

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



"ALGORITMOS DE CONTROL DE
CONGESTIÓN PARA COMUNICACIONES
VEHICULARES V2X EN ESCENARIOS
HETEROGÉNEOS"

TRABAJO FIN DE GRADO

Junio - 2026

AUTOR: Javier Tortosa García

DIRECTOR/ES: Miguel Sepulcre Ribes

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1 Vehículo autónomo conectado	11
2.2 Servicios V2X.....	12
2.2.1 CAS.....	13
2.2.2 CPS.....	14
2.2.3 Otros Servicios V2X	16
2.3 Control de Congestión.....	17
3. DISEÑO DE CONTROL DE CONGESTIÓN EN ENTORNOS HETEROGÉNEOS .	24
3.1. DA: Adaptación Dinámica de Recursos Basada en la Demanda del Vehículo	25
3.2. DPA: Priorización de Servicios y Coordinación Distribuida.....	27
3.3 Interacción con los servicios V2X y distribución de recursos	29
4. IMPLEMENTACIÓN	32
4.1. Módulo RM.....	34
4.2. Servicios V2X.....	36
5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
5.1. Escenarios y configuración.....	38
5.1.1. Servicios V2X genéricos.....	39
5.1.2. Cooperative Awareness Service y Collective Perception Service	40
5.1.3. Escenarios de simulación	42
5.1.4. Configuración del RM y parámetros Adaptive DCC	43

5.2. Evaluación de servicios V2X genéricos en escenario estático.....	45
5.2.1. Análisis de la estabilidad y convergencia.....	46
5.2.2. Análisis de la equidad en la asignación de recursos.....	48
5.3. Evaluación de CAM y CPM en escenario en autovía.....	56
5.3.1. Análisis de la estabilidad y convergencia.....	58
5.3.2. Análisis de la equidad y asignación de recursos.....	60
5.4. Análisis y comparativa	66
5.4.1. Evaluación del mecanismo de referencia: RM base	67
5.4.2. Impacto de la adaptación dinámica de β : DA.....	67
5.4.3. Solución integral mediante priorización dinámica: DPA	68
5.4.4. Tabla resumen comparativa	69
6. CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA.....	73

RESUMEN

Durante los últimos años, el desarrollo de los vehículos autónomos conectados ha impulsado el crecimiento de las comunicaciones vehiculares cooperativas, convirtiéndose en un elemento fundamental para mejorar la seguridad vial, la eficiencia del tráfico y las capacidades de conducción autónoma. Estos sistemas se basan en las comunicaciones V2X (*Vehicle-to-Everything*), que permiten el intercambio de información entre vehículos e infraestructuras mediante distintos servicios cooperativos. Sin embargo, el incremento progresivo del número de vehículos conectados y la aparición de nuevos servicios V2X con requisitos de comunicación heterogéneos plantean importantes desafíos relacionados con la gestión eficiente de los recursos radioeléctricos y el control de la congestión en el canal inalámbrico. Los mecanismos de control de congestión actualmente estandarizados por ETSI, como Adaptive DCC (*Decentralized Congestion Control*), fueron diseñados bajo hipótesis de tráfico relativamente homogéneas y no consideran explícitamente las diferentes necesidades de transmisión ni la prioridad de los servicios V2X. Como consecuencia, su aplicación en escenarios heterogéneos puede conducir a asignaciones ineficientes de los recursos de comunicación.

En este trabajo se analizan las limitaciones de los mecanismos de control de congestión existentes y se estudia la nueva arquitectura de gestión de recursos propuesta por ETSI para la Release 2. Sobre esta arquitectura se desarrollan dos mecanismos de gestión de recursos distribuidos. El primero, DA (*Demand-Aware*), adapta dinámicamente la asignación de recursos a las necesidades reales de transmisión de cada vehículo. El segundo, denominado DPA (*Demand-Priority-Aware*), extiende el enfoque anterior incorporando mecanismos de priorización y coordinación distribuida que permiten garantizar un tratamiento preferente a los servicios más críticos bajo condiciones de congestión.

Las soluciones propuestas se han implementado en un entorno de simulación basado en OMNeT++ con los frameworks Veins e INET, integrando un nuevo módulo de gestión de recursos dentro de la estación ITS y modificando los servicios V2X para adaptarse dinámicamente a las restricciones de transmisión calculadas.

ABSTRACT

In recent years, the development of connected autonomous vehicles has driven the growth of cooperative vehicular communications, becoming a key enabler for improving road safety, traffic efficiency, and autonomous driving capabilities. These systems rely on V2X (*Vehicle-to-Everything*) communications, which enable information exchange among vehicles and infrastructure through a variety of cooperative services. However, the increasing number of connected vehicles and the emergence of new V2X services with heterogeneous communication requirements introduce significant challenges related to the efficient management of radio resources and congestion control in the wireless channel.

Current congestion control mechanisms standardized by ETSI, such as Adaptive DCC (*Decentralized Congestion Control*), were designed under relatively homogeneous traffic assumptions and do not explicitly consider the different transmission requirements or priorities of V2X services. As a result, their application in heterogeneous scenarios may lead to inefficient communication resource allocation.

This work analyzes the limitations of existing congestion control mechanisms and studies the new resource management architecture proposed by ETSI for Release 2. Based on this architecture, two distributed resource management mechanisms are developed. The first one, DA (*Demand-Aware*), dynamically adapts resource allocation according to the actual transmission requirements of each vehicle. The second one, DPA (*Demand-Priority-Aware*), extends the previous approach by incorporating prioritization and distributed coordination mechanisms that provide preferential treatment to the most critical services under congested channel conditions.

The proposed solutions have been implemented in a simulation environment based on OMNeT++ using the Veins and INET frameworks, integrating a new resource management module within the ITS station and extending the V2X services to dynamically adapt their transmission behavior according to the resource constraints imposed by the management system.

1. INTRODUCCIÓN

Durante estos últimos años se ha podido observar un crecimiento sostenido del número de vehículos en circulación, trayendo consigo un aumento de la congestión vial y de los accidentes de tráfico. La mayoría de los accidentes están asociados al factor humano, incluyendo errores de percepción, distracciones o decisiones inadecuadas. Este hecho ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a mejorar la seguridad vial y reducir la dependencia de la intervención humana en la conducción.

El vehículo autónomo emerge basando su funcionamiento en la percepción del entorno. Este vehículo tiene incorporados sensores como radares, cámaras o sistemas LiDAR que le permiten detectar y analizar su entorno en tiempo real, con esta información el vehículo puede tomar decisiones de forma automatizada. Sin embargo, estos sistemas presentan una limitación intrínseca, su capacidad de percepción se restringe al campo de visión directo de los sensores, lo que impide detectar elementos ocultos tras obstáculos como edificios, curvas o vehículos de gran tamaño.

Para superar estas restricciones, surge el vehículo autónomo conectado, en el que los vehículos no solo perciben el entorno mediante sensores locales, sino que también intercambian información con otros vehículos y con la infraestructura vial empleando comunicaciones móviles o inalámbricas. Este enfoque da lugar a los C-ITS (*Cooperative Intelligent Transportation Systems*) donde los vehículos pasan de ser entidades aisladas a formar parte de un sistema colaborativo [5]. De este modo, los vehículos pueden conocer su entorno más allá de lo percibido por sus propios sensores gracias a la información compartida por el resto de vehículos por otros vehículos y elementos de la infraestructura.

La información proporcionada por los sensores embarcados está limitada por la línea de visión disponible. Por eso es importante que los vehículos se comuniquen para que de esta forma todos los vehículos puedan anticiparse a los posibles eventos que suceden en la vía y consigan adaptarse aunque los propios sensores del vehículo no sean capaces de captar esa información. El intercambio de información en sistemas C-ITS se materializa a través de comunicaciones V2X (*Vehicle-to-Everything*), que incluye tanto la comunicación entre vehículos V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) como con la infraestructura V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*).

Dentro de este tipo de comunicación, existen distintos tipos de mensajes estandarizados que permiten compartir información relevante para la seguridad y la eficiencia del tráfico. Estos mensajes están definidos en Europa por el organismo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Por un lado, los CAM (*Cooperative Awareness Message*) constituyen el mecanismo básico de comunicación [6]. Estos mensajes se transmiten de forma continua, casi periódica e incluyen información de la posición, la velocidad y dirección del vehículo. Por otro lado, los mensajes CPM (*Collective Perception Message*) representan un nivel más avanzado de comunicación [7]. En estos mensajes el vehículo comparte información sobre los objetos detectados por sus sensores, como otros vehículos, peatones u obstáculos. Los mensajes CPM contienen mayor cantidad de datos y, por tanto, generan una carga superior en el canal de comunicación.

Este tipo de comunicación debe estar habilitada en todo momento para que no se vea comprometida la seguridad vial. Sin embargo, el canal inalámbrico puede congestionarse debido a la alta cantidad de mensajes transmitidos por los vehículos autónomos conectados, generando colisiones entre los mensajes y perdiendo eficiencia a la hora de transmitir información. Para hacer frente a este problema, ETSI también especifica los mecanismos de control de congestión y las tecnologías necesarias para mitigar la saturación del canal inalámbrico.

ETSI estructura sus especificaciones en diferentes *Releases* [10]. En la Release 1 de ETSI, orientada a los servicios de concienciación básica (*Day 1 Services*), se establecieron los cimientos de la gestión de la congestión mediante mecanismos de DCC (*Decentralized Congestion Control*). Estos algoritmos de la Release 1 [10] monitorizan constantemente la carga del canal, métrica conocida como *Channel Busy Ratio* o CBR, y si detectan saturación, obligan a los vehículos a reducir la frecuencia de transmisión de sus mensajes. De este modo, la Release 1 mitiga las colisiones en escenarios densos, sacrificando la tasa de actualización de los datos de posicionamiento básico para salvaguardar la estabilidad de la red inalámbrica.

El despliegue de vehículos con capacidad V2X ya ha comenzado con la Realase 1 y se espera que se acelere en los próximos años [1]. Prueba de ello es la inclusión de los sistemas V2X en el Euro NCAP [2], lo cual incentivará a los fabricantes de vehículos a su instalación en futuros vehículos. En paralelo, se están definiendo e introduciendo progresivamente en los vehículos un número cada vez mayor de servicios V2X. Estos servicios corresponden a aplicaciones cooperativas que permiten a los vehículos intercambiar información con el objetivo de mejorar la seguridad vial, la eficiencia del tráfico o la percepción del entorno. Cada servicio puede generar diferentes tipos de mensajes y presentar requisitos de comunicación específicos en términos de frecuencia de transmisión, tamaño de los paquetes o prioridad. Además de los problemas derivados de la elevada densidad de tráfico, las futuras redes V2X deberán hacer frente a un nuevo desafío relacionado con la heterogeneidad de los vehículos y de los servicios soportados.

A medida que evolucionan los sistemas C-ITS, los vehículos incorporan capacidades sensoriales y aplicaciones cada vez más avanzadas, lo que provoca diferencias significativas en los requisitos de comunicación y en la cantidad de información transmitida. Como resultado, las futuras redes V2X se caracterizarán por la coexistencia de vehículos heterogéneos, no sólo en cuanto a sus capacidades, sino también en el número y tipo de servicios V2X que soportan. Incluso cuando los vehículos implementan los mismos servicios, sus requisitos de recursos pueden diferir significativamente. Un ejemplo claro es el servicio de percepción colectiva [7] que genera los mensajes CPMs, el CPS (*Collective Perception Service*), donde los vehículos equipados con sensores más avanzados son capaces de detectar un mayor número de objetos, lo que se traduce directamente en un aumento de los requisitos de transmisión. Esta situación plantea nuevos retos para los mecanismos tradicionales de control de congestión, diseñados inicialmente bajo hipótesis de tráfico más homogéneas.

El control de congestión en los sistemas V2X es un requisito fundamental para garantizar que el canal inalámbrico compartido permanezca estable y operativo [3]. Los mecanismos de control de congestión existentes, incluidos los estandarizados hasta la fecha, se han centrado principalmente en mantener la carga del canal dentro de límites aceptables y en garantizar la equidad entre vehículos. Sin embargo, estos mecanismos suelen asumir demandas de tráfico homogéneas y no abordan explícitamente los retos que introducen las configuraciones de servicios heterogéneas y los requisitos de recursos que varían

dinámicamente. Como consecuencia, los enfoques actuales pueden fallar al intentar dar soporte eficiente a la coexistencia de diversos servicios y vehículos V2X, especialmente cuando es necesario considerar prioridades de servicio y demandas de recursos asimétricas.

Este trabajo aborda estos desafíos proponiendo un marco de gestión de recursos distribuido que tiene en cuenta explícitamente las demandas de servicios heterogéneas y variables en el tiempo en las redes V2X. Estos aspectos están siendo analizados activamente en la ETSI como parte de la evolución hacia la Release 2 [4], lo que refleja su relevancia para los futuros despliegues V2X. Las soluciones propuestas extienden progresivamente los mecanismos de control de congestión existentes para dar soporte a una gestión de recursos consciente de la demanda y de la prioridad, preservando al mismo tiempo la estabilidad de la carga del canal y la retrocompatibilidad.

El entorno de simulación elegido para realizar la implementación de este trabajo ha sido OMNeT++ [15] junto con los frameworks Veins [16] e INET. Estas herramientas proporcionan un entorno de código abierto utilizado en el ámbito de las redes vehiculares, permitiendo modelar de forma realista las comunicaciones inalámbricas V2X. Veins gestiona simulaciones de tráfico vehicular y comunicaciones de red, mientras que INET proporciona modelos detallados de protocolos y tecnologías de comunicación. OMNeT++ modela los sistemas de comunicación mediante una arquitectura basada en módulos jerárquicos. Cada entidad funcional del sistema se implementa como un módulo independiente capaz de intercambiar mensajes con otros módulos de la simulación. Los módulos pueden contener a su vez otros submódulos, permitiendo construir arquitecturas complejas mediante la composición de componentes más simples. La estructura de los módulos y sus interconexiones se define mediante el lenguaje NED de OMNeT++, mientras que el comportamiento interno de cada módulo se implementa mediante clases desarrolladas en lenguaje C++.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera. Este primer capítulo donde se introduce el vehículo autónomo conectado, las redes de comunicación V2X, se menciona la relevancia del control de congestión y se explica el objetivo de este trabajo. El capítulo 2 presenta el estado del arte relacionado con el vehículo autónomo conectado, los servicios V2X con sus respectivos mensajes y los mecanismos de control de congestión existentes. El Capítulo 3 describe la metodología y las soluciones propuestas en este trabajo. En

particular, se presentan los mecanismos de gestión de recursos desarrollados para dar soporte a comunicaciones V2X heterogéneas, incluyendo las extensiones *demand-aware* y *priority-aware* aplicadas sobre los mecanismos de control de congestión existentes y la interacción de los servicios V2X y el gestor de recursos. El Capítulo 4 detalla la implementación de dichas soluciones en el entorno de simulación utilizado. El Capítulo 5 presenta los escenarios de simulación y analiza los resultados obtenidos para evaluar el rendimiento de las soluciones propuestas. Finalmente, el Capítulo 6 recoge las principales conclusiones del trabajo y las posibles líneas futuras de investigación.

Este trabajo ha sido presentado en ETSI en el grupo de expertos [Specialist Task Force \(STF\) 692 sobre ITS Radio Resource Management](#) y en el *CAR 2 CAR Communication Consortium* en la sesión sobre *Resource Management* de la #33 *CAR 2 CAR Week* (Marzo 2026). Además, el trabajo ha sido publicado en un congreso internacional: M. Sepulcre, J. Tortosa-Garcia, J. Gozalvez, “Demand- and Priority-Aware Adaptive Congestion Control for Heterogeneous V2X Service Requirements”, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference VTC2026-Spring, 9-13 June 2026, Nice, France.

2. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo presenta el estado del arte de las comunicaciones vehiculares cooperativas en la materia relativa a este proyecto. En primer lugar, se profundiza en el concepto de vehículo autónomo conectado y los sistemas C-ITS. A continuación, se describen los principales servicios V2X y los mensajes utilizados para el intercambio de información. Finalmente, se analizan los mecanismos de control de congestión existentes, destacando sus características, limitaciones y los retos que plantean los escenarios V2X heterogéneos.

2.1 Vehículo autónomo conectado

Las redes de comunicaciones vehiculares siguen una arquitectura basada en la pila de protocolos C-ITS, estructurada en diferentes capas funcionales. Dicha arquitectura se compone principalmente de la capa de acceso, la capa de red y transporte, y la capa *facilities*. La capa de acceso combina las funcionalidades de las capas física y de enlace del modelo OSI [5], utilizando tecnologías específicamente adaptadas para entornos vehiculares que permiten la comunicación directa entre vehículos, sin necesidad de infraestructura. Entre ellas destacan IEEE 802.11p e IEEE 802.11bd, que evolucionan el estándar IEEE 802.11 para soportar comunicaciones V2X de baja latencia y elevada movilidad. Asimismo, el 3GPP ha definido también las tecnologías para comunicación directa entre vehículos LTE-V2X y 5G NR V2X. Todas ellas operan en la banda reservada de 5.9 GHz, comprendida entre 5.85 GHz y 5.925 GHz, que está destinada a aplicaciones ITS relacionadas principalmente con seguridad vial y eficiencia del tráfico.

La pila de protocolos conocida como arquitectura ITS-S está compuesta por cuatro bloques funcionales principales y se muestra en la Figura 1. El bloque de Aplicaciones contiene la lógica de las aplicaciones ITS y los casos de uso que proporcionan servicios al usuario final. El bloque de *Facilities* actúa como una capa intermedia que ofrece funcionalidades y servicios comunes reutilizables por las aplicaciones responsables de la generación y el procesamiento de mensajes cooperativos. El bloque de *Networking & Transport* se encarga del encaminamiento y transporte de la información a través de la red, mientras que el bloque de Access implementa las tecnologías de acceso al medio y las comunicaciones inalámbricas utilizadas para el intercambio de datos [5].

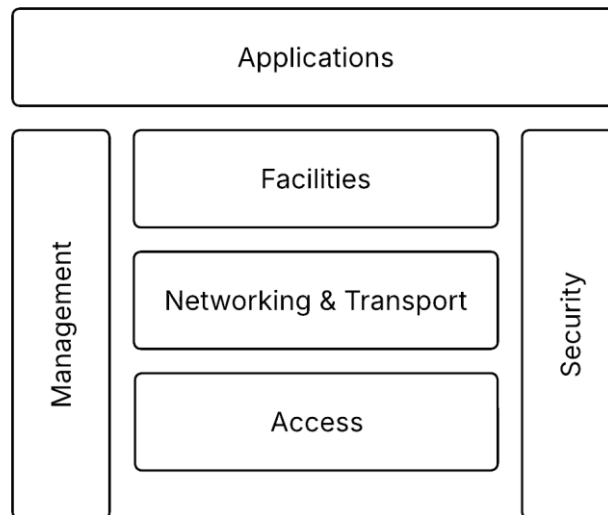


Figura 1. Arquitectura de una estación ITS

2.2 Servicios V2X

En el paradigma de los Sistemas C-ITS, las aplicaciones orientadas a la seguridad vial y a la gestión del tráfico se sustentan sobre el despliegue de los denominados servicios V2X. Estos servicios definen los protocolos, las reglas de generación y los formatos de intercambio de información que permiten a las estaciones ITS interactuar con su entorno. Dentro del marco tecnológico actual, la estandarización europea liderada por ETSI ha evolucionado desde soluciones enfocadas en la pura conectividad e intercambio de parámetros cinemáticos elementales, hasta arquitecturas complejas orientadas a dar soporte a la conducción automatizada. Con el objetivo de contextualizar el marco operativo de este trabajo, en las siguientes secciones se analizan en detalle los dos servicios más relevantes y con mayor impacto en la carga del canal inalámbrico en entornos vehiculares: el Servicio de Conciencia Cooperativa o CAS (*Cooperative Awareness Service*), y el Servicio de Percepción Colectiva o CPS, diseñado para habilitar la conducción automatizada y la sensorización remota compartida.

2.2.1 CAS

El servicio de conciencia cooperativa CAS constituye el pilar fundamental y primario de las comunicaciones V2X en su Release 1 [6]. El objetivo principal de este servicio es proporcionar a las estaciones ITS circundantes información de la presencia y el estado del resto de actores en la vía. Esta interacción se materializa mediante la difusión broadcast de los mensajes de conciencia cooperativa (CAM).

La estructura general de un CAM se muestra en la Figura 2. Se compone de una cabecera común que incluye la información correspondiente a la versión del protocolo, el tipo de mensaje y el identificador único de la estación ITS emisora, seguida de contenedores donde se incluye la información. Los contenedores obligatorios son el contenedor básico y el de alta frecuencia, el resto son opcionales. El contenedor básico incluye parámetros estáticos e identificativos obligatorios del emisor, como el tipo de estación ITS y la posición geográfica más reciente. Por otra parte, el contenedor de alta frecuencia almacena las variables cinemáticas del vehículo que cambian con rapidez como la velocidad o la dirección. El contenedor de baja frecuencia agrupa datos operativos con menor tasa de variación, tales como el estado de los sistemas de iluminación. Por último, el contenedor de vehículo especial contiene información específica asociada al rol del vehículo emisor.

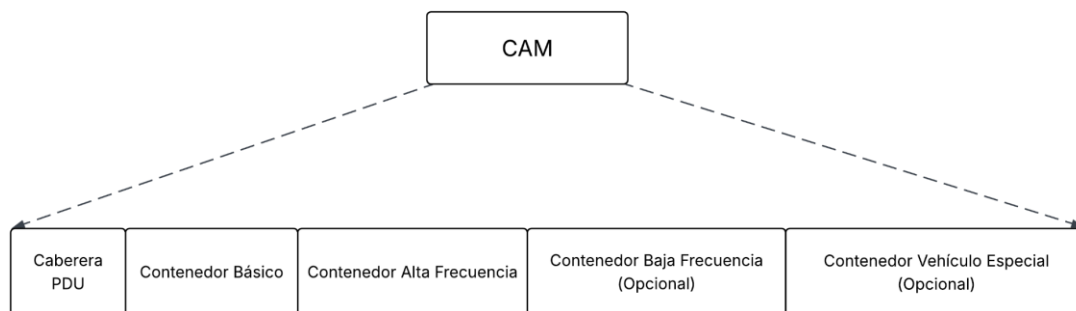


Figura 2. Estructura general del CAM

ETSI establece que el intervalo entre dos CAM consecutivos debe mantenerse entre 100 ms y 1 s. En condiciones normales, los CAM se transmiten periódicamente a baja frecuencia, pero cuando se detectan variaciones significativas en parámetros dinámicos del vehículo, como cambios de posición superiores a 4 m, variaciones de velocidad

mayores de 0,5 m/s o cambios de dirección superiores a 4°, la frecuencia de transmisión puede incrementarse hasta el máximo permitido.

2.2.2 CPS

La compartición cooperativa de información sensorial constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de aplicaciones avanzadas de conducción conectada y automatizada. Con el objetivo de dar soporte a este tipo de aplicaciones, ETSI ha definido el Servicio de Percepción Colectiva o CPS [7], basado en el intercambio periódico de mensajes CPM entre vehículos vecinos dentro del alcance de comunicación. Mientras que los mensajes CAM permiten compartir el estado y dinámica del vehículo emisor, los mensajes CPM amplían este concepto permitiendo transmitir información sobre los objetos detectados por los sensores embarcados del vehículo. La Figura 3 muestra la estructura general de un mensaje CPM, que puede incluir listas de objetos percibidos, información sobre la configuración y capacidades de los sensores utilizados, así como distintos parámetros asociados a los objetos detectados, como posición relativa, velocidad o clasificación del objeto.

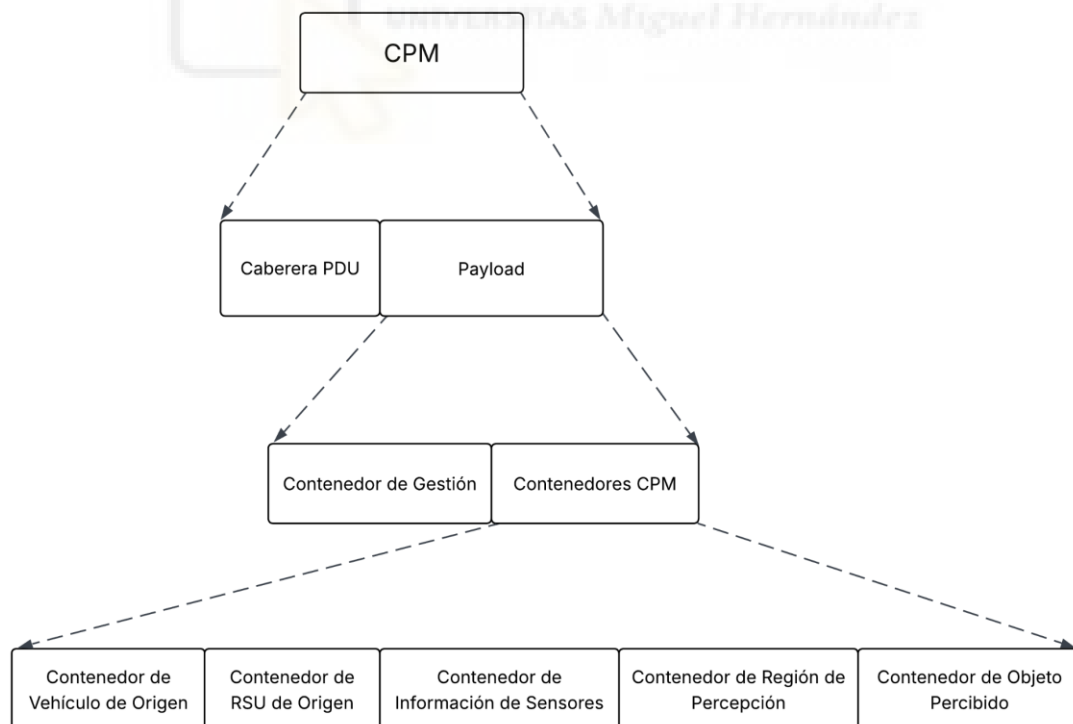


Figura 3. Estructura general del CPM

Los mensajes CPM también incorporan una cabecera común encargada de proporcionar la información básica necesaria para identificar y procesar correctamente el mensaje recibido. En la información útil del mensaje encontramos dos bloques principales, un bloque denominado *Management Container*, encargado de proporcionar la información básica necesaria para interpretar correctamente el resto de contenedores incluidos en el mensaje y otro bloque llamado *cpmContainers* que almacena el resto de contenedores encapsulados en una estructura denominada. El CPM puede incluir distintos tipos de contenedores en función del tipo de estación ITS emisora y de la información de percepción disponible. En el caso de vehículos, se incluye un *Originating Vehicle Container* con información relativa al vehículo emisor. Otro componente es el *Sensor Information Container*, utilizado para describir las características de los sensores embarcados responsables de la detección. Este contenedor puede incluir información relacionada con el tipo de sensor empleado, alcance de detección, orientación, campo de visión o precisión estimada. También, ETSI define mecanismos asociados a las regiones de percepción mediante el *Perception Region Container*, encargado de describir las áreas del entorno monitorizadas por los sensores del vehículo y posibles limitaciones de percepción. El contenedor principal corresponde al *Perceived Object Container*, es obligatorio y es el encargado de almacenar la información asociada a los objetos detectados por los sensores del vehículo. Para cada objeto percibido, el CPM puede incluir parámetros como la posición relativa respecto al vehículo emisor, velocidad, dirección de movimiento, dimensiones estimadas o clasificación del objeto, distinguiendo entre vehículos, peatones, ciclistas u otros elementos presentes en la vía. Dado que un único CPM puede contener múltiples objetos detectados simultáneamente, este contenedor suele representar la mayor parte del tamaño total del mensaje.

Además de las reglas de inclusión de objetos, ETSI define un proceso estructurado para la generación de mensajes CPM, denominado *CPM Generation Management*, representado. Este proceso se encarga de decidir cuándo debe generarse un nuevo CPM, qué información debe incluirse y cómo gestionar la carga producida sobre el canal inalámbrico. Uno de los aspectos más importantes definidos dentro de este proceso corresponde precisamente a las reglas de generación e inclusión de objetos en los mensajes CPM. Como he mencionado antes, en los mensajes CAM la frecuencia de transmisión es de 1 Hz, dependiendo de la dinámica del vehículo, puede aumentar a 10 Hz cuando se producen variaciones significativas en parámetros como posición,

velocidad o dirección. El CPS adopta un enfoque similar, pero aplicado individualmente a cada objeto detectado. De esta manera, la inclusión de objetos dentro de un CPM depende de cambios relevantes asociados a cada objeto percibido.

Debido a la gran cantidad de información que puede generarse en escenarios con elevada densidad de vehículos y objetos percibidos, resulta necesario priorizar qué información debe transmitirse. Con este objetivo surge el concepto de VoI (*Value of Information*), que representa la utilidad o relevancia asociada a una determinada información para los vehículos receptores. En el contexto del CPS, el VoI permite estimar la importancia de los distintos objetos detectados y priorizar la transmisión de aquellos que aportan un mayor beneficio para la percepción cooperativa. Aunque ETSI no define una métrica concreta para su cálculo dentro de la especificación CPS [7], el concepto se utiliza como base para diversos mecanismos de reducción de redundancia y selección de información desarrollados en el ámbito de la percepción colectiva. El valor asignado a un objeto suele depender de factores como su distancia, dinámica, nivel de incertidumbre o relevancia para las aplicaciones de seguridad y conducción cooperativa.

2.2.3 Otros Servicios V2X

Además de los servicios CAS y CPS descritos anteriormente, el ecosistema C-ITS contempla otros servicios cooperativos diseñados para intercambiar información específica entre vehículos e infraestructuras. Estos servicios permiten ampliar las capacidades de percepción, seguridad y eficiencia del sistema de transporte mediante el intercambio de información contextual adaptada a diferentes situaciones de conducción. Entre ellos destacan el servicio DENS (*Decentralized Environmental Notification Service*) [8], responsable de la generación y difusión de mensajes DENM, orientados a notificar eventos relevantes para la seguridad vial. Y el servicio MCS (*Maneuver Coordination Service*) [9], diseñado para facilitar la coordinación de maniobras entre vehículos conectados.

El servicio DENS permite notificar de forma cooperativa la ocurrencia de eventos relevantes en el entorno de circulación que pueden afectar a la seguridad o a la movilidad de otros usuarios de la vía. A diferencia de los mensajes CAM, que se transmiten periódicamente para informar del estado del vehículo, los mensajes DENM son generados

de forma orientada a eventos. Algunos ejemplos de situaciones que pueden desencadenar la generación de un DENM son accidentes, frenadas de emergencia, vehículos averiados, obstáculos en la calzada, condiciones meteorológicas adversas o trabajos en la vía.

Por otra parte, el servicio MCS tiene como objetivo facilitar la coordinación de maniobras entre vehículos conectados mediante el intercambio de información relacionada con las intenciones de conducción futuras. Mientras que los servicios CAS y CPS proporcionan información sobre el estado actual del vehículo y del entorno, MCS permite comunicar acciones planificadas, como cambios de carril, incorporaciones a una vía, adelantamientos o cruces en intersecciones.

Mediante este intercambio de intenciones, los vehículos pueden coordinar sus acciones de forma cooperativa y anticipada, reduciendo conflictos potenciales y mejorando tanto la seguridad como la eficiencia del tráfico. Este tipo de servicio adquiere una especial relevancia en escenarios de conducción automatizada y cooperativa, donde la coordinación entre vehículos resulta fundamental para ejecutar maniobras complejas de forma segura y eficiente. Además, el intercambio de intenciones futuras permite complementar la información proporcionada por los sensores embarcados y por los servicios de percepción cooperativa, proporcionando una visión más completa del comportamiento esperado de los vehículos del entorno.

2.3 Control de Congestión

ETSI define el DCC (*Decentralized Congestion Control*) como el mecanismo encargado de controlar la congestión, constituyendo además la base sobre la que se fundamenta este trabajo. DCC constituye uno de los mecanismos de control de congestión descentralizados más utilizados en redes vehiculares debido a su capacidad para mantener estable la carga del canal y garantizar un reparto equitativo de los recursos entre vehículos. En este contexto, el algoritmo se encarga de determinar la fracción máxima de recursos del canal que cada vehículo puede utilizar en función del estado de ocupación del medio inalámbrico.

El mecanismo DCC [10] definido por ETSI presenta una arquitectura distribuida y transversal (*cross-layer*) representada en la Figura 4, ya que actúa de forma coordinada

sobre distintas capas de la pila de protocolos. DCC integra funcionalidades repartidas entre las capas *Networking & Transport*, *Access* y *Management*, permitiendo adaptar dinámicamente diferentes parámetros de comunicación en función del estado de ocupación del canal. En la capa *Networking & Transport*, el mecanismo permite intercambiar información relacionada con el estado de congestión entre estaciones ITS vecinas y coordinar parámetros globales asociados al control de congestión. Por su parte, la capa *Access* constituye el componente más relevante dentro del funcionamiento de DCC, ya que se encarga de controlar directamente el acceso al medio inalámbrico mediante mecanismos de regulación de transmisión. Dentro de la capa *Access*, DCC implementa un mecanismo conocido como *gatekeeper*, encargado de regular cuándo puede transmitir cada estación ITS. Para ello, el sistema monitoriza continuamente el estado del canal inalámbrico mediante métricas como el CBR (*Channel Busy Ratio*) y adapta dinámicamente parámetros de transmisión con el objetivo de mantener estable la carga del canal y evitar situaciones de congestión. Finalmente, la entidad *Management* coordina el intercambio y gestión de los parámetros utilizados por los distintos componentes DCC distribuidos en la arquitectura ITS.

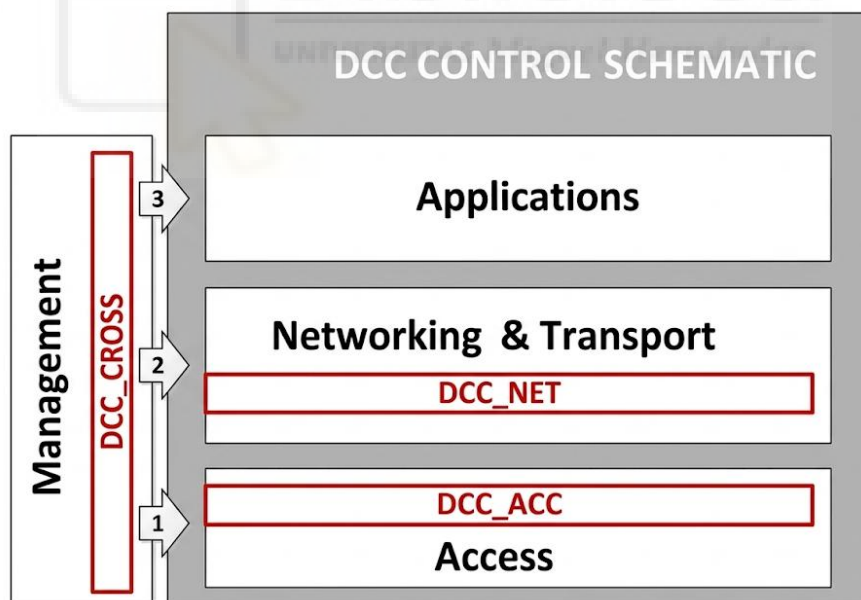


Figura 4. Arquitectura DCC

No obstante, la capa de *Facilities* quedó excluida de este lazo de control en la Release 1 de ETSI y pospuesta a futuros trabajos en Release 2. Aunque inicialmente se planteó la entidad denominada DCC_FAC, la arquitectura real se limitó a las capas de acceso, red y gestión. Como consecuencia, las aplicaciones generan sus mensajes de forma autónoma

e ignoran el estado del canal, obligando a las capas inferiores a descartar tráfico de manera indiscriminada cuando el medio se satura.

ETSI define dos enfoques principales para implementar mecanismos DCC en la capa Access: Reactive DCC y Adaptive DCC. Ambos mecanismos persiguen el mismo objetivo, mantener estable la ocupación del canal inalámbrico y evitar situaciones de congestión, pero difieren en la forma en la que regulan las transmisiones de los vehículos.

Reactive DCC se basa en una máquina de estados donde cada estación ITS modifica sus parámetros de transmisión en función de distintos umbrales de ocupación del canal. Dependiendo del nivel de CBR medido, el sistema transita entre diferentes estados de congestión, aplicando restricciones progresivamente más severas sobre la frecuencia de transmisión y el acceso al medio inalámbrico. Este enfoque presenta una implementación relativamente sencilla, aunque puede provocar cambios bruscos en el comportamiento del sistema y fenómenos de sincronización entre vehículos cuando múltiples estaciones reaccionan simultáneamente ante variaciones similares de congestión. Como alternativa, ETSI introdujo Adaptive DCC, implementando el algoritmo LIMERIC (*Linear Message Rate Integrated Control*) [11]. A diferencia del enfoque reactivo, Adaptive DCC emplea un mecanismo de retroalimentación lineal que adapta continuamente la utilización permitida del canal en función de la carga observada. Gracias a esta adaptación progresiva, el algoritmo reduce las oscilaciones del sistema y evita comportamientos cíclicos o sincronizaciones indeseadas entre vehículos vecinos. Además, Adaptive DCC permite alcanzar un reparto más equitativo de los recursos disponibles, manteniendo la ocupación del canal próxima a un valor objetivo incluso bajo condiciones de tráfico altamente dinámicas. Debido a sus superiores propiedades de estabilidad, convergencia y equidad en la utilización de los recursos del canal, Adaptive DCC ha sido adoptado por ETSI como el mecanismo de control de congestión de referencia dentro de los estándares actuales.

El funcionamiento de Adaptive DCC se basa en la monitorización periódica de la carga del canal mediante la métrica CBR, que representa la fracción de tiempo durante la cual el canal permanece ocupado. A partir de esta medida, cada vehículo adapta dinámicamente el parámetro δ , el cual representa la máxima fracción de tiempo que la estación ITS puede utilizar el canal inalámbrico para transmitir. La actualización periódica de δ se realiza mediante la ecuación de control propuesta por LIMERIC:

$$\delta(t) = (1 - \alpha) \cdot \delta(t - \Delta T) + \beta \cdot (CBR_{target} - CBR(t)) \quad (1)$$

donde $\delta(t)$ representa la fracción máxima de utilización del canal permitida en el instante t , $CBR(t)$ corresponde a la ocupación del canal medida localmente y CBR_{target} representa el nivel objetivo de carga definido por ETSI. Los parámetros α y β controlan el comportamiento dinámico del algoritmo, determinando el compromiso entre velocidad de convergencia, estabilidad y agresividad de adaptación frente a cambios en la congestión del canal. Cuando el nivel de ocupación observado es inferior al valor objetivo, el algoritmo incrementa progresivamente el valor de δ , permitiendo una mayor utilización del canal. Por el contrario, si la carga medida supera el umbral deseado, el valor de δ se reduce para disminuir la cantidad de tráfico generado por el vehículo.

ETSI establece además una serie de parámetros y restricciones para garantizar el correcto funcionamiento del algoritmo [10]. El algoritmo Adaptive DCC debe ejecutarse al menos cada 200 ms. Asimismo, el valor objetivo de ocupación del canal definido por ETSI se sitúa en un 68 % de utilización del medio inalámbrico. Bajo estas configuraciones, Adaptive DCC permite alcanzar estados estables donde la carga del canal converge hacia el valor objetivo manteniendo propiedades de *fairness* tanto local como global entre vehículos [11]. Los valores de los parámetros de Adaptive DCC se muestran en la Tabla 1. Los parámetros δ_{max} , δ_{min} , G_{max} y G_{min} se emplean para limitar el mínimo y máximo valor de la fracción de tiempo de transmisión permitido y garantizado para una estación ITS, así como el incremento y decremento máximo que dicha fracción puede experimentar dentro de un mismo ciclo de control.

Parámetro	Valor	Descripción
α	0.016	Actúa como factor de olvido
β	0.0012	Actúa como factor de ganancia
CBR _{target}	0.68	Valor objetivo de ocupación del canal
$\delta_{\max}$	0.03	Fracción máxima de tiempo de transmisión que tiene permitida una estación ITS
$\delta_{\min}$	0.0006	Fracción mínima de tiempo de transmisión que se le garantizan a una estación ITS
$G_{\max}$	0.0005	Máximo valor que puede aumentar la fracción de tiempo de transmisión en un ciclo
$G_{\min}$	-0.00025	Máximo valor que puede disminuir la fracción de tiempo de transmisión en un ciclo

Tabla 1. Valores de los parámetros ETSI Adaptive DCC

Diversos trabajos de investigación han propuesto extensiones orientadas a mejorar su comportamiento en determinados escenarios. Entre las principales líneas de investigación destacan los mecanismos que adaptan dinámicamente los parámetros de control del algoritmo para acelerar la convergencia y reducir las oscilaciones del canal [12]. Así como propuestas que incorporan información adicional sobre el entorno o el contexto de conducción para optimizar la asignación de recursos [13]. Sin embargo, la mayoría de estas propuestas no forman parte de las especificaciones actualmente estandarizadas por ETSI. Por este motivo, el presente trabajo toma como punto de partida la versión estándar de Adaptive DCC definida por ETSI, sobre la que se desarrollan las evoluciones propuestas para abordar los desafíos asociados a las comunicaciones V2X heterogéneas.

A pesar de sus buenas propiedades de estabilidad y convergencia, Adaptive DCC asume implícitamente escenarios homogéneos donde todos los vehículos presentan necesidades de comunicación similares. Como consecuencia, el algoritmo distribuye los recursos del canal de forma equitativa entre estaciones ITS vecinas, independientemente de los servicios V2X implementados o de las demandas reales de transmisión de cada vehículo.

Esta limitación resulta especialmente relevante en escenarios V2X heterogéneos, donde diferentes vehículos pueden generar cantidades de tráfico significativamente distintas debido a sus capacidades sensoriales o a los servicios cooperativos activos. Sobre esta problemática se fundamentan las extensiones propuestas en este trabajo.

Con el objetivo de abordar estas limitaciones, ETSI está definiendo en la Release 2 una nueva arquitectura de gestión de recursos denominada RM (*Resource Management*) [4], diseñada para proporcionar un control más flexible y consciente de las necesidades de los distintos servicios V2X. A diferencia de los mecanismos DCC tradicionales, centrados principalmente en controlar la carga global del canal, RM introduce una gestión distribuida de los recursos de comunicación basada en los requisitos específicos de cada servicio y en las capacidades disponibles de la estación ITS.

La arquitectura propuesta incorpora funcionalidades de gestión de recursos distribuidas entre distintas capas de la pila ITS, permitiendo una coordinación transversal entre los servicios V2X y los mecanismos de comunicación subyacentes. Dentro de esta arquitectura, la capa *Facilities* desempeña un papel fundamental mediante el componente RM_FL (*Resource Management Facilities Layer*), cuya estructura se muestra en la Figura 5 [14].

El RM_FL se compone de tres bloques principales. El primero es el RMC (*Resource Management Component*), encargado de recopilar los requisitos de los servicios, estimar los recursos de comunicación disponibles y calcular las limitaciones de transmisión que deben aplicarse a cada servicio. Dentro de este componente se incluyen funcionalidades como el cálculo de recursos y su asignación a los servicios V2X. El segundo bloque es el MDC (*Message Disseminating Component*), recibe los mensajes generados por los servicios V2X y configura sus parámetros de transmisión de forma individual en función de las restricciones establecidas por el componente de gestión de recursos. Esta adaptación se realiza mediante mecanismos de *message shaping*, que permiten modificar las características del tráfico generado por cada servicio, como la frecuencia de transmisión o la cantidad de información enviada, con el objetivo de cumplir con los recursos disponibles asignados por el RM. Una vez aplicadas estas restricciones, el MDC envía los paquetes resultantes hacia la capa *Networking & Transport* (NTL), encargada de continuar el proceso de comunicación. Finalmente, el TAC (*Traffic Analysis Component*) analiza el tráfico recibido desde las capas inferiores y proporciona

información estadística que puede utilizarse para optimizar el proceso de asignación de recursos.

Los servicios V2X interactúan con el RM_FL a través de interfaces específicas mediante las cuales comunican sus necesidades de transmisión. A partir de esta información y del estado de ocupación del canal, el sistema determina de forma distribuida las posibilidades de transmisión permitidas para cada servicio, garantizando un uso eficiente y equitativo de los recursos radioeléctricos disponibles. Esta arquitectura constituye la base sobre la que se fundamentan las soluciones de gestión de recursos desarrolladas en este trabajo.

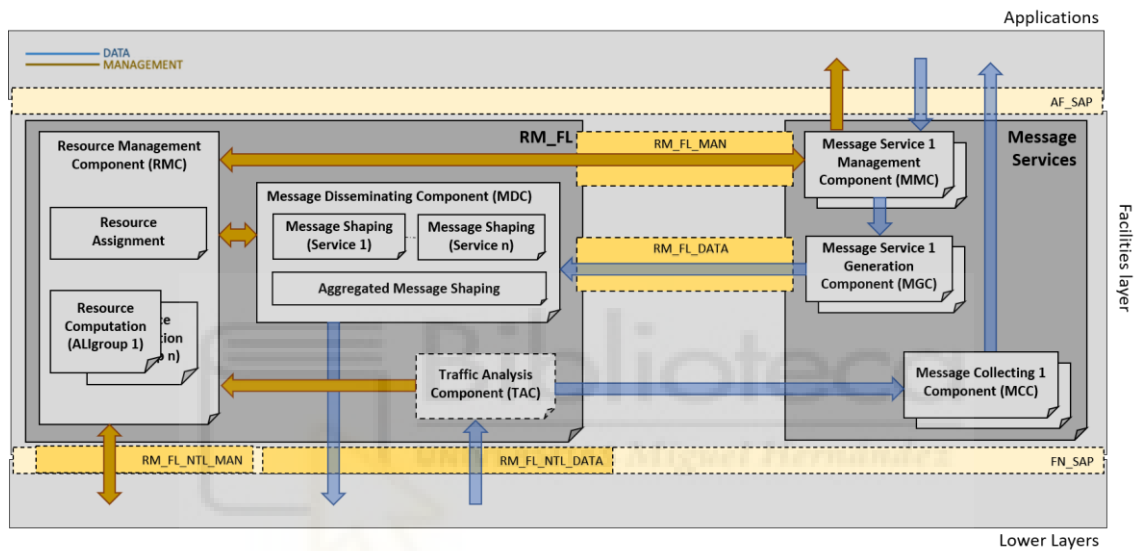


Figura 5. Componentes de RM_FL y sus interfaces

3. DISEÑO DE CONTROL DE CONGESTIÓN EN ENTORNOS HETEROGÉNEOS

Como se ha analizado en el Capítulo 2, los mecanismos de control de congestión actualmente estandarizados por ETSI, y en particular Adaptive DCC, permiten mantener estable la ocupación del canal inalámbrico y garantizar un reparto equitativo de los recursos entre vehículos. Sin embargo, estos mecanismos fueron diseñados bajo hipótesis de tráfico relativamente homogéneas, donde todos los vehículos presentan necesidades de comunicación similares. La evolución de los sistemas C-ITS hacia escenarios cada vez más heterogéneos, caracterizados por la coexistencia de múltiples servicios V2X con diferentes requisitos de transmisión y niveles de criticidad, plantea nuevos desafíos que no son abordados explícitamente por los mecanismos actuales.

Con el objetivo de responder a estas limitaciones, ETSI está definiendo en la Release 2 una nueva arquitectura de gestión de recursos basada en la entidad RM [4][14]. A diferencia de los mecanismos tradicionales de control de congestión, implementados principalmente en la capa Access, RM introduce las funcionalidades principales de gestión de recursos en la capa *Facilities*, permitiendo una interacción directa con los distintos servicios V2X activos. Esta arquitectura proporciona un marco para coordinar explícitamente la asignación de recursos entre servicios, teniendo en cuenta tanto sus necesidades de transmisión como sus requisitos operativos, y habilita el desarrollo de mecanismos de control de congestión conscientes de la demanda y de la prioridad de los servicios.

En este contexto, este trabajo propone dos soluciones orientadas a mejorar la gestión de recursos en entornos V2X heterogéneos dentro de esta arquitectura RM de la capa *Facilities*. La primera propuesta, denominada DA (*Demand-Aware*), adapta dinámicamente la asignación de recursos en función de las necesidades reales de transmisión de cada vehículo, permitiendo que aquellos con mayores demandas dispongan de una mayor proporción de los recursos disponibles. Sobre esta base, se desarrolla una segunda propuesta denominada DPA (*Demand-Priority-Aware*), que incorpora además mecanismos de priorización y coordinación distribuida para garantizar un tratamiento preferente de los servicios más críticos bajo condiciones de congestión. Finalmente, se describe el mecanismo de interacción entre los servicios V2X y la entidad RM, así como las estrategias desarrolladas para adaptar dinámicamente el

comportamiento de los servicios a las restricciones de recursos impuestas por el sistema de gestión.

La Figura 6 muestra de forma conceptual el funcionamiento general del mecanismo de gestión de recursos propuesto. Periódicamente, el RM recibe información sobre el estado de ocupación del canal desde las capas inferiores mediante la medida de carga del canal. Seguidamente, los servicios V2X activos de la estación ITS comunican periódicamente sus necesidades de transmisión R_i al RM. A partir de ambas fuentes de información, calcula la cantidad de recursos que pueden usar los servicios, representada mediante δ . Dependiendo de la solución RM considerada, los requisitos reportados por los servicios pueden o no tenerse en cuenta durante este cálculo. Una vez determinado δ , la distribución de recursos se lleva a cabo mediante un mecanismo común a todas las soluciones basado en el principio de equidad proporcional. Los servicios con el mismo nivel de prioridad reciben recursos de forma proporcional a sus tasas de datos requeridas. La asignación sigue un proceso escalonado que comienza por los servicios de mayor prioridad. Sobre esta arquitectura general se desarrollan las propuestas DA y DPA descritas en los siguientes apartados.

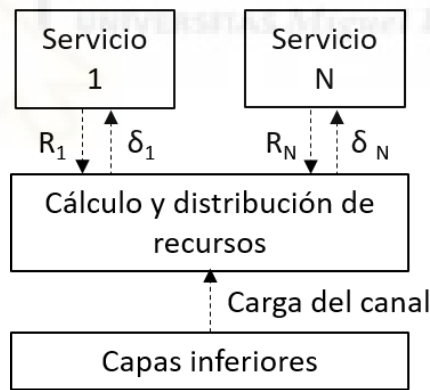


Figura 6. Arquitectura de las soluciones RM

3.1. DA: Adaptación Dinámica de Recursos Basada en la Demanda del Vehículo

Para adaptar dinámicamente la asignación de recursos a las necesidades reales de cada vehículo, este trabajo propone un mecanismo de gestión de recursos que tiene en cuenta la demanda, denominado DA. La propuesta se basa en una propiedad del propio algoritmo

LIMERIC, en el que el parámetro β actúa como un factor de ganancia adaptativa que determina la intensidad con la que el vehículo ajusta su utilización del canal frente a variaciones en la carga observada [11][13]. Valores elevados de β permiten al vehículo reaccionar de forma más agresiva y alcanzar mayores fracciones de uso del canal, mientras que valores más reducidos producen una adaptación más conservadora.

Una propiedad importante del algoritmo es que vehículos configurados con diferentes valores de β convergen a estados de equilibrio donde la fracción de recursos utilizada es proporcional al β asignado, manteniendo al mismo tiempo las propiedades de estabilidad y convergencia del sistema. Por lo tanto, si el valor de β se adapta en función de los recursos demandados por los servicios implementados en el vehículo, es posible conseguir que los vehículos con mayores necesidades de transmisión reciban una mayor proporción de los recursos disponibles del canal inalámbrico, mientras que aquellos con menores necesidades operan con valores más reducidos. Para ello, proponemos en este trabajo que β se calcule mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \beta_{base} \cdot \frac{R_{tot}}{DR_{base}} \quad (2)$$

En esta ecuación, β_{base} representa el valor de referencia utilizado por vehículos compatibles con ETSI Release 1, DR_{base} corresponde a la demanda media de recursos de los servicios presentados en el Release 1 como es el CAM y R_{tot} representa la suma de los recursos demandados por los servicios activos implementados en el vehículo.

De esta forma, el mecanismo DA permite realizar una asignación de recursos más flexible y adaptada a escenarios V2X heterogéneos, ajustando dinámicamente la utilización del canal en función de las necesidades reales de transmisión de cada vehículo.

La solución DA se enmarca en el bloque RMC definido dentro de la arquitectura RM_FL de ETSI Release 2 [14] mostrado en la Figura 5. Ya que su funcionalidad principal consiste en calcular los recursos de comunicación en función de las necesidades de transmisión de cada vehículo. El RMC es el encargado de recopilar los requisitos de los servicios, estimar los recursos disponibles y determinar las restricciones de transmisión que deben aplicarse. De forma equivalente, el mecanismo DA utiliza la información de

demanda de los servicios V2X activos para modificar dinámicamente el parámetro β del algoritmo Adaptive DCC, permitiendo ajustar la fracción de recursos asignada a cada vehículo según sus necesidades reales de transmisión.

No obstante, aunque este enfoque considera explícitamente las demandas de transmisión de cada vehículo, no tiene en cuenta la prioridad asociada a los distintos servicios V2X implementados. En consecuencia, la asignación de recursos se realiza únicamente atendiendo a la cantidad de tráfico demandada, sin diferenciar entre servicios críticos para la seguridad vial y servicios de menor relevancia. Esto puede provocar situaciones poco eficientes bajo condiciones de congestión, donde servicios prioritarios podrían verse obligados a reducir su tasa de transmisión mientras otros servicios menos críticos continúan utilizando parte de los recursos disponibles del canal. Por tanto, resulta necesario incorporar mecanismos adicionales capaces de coordinar la asignación de recursos considerando no solo la demanda de transmisión, sino también la prioridad de los servicios activos en la red.

3.2. DPA: Priorización de Servicios y Coordinación Distribuida

El mecanismo DA presentado anteriormente permite adaptar la asignación de recursos a las necesidades de transmisión de cada vehículo. Sin embargo, este enfoque continúa realizando la distribución de recursos únicamente en función de la demanda agregada de tráfico, sin considerar explícitamente la prioridad de los servicios V2X implementados. Como consecuencia, la utilización de los recursos disponibles puede resultar ineficiente desde el punto de vista de la criticidad de las aplicaciones V2X activas en la red. Con el objetivo de solucionar esta limitación, este trabajo propone un mecanismo complementario de gestión de recursos consciente tanto de la demanda como de la prioridad de los servicios, denominado DPA. Esta propuesta extiende el funcionamiento del mecanismo DA incorporando técnicas adicionales de priorización y coordinación distribuida entre vehículos vecinos.

En primer lugar, DPA modifica el cálculo de la demanda total de recursos utilizada para adaptar dinámicamente el parámetro β . Mientras que en el mecanismo DA se consideran todos los servicios implementados en el vehículo, en el reparto de los recursos calculados, en DPA, únicamente se tienen en cuenta aquellos servicios que se encuentran

transmitiendo activamente. De este modo, los servicios cuya tasa de transmisión ha sido reducida a cero debido a restricciones de recursos dejan de influir en el cálculo de β . Esta modificación evita que servicios de baja prioridad que ya no están siendo transmitidos incrementen artificialmente la demanda total estimada del vehículo. Como consecuencia, la asignación de recursos se ajusta de forma más precisa a las necesidades reales de transmisión presentes en cada instante.

Por ejemplo, si dos vehículos que implementan un mismo servicio prioritario, mientras que únicamente uno de ellos dispone además de un servicio secundario de menor prioridad. Si las condiciones de congestión impiden mantener activo dicho servicio secundario, ambos vehículos deberían recibir una cantidad equivalente de recursos para el servicio prioritario. Excluir del cálculo de β los servicios que ya no transmiten permite garantizar este comportamiento, evitando asignaciones desproporcionadas de recursos.

Además de esta adaptación del cálculo de β , el mecanismo DPA incorpora un sistema de coordinación distribuida entre vehículos vecinos orientado a reforzar la aplicación coherente de las prioridades de servicio en toda la red. En sistemas distribuidos, cada vehículo toma decisiones de control de congestión utilizando únicamente información local del canal. Como consecuencia, pueden aparecer situaciones inconsistentes donde un vehículo reduce la tasa de transmisión de un servicio prioritario mientras otros vehículos cercanos continúan transmitiendo servicios menos relevantes. Para implementar este mecanismo, en este trabajo hemos asumido que cada servicio se preconfigura con una prioridad fija y conocida por todos los vehículos. Sin embargo, podría extenderse a escenarios más avanzados donde cada servicio podría tener una prioridad diferente indicada en la cabecera del mensaje. Si un vehículo que está reduciendo los recursos asignados a un servicio prioritario detecta que todavía existen servicios de menor prioridad transmitiendo en el entorno, el mecanismo DPA permite temporalmente mantener la transmisión demandada de sus servicios prioritarios, incluso cuando el cálculo local de recursos indicaría inicialmente una reducción de la tasa. De este modo, se fuerza a los vehículos con servicios menos prioritarios que están transmitiendo a reducir sus recursos disponibles de dichos servicios, garantizando que las limitaciones de recursos afecten primero al tráfico de menor prioridad.

A diferencia de la propuesta DA, cuya funcionalidad se centra principalmente en el cálculo de la asignación de recursos, la solución DPA incorpora además mecanismos de

análisis del entorno de comunicación para garantizar una aplicación coherente de las prioridades entre vehículos vecinos. Por este motivo, DPA puede asociarse tanto al bloque RMC como al bloque TAC de la arquitectura RM_FL de la Figura 5. Por un lado, forma parte del RMC porque extiende el proceso de cálculo de recursos incorporando la prioridad de los servicios en la asignación y modificando la estimación de la demanda efectiva utilizada para determinar los recursos disponibles. Por otro lado, también presenta funcionalidades equivalentes al TAC, ya que requiere monitorizar el tráfico observado en el canal inalámbrico con el fin de identificar qué servicios continúan transmitiendo en los vehículos vecinos y qué niveles de prioridad poseen. Esta información obtenida a partir del análisis del tráfico recibido es posteriormente utilizada para ajustar las decisiones de asignación de recursos y reforzar la coordinación distribuida entre estaciones ITS.

Gracias a este mecanismo de coordinación distribuida, los servicios de alta prioridad únicamente son limitados cuando los servicios menos críticos presentes en el canal ya han sido previamente restringidos. De esta forma, DPA consigue aplicar la priorización de servicios de manera coherente entre vehículos vecinos, mejorando la utilización global de los recursos del canal y garantizando un tratamiento preferente para las aplicaciones más críticas en escenarios de congestión.

3.3 Interacción con los servicios V2X y distribución de recursos

El funcionamiento del mecanismo puede observarse en la Figura 7. En el intervalo inicial, los servicios V2X transmiten sin ninguna restricción. Cada 200 ms el RM recibe periódicamente desde las capas inferiores la medida de ocupación del canal inalámbrico mediante la métrica CBR. Seguidamente, el RM solicita, con un mensaje de control a cada servicio operativo, cuántos recursos han requerido en el último segundo. La unidad para referirse a los recursos entre el RM y los servicios son bits/segundo, ya que utilizar una unidad común permite abstraer el mecanismo de gestión de recursos respecto al tipo concreto de servicio V2X implementado, facilitando una asignación homogénea de recursos.

La demanda reportada por cada servicio no corresponde únicamente al tráfico transmitido, sino a la tasa que el servicio hubiese transmitido en ausencia de restricciones impuestas por el RM. Para ello, el servicio lleva un registro del tamaño de los paquetes del último segundo que hubiese transmitido si los recursos no estuviesen restringidos y responde al RM con la demanda de recursos requerida R_i , expresada en bits/segundo. Una vez se recibe esta información junto a la CBR, calcula los recursos disponibles aplicando una de las dos soluciones descritas anteriormente, considerando tanto la carga del canal observada como demanda total de los servicios.

La asignación de recursos se realiza de forma que respeta las prioridades entre los servicios. Para lograr esto, el proceso de asignación se realiza empezando por los servicios de mayor prioridad hacia los de menor prioridad, garantizando que las aplicaciones críticas dispongan preferentemente de los recursos disponibles antes de asignar capacidad adicional a servicios menos relevantes. Además, cuando varios servicios comparten el mismo nivel de prioridad, los recursos disponibles se distribuyen proporcionalmente a la demanda de cada uno de ellos, garantizando que experimenten un ratio de satisfacción equivalente entre servicios con misma prioridad. Una vez calculados los recursos disponibles para cada servicio, el RM comunica con otro mensaje de control a cada servicio la tasa de transmisión permitida hasta el siguiente intervalo.

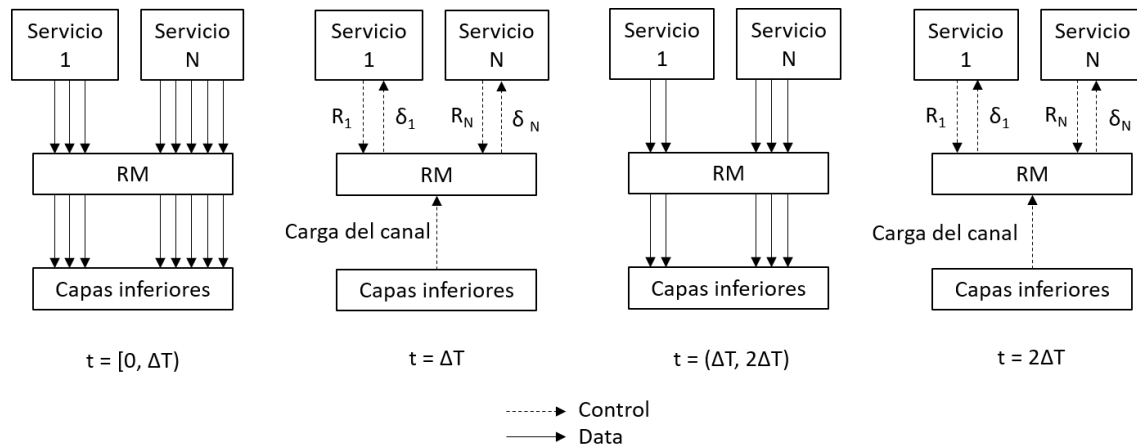


Figura 7. Esquema general del mecanismo de gestión y distribución de recursos RM

Gracias a este diseño de interacción entre servicios V2X y RM, el sistema permite adaptar dinámicamente el tráfico generado por cada aplicación V2X en función del estado de congestión, las necesidades de transmisión y la prioridad de los servicios activos,

proporcionando una gestión de recursos más flexible y eficiente en escenarios V2X heterogéneos.



4. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se describe la implementación realizada para integrar los mecanismos de gestión de recursos propuestos dentro del entorno de simulación vehicular utilizado. En particular, se presentan los principales módulos desarrollados, las modificaciones realizadas sobre los servicios V2X y la interacción entre las diferentes entidades encargadas del control de congestión y de la adaptación dinámica del tráfico generado.

Para la evaluación de las soluciones propuestas se ha utilizado una plataforma de simulación de comunicaciones vehiculares desarrollada por el grupo de investigación en el que se ha llevado a cabo este trabajo. Esta herramienta permite recrear de forma controlada escenarios V2X complejos y analizar el comportamiento de los mecanismos implementados bajo distintas condiciones de tráfico y congestión.

El simulador incorpora soporte para diferentes tecnologías de comunicación vehicular, entre las que se encuentran ITS-G5, LTE-V2X y 5G NR V2X, permitiendo estudiar su funcionamiento en diversos entornos. Asimismo, incluye implementaciones de servicios cooperativos estandarizados como el CAS, encargado del intercambio periódico de información básica de los vehículos, y el CPS, orientado a compartir información sobre el entorno detectado por los sensores embarcados. Además, dispone de un conjunto de servicios V2X genéricos configurables que permiten generar tráfico con diferentes tamaños de paquete y frecuencias de transmisión, tanto constantes como variables, facilitando la definición de múltiples escenarios de evaluación.

La plataforma está construida sobre OMNeT++ [15], un simulador de eventos discretos ampliamente utilizado en el ámbito de las redes de comunicación. Sobre esta base se integran los frameworks INET y Veins [16]. INET proporciona modelos detallados de protocolos y tecnologías de red, mientras que Veins extiende las capacidades de OMNeT++ para la simulación de entornos vehiculares, integrando la movilidad de los vehículos mediante SUMO (*Simulation of Urban MObility*). La combinación de estas herramientas permite modelar de forma realista tanto el comportamiento de la red de comunicaciones como la dinámica del tráfico vehicular.

OMNeT++ representa los sistemas mediante una arquitectura jerárquica basada en módulos interconectados. Cada entidad funcional se implementa como un módulo independiente capaz de intercambiar información con el resto de componentes de la

simulación. La comunicación entre módulos se realiza mediante puertas de entrada y salida, denominadas *gates*, que establecen las conexiones entre los distintos elementos de la arquitectura. Los mensajes intercambiados a través de estas conexiones pueden representar tanto paquetes de datos como eventos de control necesarios para coordinar el funcionamiento interno de la estación ITS.

La implementación desarrollada en este trabajo incorpora un nuevo módulo RM dentro de la estación ITS, encargado de realizar la gestión dinámica de recursos. Asimismo, se han extendido los módulos correspondientes a los servicios V2X ya existentes para permitir su interacción con el RM y su adaptación a las restricciones de recursos calculadas. El comportamiento de estas entidades se ha implementado mediante clases C++, mientras que su integración dentro de la arquitectura de la estación ITS se ha realizado mediante módulos conectados a través de *gates*. De este modo, la interacción entre el RM y los servicios se realiza mediante el intercambio de mensajes de control, mientras que los mensajes de datos continúan circulando por la pila de protocolos.

Las funcionalidades descritas en las secciones anteriores se implementan mediante dos componentes principales. Uno de ellos es el módulo RM, encargado de la gestión y distribución de recursos. También una clase base común para los servicios V2X, responsable de interactuar con el RM y adaptar dinámicamente su comportamiento a las restricciones impuestas. Ambos componentes mantienen un intercambio periódico de información que permite al sistema estimar las necesidades de transmisión de los servicios, calcular los recursos disponibles y aplicar las limitaciones correspondientes de forma distribuida. La Figura 8 muestra el diagrama de flujo general de esta interacción, ilustrando la secuencia de mensajes de control intercambiados entre el RM y los servicios V2X, así como el proceso de cálculo y aplicación de las restricciones de transmisión. En los siguientes apartados se describen con mayor detalle las funciones implementadas en cada uno de estos componentes.

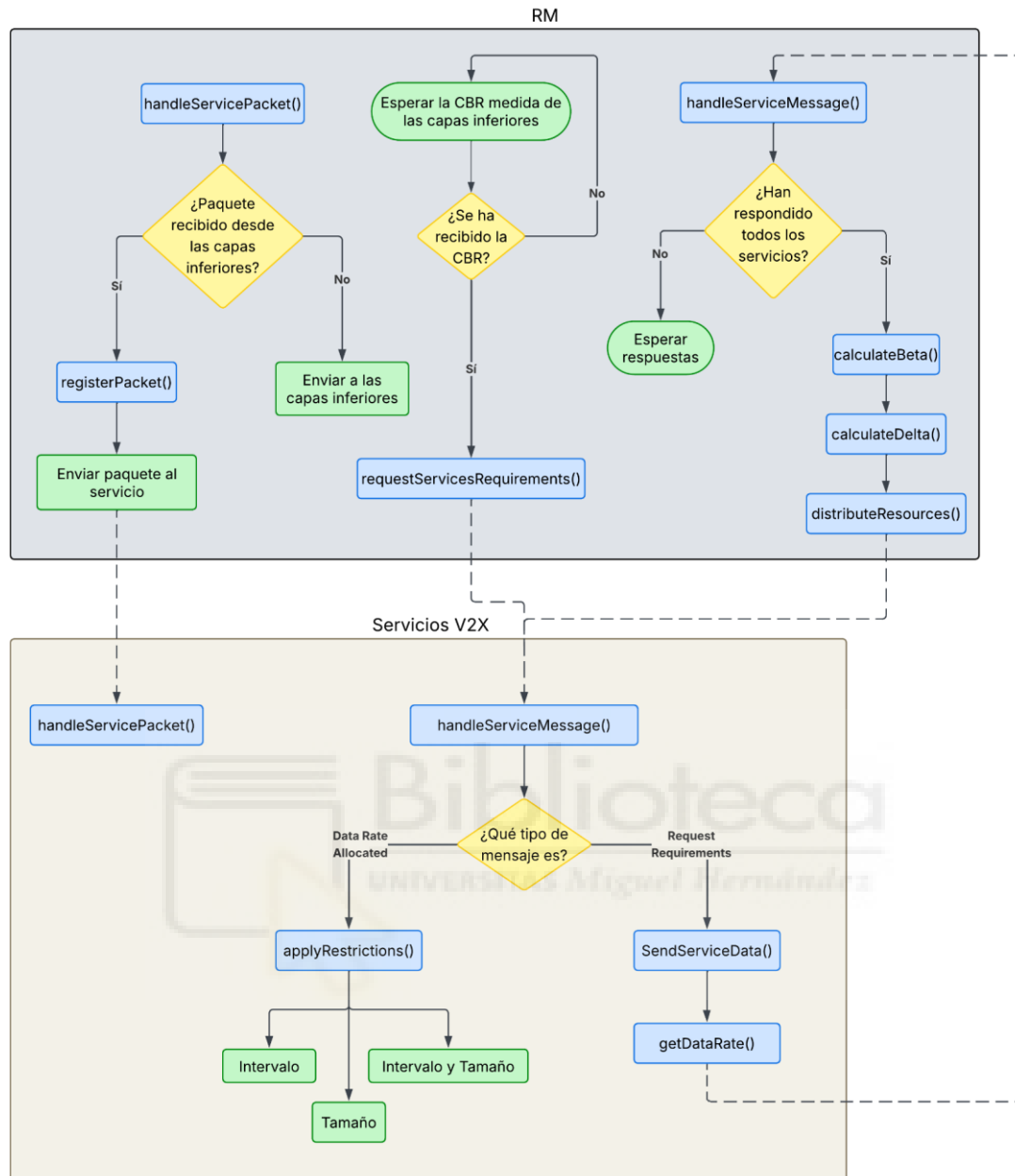


Figura 8. Diagrama de flujo de las funciones de las clases RM y los servicios V2X

4.1. Módulo RM

En esta sección se va a explicar el módulo y la clase creada junto con las funciones más importantes para describir el funcionamiento del RM.

- *handleServicePacket*: Esta función se encarga de recibir los mensajes de datos intercambiados entre los servicios de la estación ITS y las capas inferiores de la

pila de protocolos. Por un lado, recibe los mensajes generados por los servicios que deben ser enviados hacia las capas inferiores para su transmisión. Por otro lado, también recibe los mensajes procedentes de las capas inferiores que han sido recibidos desde otras estaciones ITS. Una vez procesados, los mensajes son reenviados en la dirección correspondiente para continuar su flujo dentro de la arquitectura. Cuando el mensaje es recibido desde las capas inferiores llama a *registerPacket*.

- *registerPacket*: Esta función se encarga de registrar los mensajes recibidos desde las capas inferiores con el objetivo de mantener información actualizada sobre los servicios V2X que se encuentran transmitiendo en el entorno. De esta manera, el RM puede decidir si resulta necesario restringir los servicios locales de la estación ITS en función de las prioridades observadas en los vehículos vecinos.
- *requestServiceRequirements*: A esta función se le llama cuando el RM recibe la CBR desde las capas inferiores. Es la encargada de enviar un mensaje a cada servicio V2X solicitando sus requisitos en el último segundo.
- *handleServiceMessage*: Esta función se encarga de recibir los mensajes de control enviados por los servicios al RM. Estos mensajes son la respuesta al mensaje de control del RM y contienen la tasa requerida por el servicio. Una vez el RM ha recibido la respuesta de todos los servicios procede a llamar a la función *calculateDelta*.
- *calculateDelta*: En esta función se calcula la fracción máxima de utilización del canal δ disponible para el vehículo. Primero obtiene β mediante la función *calculateBeta*. Posteriormente, aplica la ecuación de control LIMERIC. Por último llama a *distributeResources* para distribuir los recursos totales calculados entre los servicios de la estación.
- *calculateBeta*: Esta función calcula el factor de ganancia β a partir de los recursos requeridos por los servicios que han sido notificados anteriormente. Si a un servicio no se le han asignado recursos, no se tiene en cuenta para el cálculo de β .

- *distributeResources*: Esta función reparte los recursos totales δ del vehículo entre los servicios, en orden de mayor a menor prioridad. En esta función tiene en cuenta el registro de mensajes de datos recibidos de otras estaciones ITS. Si hay servicios V2X locales que se le han asignado menos recursos de los requeridos pero hay servicios menos prioritarios de otras estaciones transmitiendo, a ese servicio se le otorga los recursos que requiere ignorando el cálculo de δ .

4.2. Servicios V2X

Para que los servicios se comuniquen con el RM se ha tenido que crear una clase donde se definen las funciones necesarias para la interacción y adaptarse al control de congestión. A continuación se describen las funciones principales de esta clase:

- *handleRmMessage*: Esta función es la encargada de recibir los mensajes de control del RM. Si el mensaje está requiriendo información sobre cuántos recursos necesita el servicio, se llama a la función *sendServiceData*. En cambio, si el mensaje contiene la tasa a la que el servicio tiene que transmitir se llama a la función *applyRestrictions*.
- *sendServiceData*: Esta función se encarga de enviar un mensaje de control al RM que contiene información sobre el servicio. Incluye también los recursos requeridos por el servicio, para su cálculo se llama a *getDataRate*.
- *getDataRate*: En esta función se calculan los recursos requeridos en bits/segundo. Para ello, el servicio registra en un vector el instante de envío y el tamaño de cada paquete que hubiese querido transmitir sin tener en cuenta la limitación del RM. Recorre el vector y suma el tamaño en bits de los paquetes transmitidos hace menos de 1 segundo. El resultado de esa suma son los recursos requeridos por el servicio en el último segundo.
- *applyRestrictions*: Esta función se encarga de aplicar las restricciones del RM. Primero divide los recursos asignados por el RM entre los requeridos por el servicio. Con el resultado se guarda el ratio de satisfacción del servicio, donde el valor máximo es 1 y significa que al servicio se le permite transmitir con lo

requerido. En este trabajo se han diseñado 3 formas de adaptarse a la tasa aplicada. La primera consiste en aumentar el intervalo entre generaciones de mensajes, para ello se divide el intervalo de envío entre el ratio de satisfacción. La segunda manera se basa en disminuir el tamaño de los mensajes transmitidos, multiplicando el ratio de satisfacción al tamaño de los mensajes. Finalmente, el tercer mecanismo combina simultáneamente ambas estrategias, se divide el intervalo y se multiplica el tamaño de paquetes por la raíz cuadrada del ratio de satisfacción.



5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se evalúa experimentalmente el comportamiento de las soluciones de gestión de recursos propuestas, DA y DPA, mediante diferentes escenarios de simulación V2X. En primer lugar, se describe la configuración utilizada en las simulaciones, incluyendo los escenarios, parámetros y métricas empleadas para la evaluación. Posteriormente, las propuestas se comparan con una solución de referencia basada en el mecanismo RM con parámetros constantes, permitiendo analizar las mejoras introducidas por la adaptación basada en la demanda y la priorización de servicios.

La evaluación considera tanto escenarios controlados con servicios V2X genéricos como escenarios más representativos mediante servicios cooperativos estandarizados como CAS [6] y CPS [7]. A través del análisis de métricas relacionadas con la ocupación del canal, la distribución de recursos y la adaptación de los servicios, se estudia la capacidad de los mecanismos propuestos para gestionar demandas variables y garantizar un uso eficiente de los recursos radioeléctricos bajo condiciones de congestión.

5.1. Escenarios y configuración

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de los mecanismos de gestión de recursos propuestos, se han definido diferentes servicios V2X, escenarios de simulación y parámetros de configuración. Los servicios considerados incluyen tanto aplicaciones genéricas de tráfico sintético como los servicios cooperativos basados en los estándares C-ITS europeos CAS y CPS, permitiendo analizar el rendimiento de las propuestas bajo distintos perfiles de generación de tráfico y niveles de heterogeneidad.

Para ello, se han diseñado dos escenarios complementarios. El primero corresponde a un entorno controlado que permite aislar y analizar el comportamiento de los mecanismos de gestión de recursos bajo condiciones estables. El segundo representa un escenario más realista de autopista con movilidad vehicular, donde se evalúa el funcionamiento de las propuestas en condiciones próximas a un despliegue real. Finalmente, se detallan los parámetros de simulación y la configuración utilizada para los mecanismos de control de congestión y gestión de recursos.

5.1.1. Servicios V2X genéricos

Siguiendo las recomendaciones de 3GPP para servicios V2X [17], en este trabajo se consideran tres servicios V2X genéricos, cada uno de ellos representando un perfil de generación de tráfico diferente. En la Tabla 2 se resume la configuración de cada servicio V2X genérico.

El Servicio V2X 1 modela tráfico periódico de baja carga. Los mensajes se generan cada 100 ms siguiendo una secuencia predefinida de tamaños de paquete {300, 190, 190, 190, 190} bytes. Con el objetivo de introducir diversidad entre vehículos, cada uno de ellos comienza en una posición aleatoria dentro de dicha secuencia. Esta configuración produce una tasa media de datos requerida de aproximadamente 17 kbps y representa servicios periódicos ligeros que difunden pequeñas cantidades de información a intervalos regulares, con ligeras variaciones periódicas en el tamaño de los mensajes.

El Servicio V2X 2 representa un servicio de tráfico periódico de alta carga. En este caso, los paquetes se generan cada 10 ms, lo que produce una intensidad de tráfico significativamente superior a la del Servicio V2X 1. Los tamaños de paquete siguen una distribución discreta, tomando valores de 1200 bytes con probabilidad 0.2 y de 800 bytes con probabilidad 0.8. Bajo estas condiciones, la tasa media de datos requerida es de aproximadamente 272 kbps. Este servicio modela aplicaciones con requisitos de comunicación más exigentes tanto en frecuencia de transmisión como en volumen de información transmitida.

El Servicio V2X 3 modela un patrón de tráfico aperiódico de carga media, introduciendo aleatoriedad en el proceso de generación de mensajes. El intervalo entre paquetes se define como la suma de un componente fijo de 50 ms y una variable aleatoria con distribución exponencial de media 50 ms, dando lugar a instantes de transmisión irregulares. Los tamaños de paquete siguen una distribución uniforme entre 200 y 2000 bytes, con incrementos de 200 bytes. La tasa media de datos requerida resultante es de aproximadamente 56 kbps. Este servicio representa aplicaciones altamente dinámicas o basadas en percepción, donde tanto el tamaño de los mensajes como los instantes de generación pueden variar significativamente con el tiempo.

La adaptación de los mensajes se realiza de acuerdo con las decisiones proporcionadas por el RM. Cada servicio emplea una estrategia de adaptación diferente. En particular, el

Servicio V2X 1 adapta el intervalo de generación de mensajes, el Servicio V2X 2 modifica el tamaño de los paquetes transmitidos y el Servicio V2X 3 combina ambas estrategias, ajustando simultáneamente tanto la frecuencia de generación como el tamaño de los mensajes.

Servicio	Tipo de Tráfico	Nivel de carga	Tasa media requerida	Adaptación
V2X 1	Periódico	Baja	17 kbps	Intervalo
V2X 2	Periódico	Alta	272 kbps	Tamaño
V2X 3	Aperiódico	Media	56 kbps	Mixto

Tabla 2. Características de los Servicios V2X genéricos

5.1.2. Cooperative Awareness Service y Collective Perception Service

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del mecanismo RM bajo condiciones V2X más realistas, se han implementado y evaluado dos servicios cooperativos representativos CAS [6] y CPS [7]. La Tabla 3 resume las principales características de los servicios cooperativos considerados.

El servicio CAS es el encargado de la generación de mensajes CAM. Cada mensaje CAM se ha configurado con un tamaño fijo de 250 bytes e incluye información cinemática de la estación transmisora, como la posición, velocidad y dirección de movimiento. La generación de mensajes CAM sigue las reglas definidas por ETSI explicadas en el capítulo del Estado del Arte, de forma que se genera un nuevo mensaje cuando la variación de alguno de los parámetros cinemáticos supera un determinado umbral o cuando se alcanza un intervalo máximo de un segundo desde la última transmisión. En los escenarios considerados, este comportamiento produce una tasa media de datos requerida de aproximadamente 6.5 kbps. Para adaptarse a las restricciones impuestas por el RM, el servicio CAS modifica la frecuencia de generación de mensajes ajustando el intervalo temporal entre transmisiones consecutivas.

Por otra parte, el servicio CPS es responsable de generar mensajes *Collective Perception Message* (CPM), utilizados para compartir información sobre los objetos detectados por

los sensores embarcados del vehículo. En las simulaciones realizadas, cada vehículo dispone de un único sensor con un alcance de detección de 150 metros y un campo de visión de 360°. Cada CPM incluye información relativa a la posición, velocidad y tipo de los objetos percibidos. Los mensajes CPM se generan periódicamente cada 100 ms.

Siguiendo las directrices de la última versión del borrador de la especificación técnica de ETSI para percepción colectiva, a cada objeto detectado se le asigna un valor denominado *Value of Information* (VoI). Con el objetivo de centrar el estudio en los aspectos relacionados con la gestión de recursos, el VoI se define como un valor normalizado comprendido entre 0 y 1, inversamente proporcional a la distancia entre el vehículo detector y el objeto percibido. Este valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$voi(d) = \max \left(1 - \frac{d}{d_{max}}, 0 \right) \quad (3)$$

donde d_{max} , representa la distancia máxima de percepción a partir de la cual el valor de información pasa a ser nulo. En este trabajo, el parámetro d_{max} se utiliza para modelar distintos niveles de calidad de los sensores de los vehículos.

Por defecto, el servicio CPS incluye en cada mensaje CPM todos los objetos detectados cuyo valor de información (VoI) [7] sea superior a un umbral arbitrario que se ha definido en este trabajo con un valor de 0.3. Cada objeto añade 60 bytes a la carga útil del mensaje, mientras que la información del sensor ocupa 18 bytes, además la cabecera del CPM tiene un tamaño fijo de 35 bytes. Como consecuencia, la tasa de datos requerida por CPS es altamente variable, ya que depende tanto de las capacidades de percepción del vehículo como del número de objetos detectados en cada instante. En general, esta demanda de recursos es considerablemente superior a la del servicio CAS.

Para cumplir con las restricciones impuestas por el RM, el servicio CPS emplea una estrategia de adaptación basada en el contenido del mensaje, donde reduce el tamaño máximo del mensaje y por consecuencia se ve reducido el número de objetos percibidos incluidos en cada CPM transmitido. Si el número de objetos que superan el umbral VoI definido es mayor que el número máximo de objetos que pueden incluirse en el CPM, se seleccionarán aquellos con mayor valor VoI para su transmisión.

Servicio	Nivel de carga	Tasa requerida	Adaptación
CAS	Baja	5-8 kbps	Intervalo
CPS	Generalmente Alta	20-90 kbps	Tamaño

Tabla 3. Características de los Servicios cooperativos

5.1.3. Escenarios de simulación

Con el objetivo de evaluar de forma exhaustiva la solución de gestión de recursos propuesta, se han definido dos escenarios complementarios, cada uno orientado a analizar diferentes aspectos del comportamiento del RM.

El primer escenario se ha diseñado como un entorno de prueba controlado, cuyo objetivo es validar el funcionamiento del RM bajo condiciones estables y perfectamente definidas. Este escenario consiste en una topología estática formada por 60 vehículos, donde todos los nodos se encuentran dentro del alcance directo de comunicación entre sí. Los vehículos generan tráfico con requisitos constantes y todos ellos ejecutan los servicios V2X genéricos descritos en la sección anterior.

Para representar distintos niveles de demanda de recursos, se han definido tres tipos de vehículos. Los vehículos de Tipo 1 implementan únicamente el Servicio V2X 1, los vehículos de Tipo 2 implementan los Servicios V2X 1 y 2, mientras que los vehículos de Tipo 3 implementan simultáneamente los Servicios V2X 1, 2 y 3. Este escenario permite aislar el efecto de las decisiones tomadas por el RM sin la complejidad adicional introducida por condiciones de tráfico variables o por fenómenos propios de las redes inalámbricas.

El segundo escenario persigue un mayor grado de realismo y permite evaluar el comportamiento del RM bajo condiciones más próximas a las que podrían encontrarse en despliegues reales. Para ello, se modela una autopista de 5 km con una densidad de 60 veh/km de varios carriles donde los vehículos circulan a distintas velocidades y realizan maniobras de conducción realistas, incluyendo adelantamientos y cambios de carril. En este escenario, todos los vehículos implementan tanto el servicio CAS como el servicio

CPS. Los datos de este escenario se obtienen a partir de los vehículos que se encuentran en los 2 km centrales, debido a que en los extremos del escenario los vehículos presentan menor congestión. Los vehículos aparecen en los extremos de la autopista. Como en el instante inicial no hay vehículos, se recogen los datos a partir del segundo 300, cuando los vehículos están repartidos por toda la autopista.

En este segundo escenario, con el objetivo de representar la heterogeneidad de capacidades sensoriales existentes en entornos reales, la población de vehículos se divide en dos grupos. La mitad de los vehículos dispone de sensores de baja calidad, modelados mediante una distancia máxima de percepción de $d_{max} = 50$ m, mientras que la otra mitad incorpora sensores de alta calidad caracterizados por $d_{max} = 150$ m. Los vehículos equipados con sensores de mayor calidad obtienen VoIs más elevados para los objetos detectados, lo que se traduce en un mayor número de objetos incluidos en los mensajes CPM y, por tanto, en una mayor demanda de recursos de comunicación. Ambos tipos de vehículos se distribuyen aleatoriamente a lo largo de la autopista.

Finalmente, ambos escenarios se evalúan considerando tanto configuraciones donde todos los servicios poseen la misma prioridad como configuraciones con prioridades diferenciadas. En el caso de los servicios genéricos se establece una jerarquía de prioridades del tipo Servicio V2X 1 > Servicio V2X 2 > Servicio V2X 3, mientras que para los servicios cooperativos se considera una prioridad superior para CAS frente a CPS.

5.1.4. Configuración del RM y parámetros Adaptive DCC

Todos los vehículos ejecutan el módulo RM en la capa Facilities. El período de ejecución del RM se ha fijado en 200 ms y se activa cada vez que las capas inferiores proporcionan una nueva medida de ocupación del canal (CBR). La expresión para calcular la CBR es la siguiente:

$$CBR = \frac{T_{busy}}{T_{CBR}} \quad (4)$$

donde T_{busy} representa el tiempo acumulado durante el cual el canal se encuentra ocupado, ya sea por señales recibidas cuya potencia supera el umbral de detección o por las propias transmisiones realizadas por el vehículo. Por su parte, T_{CBR} corresponde al intervalo de observación utilizado para calcular la ocupación del canal, fijado en este trabajo en 200 ms.

Los parámetros de Adaptive DCC con los que trabaja el RM se muestran en la Tabla 4 siguiendo las especificaciones de ETSI [10]. El parámetro DR_{base} representa la demanda de recursos asociada al servicio de referencia compatible con ETSI Release 1. Este parámetro actúa como valor de normalización en el cálculo del factor de ganancia β . De este modo, aquellos vehículos que únicamente implementan el servicio de referencia presentan una demanda de recursos igual a DR_{base} , obteniendo como resultado un valor de β igual a β_{base} , preservando así el comportamiento original definido por Adaptive DCC. En los escenarios con servicios V2X genéricos, el servicio de referencia es V2X Service 1, por lo que DR_{base} se fija en 17 kbps. En los escenarios basados en CAS y CPS, el servicio de referencia es CAS, estableciéndose DR_{base} en 6.5 kbps. La fracción del tiempo inicial (δ_0) que se ha fijado en este trabajo, es decir, los recursos que va a disponer el vehículo en el instante inicial, es 0. De esta manera, se puede observar y analizar la evolución temporal de δ con un valor inicial mínimo hasta que converge. Los valores utilizados para el resto de parámetros de Adaptive DCC se han mantenido constantes en todos los escenarios considerados.

Parámetro	Valor	
	Servicios V2X genéricos	Servicios Cooperativos
α	0.016	
β_{base}	0.0012	
DR_{base}	17 kbps	6.5 kbps
CBR_{target}	0.68	
δ_0	0	
δ_{max}	0.03	
δ_{min}	0.0006	
G_{max}	0.0005	
G_{min}	-0.00025	

Tabla 4. Valores de los parámetros DCC

En todos los escenarios se emplea la tecnología ITS-G5 sobre el canal ITS de 5.9 GHz, utilizando una tasa física de transmisión de 6 Mbps.

5.2. Evaluación de servicios V2X genéricos en escenario estático

En esta sección se evalúa el comportamiento de los mecanismos de gestión de recursos propuestos en el escenario estático descrito en la Sección 5.1.3. Este escenario está compuesto por 60 vehículos situados dentro del mismo rango de comunicación, permitiendo analizar el efecto de las técnicas propuestas en condiciones controladas y sin la influencia de la movilidad o de cambios en la topología de red.

Cada vehículo estima periódicamente los recursos requeridos por sus servicios V2X a partir del tráfico que habría generado durante el último segundo en ausencia de restricciones impuestas por el RM. Aunque esta estimación se actualiza de forma continua durante toda la simulación, los servicios V2X genéricos considerados presentan demandas de recursos constantes debido a la naturaleza de sus patrones de generación de tráfico. Con el objetivo de introducir heterogeneidad en los requisitos de comunicación,

se consideran tres tipos de vehículos. Los vehículos de Tipo 1 implementan únicamente V2X Service 1, presentando una demanda media de 17 kbps. Los vehículos de Tipo 2 implementan V2X Service 1 y V2X Service 2, alcanzando una demanda agregada de aproximadamente 289 kbps. Finalmente, los vehículos de Tipo 3 implementan los tres servicios V2X genéricos, requiriendo alrededor de 345 kbps.

5.2.1. Análisis de la estabilidad y convergencia

Esta subsección analiza la estabilidad y la convergencia de la carga del canal alcanzada por las tres soluciones RM evaluadas. Se espera que la convergencia se produzca alrededor del valor objetivo de CBR de 0.68 [10], mientras que la estabilidad se define como la ausencia de oscilaciones significativas en la CBR experimentada a lo largo del tiempo. Con este propósito, la Figura 9 y la Figura 10 muestra la evolución temporal de la CBR medida por los vehículos en el escenario considerado. La figura presenta la mediana, así como los percentiles 5, 25, 75 y 95, y distingue entre configuraciones en las que los servicios V2X genéricos tienen la misma prioridad y configuraciones en las que poseen prioridades diferentes. La representación en percentiles tiene el objetivo de mostrar que la capa de acceso de todos los vehículos miden una CBR muy similar.

Como puede observarse en las Figuras 9 y 10, la solución de referencia basada en β estático presenta un comportamiento estable y convergente. Aunque no alcanza el valor al objetivo de CBR 0.68 establecido por ETSI debido a que no hay congestión suficiente, se aproxima ligeramente a ese valor. Cuando todos los servicios poseen la misma prioridad se aprecia una dispersión ligeramente superior entre vehículos. Este efecto se debe principalmente a que el intervalo de generación de mensajes del Servicio V2X 1 supera con frecuencia el periodo de medición de la CBR. Como consecuencia, este servicio contribuye únicamente a una parte de las medidas de CBR realizadas en la red. Este problema se encuentra actualmente en discusión dentro de ETSI [4] y una posible solución consiste en utilizar mecanismos adaptativos de medición de la CBR.

Los resultados obtenidos con la propuesta DA demuestran que la introducción de un β dinámico no compromete las propiedades de estabilidad ni de convergencia del sistema. Además, la CBR converge a valores más próximos al objetivo establecido en comparación con la solución de referencia basada en β estático, lo que indica una

utilización más eficiente de los recursos disponibles del canal inalámbrico. Esta mejora se atribuye a los mayores valores de β asignados a los vehículos con mayores demandas de tráfico.

Finalmente, las figuras muestran que la incorporación de mecanismos de priorización en la propuesta DPA tampoco introduce problemas de estabilidad. La carga del canal continúa convergiendo correctamente hacia el valor objetivo, confirmando que las técnicas propuestas preservan las propiedades fundamentales de Adaptive DCC incluso en escenarios con vehículos y servicios heterogéneos.

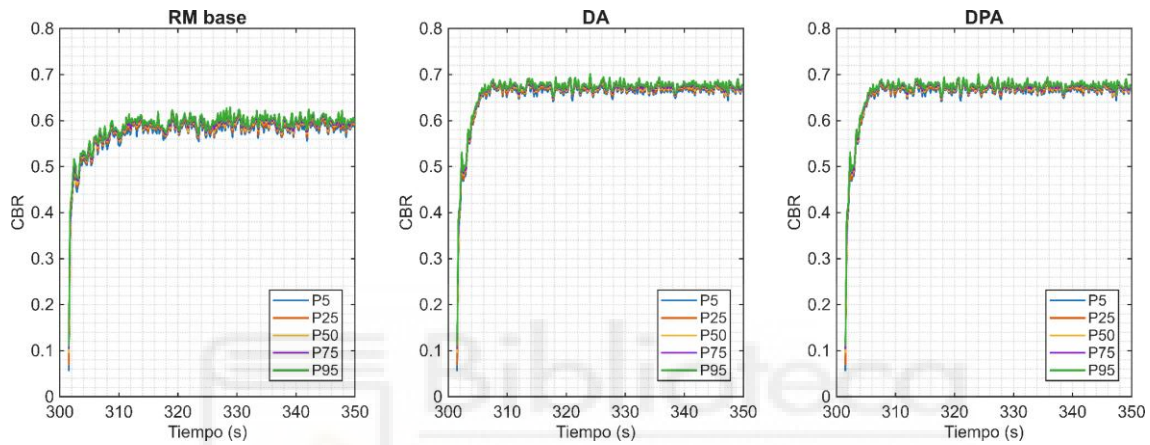


Figura 9. Percentiles de CBR en función del tiempo en escenarios con servicios V2X genéricos con misma prioridad

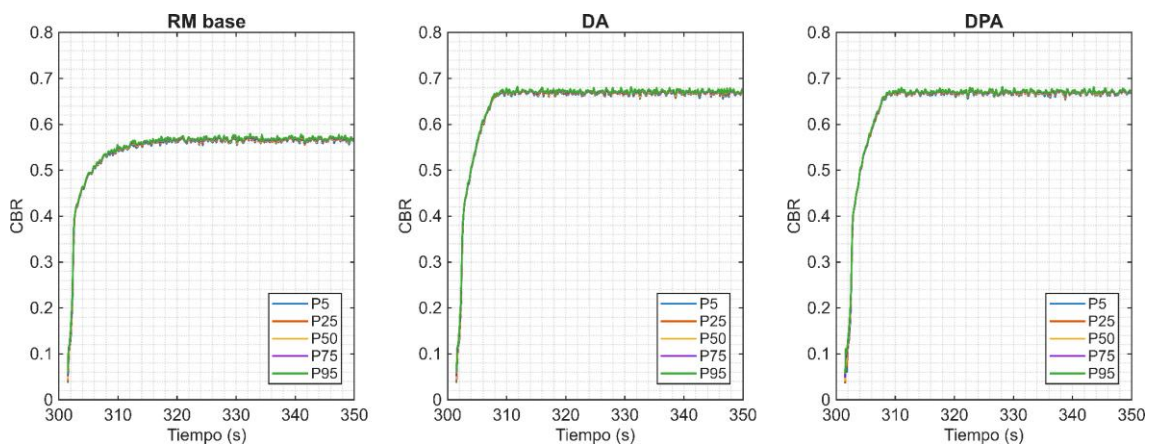


Figura 10. Percentiles de CBR en función del tiempo en escenarios con servicios V2X genéricos con distinta prioridad

5.2.2. Análisis de la equidad en la asignación de recursos

La equidad se evalúa analizando cómo se distribuyen los recursos entre los vehículos y comprobando si los diferentes servicios V2X reciben los recursos que requieren. La Figura 11 ilustra la fracción máxima media de recursos que puede utilizar un vehículo (δ) obtenida con la solución RM de referencia basada en un β estático, distinguiendo entre configuraciones en las que todos los servicios tienen la misma prioridad y aquellas en las que se utilizan prioridades diferentes. Como muestra la Figura 11, todos los tipos de vehículos convergen al mismo valor de δ , a pesar de tener diferentes requisitos de tasa de datos. Esto indica que a cada vehículo se le asigna una fracción idéntica de los recursos disponibles, independientemente de si ejecuta uno, dos o tres servicios V2X. Esta asignación uniforme es consecuencia directa de la estrategia de β estático, que calcula δ únicamente en función del CBR medido [10][12] y no tiene en cuenta los requisitos heterogéneos de los servicios de cada vehículo.

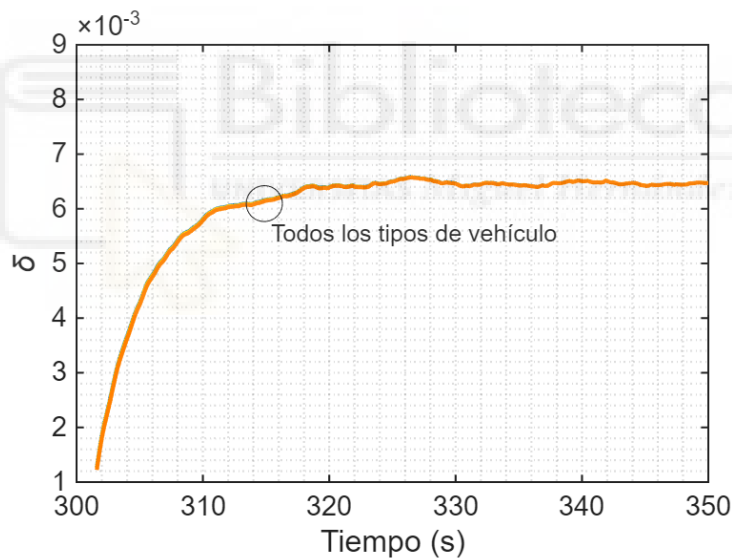


Figura 11. Recursos de los vehículos con RM base

El impacto de esta solución de RM base, una vez δ converge y el sistema es estable, se refleja en los ratios de satisfacción de los servicios V2X mostrados en la Figura 12, que refleja la relación entre los recursos que demandan y los asignados. Cuando todos los servicios tienen la misma prioridad, los vehículos de Tipo 1, con bajas demandas de tráfico, son capaces de satisfacer completamente los requisitos de sus servicios con los recursos asignados. Por el contrario, los vehículos de Tipo 2 deben reducir

proporcionalmente los recursos asignados a los Servicios V2X 1 y 2, mientras que los Servicios V2X 1, 2 y 3 de los vehículos de Tipo 3 experimentan reducciones aún más elevadas que afectan a los tres servicios, debido a que los vehículos Tipo 3 requiere más recursos.

Estos resultados indican que, aunque la solución RM base consigue equidad a nivel de vehículo al imponer una misma cuota de recursos para todos, no es capaz de considerar las demandas heterogéneas existentes cuando coexisten múltiples servicios con la misma prioridad. En otras palabras, la solución garantiza que todos los vehículos accedan a una fracción similar de los recursos disponibles, pero no asegura que los servicios reciban una proporción equivalente de los recursos que realmente necesitan. Esto provoca diferencias significativas en los niveles de satisfacción obtenidos por cada tipo de vehículo.

En cambio, cuando se aplican prioridades diferentes entre servicios el sistema presenta el comportamiento esperado. Las demandas del Servicio V2X 1 quedan completamente satisfechas para todos los tipos de vehículos, Esto se debe a que se trata del servicio con mayor prioridad y a que la fracción máxima de recursos (δ) calculada por el RM de los vehículos resulta suficiente para cubrir sus necesidades de transmisión. Por otro lado, los recursos restantes se asignan al Servicio V2X 2, el segundo servicio con mayor prioridad. Sin embargo, en los vehículos de Tipo 2 y Tipo 3 dichos recursos no son suficientes para satisfacer completamente sus requisitos, por lo que su ratio de satisfacción es reducido. Finalmente, el Servicio V2X 3, al ser el de menor prioridad, no recibe recurso, por lo tanto no transmite en ningún momento en esta simulación. Estos resultados demuestran que la solución RM base es capaz de respetar correctamente las prioridades configuradas entre servicios, aunque sigue sin abordar las diferencias en las necesidades de recursos existentes entre los distintos tipos de vehículos.

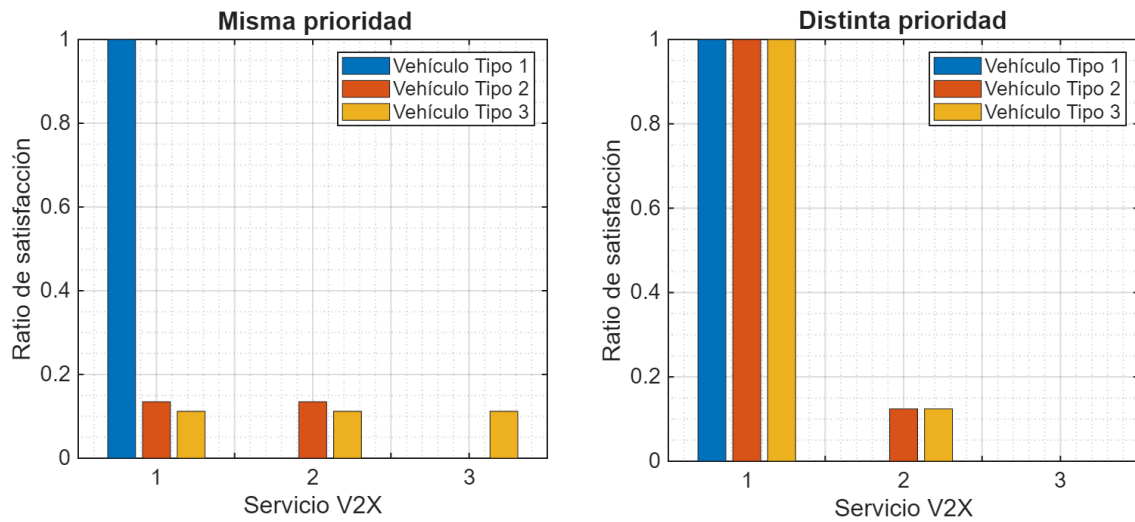


Figura 12. Ratio de satisfacción de los servicios con RM base

En la Figura 13 se puede observar el valor de β obtenido por cada tipo de vehículo al aplicar la solución DA propuesta basada en β dinámica. Los vehículos pertenecientes al mismo tipo convergen hacia valores de β similares, con pequeñas desviaciones debido a la aleatorización de la generación de tráfico ajustada en cada Servicio V2X. Dado que, en la solución DA, el valor de β depende únicamente de los requisitos totales de los servicios del vehículo, las diferencias observadas entre tipos de vehículos reflejan directamente sus distintas necesidades de recursos. Además, puede observarse que el valor de β permanece prácticamente constante a lo largo de toda la simulación. Esto se debe a que los requisitos de transmisión de los servicios V2X considerados son constantes en el tiempo.

La figura también incluye como referencia el valor de beta utilizado por RM base, que corresponde con la beta del vehículo Tipo 1. Esto es consecuencia del parámetro DR_{base} , que como se ha explicado anteriormente, coincide con los bits/segundo que requieren los servicios contemplados en la Release 1 de ETSI [10]. En los escenarios evaluados con servicios V2X genéricos, dicha tasa coincide con la requerida por el Servicio V2X 1. Como los vehículos de Tipo 1 únicamente ejecutan este servicio, el valor de β calculado mediante la solución DA resulta idéntico al empleado por la solución RM base. Por otro lado, los vehículos Tipo 2 calculan una β considerablemente mayor que los vehículos Tipo 1, debido a que además del Servicio V2X 1 ejecutan el Servicio V2X 2, que requiere una elevada ocupación del canal. Finalmente, los vehículos de Tipo 3 alcanzan los valores

más elevados de β , ya que ejecutan los tres servicios V2X considerados y, en consecuencia, presentan la mayor demanda total de recursos.

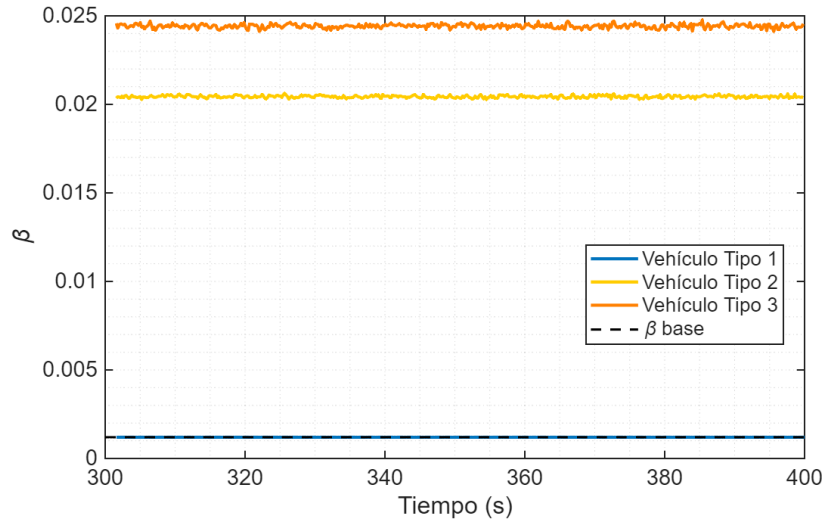


Figura 13. Beta calculada por cada tipo de vehículo con DA

Como consecuencia, a diferencia del caso de β estática donde todos los vehículos recibían el mismo valor de δ , la Figura 14 muestra la consecuencia de aplicar una β dinámica con la solución DA, permitiendo que los vehículos con mayores demandas de recursos obtengan una proporción mayor de los recursos disponibles, es decir, valores más elevados de δ . Dentro de cada tipo de vehículo, los valores de δ asignados son prácticamente idénticos, mientras que las diferencias observadas entre distintos tipos de vehículos son coherentes con sus respectivas necesidades de servicio.

Se puede observar que en el instante inicial de la simulación todos los vehículos empiezan con una δ_0 igual a 0. Tras un breve periodo transitorio inicial, las curvas de asignación de δ para cada tipo de vehículo se estabilizan y convergen a unos valores proporcionales a las respectivas β calculadas por cada tipo de vehículo. La convergencia se produce en pocos segundos tras el inicio de la simulación, lo que evidencia una rápida adaptación del mecanismo DA a las condiciones de congestión existentes en el canal. Una vez alcanzada estabilidad del sistema, las variaciones temporales son reducidas, lo que indica que el mecanismo de control es capaz de adaptarse al canal manteniendo una asignación de recursos estable y coherente con las necesidades de cada vehículo.

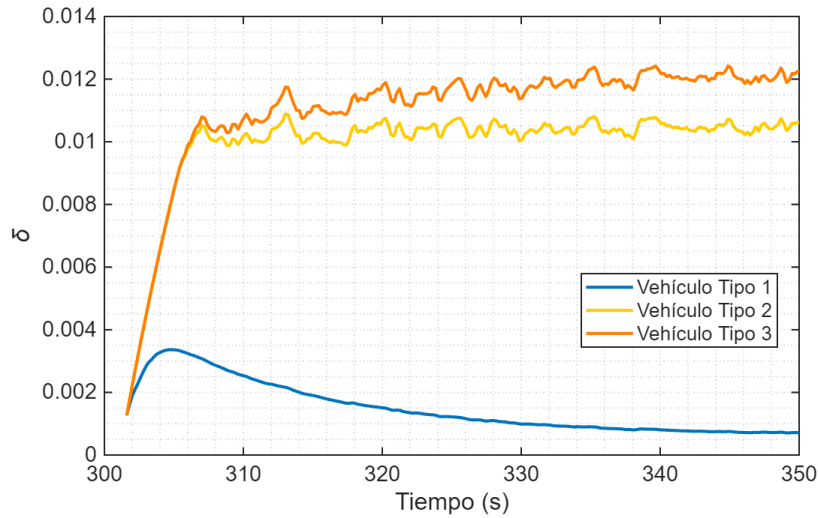


Figura 14. Evolución temporal de los recursos de cada tipo de vehículo con DA

Para evaluar si esta asignación de recursos es suficiente para satisfacer las demandas de los servicios, la Figura 15 muestran el ratio medio de satisfacción de los servicios. La figura muestra que, cuando todos los servicios tienen asignada la misma prioridad, todos ellos alcanzan niveles de satisfacción similares. En este caso, los recursos asignados a cada servicio se reducen aproximadamente en la misma proporción respecto a los recursos solicitados, alrededor de un 21 % según los resultados. Este comportamiento es el esperado, ya que la relación entre los recursos que requieren los vehículos y los recursos asignados por la solución DA es igual en todos los tipos de vehículos. Estos resultados representan una mejora clara respecto a la solución RM base basada en β estática, ya que consigue equidad no solo a nivel de vehículo, sino también entre servicios.

Sin embargo, la solución DA no tiene en cuenta las prioridades de los servicios entre diferentes vehículos. Como consecuencia, en la figura se muestra que el ratio de satisfacción del Servicio V2X 1, que posee la prioridad más alta, se reduce en los vehículos de Tipo 1 cuando los servicios tienen prioridades diferentes. Esto ocurre porque a estos vehículos se les asigna una menor proporción total de recursos, que resulta insuficiente para satisfacer completamente los requisitos del Servicio V2X 1. Este problema es importante abordarlo, ya que puede provocar que servicios considerados críticos o de mayor relevancia no dispongan de los recursos necesarios para garantizar el correcto funcionamiento del vehículo autónomo conectado.

Aunque este efecto no se observa en la solución RM base para el escenario considerado, podría aparecer en escenarios donde el Servicio V2X 1 presentase mayores demandas de tasa de transmisión, ya que dicha solución tampoco considera las prioridades de los servicios entre vehículos.

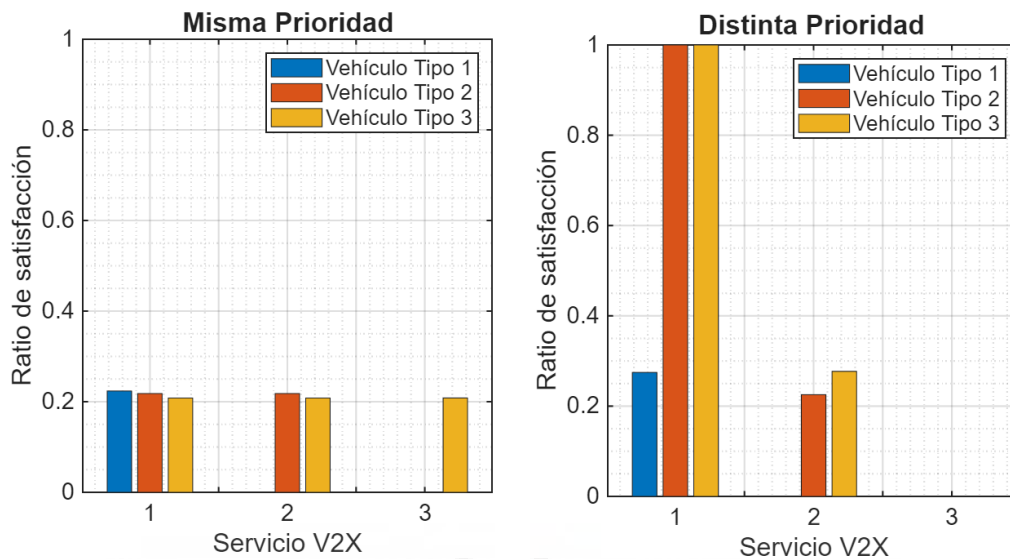


Figura 15. Ratio de satisfacción de los servicios con DA

Para tratar este problema se analizan los resultados utilizando la solución DPA. La Figura 16 muestra β calculado mediante la técnica propuesta, que combina β dinámica y priorización de servicios. Al tener en cuenta la prioridad de los servicios, resulta necesario analizar los resultados distinguiendo entre escenarios donde todos los servicios tienen la misma prioridad y escenarios donde existen prioridades diferenciadas.

Como puede observarse, cuando todos los servicios tienen la misma prioridad los resultados son idénticos a los obtenidos con la solución DA sin priorización. En este caso, cada vehículo calcula un valor de β proporcional a la demanda total generada por los servicios que ejecuta.

Sin embargo, cuando se asignan diferentes prioridades a los servicios, el comportamiento cambia significativamente. Los vehículos de Tipo 2 y Tipo 3 obtienen valores de β prácticamente idénticos. Esto es debido a que los vehículos Tipo 3 tienen suficientes recursos para satisfacer al servicio V2X 1 y, en menor proporción, al servicio V2X2. En consecuencia, el Servicio V2X 3, presente únicamente en los vehículos de Tipo 3 y con la prioridad más baja, no tiene recursos. Como consecuencia, las demandas del servicio

V2X 3 no son tomadas en cuenta para calcular β . Por lo tanto, los vehículos Tipo 2 y 3 calculan β a partir de los servicios V2X 1 y 2.

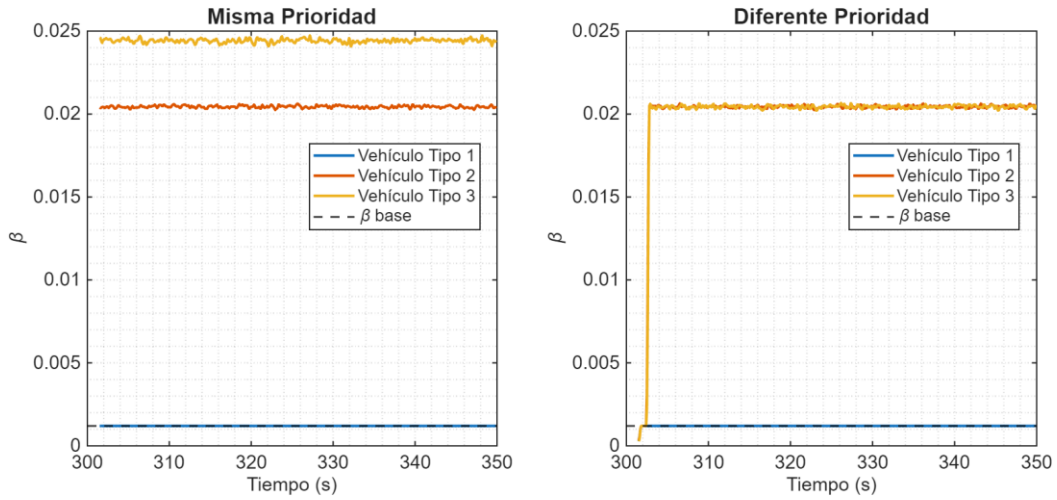


Figura 16. Beta calculada por cada tipo de vehículo con DPA

Con la propuesta DPA, se observa en la Figura 17 como δ depende si los servicios tienen la misma o distinta prioridad. Cuando todos los servicios poseen la misma prioridad, como β coincide con la obtenida mediante la solución DA, la asignación de recursos también es idéntica. En consecuencia, la fracción de recursos asignada a cada tipo de vehículo depende únicamente de las demandas totales de los servicios que ejecuta. Reduciendo de esta manera, la tasa de los servicios en la misma proporción.

Por otro lado, cuando se aplican diferentes prioridades a los servicios, los beneficios de la solución propuesta se hacen evidentes. Como muestra la figura, los vehículos de Tipo 2 y Tipo 3 convergen hacia valores de δ similares, mientras que los vehículos de Tipo 1 obtienen una menor fracción de recursos, acorde con el menor número de servicios que ejecutan.

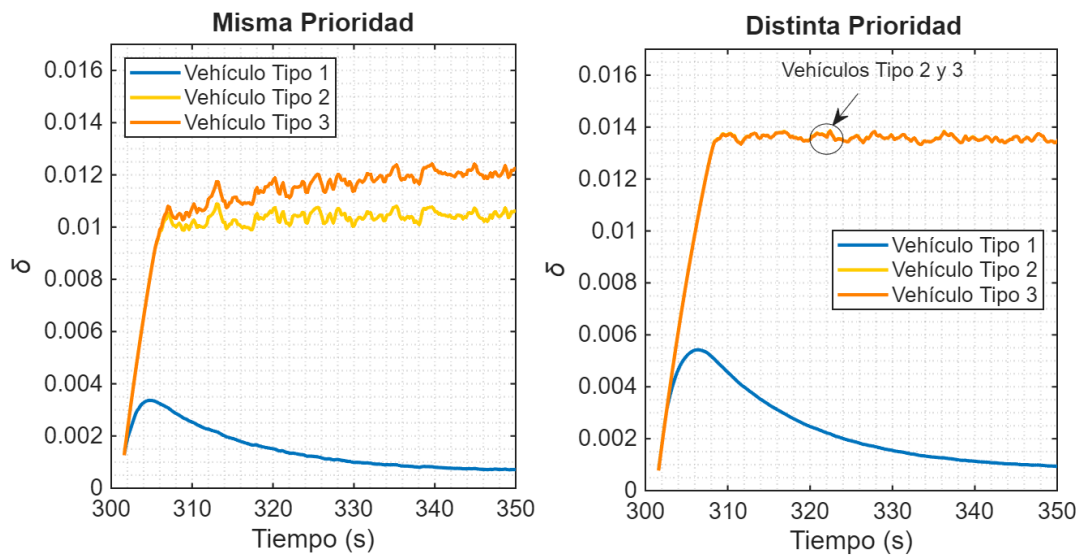


Figura 17. Evolución temporal de los recursos de cada tipo de vehículo con DPA

El ratio de satisfacción de los servicios se muestra en la Figura 18. Se puede observar que, cuando todos los servicios tienen la misma prioridad, alcanzan ratios de satisfacción muy similares, reduciéndose sus demandas de recursos aproximadamente en la misma proporción. Esto confirma que, en ausencia de priorización entre servicios, las extensiones propuestas no modifican el comportamiento del mecanismo DA.

El impacto sobre la satisfacción de los servicios, en escenarios con distinta prioridad, es interesante. En este caso, los requisitos del Servicio V2X 1 se satisfacen completamente para todos los tipos de vehículos. Entrando en detalle, la demanda del servicio V2X 1 en los vehículos Tipo 1 supera la fracción de recursos inicialmente asignada al vehículo mediante δ . Sin embargo, debido al funcionamiento de DPA, el gestor de recursos permite que el Servicio V2X 1 continúe transmitiendo hasta satisfacer completamente sus requisitos. Como consecuencia, el tráfico de mayor prioridad queda protegido incluso en situaciones de congestión.

Por otra parte, el Servicio V2X 2 experimenta una reducción en su ratio de satisfacción, similar para los vehículos de Tipo 2 y Tipo 3, mientras que el Servicio V2X 3 queda completamente suprimido debido a su menor prioridad y a la limitación de recursos disponibles.

Estos resultados confirman que la solución DPA propuesta es capaz de aplicar correctamente la priorización de servicios en situaciones de escasez de recursos, manteniendo al mismo tiempo las propiedades de equidad y eficiencia de la solución DA. De esta forma, se resuelve la principal limitación identificada en la solución DA, donde los servicios de mayor prioridad podían verse penalizados al compartir recursos con servicios menos críticos. Con DPA, los servicios de mayor prioridad quedan protegidos frente a degradaciones innecesarias, mientras que los servicios de menor prioridad únicamente ven limitados sus recursos cuando la congestión del canal lo hace estrictamente necesario.

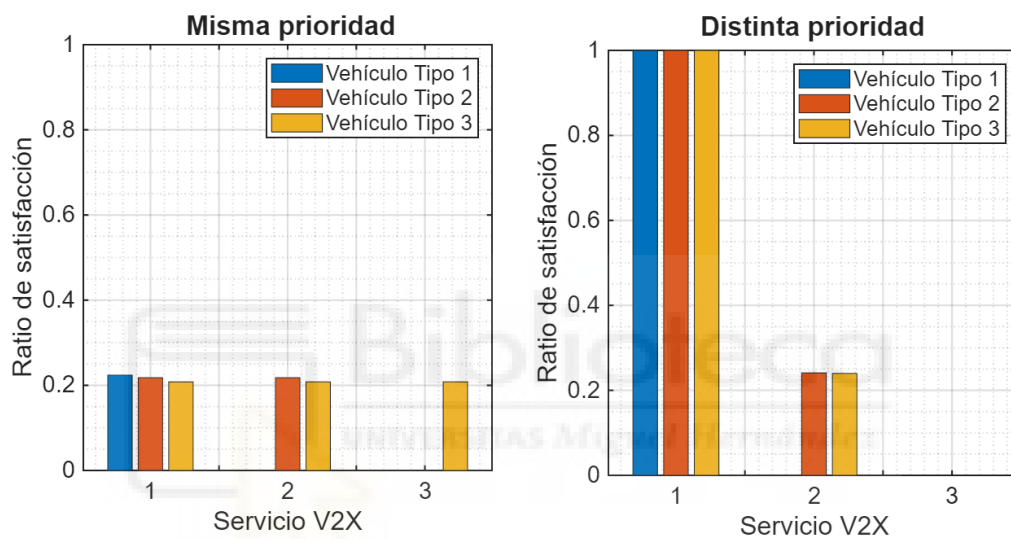


Figura 18. Ratio de satisfacción de los servicios V2X genéricos con DPA

5.3. Evaluación de CAS y CPS en escenario dinámico

En esta sección, la evaluación se amplía al segundo escenario, que considera servicios V2X realistas con demandas de recursos variables, concretamente los servicios CAS [6] y CPS [7]. A diferencia del análisis anterior, basado en servicios V2X genéricos con requisitos de tasa de datos constantes, este escenario evalúa las soluciones de gestión de recursos a requisitos de tasa de datos variables en el tiempo. El análisis sigue una estructura similar a la de la sección anterior, centrándose en la estabilidad, la

convergencia, la equidad y la satisfacción de los servicios. Sin embargo, se presta especial atención a los aspectos más críticos derivados de las demandas dinámicas y asimétricas de los servicios, donde las decisiones de gestión de recursos se vuelven más complejas y la priorización de servicios adquiere un papel fundamental.

El análisis comienza observando la tasa de datos requerida por cada vehículo en el escenario considerado. Todos los vehículos implementan tanto el servicio CAS como el servicio CPS. Sin embargo, la mitad de los vehículos están equipados con sensores de alta calidad, lo que da lugar a un mayor número de objetos detectados y, en consecuencia, a mayores demandas de tráfico. El servicio CAS genera una carga relativamente estable y moderada, representada en la Figura 19.

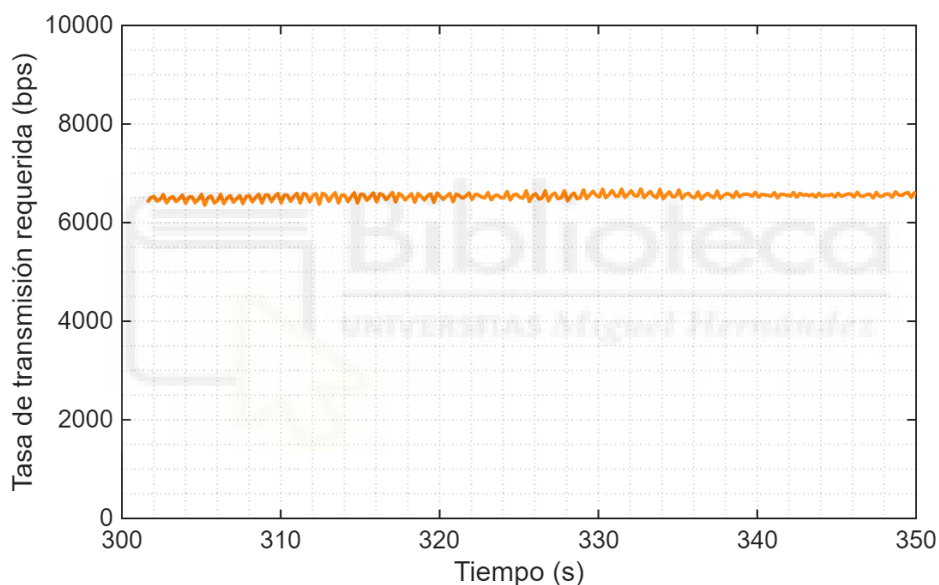


Figura 19. Tasa de transmisión requerida por el CAS

Este escenario se ha simulado en una autovía de doble sentido y 2 carriles para cada sentido, además los vehículos realizan maniobras de adelantamiento y circulan a velocidades variables. Debido a esto, el tráfico generado por CPS es altamente dinámico, ya que el número de objetos detectados por cada vehículo cambia continuamente a lo largo del tiempo. Como resultado, los requisitos instantáneos de tasa de datos pueden diferir de forma considerable entre vehículos, incluso entre aquellos que disponen del mismo nivel de calidad de sensores, ya que dependen de la posición relativa de los vehículos circundantes. Este comportamiento se ilustra en la Figura 20, que muestra la evolución temporal de la tasa de datos requerida por vehículo, representando la mediana

junto con los percentiles 5, 25, 75 y 95 para las configuraciones con sensores de baja y alta calidad.

Este escenario ilustra, por tanto, el desafío inherente al que se enfrenta una solución de gestión de recursos en despliegues V2X realistas: asignar recursos de forma adecuada ante demandas de servicio heterogéneas y variables en el tiempo, manteniendo al mismo tiempo una carga estable del canal.

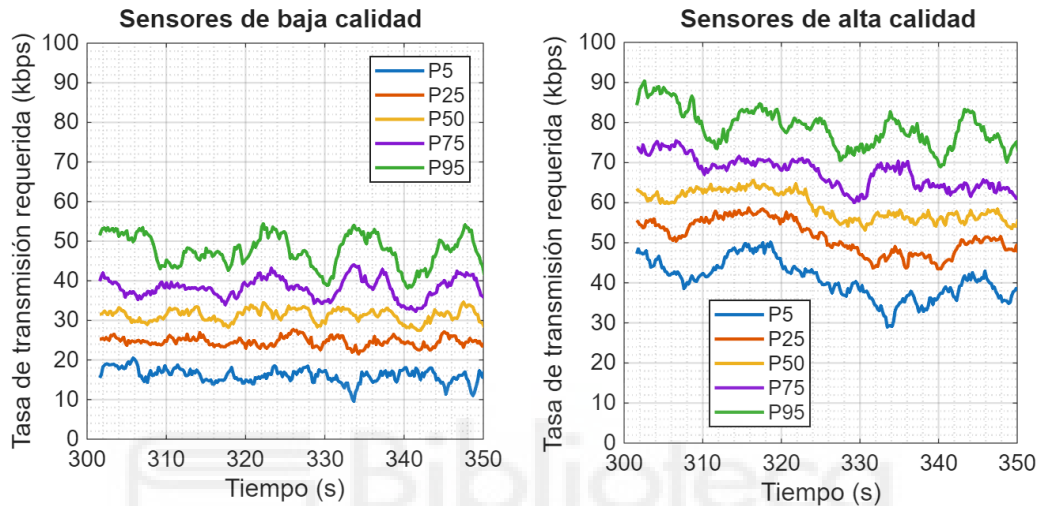


Figura 20. Tasa de transmisión requerida por el CPS según el tipo de sensor

5.3.1. Análisis de la estabilidad y convergencia

Para evaluar la estabilidad y la convergencia de la carga del canal en este escenario, la Figura 21 y la Figura 22 muestra una representación mediante los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 del CBR experimentado por todos los vehículos durante la simulación, para las tres soluciones RM evaluadas y para las configuraciones con servicios de igual y distinta prioridad respectivamente.

Los resultados muestran que todas las soluciones RM consiguen mantener un CBR estable y converger a valores próximos al punto de operación objetivo. La diferencia entre los percentiles es reducida en todos los casos, lo que indica una variabilidad temporal y espacial limitada en el CBR experimentado. Igual que el escenario anterior con servicios V2X genéricos, la técnica RM base converge a un valor CBR ligeramente por debajo del objetivo. En cambio, con las otras dos soluciones DA y DPA, la mediana permanece cercana al valor objetivo deseado, mientras que los percentiles 5 y 95 muestran que

incluso las situaciones más extremas observadas durante la simulación presentan únicamente pequeñas desviaciones en función de la configuración RM utilizada y del esquema de prioridades aplicado a los servicios.

Estas observaciones confirman que las soluciones RM propuestas son capaces de mantener la estabilidad de la carga del canal incluso en presencia de demandas de tráfico heterogéneas y variables en el tiempo, como las generadas por los servicios CAS y CPS.

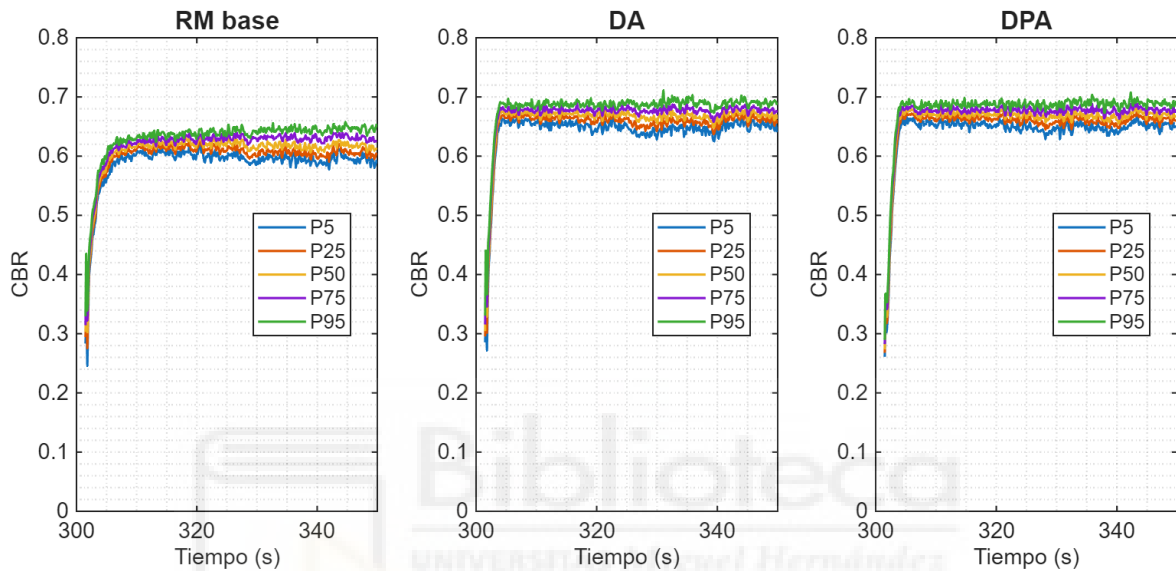


Figura 21. CBR en función del tiempo en escenarios con servicios cooperativos con misma prioridad

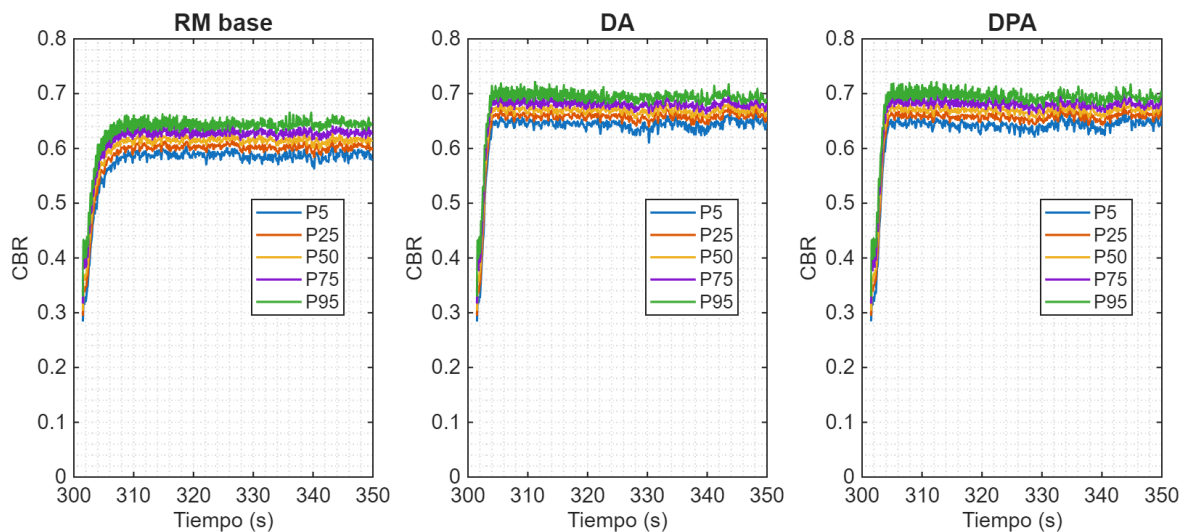


Figura 22. CBR en función del tiempo en escenarios con servicios cooperativos con distinta prioridad

5.3.2. Análisis de la equidad y asignación de recursos

De la misma manera que se ha analizado con los servicios V2X genéricos, en esta sección se va abordar la equidad y la asignación de recursos en este escenario de autovía con los servicios cooperativos CAS y CPS.

La Figura 23 muestra los percentiles de la tasa asignada a los vehículos mediante RM base. Recordemos que, a diferencia de las soluciones propuestas, la técnica RM base emplea un valor de β estático e idéntico para todos los vehículos, independientemente de los servicios que ejecuten o de sus necesidades de recursos.

Aunque todos los vehículos utilizan el mismo valor de β y persiguen un mismo nivel objetivo de ocupación del canal, los recursos asignados no son iguales para todos los vehículos. Esto se debe a las variaciones espaciales de la densidad de tráfico presentes en el escenario. En un mismo instante de simulación pueden coexistir zonas con una elevada concentración de vehículos y otras con una ocupación significativamente menor.

Como resultado, la fracción de recursos disponible para transmitir, y por tanto la tasa de datos asignada, puede variar entre vehículos situados en distintas zonas de la carretera. No obstante, estas diferencias se deben exclusivamente a las condiciones locales de congestión y no a las necesidades reales de los servicios ejecutados por cada vehículo, ya que la solución RM base no considera la heterogeneidad de las demandas de tráfico durante el proceso de asignación de recursos.

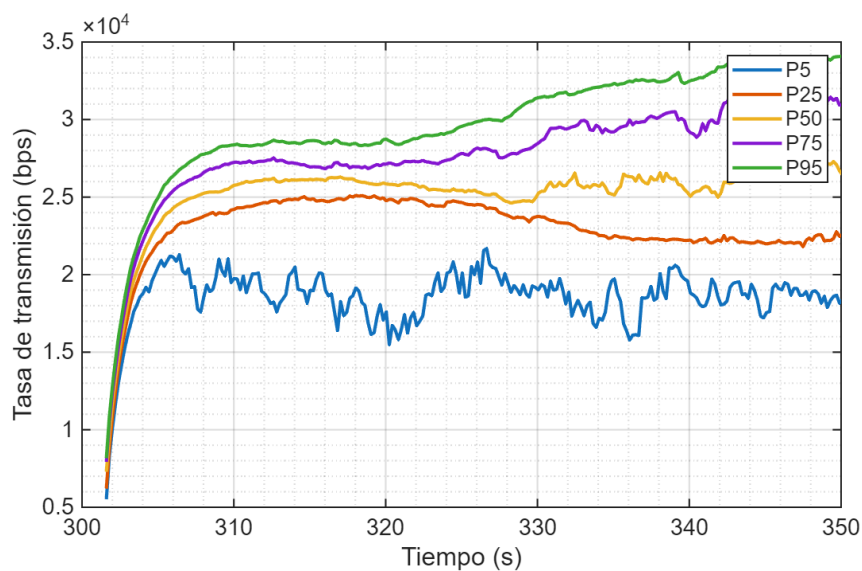


Figura 23. Percentiles de la tasa de transmisión de los vehículos con RM base

Los ratios de satisfacción de los servicios CAS y CPS se muestran en la Figura 24, que representan la relación entre los recursos demandados por cada servicio y los recursos finalmente asignados por el mecanismo RM base una vez el sistema se ha estabilizado. Cuando ambos servicios tienen la misma prioridad, los vehículos equipados con sensores de baja calidad alcanzan, tanto para CAS como para CPS, un ratio de satisfacción más elevado que los vehículos equipados con sensores de alta calidad.

Este comportamiento se debe a que los vehículos con sensores de alta calidad detectan un mayor número de objetos y, en consecuencia, demandan una cantidad superior de tráfico cooperativo. Sin embargo, la solución RM base no tiene en cuenta estas diferencias en las necesidades de recursos y asigna recursos siguiendo únicamente criterios de congestión del canal. Provocando que, tanto los vehículos equipados con sensores de baja calidad como los vehículos equipados con sensores de alta calidad obtienen de media los mismos recursos. Como consecuencia, los vehículos con mayores demandas experimentan una mayor reducción en los recursos disponibles para transmitir, lo que se traduce en menores ratios de satisfacción.

Cuando se aplican prioridades diferentes entre servicios, el sistema presenta el comportamiento esperado. Como muestra la Figura 24, las demandas del servicio CAS quedan completamente satisfechas para todos los vehículos, alcanzando un ratio de satisfacción igual a 1. Esto se debe a que CAS es el servicio de mayor prioridad y demanda una cantidad de recursos suficiente para satisfacer a todos los vehículos. En cambio, el servicio CPS encuentra sus recursos reducidos. Especialmente si el vehículo tiene sensores de alta calidad, ya que detectan más objetos pero se le asigna la misma cantidad de recursos que los vehículos con sensores de baja calidad.

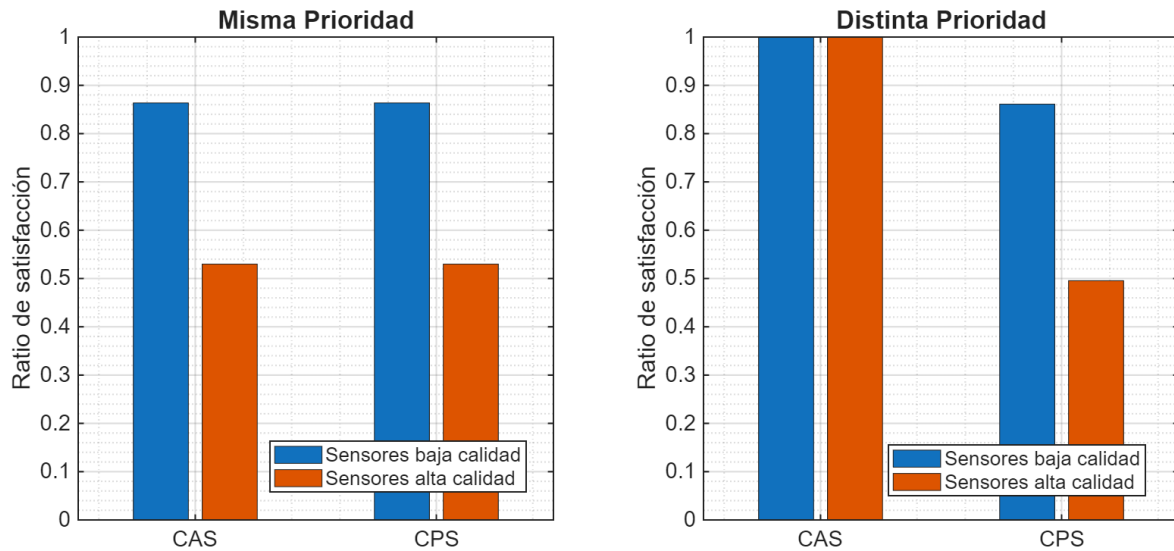


Figura 24. Ratio de satisfacción de los servicios cooperativos con RM base

La Figura 25 muestra la evolución temporal del parámetro β calculado mediante la solución DA y DPA en el escenario con servicios cooperativos CAS y CPS. A diferencia de lo observado en el escenario anterior con servicios V2X genéricos, donde β permanecía constante, en este caso su valor varía continuamente a lo largo del tiempo. Este comportamiento se debe a que los requisitos de transmisión de los servicios cooperativos dependen del entorno percibido por cada vehículo y, por tanto, cambian dinámicamente conforme varía el número de objetos detectados.

Se observa que los vehículos equipados con sensores de alta calidad calculan sistemáticamente valores de β superiores a los obtenidos por los vehículos con sensores de baja calidad. Esto es consecuencia directa de la mayor cantidad de información cooperativa generada por los sensores de alta calidad, que detectan un mayor número de objetos y requieren, por tanto, una mayor cantidad de recursos de comunicación. A pesar de estas variaciones temporales, los valores de β se mantienen claramente diferenciados entre ambos grupos de vehículos, reflejando adecuadamente sus distintas necesidades de transmisión.

La coincidencia entre los valores de β obtenidos con las soluciones DA y DPA se debe al procedimiento utilizado para su cálculo. En la solución DA, β se calcula a partir de la demanda total de recursos de los servicios implementados por cada vehículo. Por su parte,

DPA únicamente considera en dicho cálculo aquellos servicios a los que se les asignan recursos tras aplicar el mecanismo de priorización. Sin embargo, en el escenario evaluado ninguno de los servicios cooperativos, ni CAS ni CPS, llega a quedar completamente sin recursos. Como consecuencia, ambos servicios son tenidos en cuenta durante el cálculo de β en todas las situaciones analizadas, obteniéndose exactamente los mismos valores con las soluciones DA y DPA.

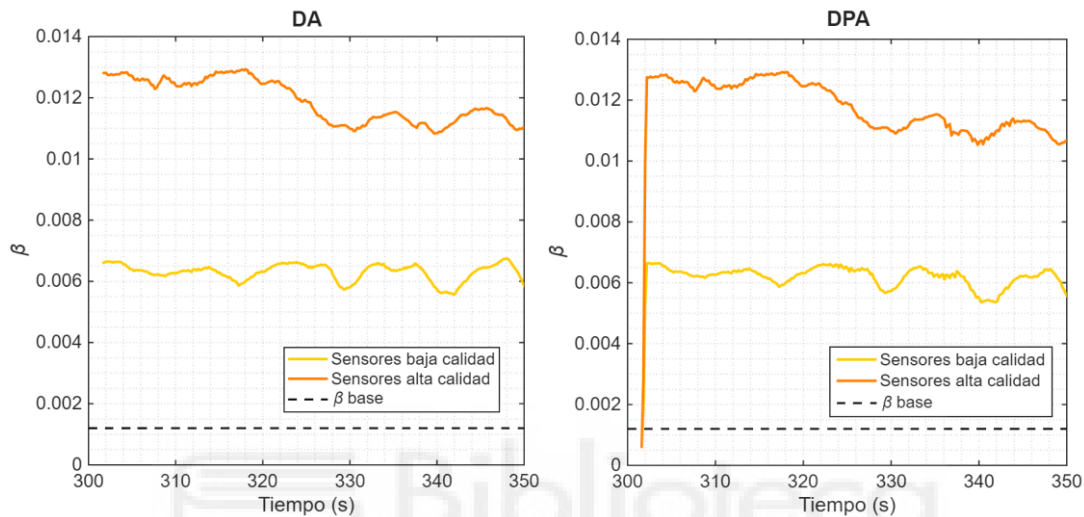


Figura 25. Beta calculada por cada tipo de vehículo con DA y DPA

Una vez analizado el comportamiento del parámetro β , la Figura 26 muestra la evolución temporal de la tasa de transmisión asignada a los vehículos al aplicar la solución DA y DPA. Al obtener el mismo valor de β en las dos técnicas, los recursos asignados a los vehículos y la tasa de transmisión resultante son también idénticos.

Los resultados muestran que los vehículos equipados con sensores de alta calidad disponen de una tasa de transmisión significativamente superior a la obtenida por los vehículos con sensores de baja calidad. Este comportamiento es coherente con los valores de β observados anteriormente.

Asimismo, puede observarse que la tasa de transmisión asignada presenta variaciones a lo largo del tiempo para ambos grupos de vehículos. Estas fluctuaciones son consecuencia de los cambios en las demandas instantáneas de los servicios CAS y CPS, así como de las variaciones locales de congestión experimentadas en las distintas zonas del escenario. A

pesar de ello, la diferencia entre ambos grupos de vehículos se mantiene durante toda la simulación, lo que demuestra que las soluciones DA y DPA propuestas adaptan continuamente la asignación de recursos a la heterogeneidad existente en el sistema.

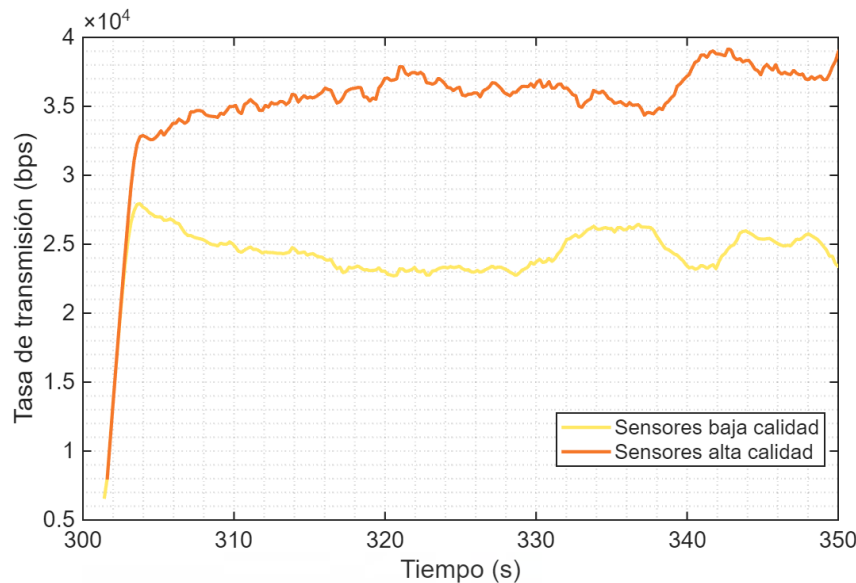


Figura 26. Tasa de transmisión según la calidad de los sensores en DA y DPA

Por último, la Figura 27 y la Figura 28 muestran el ratio media de satisfacción de los servicios obtenida en el escenario CAS/CPS para las dos soluciones propuestas en este trabajo, DA y DPA respectivamente, considerando configuraciones con la misma prioridad para todos los servicios y configuraciones con diferentes niveles de prioridad. Cuando todos los servicios tienen asignada la misma prioridad, las soluciones propuestas alcanzan una ratio de satisfacción similar entre servicios y tipos de vehículos. En este caso, los recursos disponibles se reparten de forma proporcional entre CAS y CPS, independientemente de las capacidades de percepción de los vehículos. En comparación con la solución de referencia, este comportamiento refleja la capacidad de las soluciones propuestas para adaptarse de manera consistente a demandas heterogéneas y variables en el tiempo, dando lugar a una satisfacción de servicio más equilibrada en toda la red.

Cuando se aplican diferentes prioridades a los servicios, las soluciones DA y DPA son capaces de mantener un alto nivel de satisfacción para CAS independientemente de sus

capacidades de percepción. Al mismo tiempo, CPS alcanza ratios de satisfacción similares entre vehículos, con independencia de la calidad de sus sensores, aprovechando de forma eficiente los recursos disponibles restantes. Estos resultados confirman que las soluciones propuestas implementan eficazmente la priorización de servicios en escenarios realistas, protegiendo los servicios críticos relacionados con la seguridad y maximizando al mismo tiempo el aprovechamiento de los recursos disponibles para el tráfico de menor prioridad.

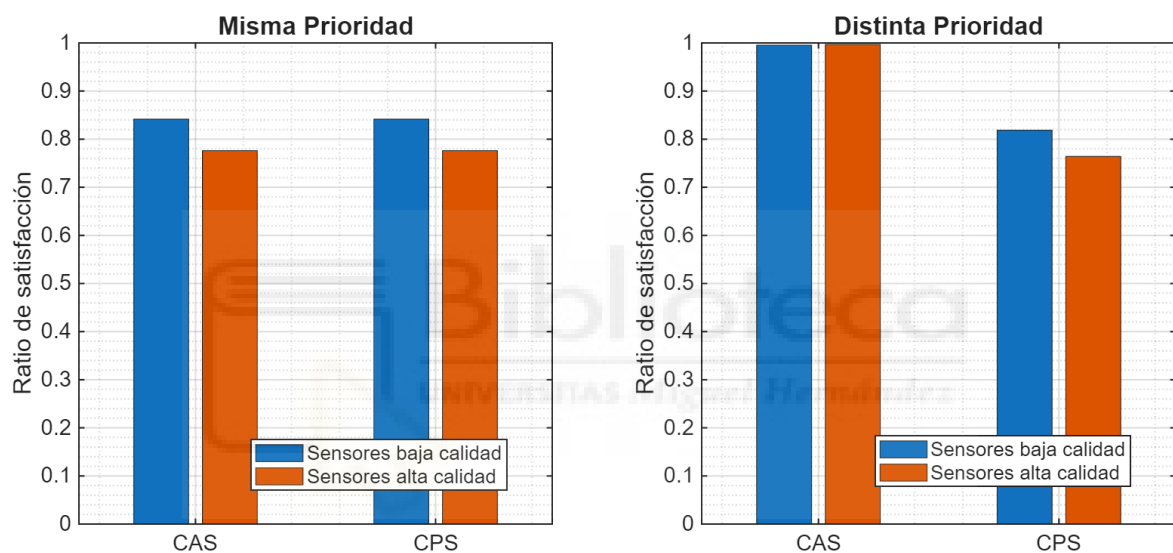


Figura 27. Ratio de satisfacción de los servicios cooperativos con DA

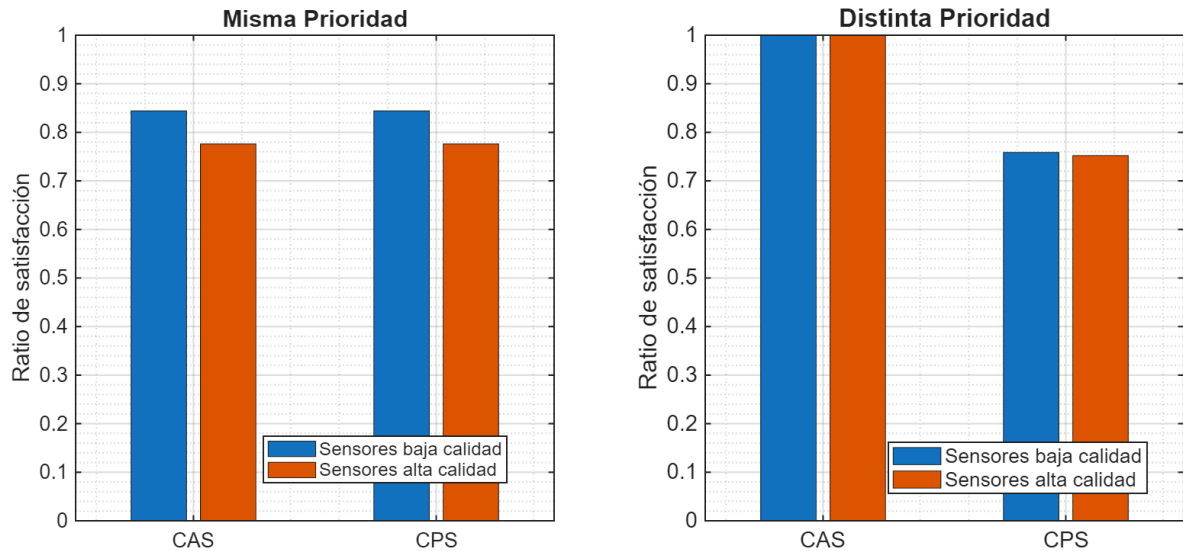


Figura 28. Ratio de satisfacción de los servicios cooperativos con DPA

En este escenario concreto no se observan diferencias significativas de rendimiento entre las soluciones DA y DPA. Sin embargo, en escenarios como los evaluados con servicios V2X genéricos donde los vehículos implementan diferentes conjuntos de servicios y las decisiones locales pueden dar lugar a una aplicación inconsistente de las prioridades sí se observan mejoras claras de rendimiento con la solución DPA.

5.4. Análisis y comparativa

Una vez evaluados de forma independiente el escenario estático controlado en la Sección 5.2 y el escenario dinámico de autovía en la Sección 5.3, resulta imprescindible realizar un análisis comparativo de las tres soluciones de gestión de recursos RM estudiadas: el mecanismo de referencia de ETSI RM, la propuesta adaptación dinámica de los recursos según la demanda de los servicios DA y la solución avanzada con priorización de servicios DPA.

Este análisis permite identificar las limitaciones intrínsecas de cada enfoque, las mejoras introducidas por las propuestas de este trabajo y cómo responden los algoritmos ante la heterogeneidad de nodos y la variabilidad del canal inalámbrico.

5.4.1. Evaluación del mecanismo de referencia: RM base

El algoritmo RM base, demuestra un comportamiento robusto en términos de estabilidad y convergencia, logrando estabilizar la carga del canal de manera consistente. Su principal virtud radica en que impone una equidad estricta a nivel de nodo: todos los vehículos, independientemente de sus características, reciben exactamente la misma fracción máxima de recursos.

Sin embargo, este enfoque constituye su principal fallo de diseño cuando se despliegan servicios heterogéneos dentro del marco de la Release 2 [4]. La incapacidad de adaptación ante la demanda, debido al cálculo de δ exclusivamente en función de la ocupación global del canal a través de una β estática, el algoritmo ignora por completo los requisitos reales de cada vehículo [10]. Esto produce una penalización injusta de vehículos complejos. Por ejemplo, los vehículos con altas necesidades de transmisión como los Tipo 2 y Tipo 3 en el escenario estático, o vehículos con sensores de alta calidad en autovía, sufren una degradación severa en el ratio de satisfacción de todos sus servicios. Por el contrario, los vehículos con baja demanda, como los vehículos Tipo 1, desaprovechan parte de su cuota asignada.

5.4.2. Impacto de la adaptación dinámica de β : DA

La solución DA propuesta resuelve la principal deficiencia del mecanismo base al sustituir el valor constante 0.0012 de β [10] por un factor dinámico dependiente de la demanda de tráfico agregada de cada vehículo. Los resultados demuestran que esta modificación no altera las propiedades de estabilidad del sistema y, además, mejora la eficiencia en el uso del canal, convergiendo a valores de CBR más próximos al CBR_{target} 0.68 [10].

La mejora principal que introduce es que, al ligar β a los requisitos de los servicios, el mecanismo distribuye de manera desigual, pero más justa, los recursos. Los vehículos con mayores demandas obtienen una δ significativamente mayor, logrando una equidad real a nivel de servicio: cuando no hay prioridades, todos los servicios de la red ven reducidas sus demandas en idéntica proporción. Por ejemplo, en el escenario estático, todos los servicios V2X obtenían un ratio de satisfacción aproximado del 21%.

La limitación que conlleva este mecanismo surge en escenarios con prioridades diferenciadas. Al carecer de un mecanismo global de criticidad, penaliza colateralmente al tráfico de alta prioridad en vehículos de baja demanda. Por ejemplo, el Servicio V2X 1, el más crítico, ve reducido su ratio de satisfacción en los vehículos de Tipo 1 debido a que la δ total asignada a ese nodo es baja. Esto supone un riesgo inaceptable en redes vehiculares, donde la seguridad vial exige que los mensajes críticos, como los CAM [6], estén completamente garantizados.

5.4.3. Solución integral mediante priorización dinámica: DPA

La técnica DPA representa la evolución natural de la solución DA al unificar la sensibilidad a la demanda de la propuesta con un filtrado basado en la relevancia del tráfico.

En escenarios homogéneos o sin prioridades, mantiene los excelentes resultados de equidad y convergencia de DA. Sin embargo, en entornos con prioridades diferenciadas, tanto en entornos controlados como en escenarios reales, DPA demuestra que su mecanismo consigue resultados positivos. Ya que, protege el tráfico de mayor prioridad, como son Servicio V2X 1 y CAS, en cualquier tipo de vehículo, forzando a que la degradación por congestión recaiga exclusivamente sobre las aplicaciones menos críticas, tal es el caso del Servicio V2X 3 o CPS en sus respectivos escenarios.

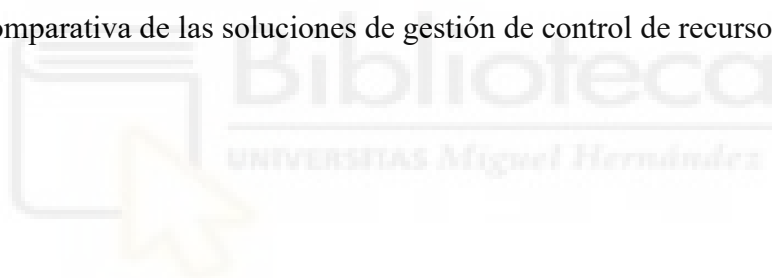
El análisis en el escenario realista revela que DPA optimiza el canal al evitar transmisiones de objetos con escaso valor de información en los mensajes CPM, basados en el umbral VoI [7]. Consigue que vehículos con sensores de baja y alta calidad compartan el canal de forma armónica, garantizando todos los requisitos del CAS [6] y maximizando el rendimiento de la percepción cooperativa restante.

5.4.4. Tabla resumen comparativa

Para sintetizar el comportamiento de las tres soluciones analizadas a lo largo del capítulo, la Tabla 5 recoge de manera cualitativa el rendimiento de cada mecanismo frente a los requisitos clave de los sistemas de transporte inteligentes cooperativos.

Criterio	RM base	DA	DPA
Estabilidad CBR	Alta	Alta	Alta
Convergencia al CBR_{target}	Media	Alta	Alta
Equidad entre vehículos	Igualitaria	Proporcional a la demanda de todos los servicios	Proporcional a la demanda de los servicios activos
Adaptación a la demanda	No	Sí	Sí
Priorización de servicios	Local	Local	Global
Adecuación a escenarios heterogéneos	Baja	Media	Alta

Tabla 5. Comparativa de las soluciones de gestión de control de recursos evaluadas



6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha abordado el desafío de la gestión de recursos en redes V2X caracterizadas por demandas de servicio heterogéneas y variables en el tiempo. A medida que los despliegues V2X evolucionan para soportar un número creciente de servicios con diferentes prioridades y requisitos de recursos, los mecanismos tradicionales de control de congestión, diseñados bajo la hipótesis de un tráfico homogéneo, resultan insuficientes para explotar de forma eficiente los recursos radioeléctricos disponibles manteniendo al mismo tiempo la estabilidad del canal.

Para afrontar este problema, se han propuesto varias soluciones distribuidas de gestión de recursos basadas en una arquitectura común de gestión. Las soluciones propuestas incorporan mecanismos de gestión de recursos radio conscientes de la demanda de los servicios y de sus prioridades. Las extensas evaluaciones realizadas demuestran que todas las soluciones propuestas mantienen propiedades de estabilidad y convergencia de la carga del canal comparables a las de la solución de referencia.

Los resultados muestran además que tener en cuenta las demandas heterogéneas de los servicios permite una asignación de recursos más eficiente y consistente entre vehículos. En particular, la solución con priorización de servicios garantiza que los servicios de mayor prioridad queden completamente protegidos en situaciones de escasez de recursos, mientras que el tráfico de menor prioridad se limita de forma adaptativa cuando resulta necesario. Este comportamiento se consigue sin comprometer la equidad ni la estabilidad del sistema, y resulta especialmente relevante en escenarios realistas que incluyen servicios estandarizados como CAS y CPS.

Es importante destacar que las soluciones propuestas están completamente alineadas con los principios actuales de estandarización V2X. Estas soluciones se apoyan en mecanismos de control de congestión ampliamente conocidos y aceptados, preservan la compatibilidad con sistemas existentes y se basan exclusivamente en una operación distribuida y en información disponible localmente. Por tanto, constituyen mejoras prácticas e incrementales, en lugar de modificaciones radicales de los diseños estandarizados.

Esta alineación con las actividades actualmente desarrolladas en ETSI Release 2 sugiere que las soluciones propuestas son buenas candidatas para su consideración en futuros procesos de estandarización y adopción industrial.

Como líneas de trabajo futuro, podría implementarse un mecanismo de supervisión dentro del módulo RM que permita verificar que los distintos servicios respetan los recursos que les han sido asignados, evitando que transmitan por encima de los límites establecidos. Esta funcionalidad estaría alineada con el papel del componente MDC de la arquitectura RM_FL presentada en la Figura 5, cuya función es supervisar y regular la transmisión de los servicios hacia las capas inferiores aplicando las restricciones de recursos calculadas por el gestor. Esto permitiría garantizar el correcto funcionamiento de los algoritmos de gestión de recursos y evaluar con mayor precisión su impacto sobre la congestión del canal.

También sería necesario evaluar y adaptar las soluciones propuestas para escenarios donde intervienen servicios V2X basados en eventos, especialmente aquellos de alta prioridad como DENM. A diferencia de servicios periódicos como CAM o CPS, los mensajes DENM se generan de forma esporádica en respuesta a situaciones concretas, por ejemplo una frenada de emergencia, un accidente o un obstáculo en la vía. En estos casos, resulta fundamental analizar si los mecanismos de gestión de recursos son capaces de reaccionar adecuadamente ante incrementos repentinos de tráfico prioritario, garantizando que dichos eventos dispongan de los recursos necesarios para su transmisión inmediata sin comprometer la estabilidad global del canal. Este estudio permitiría validar el comportamiento de las soluciones propuestas en escenarios más cercanos a las condiciones reales de operación de los sistemas C-ITS.

Otra posible línea de trabajo consiste en incorporar un mecanismo temporal de validez de los recursos asignados por el RM. En la implementación actual se asume que los recursos concedidos a un servicio deben utilizarse durante el intervalo de control correspondiente y que, en caso de no ser consumidos, se pierden. Sin embargo, podría estudiarse la posibilidad de que el RM asignase los recursos junto con una mayor ventana temporal de utilización, permitiendo que aquellos recursos no consumidos inmediatamente pudiesen aprovecharse durante un periodo limitado. Este enfoque podría mejorar la eficiencia en el uso del canal, especialmente en servicios cuya generación de tráfico presenta una naturaleza más variable o irregular.

Asimismo, podría explorarse un modelo de asignación de recursos más flexible, en el que los servicios no estuviesen obligados a respetar estrictamente la tasa asignada por el RM en cada intervalo de control. En lugar de ello, el sistema podría permitir exceder temporalmente los recursos concedidos dentro de unos márgenes previamente definidos. Cuando un servicio superase dichos límites, el exceso consumido se compensaría mediante una penalización en intervalos posteriores, reduciendo los recursos asignados hasta equilibrar el uso acumulado del canal. Este enfoque permitiría acomodar mejor las fluctuaciones instantáneas de tráfico características de algunos servicios V2X, manteniendo al mismo tiempo un control efectivo sobre la ocupación global del canal y preservando la equidad entre servicios y vehículos.

Poniendo el enfoque en el CPS, en escenarios con elevada densidad de vehículos, el servicio genera una gran cantidad de información sobre el entorno percibido. En estas condiciones es habitual que múltiples vehículos transmitan información redundante sobre los mismos objetos, lo que incrementa la ocupación del canal sin aportar necesariamente un beneficio proporcional. Una posible línea de investigación consistiría en desarrollar mecanismos capaces de identificar y filtrar información redundante antes de su transmisión, mejorando así la eficiencia en el uso de los recursos radio y reduciendo el nivel de congestión.

Además, la asignación de recursos al servicio CPS se ha realizado a partir del concepto de *Value of Information* (VoI). En este trabajo se ha empleado un umbral mínimo de VoI fijo y arbitrario, de forma que únicamente se transmiten los objetos cuyo valor supera dicho valor. Como trabajo futuro, resultaría interesante desarrollar mecanismos de adaptación dinámica de este umbral, permitiendo que los vehículos ajusten su valor en función de las condiciones del entorno, el nivel de congestión del canal o las necesidades de las aplicaciones. De esta manera, podría incrementarse el VoI medio de la información transmitida y optimizar aún más el uso de los recursos disponibles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CAR 2 CAR, “C-ITS: Europe’s Path to Connected, Cooperative & Automated Mobility”, Communication Consortium, Mar. 2022.
- [2] “Euro NCAP,” Euro NCAP. Accessed: Jun. 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/press-media/euro-ncap-vision-2030-a-safer-future-for-mobility/>
- [3] Xhoxhi E Schiegg F, “A First Study on the Spectrum Needs for Release 2 V2X Services”, in *Proc. IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall)*, 2023.
- [4] ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Facilities layer; Radio Resource Management Study; Release 2”, ETSI TR 104 073 V2.1.1. (2025-07).
- [5] ETSI, “Intelligent Transport System (ITS); Communications Architecture”, EN 302 665 v1.1.1. (2010-09).
- [6] ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service”, EN 302 637-2 v1.3.1. (2014-09).
- [7] ETSI, “Intelligent Transport System (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Collective Perception Service; Release 2”, TS 103 324 V2.1.1. (2023-06).
- [8] ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Decentralized Environmental Notification Service; Release 2”, ETSI TS 103 831 V2.1.1. (2022-11).
- [9] ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Manoeuvre Coordination Service (MCS); Pre-standardization study; Release 2”, ETSI TR 103 578 V2.1.1. (2024-04).
- [10] ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part”, TS 102 687 v1.2.1. (2018-04).
- [11] G. Bansal, J. B. Kenney and C. E. Rohrs , “LIMERIC: A Linear Adaptive Message Rate Algorithm for DSRC Congestion Control”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4182- 4197, Nov. 2013.
- [12] O. Amador, I. Soto, M. Calderón and M. Urueña, “Experimental Evaluation of the ETSI DCC Adaptive Approach and Related Algorithms”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49798-49811, 2020.

- [13] G. Bansal and J. B. Kenney , “Achieving weighted-fairness in message rate-based congestion control for DSRC systems”, *Proc. IEEE 5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC)*, Dresden, Germany (2013-06).
- [14] ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Cross-Layer; Communication Resource Management; Release 2”, ETSI TS 103 697 V0.0.4. (2026-05).
- [15] A. Varga and R. Hornig, “AN OVERVIEW OF THE OMNeT++ SIMULATION ENVIRONMENT,” in *Proceedings of the First International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications Networks and Systems*, ICST, 2008. doi: 10.4108/icst.simutools2008.3027.
- [16] C. Sommer *et al.*, “Veins: The open source vehicular network simulation framework,” in *Recent Advances in Network Simulation*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 215–252.
- [17] 3GPP, “Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything (V2X) use cases for LTE and NR (v15.3.0, Release 15)”, TR 37.885. (2019-06).

