritmo de control atienda a la elasticidad de la demanda de peatones y vehículos.

Según los valores que el algoritmo de control establezca para estas variables, podrá favorecer el paso de los peatones o de los vehículos dotándoles así de prioridades diferentes. La prioridad en los peatones busca un mayor flujo de peatones que de vehículos. Esto quiere decir que, si el semáforo de peatones está en rojo, si aparece al menos un peatón y el tiempo mínimo del semáforo de vehículos se ha alcanzado, el semáforo de peatones se pondrá en verde. Por otro lado, si el semáforo de peatones está en verde y se detecta un vehículo se pasa a un estado intermedio (fase 1.2). El estado sigue siendo verde para peatones y rojo para vehículos, pero en este caso, si el tiempo es mayor al tiempo máximo o no se detecta un peatón y se ha superado el tiempo mínimo, el estado cambiará y se pasará a la fase 2. Con esta modificación al control de tiempos fijos,

se cambiarían los tiempo de $T_{p_{green}}$, alargándolo en el caso de que no sea necesario cambiarlo y optimizando el flujo de peatones. La prioridad en los vehículos busca un mayor flujo de vehículos que de peatones. Esto quiere decir que, si el semáforo de vehículos está en rojo, si aparece al menos un vehículo y el tiempo mínimo del semáforo de peatones se ha alcanzado, el semáforo de vehículos se pondrá en verde. Por otro lado, si el semáforo de vehículos está en verde y se detecta un peatón se pasa a un estado intermedio (fase 4.2). El estado sigue siendo verde para vehículos y rojo para peatones, pero en este caso, si el tiempo es mayor al tiempo máximo o no se detecta un vehículo y se ha superado el tiempo mínimo, el estado cambiará y se pasará a la fase 5. Con esta modificación al control de tiempos fijos, se cambiarían los tiempo de $T_{v_{green}}$, alargándolo en el caso de que no sea necesario cambiarlo y optimizando el flujo de vehículos.

5. Experimentos y resultados

Es habitual que la experimentación de los sistemas de control inteligente de tráfico se realice mediante simulación (Pell et al., 2017). Existen una gran cantidad de sistemas de simulación, debido a las similitudes entre el tráfico de vehículos y el tráfico de mensajes en red. En nuestro caso utilizaremos Matlab y Simulink.

5.1. Modelo de simulación

El modelo de simulación está basado en Matlab y Simulink. Con Matlab se obtienen los valores del entorno simulado correspondientes a las entradas utilizadas en el sistema de control, el cual se ejecuta desde Simulink dando como resultado un conjunto de salidas que, posteriormente, se representan en una serie de tablas para permitir la comparación de la eficiencia de los algoritmos de control empleados. El modelo de simulación utiliza los siguientes datos de entrada. Llegada de vehículos: vector con los tiempos de llegada de los vehículos distribuidos aleatoriamente pero atendiendo a una determinada tasa de entrada configurable en cada simulación. Llegada de peatones: vector con los tiempos de llegada de los peatones distribuidos aleatoriamente pero atendiendo a una determinada tasa de entrada configurable en cada simulación. Tasa de entrada de peatones y de vehículos. Tipo de control. Puede ser basado en tiempos fijos o basado en tiempos variables con prioridad para los vehículos o para los peatones, tal como se explicó anteriormente. Tiempo de simulación. Tiempo total que la simulación realiza. Tiempo servicio en rojo de peatones y de vehículos cuando se simula con un control basado en tiempos fijos. Longitudes de cola máximas para el cambio de estado cuando se simula con un control basado en tiempos variables. Mediante Simulink se ejecutan los diferentes algoritmos de control durante el tiempo de simulación especificado. El sistema se basa en un diagrama de estados. Cuando se cumplen las condiciones el estado cambia tal y como se muestra en la Figura 6 del diagrama de estados donde aparecen las 6 fases del sistema. Para cada simulación los datos de salida que se obtienen son: Tiempo de duración del estado en rojo de los semáforos tanto de peatones como de vehículos. Longitud de cola al final del estado en rojo para peatones y vehículos. Longitud de cola al principio del estado en rojo para peatones y vehículos. Con ello se puede saber

si el sistema satura y la longitud de cola de cada ciclo. Longitud de paso de vehículos y peatones durante el estado en el que el semáforo se encuentra en verde.

5.2. Experimentos realizados

Para comparar los algoritmos de control diferentes, se han planteado una serie de experimentos. Un primer experimento formado por 36 simulaciones para conocer los tiempos de servicio de peatones y vehículos más óptimos utilizando el algoritmo de control basado en tiempos fijos. Estas simulaciones se dividen en cuatro casos de 9 simulaciones siendo las tasas de entrada de peatones λ_p y de vehículos λ_v un combinación de ellas desde una tasa mínima de 5 a una máxima de 40. Cada caso corresponde a diferentes tiempos de servicio en rojo ($T_{v_{red}}$ para vehículos y $T_{p_{red}}$ para peatones). Los tiempos se han variado siguiendo la Tabla 2 manteniendo el tiempo de ciclo (T_{ciclo}) constante.

Tabla 2: Tabla con los tiempos de servicio en rojo.

	$T_{v_{red}}$	$T_{p_{red}}$	T_{ciclo}
Caso 1	20	10	30
Caso 2	15	15	30
Caso 3	10	20	30
Caso 4	5	25	30

El caso 1 está buscando una priorizar los peatones frente a los vehículos, mientras que el caso 4 busca lo contrario. Los casos 2 y 3 son los intermedios. En todos los casos el tiempo de ciclo es fijo lo que servirá para conocer qué prioridad es más adecuada para las diferentes tasas de llegadas de vehículos y peatones. El segundo experimento está formado por 27 simulaciones que comparan el mejor resultado de tiempos fijos con el algoritmo de control basado en tiempos variables. Estas simulaciones también se dividen en tres grupos de 9 simulaciones. Los grupos son: Control basado en tiempos fijos con los datos de tiempos obtenidos en el anterior experimento (TF). Control basado en tiempos variables con prioridad de vehículos (PV). Control basado en tiempos variables con prioridad de peatones (PP). En este segundo experimento se configuran las siguientes características para evitar saturaciones tanto de peatones como de vehículos. Se establece un valor de longitud de cola máxima. Cuando la cola alcanza dicho valor se fuerza al sistema a cambiar de estado el semáforo para evitar la saturación de la calle. Se establecen tiempos mínimos y máximos de espera de peatones y vehículos. El tiempo mínimo de espera es el tiempo mínimo para un peatón es tiempo el semáforo debe estar en verde para un vehículo, y viceversa. Igualmente, el tiempo máximo de espera es el tiempo máximo que el semáforo está en rojo para un peatón o vehículo con al menos un vehículo o un peatón respectivamente esperando para cruzar. Se realizó una simulación de 3600 segundos para tener una variación del flujo lo más acertada posible, evitando una repetición innecesaria de ciclos. Una simulación menor a este tiempo puede provocar que, en ciertos casos, no se llegue a contemplar correctamente las variaciones de cada ciclo. Es decir, cuantos más ciclos se simulen, más ajustado serán los resultados. No obstante, a partir de cierto número de simulaciones, la variación de los resultados llega a ser casi imperceptible, por lo que, sería tiempo de

simulación que se consume sin necesidad. La cantidad de ciclos realizados en el control basado en tiempos fijos es de 106, siendo un número lo bastante grande para evitar fallos de medida. No obstante, la cantidad de ciclos en el control basado en tiempos variables es de un mínimo de 25 y un máximo de 140. Adicionalmente, el vaciado de cola de vehículos y peatones no es el mismo, por lo que se implementó una tasa de vaciado diferente para cada caso. La tasa de vaciado define a qué velocidad se despeja el cruce dependiendo de si se trata de peatones o de vehículos. Por lo general, en un cruce, los peatones cruzan en grupos de personas. En cambio, en los vehículos en calles de un carril solo pueden cruzar la calle uno detrás de otro, Por lo tanto, se introduce una tasa de vaciado de 10 para el caso de peatones y de 1 para el caso de vehículos.

5.3. Resultados con control basado en tiempos fijos

Tal y como se ha explicado anteriormente, los resultados de este experimento muestran los tiempos de servicio de peatones y vehículos más óptimos. Estos tiempos de servicio se usarán en el segundo experimento. Para ello, de las 36 simulaciones realizadas combinando los distintos casos de tiempos de servicio con las diferentes tasas de entrada de vehículo y peatones se sacan las siguientes tablas. En todas ellas, las columnas λ_p y λ_v corresponden a las distintas tasas de entrada de peatones y vehículos respectivamente. Los casos son los mencionados en la Tabla 2. La Tabla 3 muestra la longitud de cola de vehículos promedio y acumulada por cada ciclo.

Tabla 3: Resultados Control Tiempos Fijos: $Lq_{cv} - \bar{L}q_v$

		$Lq_{cv}/TasaVaciado_v - \bar{L}q_v/TasaVaciado_v$			
λ_v	λ_p	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
5	5	1,2;1,3	1,0;1,1	0,7;0,8	0,3;0,4
5	20	1,2;1,3	1,0;1,1	0,7;0,8	0,3;0,4
5	40	1,2;1,3	1,0;1,1	0,7;0,8	0,3;0,4
20	5	4,7;5,2	3,8;4,1	2,8;3,1	1,7;2,0
20	20	4,7;5,2	3,8;4,1	2,8;3,1	1,7;2,0
20	40	4,7;5,2	3,8;4,1	2,8;3,1	1,7;2,0
40	5	8,9;210	6,9;8,9	5,1;5,8	3,2;3,8
40	20	8,9;210	6,9;8,9	5,1;5,8	3,2;3,8
40	40	8,9;210	6,9;8,9	5,1;5,8	3,2;3,8

La Tabla 4 muestra la longitud de cola de peatones promedio por cada ciclo.

Tabla 4: Resultados Control Tiempos Fijos: Lq_{cp}

		$Lq_{cp}/TasaVaciado_p - \bar{L}q_p/TasaVaciado_p$			
λ_p	λ_v	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
5	5	0,05;0,05	0,06;0,06	0,09;0,09	0,11;0,11
5	20	0,05;0,05	0,06;0,06	0,09;0,09	0,11;0,11
5	40	0,05;0,05	0,06;0,06	0,09;0,09	0,11;0,11
20	5	0,25;0,25	0,33;0,33	0,42;0,42	0,52;0,52
20	20	0,25;0,25	0,33;0,33	0,42;0,42	0,52;0,52
20	40	0,25;0,25	0,33;0,33	0,42;0,42	0,52;0,52
40	5	0,52;0,52	0,72;0,72	0,90;0,90	1,10;1,10
40	20	0,52;0,52	0,72;0,72	0,90;0,90	1,10;1,10
40	40	0,52;0,52	0,72;0,72	0,90;0,90	1,10;1,10

Se puede observar que, tanto para vehículos como peatones, para el mismo valor de tasa de entrada, se tienen los mismos valores de longitudes de cola. Esto tiene sentido debido a que, al no tener un control inteligente, para la misma simulación, la entrada siempre va a ser la misma. Por ejemplo, en el caso de vehículos con una tasa de entrada $\lambda_v = 5$ la longitud de cola, tanto acumulada como por ciclo es la misma independientemente de la tasa de entrada de peatones λ_p . En la Tabla 3, se observa que para una tasa de entrada $\lambda_v = 40$, el valor obtenido de la longitud de cola por tasa de vaciado es muy grande. Por lo tanto, realizando los cálculos de saturación (ecuación 2) se obtiene la Tabla 5 y la representación gráfica de los resultados en la Figura 7. Tanto en la tabla de saturación de tiempos fijos (Tabla 5) para vehículos como en la Figura 7, existe un caso en el que la saturación es muy alta, cercana a 1. Este valor indica que en el 96% de los casos la cola no se llega a vaciar. Cabe destacar que en los cuatro casos los valores de saturación están directamente relacionados con el tiempo de servicio. Esto quiere decir que en el caso 1, con tiempo de servicio rojo alto, el llenado de cola es más fácil que el vaciado, especialmente en el caso de los vehículos. Como se puede observar en la Tabla 5, a menores tasas de entrada de vehículos, mayor es la tasa de saturación. Pero en este caso, la tasa indica una ineficiencia en el control debido a que hay ocasiones en las que se cambia de estado sin necesidad. Es decir, se pone un semáforo en verde, cuando no hay vehículos en cola, provocando que, estos ciclos, no sean óptimos.

Tabla 5: Resultados Saturación Tiempos Fijos para vehículos

		Sat			
λ_v	λ_p	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
5	5	0,07	0,09	0,12	0,22
5	20	0,07	0,09	0,12	0,22
5	40	0,07	0,09	0,12	0,22
20	5	0,09	0,08	0,10	0,16
20	20	0,09	0,08	0,10	0,16
20	40	0,09	0,08	0,10	0,16
40	5	0,96	0,23	0,12	0,16
40	20	0,96	0,23	0,12	0,16
40	40	0,96	0,23	0,12	0,16

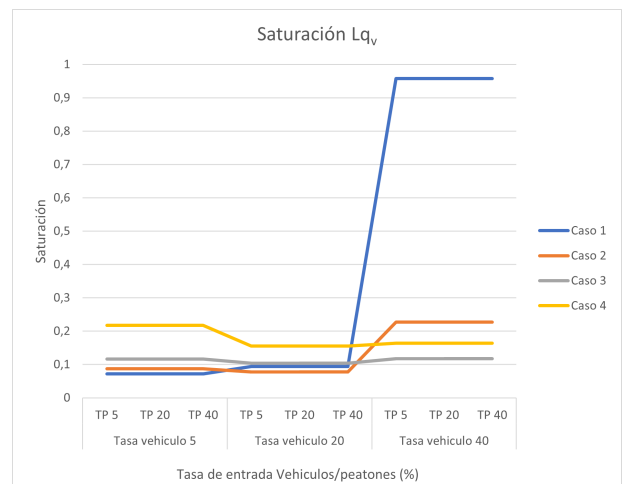


Figura 7: Saturación (%) de la longitud de cola de vehículos

No obstante, a mayores tasas, al haber una entrada más constante de vehículos, hay menos veces que el semáforo cambia de estado sin necesidad, dando menores tasas de saturación. En conclusión, a menores tasas de entrada, lo más óptimo son tiempos de servicio en rojo más altos, en cambio, a mayores tasas de entrada, son los tiempos de servicio en rojo más bajos los que mejoran el tráfico. Consecuentemente, un sistema de control óptimo debe ser capaz de conocer la cantidad de vehículos en cola, o con posibilidad de llegar al semáforo en un corto tiempo. Sistemas como el presentado en Poza-Lujan et al. (2022) son los que dan soporte al sistema de control de tráfico presentado.

5.4. Resultados con control basado en tiempos variables

En este experimento se realizaron 27 simulaciones combinando las tasas de entrada de vehículos con la de peatones y con los distintos controles. Estas simulaciones tienen la misma tasa de entrada tanto de peatones como de vehículos para comprobar el comportamiento ante la misma entrada. Al igual que en el experimento anterior, se obtienen las longitudes de cola existentes tanto por ciclo como acumulada. La longitud de cola por ciclo es la longitud de cola que se forma en cada ciclo. La longitud de cola acumulada es la longitud de cola que se forma por ciclo más la longitud de cola ya existente del ciclo anterior. A partir de las simulaciones se obtiene la Tabla 6 de longitudes de cola en cada ciclo para los vehículos y para los peatones.

Tabla 6: Resultados Control Tiempos Variables: $Lq_{c,v}$

λ_v	λ_p	$Lq_{c,v}/TasaVaciado_v$			$Lq_{c,p}/TasaVaciado_p$		
		TF	PV	PP	TF	PV	PP
5	5	0,8	1,1	6,0	0,09	0,57	0,14
5	20	0,8	1,0	5,6	0,37	0,68	0,34
5	40	0,8	1,0	5,7	0,73	1,11	0,48
20	5	3,5	1,9	6,0	0,09	0,57	0,16
20	20	3,5	2,0	5,8	0,37	0,69	0,34
20	40	3,5	1,8	5,9	0,73	1,12	0,54
40	5	7,2	3,1	6,0	0,09	0,57	0,15
40	20	7,2	3,3	5,5	0,37	0,71	0,34
40	40	7,2	2,9	5,6	0,73	1,14	0,55

Tabla 7: Resultados Control Tiempos Variables: Lq_v

λ_v	λ_p	$Lq_v/TasaVaciado_v$			$Lq_p/TasaVaciado_p$		
		TF	PV	PP	TF	PV	PP
5	5	0,9	1,2	6,0	0,09	0,59	0,15
5	20	0,9	1,1	5,9	0,37	0,70	0,35
5	40	0,9	1,1	6,0	0,73	1,13	0,53
20	5	3,8	2,1	6,4	0,09	0,59	0,16
20	20	3,8	2,2	6,3	0,37	0,70	0,36
20	40	3,8	2,0	6,3	0,73	1,13	0,57
40	5	8,8	3,7	6,9	0,09	0,59	0,15
40	20	8,8	3,8	6,8	0,37	0,71	0,36
40	40	8,8	3,3	7,0	0,73	1,14	0,58

La Tabla 7 es el resultado de las longitudes de cola acumulada para los vehículos y para los peatones. Al igual que en el experimento anterior, comprobamos la saturación del sistema.

Para ello, por medio de la fórmula de saturación (ecuación 2), obtenemos la Tabla 8 de saturaciones para vehículos. En cuanto a los peatones nunca llega a saturar gracias a la tasa de vaciado.

Tabla 8: Resultados Sat Tiempos Variables para vehículos

		Sat_v		
λ_v	λ_p	TF	PV	PP
5	5	0,08	0,06	0,01
5	20	0,08	0,04	0,05
5	40	0,08	0,06	0,05
20	5	0,09	0,08	0,06
20	20	0,09	0,10	0,08
20	40	0,09	0,09	0,07
40	5	0,18	0,17	0,13
40	20	0,18	0,13	0,18
40	40	0,18	0,13	0,19

Tal y como muestra tanto la Tabla 8 como la Figura 8, los parámetros están muy lejos de la saturación. Es decir, los datos no llegan a pasar de un 20 % de saturación. Por lo que podemos concluir que, tanto para tiempos fijos como para tiempos variables, el sistema no satura. Cabe destacar, que incluso para un control de tiempos variables de prioridad peatones, la longitud de vehículos nunca llega a saturar.

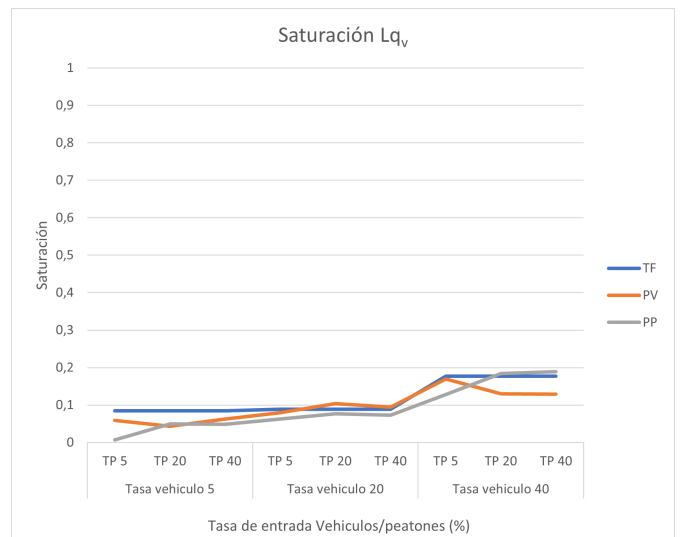


Figura 8: Saturación (%) de la longitud de cola de vehículos

Por lo tanto, para comprobar qué sistema se comporta mejor, se busca cual de todos los sistemas se comporta con menos variaciones a lo largo de la simulación. Esto quiere decir que, la diferencia de las longitudes de cola acumuladas en cada ciclo con la media sea la menor. Con esto obtenemos un sistema similar, con colas similares, que nos permiten en un futuro, realizar un control más exhaustivo. Por lo tanto, utilizando la ecuación 1 de la Optimización (Op), se obtiene la Tabla 9 de valores para los vehículos y para los peatones. Tanto en la Tabla 9 en la parte de vehículos como en la Figura 9 se puede observar que, para un control de tiempos fijos, la diferencia entre las colas en cada ciclo con el promedio es mayor que con un control de tiempos variable.

Tabla 9: Op de la longitud de cola de vehículos

λ_v	λ_p	Op_v			Op_p		
		TF	PV	PP	TF	PV	PP
5	5	9,6	3,2	5,9	9,1	8,7	4,1
5	20	9,6	2,6	6,1	17,5	13,8	7,3
5	40	9,6	2,7	6,0	24,7	27,2	10,2
20	5	19,3	5,4	8,0	9,1	8,6	6,1
20	20	19,3	11,8	9,9	17,5	15,5	13,4
20	40	19,3	11,4	10,2	24,7	29,3	16,7
40	5	29,0	8,3	10,4	9,1	8,6	7,4
40	20	29,0	13,7	11,6	17,5	17,2	15,6
40	40	29,0	13,3	10,2	24,7	31,5	22,8

Cabe destacar que, en un control de tiempos variables con prioridad peatones, la longitud de cola de vehículos sigue teniendo una optimización mejor que en un control de tiempos fijos. Esto significa que el control de la cola de vehículos funciona correctamente tanto en prioridad peatones como en prioridad vehículos.

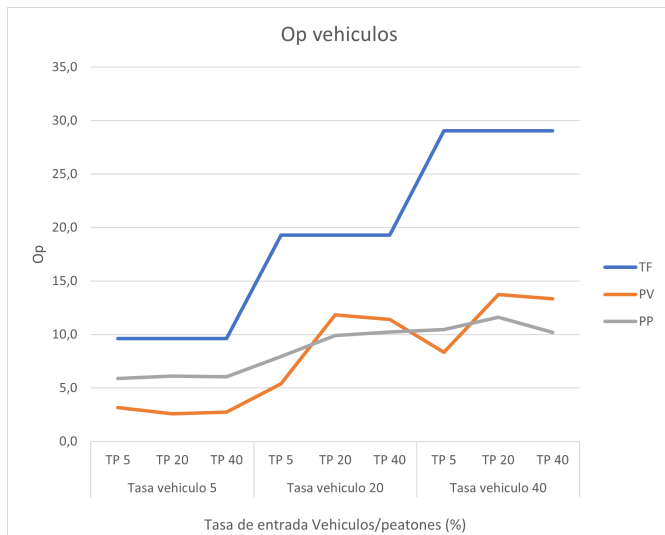


Figura 9: Op de vehículos

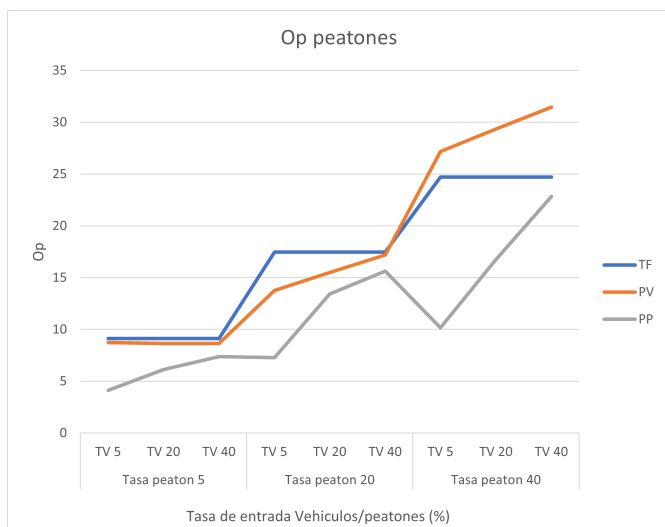


Figura 10: Op de peatones

Se observa que tanto en la Tabla 9 en la parte de peatones, como en la Figura 10 los resultados son mejores en el caso de prioridad peatones aunque en el caso de prioridad vehículos no siempre es así.

6. Conclusiones y trabajo futuro

En este artículo se ha presentado una arquitectura de control inteligente distribuido. Esta arquitectura tiene como elementos básicos los módulos de control. Los módulos se conectan entre sí formando dispositivos inteligentes que se comunican con otros dispositivos inteligentes dentro del mismo área de control cuando dichos dispositivos tienen una misión común. Para validar esta nueva arquitectura, se ha modelado un caso de estudio que se ha simulado por medio de MatLab y Simulink. El caso de estudio consiste en un cruce entre una calle peatonal y una vía de vehículos. En el caso de estudio se han creado dos áreas de control, una de ellas dedicada a la detección de vehículos y otra de ellas dedicada al control del tráfico del cruce. Para la gestión del cruce se ha implementado un algoritmo de control en el que se han probado diversas estrategias basadas en priorizar peatones, vehículos o dinamizar ambas. En el caso de uso se han medido unos parámetros que permiten ser analizados por unas fórmulas propuestas que permiten comparar las distintas políticas de control. Con el control implementado, se obtienen distintos parámetros para medir la saturación del cruce y evaluar, por tanto, la configuración más óptima del control. Se han definido los indicadores *Op* y *Sat* como método de medición del estado del cruce y así poder comparar las diferentes estrategias de control. Para medir dichas variables se ha creado una simulación en MatLab y Simulink en la que se ha modelado un flujo de peatones y de vehículos. Estos flujos se han variado con diferentes tasas de llegada tanto para peatones como para vehículos y así comprobar en qué circunstancias cada algoritmo de control es más óptimo. Primero se ha probado el control fijo, variando los tiempos de servicio de peatones y vehículos dentro de un ciclo fijo de 30 segundos. En función de las tasas de peatones y vehículos, la saturación confirma los casos en los que se da más tiempo de servicio a los vehículos que a los peatones mejorando el servicio a los vehículos apenas empeorando el servicio a los peatones. Seguidamente se prueban los algoritmos de tiempos variables en los que los tiempos de servicio varían en función de la detección de peatones o de una longitud de cola concreta. Se ha experimentado con las mismas tasas de llegadas de peatones y vehículos que en el control basado en tiempos fijos, comparando los resultados con los mejores casos de control de tiempo fijo. Los resultados muestran que, a igualdad de tasas en cada grupo de simulación, las longitudes de cola pueden variar dependiendo del algoritmo. Aunque las longitudes de cola medias y acumuladas en cada grupo puedan llegar a ser mayores, fijándonos en los datos de la tabla de saturación y de optimización, el sistema de tiempos variables tiene mejor rendimiento. A esta conclusión se llega ya que la saturaciones por ciclo son menores, es decir, hay menos veces que el sistema se satura. Aunque la longitud de cola media sea algo mayor, dado que esa longitud se consigue vaciar a tiempo, el sistema es óptimo y no satura, evitándose el atasco. A partir del trabajo presentado es posible desarrollar diversas líneas. En lo que se refiere a la experimentación, este trabajo presenta una

simulación con las limitaciones inherentes a este método. La construcción de un sistema basado en prototipos reales permitiría obtener una mejor evaluación del control presentado. Esto se debe a que se las variables no controlables en un entorno real aparecerían al implementarse un sistema prototipado. Otra línea de trabajo es la implementación de algoritmos de control dinámico de manera que cada semáforo pueda cambiar el tipo de control entre tiempos fijos, o dar prioridad a peatones o vehículos dependiendo del flujo de vehículos, es decir de la demanda. A través de dispositivos que detectan los vehículos, los semáforos pueden predecir las variaciones de las tasas de llegada y poder variar el algoritmo de control según la opción más óptima. A partir de una arquitectura donde diversos dispositivos inteligentes pueden proporcionar información a semáforos más o menos cercanos, es sencilla la inclusión de detección de atascos más allá del cruce, para regular el acceso al atasco y evitar una saturación mayor. Para desarrollar los algoritmos de control avanzados será necesario disponer de los datos de las simulaciones. Aunque en el trabajo presentado en el artículo los datos se almacenan en una hoja de cálculo, el uso de bases de datos donde se almacenen todos los detalles de la simulación, como posiciones de vehículos, permitiría comparar los algoritmos en condiciones similares. Finalmente, es muy interesante estudiar la coordinación entre diferentes cruces para lograr olas verdes dependientes de la demanda y no exclusivas de una vía, tal como están implementadas dichas olas actualmente.

Agradecimientos

Trabajo apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España Proyecto MICINN: CICYT PRECON-I4: “Sistemas informáticos predecibles y confiables para la Industria 4.0” TIN2017-86520-C3-1-R.

Acrónimos

Acrónimo	Significado
DCS	Distributed Control System
I2I	Infrastructure to Infrastructure
RTL	Real Traffic Lights
SDG	Sustainable Development Goals
TMS	Traffic Management System
VANET	Vehicular Ad-hoc NETWORKS
VTL	Virtual Traffic Lights
WSN	Wireless Sensor Network

Referencias

Al-qutwani, M., Wang, X., 2019. Smart traffic lights over vehicular named data networking. *Information* 10 (3), 83.
 Banister, D., 2011. Cities, mobility and climate change. *Journal of Transport Geography* 19 (6), 1538–1546.
 Beaver, L. E., Chalaki, B., Mahbub, A. I., Zhao, L., Zayas, R., Malikopoulos, A. A., 2020. Demonstration of a time-efficient mobility system using a scaled smart city. *Vehicle System Dynamics* 58 (5), 787–804.
 Burguillo-Rial, J. C., Rodríguez-Hernandez, P. S., Montenegro, E. C., Castiñeira, F. G., 2012. History-based self-organizing traffic lights. *Computing and Informatics* 28 (2), 157–168.

Chen, L.-W., Chang, C.-C., 2016. Cooperative traffic control with green wave coordination for multiple intersections based on the internet of vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 47 (7), 1321–1335.
 De Souza, A. M., Brennand, C. A., Yokoyama, R. S., Donato, E. A., Madeira, E. R., Villas, L. A., 2017. Traffic management systems: A classification, review, challenges, and future perspectives. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 13 (4), 1550147716683612.
 Gao, K., Huang, S., Han, F., Li, S., Wu, W., Du, R., 2020. An integrated algorithm for intersection queue length estimation based on iot in a mixed traffic scenario. *Applied Sciences* 10 (6), 2078.
 Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., Steffen, W., Glaser, G., Kanie, N., Noble, I., 2013. Policy: Sustainable development goals for people and planet. *Nature* 495 (7441), 305.
 Hartanti, D., Aziza, R. N., Siswipraptini, P. C., 2019. Optimization of smart traffic lights to prevent traffic congestion using fuzzy logic. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control* 17 (1), 320–327.
 Hernández Bel, A., 2020. Dispositivo modular configurable para la detección de vehículos, y viandantes, y con soporte a la iluminación de la vía e información de tráfico. Tech. rep., Universitat Politècnica de València.
 Jang, H.-C., Lin, T.-K., 2018. Traffic-aware traffic signal control framework based on sdn and cloud-fog computing. In: 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), IEEE, pp. 1–5.
 Lämmer, S., Helbing, D., 2008. Self-control of traffic lights and vehicle flows in urban road networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2008 (04), P04019.
 Liang, X., Du, X., Wang, G., Han, Z., 2018. Deep reinforcement learning for traffic light control in vehicular networks. *arXiv preprint arXiv:1803.11115*.
 Liu, H. X., Wu, X., Ma, W., Hu, H., 2009. Real-time queue length estimation for congested signalized intersections. *Transportation research part C: emerging technologies* 17 (4), 412–427.
 Mahoor, M., Salmasi, F. R., Najafabadi, T. A., 2017. A hierarchical smart street lighting system with brute-force energy optimization. *IEEE Sensors Journal* 17 (9), 2871–2879.
 Navarro, J., Vidaña-Vila, E., Alsina-Pagès, R. M., Hervás, M., 2018. Real-time distributed architecture for remote acoustic elderly monitoring in residential-scale ambient assisted living scenarios. *Sensors* 18 (8), 2492.
 Pell, A., Meingast, A., Schauer, O., 2017. Trends in real-time traffic simulation. *Transportation research procedia* 25, 1477–1484.
 Plączek, B., 2014. A self-organizing system for urban traffic control based on predictive interval microscopic model. *Engineering applications of artificial intelligence* 34, 75–84.
 Poza-Lujan, J.-L., Posadas-Yagüe, J.-L., Simó-Ten, J.-E., Blanes, F., 2020. Distributed architecture to integrate sensor information: Object recognition for smart cities. *Sensors* 20 (1), 112.
 Poza-Lujan, J.-L., Uribe-Chavert, P., Sáenz-Peñañiel, J.-J., Posadas-Yagüe, J.-L., 2021. Distributing and processing data from the edge: a case study with ultrasound sensor modules. In: *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence*. Springer, pp. 190–199.
 Poza-Lujan, J.-L., Uribe-Chavert, P., Sáenz-Peñañiel, J.-J., Posadas-Yagüe, J.-L., 2022. Processing at the edge: A case study with an ultrasound sensor-based embedded smart device. *Electronics* 11 (4), 550.
 Sachs, J. D., 2012. From millennium development goals to sustainable development goals. *The Lancet* 379 (9832), 2206–2211.
 Simarro Fernández, R., Simó Ten, J. E., Navarro Herrero, J. L., Poza-Luján, J.-L., Posadas-Yagüe, J.-L., 2016. Núcleo de control: Controladores modulares en entornos distribuidos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)* 13 (2), 196–206.
 Tiaprasert, K., Zhang, Y., Wang, X. B., Zeng, X., 2015. Queue length estimation using connected vehicle technology for adaptive signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 (4), 2129–2140.
 Tubaishat, M., Shang, Y., Shi, H., 2007. Adaptive traffic light control with wireless sensor networks. In: 2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. IEEE, pp. 187–191.
 Uribe Chavert, P., 2020. Sistema de control de tráfico automático basado en dispositivos modulares heterogéneos. Tech. rep., Universitat Politècnica de València.
 Wen, W., 2008. A dynamic and automatic traffic light control expert system for solving the road congestion problem. *Expert Systems with Applications* 34 (4), 2370–2381.