

Jornadas de Automática

Optimización multivariable de tráfico urbano mediante control inteligente distribuido

Cristian Iza^{a,*}, Juan-Luis Posadas-Yagüe^b, Miguel Rebollo^c, Jose-Luis Poza-Lujan^d

^aEscuela de Doctorado, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera snn, 46022, Valencia, España

^bDpto. de Informática de Sistemas y Computadores, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera snn, 46022, Valencia, España

^cInstituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera snn, 46022, Valencia, España

^dInstituto Universitario Valenciano de Investigación en Inteligencia Artificial, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera snn, 46022, Valencia, España

To cite this article: Iza, C., Posadas-Yague, J.L., Rebollo, M., Poza-Lujan, J.L. 2026. Multivariable optimization of urban traffic through distributed intelligent control. *Jornadas de Automática*, 47.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13881>

Resumen

Este artículo resume una línea de investigación orientada a la gestión inteligente del tráfico urbano mediante la transición de controladores estáticos a arquitecturas distribuidas multivariables. Se describe el desarrollo de la arquitectura CICADA, la cual integra el control simultáneo de semáforos, límites de velocidad, giros y estacionamiento utilizando aprendizaje por refuerzo profundo y lógica deóntica para garantizar la seguridad normativa. Las validaciones realizadas en entornos de simulación SUMO demuestran que la coordinación de estas variables permite reducir significativamente las colas, los tiempos de viaje y las emisiones contaminantes, superando el rendimiento de los enfoques monovariables tradicionales. El sistema propuesto establece una base escalable para la futura movilidad conectada y autónoma en ciudades inteligentes.

Palabras clave: Gestión integrada del tráfico, Optimización distribuida para sistemas a gran escala, Control sobre redes, Sistemas multiagente, Coordinación de sistemas multivehículo, Sistemas de control embebidos en red.

Multivariable optimization of urban traffic through distributed intelligent control

Abstract

This paper summarizes a research line aimed at intelligent urban traffic management through the transition from static controllers to multivariable distributed architectures. It describes the development of the CICADA architecture, which integrates the simultaneous control of traffic lights, speed limits, turns, and parking using deep reinforcement learning and deontic logic to ensure normative safety. Validations conducted in SUMO simulation environments demonstrate that coordinating these variables significantly reduces queues, travel times, and pollutant emissions, outperforming traditional mono-variable approaches. The proposed system establishes a scalable foundation for future connected and autonomous mobility in smart cities.

Keywords: Integrated traffic management, Distributed optimisation for large-scale systems, Control over networks, Multi-agent systems, Coordination of multiple vehicle systems, Networked embedded control systems.

1. Introducción

La congestión del tráfico en áreas urbanas representa un desafío recurrente que afecta negativamente la movilidad, la calidad de vida y el medio ambiente.

Históricamente, la regulación de las calles se ha centrado de forma aislada en la temporización de los ciclos de semáfo-

tos a través de sistemas convencionales basados en algoritmos de control, los cuales comienzan a tener dificultades para controlar modificaciones integrales en las normas de tráfico.

Para superar estas limitaciones y facilitar la descongestión, se hace indispensable la integración de señales de tráfico adaptativas junto a sistemas de control distribuido. Por lo general,

*Autor para correspondencia: jopolu@upv.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

esta adaptación se realiza por medio de señales de tráfico condicionadas por un horario (Figura 1) o sistemas similares.



Figura 1: Señal de prohibición de giro durante el tráfico diurno (Riga, Letonia).

Sin embargo, las tecnologías actuales permiten generar diferentes acciones para permitir cambiar el tráfico más allá de los semáforos. El presente trabajo consolida el conocimiento de diversas investigaciones recientes orientadas a optimizar el flujo vehicular mediante la modificación dinámica de reglas en intersecciones y el control multivariable.

El presente artículo describe en la Sección 2 el estado de la cuestión en cuanto a sistemas similares; en la Sección 3 se detalla el procedimiento y la metodología en la que se basa la arquitectura presentada; la Sección 4 presenta la arquitectura CICADA (Control Inteligente para la Co-optimización Adaptativa en entornos Dinámicos y Autónomos); la Sección 5 expone los resultados obtenidos mediante los experimentos simulados; la Sección 6 analiza los resultados obtenidos y la Sección 7 presenta las líneas de trabajo futuro.

2. Soluciones actuales

La evolución de la gestión del tráfico ha pasado de sistemas pioneros de control adaptativo, como OPAC (Gartner, 1983) o SYNCHRO (Goodall et al., 2013), centrados en optimizar tiempos de paso en semáforos y desfases entre los mismos, hasta herramientas de coordinación de redes complejas como SCATS (Lowrie, 1990) o SCOOT (Hunt et al., 1981). Aunque eficaces en la sincronización de semáforos, estos sistemas operan bajo reglas predefinidas que carecen de la flexibilidad necesaria para orquestar cambios dinámicos en la normativa de tráfico ante variaciones de condiciones. En la última década, la literatura científica ha explorado el potencial de la Inteligencia Artificial. Se han propuesto modelos

de Aprendizaje por Refuerzo (RL) como AttendLight (Oroojlooy et al., 2020), que utiliza mecanismos de atención para el control universal de señales, o el sistema SMART para optimización multi-agente (Chu et al., 2019). En el ámbito de la velocidad, sistemas como MARVEL (Zhang et al., 2023) gestionan límites variables en corredores de autopista, mientras que para el estacionamiento se han desarrollado autómatas de aprendizaje para la asignación inteligente de plazas (Waheed et al., 2021).

Sin embargo, la mayoría de estas soluciones siguen siendo monovariantes o abordan los parámetros de control de forma desacoplada, lo que genera problemas de sincronización y latencia en entornos urbanos densos. Recientemente, investigaciones han demostrado que el control conjunto de múltiples variables genera un "dividendo de coordinación". Propuestas basadas en comunicaciones V2X (Abboud et al., 2016) permiten que los vehículos tomen decisiones colaborativas, pero a menudo dependen de la voluntad del conductor, comprometiendo la estabilidad del sistema. La contribución de la arquitectura CICADA aborda estas limitaciones proponiendo un control neuro-simbólico. A diferencia de los modelos de aprendizaje convencionales que operan como "cajas negras", el enfoque presentado subordina la optimización física a un marco de seguridad mediante un filtrado deontológico, garantizando un estado seguro por diseño.

3. Procedimiento y Metodología

En lugar de gestionar la infraestructura vial y la dinámica de los vehículos de manera disociada, la propuesta principal radica en un ecosistema unificado impulsado por técnicas de inteligencia artificial, como el Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL) y las redes neuronales. Este enfoque permite ajustar de forma coordinada los límites de velocidad, la disponibilidad de aparcamiento y los permisos de giro, operando bajo un ciclo de actuación sincronizado y respaldado por capas de seguridad basadas en lógica deontológica.

3.1. Objetivos de la investigación

Debido a que el control de tiempos de semáforos está trabajado muy ampliamente (Moreno-Malo et al., 2024) en la investigación se ha decidido ampliar los ámbitos de actuación del control inteligente. La Figura 2 muestra las áreas de actuación que el sistema deberá controlar. Como se muestra son muchas más acciones de las que tradicionalmente se han considerado.

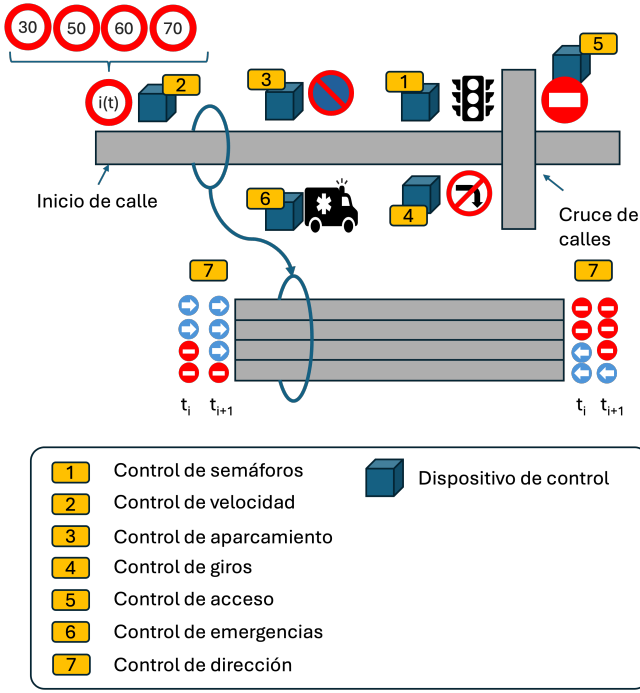


Figura 2: Visión conceptual de la misión del sistema. Cambiar reglas de tráfico dentro de un rango en función del estado y de los objetivos de optimización.

El primer ámbito, control de semáforos Figura 2(1), es el control que ya está implementado en anteriores trabajos. A este ámbito de control se decide añadir el control de velocidad 2(2), siempre considerando que se dispone de señales basadas en paneles led que permiten variar la señal mostrada (Iza Guamán, 2023). Además del control de velocidad, el control de aparcamiento permite facilitar dinámicamente la circulación reduciendo los tiempos que un vehículo circula buscando aparcar 2(3). Para futuras implementaciones se dejan otros ámbitos de control como permitir o no cambios de dirección 2(4 y 5), la gestión de vehículos de emergencia 2(6) o incluso los cambios de sentido en avenidas con más de un carril 2(7).

3.2. Evolución del Sistema de Control

La línea de investigación ha evolucionado desde la mejora de la coordinación semafórica básica hasta sistemas de alta complejidad distribuida. Para evaluar la eficacia de los sistemas de regulación inteligente, se han diseñado y ejecutado simulaciones en múltiples escenarios urbanos (incluyendo topologías de cuadrícula tipo Manhattan) utilizando la plataforma SUMO (Simulation of Urban Mobility), controlada e interconectada a través de Python.

Las propuestas metodológicas centrales se dividen en los siguientes enfoques Inicialmente se propuso la integración de señales de tráfico en sistemas tipo SCATS mediante algoritmos distribuidos para optimizar el flujo en tiempo real (Iza et al., 2025b). Integración de Velocidad y Parking: Posteriormente, se incorporó el ajuste automático de límites de velocidad y la activación dinámica de carriles para estacionamiento, utilizando redes neuronales para responder a la densidad vehicular (Iza et al., 2025a). Gestión de Reglas de Giro y Acceso: Los trabajos más recientes integran permisos de giro condicionales en las intersecciones, permitiendo una reconfiguración completa de la normativa de tráfico basada en el estado actual de la red (Iza et al., 2026b).

4. Arquitectura del sistema

Para operativizar las estrategias de optimización multivariable, se propone un cambio de paradigma hacia una arquitectura de control distribuida, jerárquica y altamente conectada (Iza et al., 2026a). La arquitectura CICADA, representa un cambio de paradigma desde las estructuras jerárquicas tradicionales hacia un sistema de control distribuido y altamente conectado. Su diseño se fundamenta en la segregación funcional de los dispositivos y una comunicación orquestada mediante un bus lógico de datos.

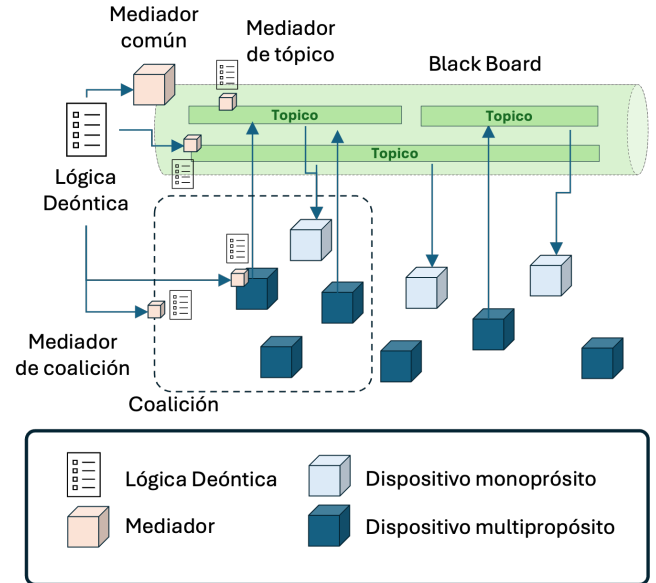


Figura 3: Visión conceptual de la misión del sistema. Cambiar reglas de tráfico dentro de un rango en función del estado y de los objetivos de optimización.

4.1. Clasificación de Dispositivos y Nodos de Control

Dentro del ecosistema CICADA, los elementos de hardware y software se clasifican según su capacidad de actuación y decisión (Figura 3).

- **Dispositivos Monopropósito:** Son elementos especializados encargados de monitorizar o actuar sobre un área de control única y específica. Ejemplos de estos son los controladores de semáforos, señales de tráfico dinámicas (paneles LED) o sensores de detección de características vehiculares.
- **Dispositivos Multipropósito:** Actúan como nodos de agregación que permiten la toma de decisiones complejas a partir del procesamiento de datos provenientes de distintos dispositivos monopropósito. Estos dispositivos integran capacidades de cómputo local (como redes neuronales DNN o algoritmos PPO) para optimizar el flujo en su área de influencia.

A partir de estos distintos tipos de dispositivos es fácil distribuir las tareas específicas, muy centradas en el ámbito local, con las tareas más avanzadas y que requieren más inteligencia.

4.2. Conexión entre dispositivos

La comunicación entre todos los elementos del sistema se realiza mediante un paradigma de Publicación/Suscripción sobre una pizarra distribuida (Blackboard), implementada mediante un bus lógico de alta velocidad (DDS/MQTT). Este Blackboard no es una base de datos estática, sino un espacio de trabajo compartido organizado en tres categorías funcionales de tópicos.

- Tópicos de Estado: Donde los agentes publican la realidad del entorno (posiciones, velocidades, ocupación).
- Tópicos de Intención: Donde los agentes publican sus deseos de acción (ej. "el semáforo A desea cambiar a fase verde") antes de ser autorizados.
- Tópicos Normativos: Donde los mediadores publican las órdenes finales validadas por el sistema.

4.3. Mediación y Lógica Deóntica

Para gestionar las decisiones que afectan a múltiples áreas de control simultáneamente —como la coordinación entre el aumento de un ciclo semafórico y la habilitación de carriles de aparcamiento— la arquitectura introduce la figura de los elementos mediadores. Estos mediadores actúan como supervisores que consultan un conjunto de reglas coherentes basadas en lógica deóntica (operadores de obligación O, permiso P y prohibición F). Su función principal es el arbitraje de conflictos en tiempo real, asegurando la estabilidad del sistema mediante la prevención de ciclos infinitos, interbloqueos (deadlocks) o acciones contradictorias que puedan comprometer la seguridad vial. Gracias a este filtrado normativo, el control físico está siempre subordinado a la legalidad del sistema, garantizando un estado seguro (fail-safe) por diseño.

4.4. Flujo de Control Sincronizado

El ciclo de control se cierra mediante un lazo de realimentación donde los mediadores leen las intenciones de la pizarra, las proyectan sobre el subespacio de acciones seguras definido por la lógica deóntica y publican el resultado en los tópicos normativos. Finalmente, los controladores locales se suscriben a estos tópicos y ejecutan la acción sobre la infraestructura real o simulada (SUMO), logrando una coordinación multivariable que optimiza el throughput urbano de manera holística.

5. Metodología Experimental

5.1. Mejora de la Eficiencia Operativa Urbana

Los resultados demuestran que la transición de un control estático a uno basado en aprendizaje por refuerzo profundo genera mejoras disruptivas en la fluidez del tráfico. En escenarios de alta demanda, el sistema unificado ha logrado reducir el Tiempo Medio de Viaje (ATT) entre un 16 % y un 24.85 % (Iza et al., 2025a). Esta mejora es consistente con la reducción del Tiempo de Espera (WT) en intersecciones, que presenta disminuciones de hasta el 38.09 % en promedio, alcanzando picos del 50.1 % en condiciones de flujo moderado.

5.2. Impacto Ambiental y Seguridad Vial

Uno de los resultados más significativos es el denominado *dividendodecoordinacion* en términos de sostenibilidad. El control multivariable unificado es 1.5 veces más efectivo que los controles aislados, logrando una reducción de emisiones de CO₂ de entre el 27.89 % y el 30.85 % (Iza et al., 2026a). Este descenso se atribuye a la eliminación de ciclos innecesarios de parada y arranque (stop-and-go) mediante el ajuste dinámico de la velocidad. En cuanto a la seguridad, el sistema basado en PPO reduce la Probabilidad de Accidentes (ADP) en un 49.73 % de media. En escenarios de flujo medio, esta reducción de riesgo llega al 69.83 %, demostrando que la inteligencia adaptativa estabiliza el flujo vehicular antes de que se alcancen densidades críticas de conflicto.

5.3. Robustez Arquitectónica y Filtro Deóntico

La evaluación de la arquitectura CICADA se centró en la viabilidad técnica y la seguridad lógica del sistema distribuido. Los resultados de rendimiento del bus de datos (DDS) confirmaron una escalabilidad lineal: incluso con 64 nodos activos, la latencia se mantuvo por debajo de los 30 ms, cumpliendo los requisitos para operaciones en tiempo real. La validación de la capa de lógica deóntica mediante pruebas de estrés de Monte Carlo arrojó los siguientes datos clave. El filtro interceptó y bloqueó el 100 % de las acciones ilegales propuestas por la red neuronal durante su fase de exploración. El proceso de validación normativa promedió apenas 2.1 ms, un impacto despreciable en el ciclo de control de 10 Hz. Ante una pérdida del 15 % de los tópicos de datos, el sistema mantuvo una eficiencia operativa superior al 85 %, demostrando una degradación elegante frente al colapso total de los sistemas centralizados tradicionales.

La viabilidad de implementar este sistema en infraestructuras urbanas críticas depende de su capacidad para gestionar la incertidumbre y los fallos sin comprometer la seguridad vial. A continuación se destaca cómo la arquitectura cubre estos aspectos:

- Seguridad Operacional y Control Neuro-Simbólico: el control físico de la infraestructura (como semáforos o señales de velocidad) está siempre subordinado a la legalidad del sistema. Al integrar una capa de lógica deóntica que actúa como un "firewall lógico", se garantiza que si el agente de control propone acciones no previstas estas son interceptadas antes de ser ejecutadas. Esto elimina el riesgo de comportamientos erráticos típicos de las soluciones basadas exclusivamente en redes neuronales que actúan como una "caja negra".
- Resiliencia ante Fallos de Comunicación y Saturación: a diferencia de las arquitecturas centralizadas donde un fallo en el nodo central colapsa la red, CICADA utiliza una pizarra distribuida. Esta topología de interconexión permite que ante la pérdida de sincronización de datos, los nodos no afectados compensan la falta de información global mediante políticas de control local evitando las inacciones de control de tráfico.
- Robustez ante Incertidumbre Sensorial: Para mitigar fallos en sensores físicos o pérdida de conectividad, el sis-

tema emplea modelos de estimación basados en la correlación del historial de datos y acciones de los nodos vecinos. Esto asegura que el mediador pueda inferir el estado de una zona afectada a partir de los datos de su entorno cercano.

Consecuentemente, el sistema ofrece una solución resistente para gestionar el tráfico de las ciudades. Gracias al diseño de datos compartidos y al uso de reglas lógicas, el sistema puede seguir trabajando de forma segura aunque fallen algunos sensores o se sature la red. Este enfoque garantiza que la inteligencia artificial nunca tome decisiones peligrosas o ilegales, ya que siempre está supervisada por un filtro de seguridad.

5.4. Estudio de Ablación y Generalización

El estudio de ablación realizado para identificar el peso de cada variable de control reveló que el control de velocidad es el componente individual más crítico; su eliminación reduce el rendimiento global del sistema de forma más drástica que la eliminación del control de parking o giros. Sin embargo, la integración de las tres variables proporciona una ganancia incremental del 32 % sobre el control monovariable (Iza et al., 2026a).

5.5. Límites de Validez y Desafíos para la Implementación Real

La investigación reconoce que la transición del entorno de simulación al mundo físico presenta condicionantes críticos que definen sus límites de validez actuales. La validación se sitúa en un entorno de simulación de alta fidelidad (TRL 2-3). La transferencia a entornos reales (TRL 6-9) requerirá considerar variables no modeladas íntegramente, entre otras, las condiciones climáticas extremas o la degradación física del hardware sensorial.

También se requiere de un modelado del comportamiento humano. Aunque SUMO es una herramienta avanzada, sus modelos de seguimiento vehicular pueden no capturar plenamente la irracionalidad o el incumplimiento normativo de conductores reales. Por ello, se propone una implementación por fases donde el sistema actúe inicialmente a través de señalización digital (paneles LED) antes de una integración total en vehículos conectados en un futuro a largo plazo. Se debe considerar que la eficacia máxima de la arquitectura está ligada a la penetración de comunicaciones V2I y a la calidad de la sensoria urbana. En escenarios con baja disponibilidad tecnológica, el sistema debe apoyarse en métricas agregadas (bucles de inducción) en lugar de trayectorias individuales, lo que podría limitar su precisión en la optimización de flujos. Existe un límite físico difícil de salvar, consistente en las redes con saturación extrema, la optimización inteligente de las reglas de tráfico puede declinar en eficacia si no se acompaña de cambios estructurales en la geometría de la red, ya que la capacidad de la vía es finita.

6. Análisis de Resultados Experimentales

Para validar la arquitectura, se realizaron simulaciones de alta fidelidad utilizando el entorno SUMO sobre una topología

de cuadrícula tipo Manhattan de 4x4, compuesta por 16 nodos de control. El desempeño del sistema multivariable unificado (PPO) fue evaluado frente a dos líneas base: un control estático convencional (B) y un control adaptativo monovariable basado en reglas de velocidad (SL) (Iza et al., 2026a).

6.1. Comparativa de Desempeño Cuantitativo

Los experimentos demuestran que la gestión coordinada de variables produce una mejora estadística significativa ($p < 0,001$) en todos los indicadores clave de rendimiento (KPIs). En la Tabla 1 se detallan los valores medianos obtenidos en el escenario de máxima demanda vehicular (Escenario 4, saturación crítica), donde la resiliencia de la arquitectura es más evidente.

Tabla 1: Comparativa de indicadores en escenario de alta saturación (Medianas $\pm$ DT) para los KPI: Longitud de Cola (QL), Tiempo de Espera (WT), Emisiones CO_2 (CO_2); Tiempo de Viaje (ATT), y Prob. Accidentes (ADP)

KPI	Control (B)	PPO	Mejora %
QL	34.87 $\pm$ 6.21 m	24.87 $\pm$ 3.45 m	↓ 28.7 %
WT	41.57 $\pm$ 7.42 s	27.63 $\pm$ 4.56 s	↓ 33.5 %
CO_2	36.88 $\pm$ 7.82 g/s	22.55 $\pm$ 6.23 g/s	↓ 38.8 %
ATT	551.53 $\pm$ 86.6 s	469.63 $\pm$ 74.1 s	↓ 14.8 %
ADP	47.10 $\pm$ 8.94 %	23.98 $\pm$ 7.34 %	↓ 49.1 %

6.2. Dividendo de Coordinación

Un hallazgo fundamental de la investigación es que el control multivariable no actúa meramente como la suma de sus componentes individuales. El estudio de ablación realizado revela que la gestión conjunta de velocidad, estacionamiento y giros proporciona una ganancia incremental del 32 % sobre los enfoques que operan con una sola variable de control. Esta sinergia se explica físicamente porque el sistema utiliza la velocidad dinámica como un amortiguador, estabilizando el flujo antes de que los vehículos alcancen las colas semafóricas, eliminando los ciclos de parada y arranque que disparan las emisiones y el riesgo de colisión.

6.3. Convergencia y Estabilidad del Modelo

El análisis de las curvas de aprendizaje confirma que el sistema alcanza una recompensa positiva y estabilidad operativa a partir de los 150,000 timesteps. Durante esta fase, el intervalo de confianza del 95 % se estrecha significativamente, manteniendo un coeficiente de variación inferior al 6 % ante diferentes semillas aleatorias. Este comportamiento garantiza que los beneficios observados son una propiedad persistente del modelo neuro-simbólico propuesto y no el resultado de una inicialización favorable.

6.4. Validación

La validación utiliza DRL (PPO) en un escenario Manhattan 4x4 simulado en SUMO. Los agentes (nodos de control multipropósito) observan la ocupación y velocidad del entorno para ejecutar acciones multivariables sobre semáforos, límites de velocidad, giros y parking. La recompensa optimiza el flujo vehicular minimizando colas y emisiones, siempre bajo supervisión de un filtro deóntico. La metodología de medición de la fluidez compara el sistema unificado frente a controles estáticos mediante indicadores clave (KPIs) como el tiempo medio

de viaje (ATT) y de espera (WT), logrando mejoras de hasta el 24,85 % y 38,09 % respectivamente.

7. Discusión

La investigación presentada consolida un cambio de paradigma en la gestión del tráfico urbano, demostrando que la transición de controladores monovariantes estáticos hacia arquitecturas distribuidas e inteligentes es fundamental para abordar la complejidad de las ciudades modernas. A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

- **Eficacia del Control Multivariable:** La integración coordinada de semáforos, límites de velocidad y gestión de aparcamiento supera sistemáticamente a los enfoques aislados. El denominado "dividendo de coordinación" se traduce en una mejora del rendimiento global del sistema de hasta un 32 % en comparación con el control de una única variable.
- **Optimización de la Movilidad y Sostenibilidad:** La arquitectura ha demostrado una capacidad robusta para reducir el tiempo medio de viaje hasta en un 24.85 % y las emisiones de CO₂ en más de un 30 %. Estos beneficios son el resultado directo de la eliminación de ciclos de parada y arranque innecesarios mediante el ajuste dinámico de la velocidad.
- **Seguridad y Fiabilidad Normativa:** El uso de lógica deontica como capa de supervisión garantiza que las decisiones tomadas por algoritmos de aprendizaje por refuerzo (DRL) cumplan estrictamente con la normativa vigente. El filtro deontico ha demostrado ser infalible en la interceptación de acciones ilegales, manteniendo la estabilidad del sistema con un impacto computacional mínimo.
- **Escalabilidad y Resiliencia:** La arquitectura CICADA, apoyada en un bus de datos de alta velocidad y un modelo de pizarra distribuida, presenta una escalabilidad lineal y una notable resiliencia ante la pérdida de datos, manteniendo una eficiencia operativa superior al 85 % en condiciones de degradación de red.

Estas mejoras demuestran cómo la distribución de la inteligencia básica embebida en dispositivos, unida a la coordinación del conocimiento y las acciones permiten una optimización muy elevada de un problema de control.

8. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, y basándose en la visión conceptual de la misión del sistema (Figura 2), se plantea la expansión de las capacidades de actuación de la arquitectura CICADA mediante la implementación de las siguientes áreas de control. Implementación de permisos dinámicos para cambios de dirección y regulación de acceso a zonas restringidas según el estado de la red. Desarrollo de protocolos de prioridad que

permitan coordinar el resto de las variables de tráfico para facilitar el tránsito rápido y seguro de ambulancias o servicios de rescate. Optimización del flujo mediante la gestión de cambios de sentido en avenidas con más de un carril, permitiendo una reconfiguración dinámica de la calzada en función de la demanda vehicular predominante. Estas futuras implementaciones permitirán que el sistema evolucione hacia una gestión urbana todavía más holística, sentando las bases para una infraestructura plenamente adaptativa en el contexto de las ciudades inteligentes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del proyecto Sistemas informáticos industriales confiables en la era de la computación continua (PID2024-155230OB-C42) concedido por la Agencia Estatal de Investigación.

Referencias

- Abboud, K., Omar, H. A., Zhuang, W., 2016. Interworking of dsrc and cellular network technologies for v2x communications: A survey. *IEEE transactions on vehicular technology* 65 (12), 9457–9470.
- Chu, T., Wang, J., Codecà, L., Li, Z., 2019. Multi-agent deep reinforcement learning for large-scale traffic signal control. *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 21 (3), 1086–1095.
- Gartner, N. H., 1983. OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control. No. 906.
- Goodall, N. J., Smith, B. L., Park, B., 2013. Traffic signal control with connected vehicles. *Transportation Research Record* 2381 (1), 65–72.
- Hunt, P., Robertson, D., Bretherton, R., Winton, R., 1981. Scoot-a traffic responsive method of coordinating signals. Tech. rep.
- Iza, C., Iza, D., Posadas-Yagüe, J.-L., Poza-Lujan, J.-L., 2026a. Coordinated optimization of speed, parking, and turns in an integrated urban traffic system. *Expert Systems with Applications* 323, 132249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.132249>
- Iza, C., Iza, J., Posadas-Yagüe, J.-L., Poza-Lujan, J.-L., 2026b. Urban traffic optimization through traffic rule changes at intersections. In: Min-Allah, N., Alissa, K., Sitek, P., Sano, M., Rodríguez, S., Nongailard, A. (Eds.), *Distributed Computing and Artificial Intelligence*, 22nd International Conference. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 361–371.
- Iza, C., Iza, J., Posadas-Yagüe, J.-L., Poza-Lujan, J.-L., Dec. 2025a. Integration of speed control and parking management in sumo for urban traffic optimization. *ADCAI: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal* 14, e33585. DOI: [10.14201/adcaij.33585](https://doi.org/10.14201/adcaij.33585)
- Iza, C., Uribe-Chavert, P., Posadas-Yagüe, J.-L., Poza-Lujan, J.-L., 2025b. A scalable control solution for traffic signal coordination for adaptable and responsiveness streets. In: Marreiros, G., Grande, L., Llerena, J. P., Conceição, L., Ko, H., Plaza, M., Ricca, M. (Eds.), *Distributed Computing and Artificial Intelligence*, Special Sessions II, 21st International Conference. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 272–278.
- Iza Guzmán, C. F., 2023. Dispositivo de regulación del tráfico para optimizar el tránsito en intersecciones.
- Lowrie, P., 1990. Scats, sydney co-ordinated adaptive traffic system: A traffic responsive method of controlling urban traffic.
- Moreno-Malo, J., Posadas-Yagüe, J.-L., Cano, J. C., Calafate, C. T., Conejero, J. A., Poza-Lujan, J.-L., 2024. Improving traffic light systems using deep q-networks. *Expert Systems with Applications* 252, 124178.
- Oroojlooy, A., Nazari, M., Hajinezhad, D., Silva, J., 2020. Attendlight: Universal attention-based reinforcement learning model for traffic signal control. *Advances in Neural Information Processing Systems* 33, 4079–4090.
- Waheed, A., Krishna, P. V., Sadoun, B., Obaidat, M., et al., 2021. Learning automata and reservation based secure smart parking system: Methodology and simulation analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory* 106, 102205.
- Zhang, Y., Quinones-Grueiro, M., Zhang, Z., Wang, Y., Barbour, W., Biswas, G., Work, D., 2023. Marvel: Multi-agent reinforcement-learning for large-scale variable speed limits. *arXiv preprint arXiv:2310.12359*.