



UNIVERSIDAD DE DEUSTO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA  
DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS RADIO EFICIENTE  
PARA REDES VEHICULARES DONDE CO-EXISTEN  
USUARIOS CELULARES COMÚNES Y VEHÍCULOS.

Tesis doctoral por IDOIA DE LA IGLESIA CARRIL  
dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería para la Sociedad de la  
Información y Desarrollo Sostenible  
Director UNAI HERNÁNDEZ JAYO





UNIVERSIDAD DE DEUSTO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA  
DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS RADIO EFICIENTE  
PARA REDES VEHICULARES DONDE CO-EXISTEN  
USUARIOS CELULARES COMÚNES Y VEHÍCULOS.

Tesis doctoral por IDOIA DE LA IGLESIA CARRIL  
dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería para la Sociedad de la  
Información y Desarrollo Sostenible  
Director UNAI HERNÁNDEZ JAYO

El doctorando

El director

Bilbao, octubre de 2018

*Diseño e implementación de una metodología de asignación de recursos radio eficiente para redes vehiculares donde co-existen usuarios celulares comunes y vehículos.*

Autor: Idoia de la Iglesia Carril

Director: Unai Hernández Jayo

Texto impreso en Bilbao

Primera edición, octubre de 2018

---

*La vida comienza  
donde termina tu zona de confort.*

*Life begins  
at the end of your comfort zone.*



## **Resumen**

La comunicación del vehículo con su entorno, conocida como V2X (Vehicle-to-Everything), se presenta como un paradigma emergente capaz de ser uno de los factores principales de la siguiente revolución en el mundo del automóvil. V2X es una tecnología inalámbrica que permite la comunicación entre los vehículos, la infraestructura, otro tipo de dispositivos (sensores, peatones, etc.) y la red de comunicaciones cableada presente. Este tipo de comunicaciones son la base sobre la que se sustenta el despliegue de los denominados Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo, conocidos en inglés como C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems), los cuales permiten aumentar la seguridad en las carreteras, mejorar la gestión y eficiencia del tráfico y proporcionar nuevas experiencias y servicios a los pasajeros durante sus viajes.

Los sistemas V2X pueden desplegarse utilizando diferentes tecnologías inalámbricas, estando este trabajo centrado en la habilitación de sistemas C-ITS haciendo uso de tecnologías celulares, principalmente LTE o su evolución 5G.

Uno de los grandes problemas surgidos en este tipo de comunicaciones es el ser capaz de satisfacer los exigentes requisitos de calidad de servicio demandados por las aplicaciones de seguridad y entretenimiento en entornos donde existe una alta densidad de vehículos. Además, es necesario tener en cuenta que hasta ahora los principales consumidores de las redes celulares eran los usuarios comunes. Por lo tanto, aunque a partir de ahora los vehículos formen parte del grupo de consumidores de la red celular, es imprescindible mantener y seguir mejorando la calidad de servicio que se ha ofrecido hasta ahora a los usuarios celulares comunes.

Por tanto, en una red celular en la que ya de por sí cohabitan un gran número de usuarios celulares, si añadimos nuevos nodos como es el caso de los vehículos, una gestión de recursos radio eficiente es indiscutiblemente un elemento de suma importancia para desplegar aplicaciones cooperativas con diferentes requisitos de calidad de servicio. En la literatura actual puede encontrarse un vasto número de metodologías de asignación de recursos radio, cada una con sus propias características. Debido a que el espectro radio es un recurso limitado y a la alta complejidad del problema a solucionar, no hay una metodología definitiva que consiga resolver de forma óptima todos los escenarios posibles. Este hecho hace que el campo de gestión y asignación de recursos radio sea un tema de investigación candente.

Como resultado, el presente trabajo de tesis doctoral centra su esfuerzo en el diseño e implementación de una metodología de asignación de recursos radio para redes celulares en las que co-existen usuarios celulares comunes y vehículos. La metodología propuesta ofrece un valor añadido frente a las metodologías existentes en la literatura, debido tanto a su originalidad como a los niveles de rendimiento que ofrece de igual manera a las comunicaciones de los usuarios comunes, como a los enlaces V2X creados.

Con la intención de validar la metodología propuesta, se ha llevado a cabo una extensa experimentación en la cual se han comparado los resultados obtenidos con otras metodologías de referencia y previamente contrastadas en la literatura. Gracias a esta experimentación se ha podido afirmar de forma rigurosa que la técnica propuesta es competitiva en distintas métricas en base al throughput ofrecido a los usuarios, al rendimiento energético de las comunicaciones entre vehículos, la eficiencia energética de las comunicaciones del conjunto global de usuarios y es especialmente competitiva en términos de eficiencia espectral.

## **Abstract**

The communication of the vehicle with its environment, known as V2X (Vehicle-to-Everything), is presented as an emerging paradigm capable of being one of the main factors of the next revolution in the automotive world. V2X is a wireless technology that allows communication between vehicles, infrastructure, other types of devices (sensors, pedestrians, etc.) and the existing wired communications network. This type of communication is the basis for the deployment of the so-called Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS), which increase road safety, improve traffic management and efficiency and provide new experiences and services to passengers during their journeys.

V2X systems can be deployed using different wireless technologies. This work is focused on enabling C-ITS systems using cellular technologies, mainly LTE or its 5G evolution.

One of the biggest problems in this type of communications is being able to satisfy the demanding quality of service requirements demanded by security and entertainment applications in environments where there is a high density of vehicles. In addition, it should be borne in mind that until now the main consumers of cellular networks were the regular users. Therefore, even though vehicles are becoming part of the cellular network customer group, it is essential to maintain and increase the quality of service that has been offered to regular cellular users so far.

Therefore, in a cellular network in which a large number of cellular users already coexist, if we add new nodes such as vehicles, efficient

radio resource management is undoubtedly an extremely important element for deploying cooperative applications with different quality of service requirements. A vast number of different radio resource allocation methodologies can be found in the current literature. Due to the fact that the radio spectrum is a limited resource and the high complexity of the problem to be solved, there is no definitive methodology that can optimally resolve all possible scenarios. This makes the field of radio resource management and allocation a hot research topic.

As a result, the present doctoral thesis focuses on the design and implementation of a methodology for the radio resource allocation for cellular networks in which regular cellular users and vehicles co-exist. The proposed methodology offers added value compared to existing methodologies in the literature, due both to its originality and to the performance levels it offers to regular user communications, as well as to the V2X links created.

With the intention of validating the proposed methodology, an extensive experimentation has been carried out. The results of this experimentation have been compared with other reference methodologies and previously contrasted in the literature. Thanks to this experimentation, it has been possible to rigorously state that the proposed technique is competitive in different metrics based on the throughput offered to users, the energy efficiency of communications between vehicles, the energy efficiency of the communications of the global group of users and, the proposed methodology is particularly competitive in terms of spectral efficiency.

## Agradecimientos

Habitualmente la gente utiliza esta sección de la tesis para agradecerle a sus seres queridos lo que le han apoyado durante los años que dura la tesis. Sin embargo, yo quiero aprovechar esta sección para agradecerle a esta tesis la gente que me llevo gracias a ella. Porque aunque no siempre seamos conscientes, lo más importante de la vida no son las cosas que tenemos o conseguimos, como podría ser este libro o la línea que añadiré a mi curriculum, sino los momentos que vivimos y las personas que conocemos gracias a las decisiones que tomamos.

Para empezar quiero agradecer a Unai H. la oportunidad que me dió hace más de 6 años de unirme a Mobility, un grupo increíble donde he conocido personas excepcionales que se han hecho parte de mi vida y espero que siga siendo así por muuuucho, mucho tiempo. El poder encontrar amigos entre los compañeros de trabajo ha sido una gran suerte. Gracias a vosotros, Mobility Youth, los lunes eran menos lunes y los alti-bajos inherentes a la tesis eran más altos que bajos en cuanto bajabamos al café o subíamos a comer. Es todo un orgullo formar parte de este grupo en el que cada uno de vosotros me ha enseñado y aportado algo distinto. Por todo esto y mucho más, Browner, Hugo, Itziar, Ander, Alejo, Eneko, Bruno, Pablo, Luis, Peru, Sanni, Txertu, Gorka... Gracias!

Me gustaría agradecer también a Roberto C. su colaboración en la tesis, las entretenidas charlas del Team Colibrí cada vez que venía de visita y las hojitas de eucalipto que me traía para que se me curara el catarro. Gracias, Rober! Agradecer también a Alfonso B. los meses que fue mi compañero de mesa y el salseo que generaba en Team Science. Y como no, agradecer también al resto de Mobilities (aquellos con los que por

circunstancias el trato no ha sido tan cercano) el buen rollo y energía que le dan al grupo.

En este punto quiero hacer mención especial a dos de mis mayores recompensas de estos años que son Eneko Osaba y Bruno Santamaría. Gracias, Compi, por tu apoyo incondicional y por aguantarme y tratar de entenderme aún cuando ni yo misma me aguantaba ni me entendía. No eres consciente de todo lo que me has ayudado y de lo que significas para mi. Y a ti, Clonp, gracias por todas las risas, las liadilles y momentos felices que me has hecho vivir.

También quiero agradecer a Unai H. lo que he crecido profesionalmente a lo largo de estos años gracias a todo lo que me ha enseñado y ha confiado en mi. Y, sobre todo, agradecerle los momentos en los que se ha comportado más como un hermano mayor que como un director de tesis. Gracias!

Quiero agradecer también a Mobility y al doctorado la oportunidad que tuve de irme de estancia a Nokia y, sobre todo, agradecer a toda la gente que conocí allí por todo lo que aprendí y los maravillosos 6 meses que me hicieron vivir. Siempre recordaré esta estancia como una etapa muy especial e importante de mi vida.

También quiero agradecer a esta tesis la oportunidad que me ha dado de trabajar en ALSTOM. Porque, aunque por circunstancias de la vida, la estancia en Madrid no haya sido tan maravillosa como la de Polonia, me siento muy afortunada de haber podido conocer y compartir estos meses con el gran grupo de profesionales que trabaja allí, a los que agradezco lo mucho que me han enseñado y han confiado en mi, lo bien que me han acogido y lo agusto que me he sentido con ellos. Las semanas se hacían más cortas gracias a los ratitos de café, los partidos de pádel y las inocentes cervecitas que se alargaban hasta las tantas. Gracias, Alstom Innovation Beer!

Casi antes de acabar, quiero agradecer especialmente a esta tesis el regalo más grande que me podía haber hecho, y ese eres tú, Pablo

Fernández. Gracias por tu comprensión y apoyo y, sobre todo, por tratar de convencerme y enseñarme cada día que el amor eterno existe.

Y por último, y esto ya no es gracias a esta tesis, quiero agradecer a la vida la familia que tengo. Gracias, aita y ama, por todo lo que me habéis enseñado y todos los valores que me habéis inculcado. Espero que algún día mis hijos se sientan tan orgullosos de mi como me siento yo de vosotros. Gracias, tata, por estar siempre ahí para todo, por cuidarme y protegerme tanto desde que soy pequeña. Gracias, Unai, por estar tanto para las risas como para las lágrimas y, sobre todo, gracias por hacer feliz y cuidar y querer tanto a mi hermana. Y, por último, quiero agradecer a vosotros dos el haberme dado a lo más bonito de mi vida, Markel. Gracias, bitxito, por tu sonrisa, tu felicidad y tus abrazos que nos alegran la vida.

A todos vosotros y a toda la gente que ha formado y forma parte de mi vida, gracias de corazón, porque todos habéis aportado vuestro granito de arena para ayudarme a crecer y a convertirme en la persona que soy ahora.



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introducción y motivación</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2 Hipótesis y objetivos . . . . .	4
1.3 Intereses científicos y sociales . . . . .	7
1.4 Metodología de investigación . . . . .	9
1.5 Estructura de la tesis . . . . .	11
<b>2 C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo</b>	<b>15</b>
2.1 Aplicaciones para C-ITS . . . . .	16
2.2 Niveles de automatización . . . . .	20
2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares . . . . .	25
2.3.1 IEEE 802.11p . . . . .	26
2.3.2 Comunicaciones celulares C-V2X . . . . .	29
2.3.3 Comparativa . . . . .	33
<b>3 Comunicaciones C-V2X</b>	<b>39</b>
3.1 Evolución a LTE-V2X . . . . .	39
3.2 5G para el coche autónomo . . . . .	43
3.2.1 5GAA . . . . .	47
3.3 Modos de Servicio de V2X . . . . .	47
3.3.1 Servicio V2X a través del interfaz sidelink PC5 . . . . .	48

## ÍNDICE GENERAL

---

3.3.2	Servicio V2X a través del interfaz radio Uu . . . . .	50
3.4	Asignación programada de recursos radio . . . . .	51
3.5	Resumen y conclusiones del estado del arte . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Explicación de la Metodología</b>	<b>57</b>
4.1	Descripción del escenario . . . . .	58
4.1.1	Tipos de usuarios en el escenario propuesto . . . . .	59
4.1.2	La arquitectura de red . . . . .	63
4.1.3	El entorno de aplicación . . . . .	66
4.2	Formulación del problema . . . . .	69
4.3	Descripción de la Metodología RODEO . . . . .	70
4.3.1	Problema de Emparejamiento de Common User Equipments (C-UEs) y Vehicular User Equipments (V-UEs) . . . . .	73
4.3.2	Asignación de Potencias de Transmisión . . . . .	78
4.3.3	Metaheurística de Asignación de Recursos Radio . . . . .	82
4.4	Principales aportaciones del modelo propuesto . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Experimentación y resultados</b>	<b>89</b>
5.1	Entorno de experimentación . . . . .	90
5.2	Metodologías de referencia . . . . .	92
5.3	Métricas utilizadas para la evaluación de los resultados . . . . .	93
5.4	Experimentación y resultados del problema MPC . . . . .	95
5.4.1	Evaluación de los resultados de throughput . . . . .	95
5.4.2	Evaluación de los resultados de rendimiento energético . . . . .	101
5.4.3	Evaluación de los resultados de eficiencia energética . . . . .	103
5.4.4	Evaluación de los resultados de eficiencia espectral . . . . .	111
5.4.5	Evaluación de resultados y conclusiones . . . . .	116
5.5	Experimentación y resultados del problema SPC . . . . .	120
5.5.1	Evaluación de los resultados de throughput . . . . .	120
5.5.2	Evaluación de los resultados de rendimiento energético . . . . .	123
5.5.3	Evaluación de los resultados de eficiencia espectral . . . . .	130
5.5.4	Evaluación de resultados y conclusiones . . . . .	135

<b>6 Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>139</b>
6.1 Aportaciones y conclusiones generales . . . . .	140
6.2 Líneas futuras de trabajo . . . . .	144
<b>A Conclusions and further work</b>	<b>147</b>
A.1 Contributions and general conclusions . . . . .	148
A.2 Future work . . . . .	152
<b>B Acrónimos</b>	<b>155</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>159</b>



# Índice de figuras

1.1	Metodología de investigación . . . . .	10
2.1	Tipos de comunicaciones V2X (Fuente [Americas 16]) . . . . .	17
2.2	Niveles de automatización del vehículo (Fuente [Sjöberg 17]) . . . . .	22
2.3	Detección de objetos NLOS para vehículo autónomo gracias a V2X (Fuente [Qualcomm 16]) . . . . .	24
2.4	Tráfico cooperativo de vehículos autónomos gracias a V2X (Fuente [Qualcomm 16]) . . . . .	24
2.5	Circulación de coches autónomos seguros gracias a V2X (Fuente [Qualcomm 16]) . . . . .	25
2.6	Pila de protocolos WAVE . . . . .	26
2.7	Pila de protocolos ITS-G5 . . . . .	27
3.1	Evolución de 5G (Fuente [Qualcomm 17a]) . . . . .	43
3.2	Características y casos de uso de 5G (Fuente [Ericsson 17]) . . . . .	44
3.3	Vehículo autónomo con comunicaciones V2X (Fuente [5GAA 17]) . . . . .	46
3.4	Interfaces LTE para comunicaciones V2X (Fuente [Qualcomm 17b]) . . . . .	48
4.1	Visión general del escenario . . . . .	60
4.2	Tipos de organización en redes vehiculares (Fuente [Qualcomm 17a]) . . . . .	61
4.3	Modos de implementación de RSU en red celular (Fuente [3GPP 17]) . . . . .	65
4.4	Arquitectura de red celular para implementar comunicaciones V2X(Fuente [3GPP 06]). . . . .	66
4.5	Entorno de simulación (Fuente [3GPP 06]). . . . .	68
4.6	Metodología RODEO . . . . .	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.7	Representación de los requisitos de emparejamiento. . . . .	76
4.8	Definición de potencias de transmisión para SPC . . . . .	81
4.9	Definición de potencias de transmisión para MPC . . . . .	83
5.1	Desarrollo del entorno de simulación. . . . .	91
5.2	Resultados de throughput de los C-UEs para MPC . . . . .	96
5.3	Resultados de throughput de los V-UEs para MPC . . . . .	98
5.4	Resultados de throughput total para MPC . . . . .	100
5.5	Resultados de rendimiento energético de los C-UEs para MPC . . . . .	102
5.6	Resultados del rendimiento energético de los V-UEs para MPC . . . . .	104
5.7	Resultados del rendimiento energético total para MPC . . . . .	105
5.8	Resultados de eficiencia energética de los C-UEs para MPC . . . . .	107
5.9	Resultados de eficiencia energética de los V-UEs para MPC . . . . .	108
5.10	Resultados de eficiencia energética total para MPC . . . . .	109
5.11	Resultados de eficiencia espectral de los C-UEs para MPC . . . . .	112
5.12	Resultados de eficiencia espectral de los V-UEs para MPC . . . . .	114
5.13	Resultados de eficiencia espectral total para MPC . . . . .	115
5.14	Resultados de throughput de los C-UEs para SPC . . . . .	122
5.15	Resultados de throughput de los V-UEs para SPC . . . . .	124
5.16	Resultados de throughput total para SPC . . . . .	125
5.17	Resultados de rendimiento energético de los C-UEs para SPC . . . . .	126
5.18	Resultados del rendimiento energético de los V-UEs para SPC . . . . .	128
5.19	Resultados de rendimiento energético total para SPC . . . . .	129
5.20	Resultados de eficiencia espectral de los C-UEs para SPC . . . . .	131
5.21	Resultados de eficiencia espectral de los V-UEs para SPC . . . . .	133
5.22	Resultados del eficiencia espectral total para SPC . . . . .	134

# Índice de tablas

1.1	Actividades y objetivos específicos de la tesis doctoral . . . . .	6
2.1	IEEE 802.11p vs C-V2X: Características radio . . . . .	34
2.2	IEEE 802.11p vs C-V2X: Funcionamiento tecnológico . . . . .	35
2.3	IEEE 802.11p vs C-V2X: Casos de uso y rendimiento . . . . .	36
4.1	Entornos de simulación y patrones de movimiento . . . . .	67
5.1	Resumen de los resultados obtenidos para el problema MPC . . . .	116
5.2	Resumen de los resultados obtenidos para el problema SPC . . . .	135



*Se necesitan dos años para  
aprender a hablar, y sesenta  
para aprender a callar.*

Ernest Hemingway

# 1

## Introducción y motivación

Las tecnologías de la información y la comunicación, más conocidas como Information and Communication Technologies (ICT), fueron diseñadas originalmente para proporcionar mecanismos de intercambio de información entre las personas, dotando en las últimas décadas a la sociedad de una amplia gama de nuevas capacidades y oportunidades. Por ejemplo, permiten a las personas comunicarse en tiempo real con otras personas de diferentes países utilizando tecnologías como la mensajería instantánea, la voz sobre IP (VoIP) o la videoconferencia. Así, redes sociales como Facebook o Twitter permiten a los usuarios de todo el mundo mantenerse en contacto y comunicarse regularmente.

Sin embargo, en los últimos años las formas de comunicación se han diversificado, apareciendo nuevas comunicaciones entre personas y objetos y entre objetos entre sí sin requerir la intervención humana de manera directa. Estas comunicaciones comúnmente conocidas como comunicaciones Machine to Machine (M2M), introducen una nueva era en la que cosas inteligentes están interconectadas entre sí a través de Internet. Esta interconexión de cualquier objeto con cualquier otro de su alrededor es la base del fenómeno conocido como Internet of Things (IoT).

El IoT y, en particular, las cosas inteligentes, recogen y analizan datos, facilitando una amplia variedad de nuevos servicios que continuarán provocando profundos

## **1. Introducción y motivación**

---

cambios en la vida cotidiana de las personas. Dado que estos objetos tienen inteligencia, capacidad de comunicación y capacidad para interactuar con su entorno, se consideran un componente clave para el desarrollo de las futuras ciudades inteligentes o, comúnmente denominadas Smart Cities. Así, el fenómeno IoT ha impulsado a investigar en nuevas aplicaciones en muchos dominios diferentes como Smart Home, Smart Health, Smart Cars, etc.

En los últimos años, la industria automovilística y el entorno académico han promovido la investigación del uso del paradigma IoT en el dominio vehicular, dándose a conocer el término Internet of Vehicles (IoV), donde se espera que los nuevos vehículos inteligentes dotados de comunicaciones revolucionen el transporte y pasen de ser un mero medio de transporte a objetos inteligentes más seguros, rápidos, entretenidos e, incluso, autónomos.

### **1.1 Planteamiento del problema**

Durante los últimos años, se han realizado múltiples demostraciones de vehículos viajando sin conductor. Para ello, los vehículos disponen de una gran cantidad de sensores como radares, LIDARs (detección de luz y alcance) y sistemas de cámaras, que les permiten conocer la situación de su entorno cercano. Esto les facilita la toma de decisiones como un único individuo autosuficiente ya que, en última instancia, dependen únicamente de sus propios sensores.

Sin embargo, los vehículos forman parte de un complejo ecosistema que debe ser gestionado de manera global para poder aprovechar al máximo los sistemas e infraestructuras de transporte. Así, los vehículos autónomos, además de sensores, pueden incorporar comunicaciones que les permitan comunicarse entre ellos y también con el resto de usuarios y entorno que les rodea. Estas comunicaciones son conocidas como comunicaciones V2X (Vehicle-to-Everything).

En la actualidad existen dos tecnologías que permiten la implementación de las comunicaciones V2X: IEEE 802.11p y las comunicaciones celulares, como LTE-V2V. Aunque IEEE 802.11p fue diseñado específicamente para comunicaciones V2X que permitan el despliegue de aplicaciones cooperativas en sistemas de transporte inteligentes, tiene ciertas limitaciones técnicas, tal y como se va a detallar en la sección 2.3. La principal deficiencia identificada es el bajo rendimiento en los

## 1.1 Planteamiento del problema

---

escenarios de alta densidad de vehículos, principalmente por la implementación de la capa MAC (Medium Access Control) basada en CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Además, la falta de un despliegue generalizado de infraestructura hace que se considere que el estándar IEEE 802.11p ofrece conectividad intermitente entre vehículos y dispositivos. Por lo tanto, no puede asegurar el cumplimiento de los estrictos requisitos de latencia y fiabilidad de las aplicaciones cooperativas relacionadas con la seguridad.

En cuanto a las comunicaciones celulares, desde el 3GPP Release 12, LTE-A soporta la funcionalidad Device-to-Device (D2D). Esta tecnología no fue concebida para cumplir los estrictos requisitos V2X en términos de latencia, fiabilidad y movilidad. Por tanto, estas limitaciones han motivado a la comunidad científica a investigar la posible aplicación de las comunicaciones celulares D2D a las comunicaciones V2X.

Los sistemas D2D ofrecen cuatro tipos diferentes de ganancia, que son ganancia de proximidad, ganancia de salto, ganancia de emparejamiento y ganancia de reutilización. En particular, la ganancia de reutilización surge del hecho de que los enlaces D2D y celulares pueden compartir los mismos recursos radio. De este modo, en una infraestructura celular subyacente D2D, los mismos recursos pueden ser utilizados simultáneamente por el usuario implicado en la comunicación V2V y por el usuario celular común. Sin embargo, la ganancia de reutilización se produce a expensas de un mayor nivel de interferencia, lo que a su vez debe ser controlado cuidadosamente por la red. Por lo tanto, en una red celular en la que existe una alta densidad de usuarios, una gestión de recursos radio eficiente es indiscutiblemente un elemento de suma importancia para desplegar aplicaciones cooperativas con diferentes requisitos de calidad de servicio.

En definitiva, el presente trabajo de tesis doctoral centra su esfuerzo en la creación de una metodología de asignación de recursos radio en redes celulares en las que coexistan usuarios celulares comunes y vehículos. Esta metodología tiene en cuenta los diversos requisitos de calidad de servicio de las aplicaciones de todos los usuarios. Asimismo, la metodología presentada trata de ofrecer un valor añadido frente a las técnicas ya existentes, ya sea en relación a la mejora de resultados, o a la aportación de originalidades conceptuales. Esto hace que trabajos como el que

## 1. Introducción y motivación

---

se realiza en esta tesis se tornen necesarios debido a la importancia que tienen las comunicaciones V2X para el futuro de los sistemas cooperativos de transporte.

### 1.2 Hipótesis y objetivos

Una vez introducida la problemática, y con la intención de abordarla de una manera eficiente, se plantea la siguiente hipótesis a validar durante el desarrollo de la tesis doctoral:

«Es posible diseñar una metodología novel para la asignación de recursos radio usando comunicaciones V2V underlay en redes celulares en las que coexisten usuarios celulares comunes y vehículos, que aporte un valor añadido y mejore las técnicas ya existentes para el despliegue de aplicaciones en sistemas inteligentes de transporte cooperativo (C-ITS).»

Para validar esta hipótesis se propone el siguiente objetivo general de la tesis, el cual deriva directamente de la hipótesis y siendo su ejecución estrictamente necesaria para la validación de la misma.

*«Diseñar e implementar una metodología underlay para la asignación de recursos radio en redes celulares en las que coexisten usuarios celulares comunes y vehículos para el despliegue de aplicaciones en sistemas inteligentes de transporte cooperativo, aportando mejoras de rendimiento en comparación con los métodos ya existentes»*

Este objetivo es el perseguido a lo largo del desarrollo de este trabajo, y cuya consecución certifica la hipótesis arriba planteada. Además de esto, y con el fin de alcanzar un mayor nivel de detalle, se establecen los siguientes objetivos específicos, cuyo cumplimiento contribuye al alcance del objetivo general.

- OE1: definir la filosofía y el modo de funcionamiento de la metodología de asignación de recursos radio. Este objetivo se logra, en primer lugar, realizando un examen exhaustivo del estado del arte en sistemas inteligentes de transporte, comunicaciones vehiculares y tecnologías que permiten el despliegue de aplicaciones cooperativas. También, es fundamental conocer en detalle las técnicas existentes para la asignación de recursos radio en redes

celulares, con el propósito de identificar aquellas características que puedan desembocar en un buen rendimiento por parte del método a diseñar. En segundo lugar, gracias al conocimiento adquirido del estudio previo, se alcanza el objetivo al especificar los distintos pasos que van a formar parte de la metodología, como pueden ser la definición de potencias o la asignación de recursos radio.

- OE2: definir e implementar el escenario sobre el que realizar la experimentación. Ya que debido a la complejidad del escenario no es posible validarlo en un entorno real, es crítico implementar en el entorno de simulación un escenario tan próximo a la realidad como sea posible. Para seleccionar este escenario es indispensable conocer en profundidad el estado del arte relacionado, y especialmente fijarse en los escenarios estandarizados por el 3GPP para validar las comunicaciones V2X. Es importante que el escenario permita modificar múltiples variables para permitir sacar conclusiones relevantes de la experimentación.
- OE3: desarrollar e implementar la metodología propuesta en el entorno de simulación. Ésta debe seguir la filosofía establecida en el objetivo OE1, y cuyo meta de obligado cumplimiento es asegurar siempre la calidad de servicio mínima requerida por todos los usuarios de la red celular.
- OE4: seleccionar e implementar metodologías a comparar. Este objetivo está compuesto por dos sub-objetivos. El primero de ellos consiste en conseguir identificar las metodologías existentes con las que comparar el funcionamiento de la metodología propuesta. Para este propósito es necesario realizar un buen análisis de la literatura disponible que permita hacer una comparación justa de metodologías. El segundo sub-objetivo es la implementación de las metodologías seleccionadas en el entorno de simulación, para ejecutar todas en los escenarios planteados y poder comparar sus resultados.
- OE5: configurar el entorno de pruebas. Para ello es necesario seleccionar las variables a modificar en el escenario definido en el OE2 y establecer el conjunto de valores que se va a asignar a cada variable en el distinto juego de experimentaciones. Es de crucial importancia que todas las metodologías

## 1. Introducción y motivación

---

cuenten con una configuración similar, pues solo de esta forma la comparación posterior resultará justa y objetiva.

- OE6: análisis y evaluación de los resultados obtenidos en la experimentación. Una vez realizada la experimentación pertinente, se analizan los resultados obtenidos. Este análisis de los resultados se lleva a cabo evaluando diversas métricas, entre ellas el throughput, el rendimiento energético y la eficiencia espectral.

Así, la Tabla 1.1 recoge las actividades más representativas que se ejecutan con el fin de conseguir el objetivo general. Estas actividades están relacionadas con uno, o varios, de los objetivos específicos arriba mencionados. Esta relación también queda representada en la misma tabla.

<b>Actividad</b>	<b>Objetivos</b>
Estudio del estado del arte con respecto a las comunicaciones vehiculares y sistemas inteligentes de transporte	OE1
Análisis de las tecnologías que permiten el despliegue de aplicaciones vehiculares cooperativas	OE1
Análisis de las metodologías de asignación de recursos radio existentes en la literatura	OE1
Estudio e implementación del escenario sobre el que validar la metodología	OE2
Diseño e implementación de la metodología de asignación de recursos propuesta	OE1 y OE3
Elección e implementación de las técnicas a utilizar en la experimentación para la comparación de resultados	OE1 y OE4
Diseño y ejecución de la experimentación diseñada	OE2 y OE5
Análisis y comparación de los resultados mediante diversas métricas	OE6

**Tabla 1.1:** Actividades y objetivos específicos de la tesis doctoral

### 1.3 Intereses científicos y sociales

Una vez introducido el marco de la tesis, y después de haber enunciado la hipótesis y los objetivos que han marcado el camino hacia la validación de la misma, en este apartado se pretende destacar los intereses inherentes a la realización de este trabajo. El objetivo de esta sección, por lo tanto, es destacar porqué es necesario que una tesis de esta índole sea escrita, y describir los aspectos que han motivado la elaboración de la misma.

La aplicación de las ICTs al ámbito del transporte dio lugar al término Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS - Intelligent Transport Systems), que consiste en el conjunto de aplicaciones informáticas y sistemas tecnológicos creados con el objetivo de mejorar la seguridad y eficiencia en el transporte, facilitando la labor de control, gestión y seguimiento por parte de los responsables. Algunas aplicaciones típicas de los ITS son el cobro electrónico de peajes, la vigilancia automática de infracciones y los sistemas de notificación de emergencias, entre otros. En todas estas aplicaciones el vehículo es un sujeto pasivo.

El hecho de que en la actualidad los vehículos estén dotados de comunicaciones y por tanto, sean capaces de comunicarse con su entorno, transforma significativamente el concepto de movilidad instaurado hasta hace pocos años. Estas comunicaciones que permiten el intercambio automático de información en tiempo real de los vehículos con su entorno son conocidas como comunicaciones V2X (Vehicle-to-Everything) y han promovido lo que se conoce como C-ITS, por sus siglas en inglés Cooperative Intelligent Transportation Systems.

Los C-ITS permiten a los usuarios de la carretera y a los gestores de tráfico compartir información y utilizarla para coordinar sus acciones. De este modo, a través de las comunicaciones V2X, se pretende que estos sistemas cooperativos mejoren significativamente la seguridad vial, aumenten el flujo eficiente de tráfico, reduzcan el impacto ambiental y proporcionen servicios adicionales de información al viajero, ayudando así al conductor a tomar las decisiones correctas y a adaptarse a la situación del tráfico.

Además, las comunicaciones V2X también se plantean como un elemento crucial para aumentar la seguridad de los futuros vehículos autónomos y su plena integración en el sistema global de transporte. Es cierto que los vehículos autónomos

## **1. Introducción y motivación**

---

son capaces de circular en muchos escenarios utilizando únicamente sensores; sin embargo, las comunicaciones inalámbricas permiten ofrecer una conducción más segura y eficiente, permitiendo, además, ofrecer mejores servicios al usuario. Por lo tanto, la cooperación, la conectividad y la automatización no son tecnologías complementarias, sino que se refuerzan mutuamente y con el tiempo se fusionarán por completo en el contexto del vehículo autónomo.

Las comunicaciones V2X no solo ofrecen ventajas en cuanto a seguridad y eficiencia en el transporte. Otra ventaja de los servicios basados en comunicaciones V2X es que permiten la comunicación entre los ocupantes del vehículo y su entorno. Esto hace posible a los ocupantes acceder a toda la información y servicios de Internet desde el propio vehículo, lo que permite el despliegue de una amplia gama de nuevas aplicaciones y servicios.

Por tanto, se podrían resumir los beneficios generados por las comunicaciones V2X con los siguientes puntos:

- Mayor reconocimiento y prevención de los riesgos en las carreteras mediante la conducción anticipada y adaptativa, lo que podrá traducirse en una reducción del número de víctimas mortales y accidentes de tráfico.
- Uso optimizado de la infraestructura vial facilitando, por ejemplo, los servicios destinados a reducir la congestión del tráfico través de aplicaciones de gestión dinámica de rutas.
- Mejores servicios de entretenimiento a los pasajeros, ofrecido a los ocupantes múltiples maneras de invertir su tiempo de viaje.

En relación al interés científico que reviste esta área, se puede asegurar que es amplio, ya que los escenarios vehiculares cooperativos se enfrentan a múltiples desafíos de comunicación, como pueden ser las condiciones adversas de propagación, el alto patrón de movilidad de los vehículos junto con su difícilmente predecible dirección de movimiento, sin mencionar los limitados recursos de comunicación. Por tanto, la selección y el diseño de la tecnología de comunicaciones que posibilite estos enlaces V2X es un factor clave para el despliegue de los previamente mencionadas C-ITS.

Al mismo tiempo, hay un gran potencial de negocio detrás de muchos casos de uso enfocados a incrementar la seguridad en carretera y mejorar eficiencia del uso de los sistemas de transporte. Este interés ha desencadenado estudios avanzados, tanto en el mundo académico como en la industria. Por lo tanto, el diseño de las comunicaciones V2X para el vehículo inteligente o vehículo autónomo sigue siendo un tema importante en la investigación, siendo objeto de una gran cantidad de estudios en congresos y revistas científicas especializadas año tras año. Este tema se trata con mayor detalle en el siguiente capítulo de esta tesis.

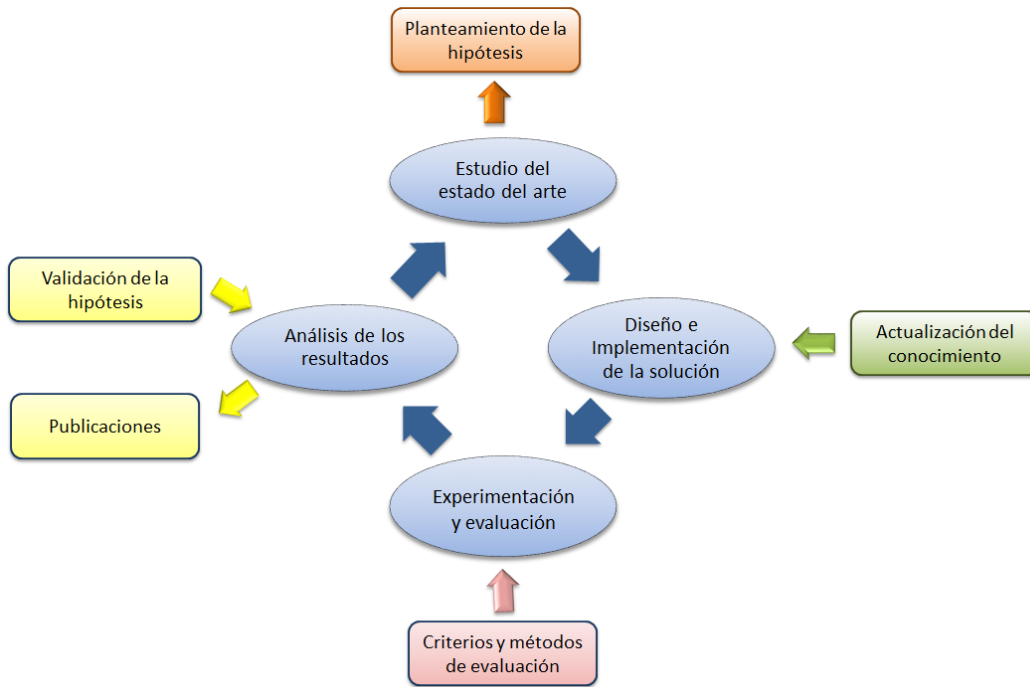
### 1.4 Metodología de investigación

Como ya se ha indicado en apartados anteriores, la implementación de las comunicaciones V2X y su capacidad de permitir el despliegue de aplicaciones cooperativas y, sobre todo, de mejorar la seguridad en las carreteras, hacen que sea un campo de investigación en constante crecimiento, generando multitud de producción científica año tras año. Además, el área de conocimiento a la que se adscribe la tesis, los sistemas inteligentes de transporte cooperativo, es una de las que más rápido han evolucionado en cuanto a desarrollo tecnológico durante los últimos años, especialmente en el ámbito de las comunicaciones V2X. Esto hace imprescindible la utilización de una metodología de investigación que se adecúe a dicha velocidad. Estas son las principales razones por las que se ha hecho imprescindible acogerse a una metodología de investigación de ciclo continuo, en la que la actualización del conocimiento y la identificación constante de mejoras son dos de sus principales pilares.

Con esta importante necesidad se ha elegido un procedimiento iterativo en el que el cumplimiento de cada ciclo contribuye al refinamiento de la solución planteada para validar la hipótesis. La idea principal de este proceso cíclico es que los conocimientos adquiridos en su fase inicial ayuden a diseñar una metodología cada vez más prometedora, capaz de competir cara a cara contra metodologías aceptadas en la literatura, ya sea ofreciendo mejoras de rendimiento, o mejoras en cuanto a concepto, ofreciendo originalidades y aportaciones reseñables.

## 1. Introducción y motivación

---



**Figura 1.1:** Metodología de investigación

En la Figura 1.1 se muestra la metodología de investigación empleada. En esta misma imagen puede observarse el carácter iterativo del procedimiento, el cual puede sintetizarse de la siguiente manera:

- *Estudio del estado del arte:* El objetivo principal de esta fase es el de investigar el estado del arte relacionado con el campo en el que se está trabajando. Para lograr este objetivo, se hará uso de la bibliografía relacionada y publicaciones de la comunidad científica en este ámbito, de tal manera que se consiga un conocimiento actualizado sobre el estado del arte en la materia, con el fin de detectar limitaciones, necesidades u oportunidades de mejora. De este modo, los conocimientos adquiridos en esta fase tras haber analizado los posibles nichos de mejora, deben desembocar en el planteamiento de la hipótesis.
- *Diseño e implementación de la solución:* Después de realizar la revisión del estado del arte, y teniendo siempre en mente la hipótesis a validar, en esta fase se debe diseñar e implementar la solución propuesta que solvante los

problemas en los que se centra la tesis con el objetivo de validar la hipótesis previamente planteada.

- *Experimentación y evaluación:* El fin de esta fase es someter a la solución propuesta en el paso anterior a un proceso de testeo y análisis de resultados. Para realizar este procedimiento es crítico aportar un escenario que se asemeje al máximo a un escenario real, de modo que las conclusiones obtenidas de la experimentación y evaluación puedan extrapolarse a escenarios reales.
- *Análisis de los resultados:* Tras la realización de la experimentación pertinente, los resultados obtenidos tienen que ser analizados y contrastados con los obtenidos por otras técnicas establecidas en el estado del arte. Así, si tras compararlas con la metodología propuesta en esta tesis la hipótesis sigue siendo cierta, se podría dar por finalizado el desarrollo de la tesis. Sin embargo, si la hipótesis no queda validada, el ciclo vuelve a comenzar por su punto inicial.
- *Publicaciones:* Una vez validada la hipótesis de la tesis, es necesario divulgar los conocimientos obtenidos y generados durante la investigación, contribuyendo a la producción científica y a la generación de conocimiento. Además, si es necesario, se debe realizar la transferencia de conocimiento producido a otros sectores económicos, productivos y sociales.

## 1.5 Estructura de la tesis

En esta sección se presenta la estructura de esta memoria. Así, el contenido de esta tesis doctoral queda dividido en seis capítulos, donde cada uno de ellos aborda los contenidos introducidos a continuación:

- El primer capítulo, el presente, se trata de la introducción, y es donde se proporciona una visión global acerca del ámbito de trabajo de la tesis y de las motivaciones principales que han propiciado su realización. Para empezar, se presenta la problemática existente, derivando así en el planteamiento de la hipótesis de este trabajo, y la definición de los objetivos operativos. A continuación, se resaltan los intereses científicos y sociales que justifican el

## 1. Introducción y motivación

---

desarrollo de una tesis en esta temática. Y por último, se presenta la metodología que permitirá la validación de la hipótesis previamente planteada.

- El segundo capítulo del documento proporciona al lector una visión general de los sistemas inteligentes de transporte y las aplicaciones cooperativas que éstos permiten desplegar. Además, se presentan las tecnologías actuales que permiten el despliegue de estas aplicaciones. Y por último, se realiza una comparativa entre las tecnologías para justificar por qué en este trabajo se ha decidido utilizar comunicaciones celulares para la implementación de las comunicaciones V2X.
- El tercer capítulo bien podría considerarse una continuación del anterior, ya que después de justificar por qué se eligen las tecnologías celulares, se presentan las características principales de las mismas que hacen que sea una buena opción para el despliegue de aplicaciones cooperativas en entornos vehiculares.
- El cuarto capítulo es el que recoge la explicación de la metodología presentada en esta tesis para validar la hipótesis planteada en la introducción. Además, durante este apartado justifica diversas decisiones tomadas a la hora de definir la arquitectura de la tecnología celular y presenta el entorno en el que se valida la hipótesis de este trabajo. Adicionalmente, en este capítulo se explicarán las principales aportaciones y contribuciones de la metodología propuesta, así como las diferentes similitudes y originalidades respecto a las principales técnicas de la literatura.
- El capítulo quinto aborda la experimentación llevada a cabo para validar la metodología presentada en el capítulo anterior y la presentación de los resultados que se obtienen de la misma. Se presentan, por un lado, las diversas métricas que permiten evaluar y comparar el rendimiento ofrecido por la metodología presentada en este trabajo con otras metodologías descritas también en este capítulo. Además de esto, se detallan los parámetros que definen los distintos escenarios en los que se evalúa la metodología propuesta. Y por último, se analizan los resultados obtenidos de la experimentación en los distintos escenarios definidos utilizando las métricas propuestas.

## **1.5 Estructura de la tesis**

---

- El sexto y último capítulo del trabajo expone las conclusiones de la tesis, así como las líneas futuras de trabajo y mejoras que pueden derivarse del análisis de los resultados del capítulo anterior.



*Para descubrir cómo se nada  
en el mar, hay que salir de la  
pecera.*

Anónimo

# 2

## **C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo**

**L**a nueva necesidad de la sociedad de estar todo el día conectados y disponer de la máxima información sobre su entorno, junto con el creciente número de vehículos en las carreteras que agrava y aumenta los accidentes de tráfico y la congestión, ha hecho que la industria del automóvil se replantee su modo de ofrecer servicios.

Estas razones han promovido el análisis e investigación de los conocidos como Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo (C-ITS). Considerando estos sistemas un componente crucial para el futuro de nuestra sociedad, se espera que las múltiples aplicaciones planificadas para el despliegue sobre los C-ITS conduzcan a una movilidad más segura, inteligente, conveniente y efectiva.

Desde que se empezó a hablar de los términos vehículo autónomo y vehículo conectado, el número de stakeholders involucrados en la industria del automóvil ha crecido ampliamente. Con el objetivo de asegurarse de que todos se dirigen hacia el mismo destino, es esencial disponer de una capa de servicio bien definida que especifique las aplicaciones C-ITS que se pretenden ofrecer a nivel global.

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

### 2.1 Aplicaciones para C-ITS

La idea de que los vehículos compartan información y trabajen juntos para que el transporte sea más seguro, ecológico y entretenido es realmente interesante para la sociedad y la industria. En este sentido, los C-ITS tienen como objetivos principales:

- reducir la congestión del tráfico,
- disminuir el impacto ambiental del transporte,
- reducir significativamente el número de accidentes de tráfico mortales y
- amenizar el viaje a los usuarios.

El impacto de los C-ITS sobre la seguridad evidencia la necesidad de invertir en estos sistemas, ya que, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), aproximadamente 1,25 millones de personas murieron en 2015 debido a accidentes de tráfico, con un costo gubernamental asociado de alrededor del 3 % del Producto Interior Bruto (PIB) [OMS 16].

Una de las tecnologías claves para el despliegue de aplicaciones C-ITS son las comunicaciones inalámbricas, las cuales permiten a los vehículos comunicar su posición, velocidad, dirección y otros datos a otros vehículos y entidades. Esta información se puede explotar para mejorar la seguridad vial, la eficiencia del tráfico y otros servicios no relacionados con la seguridad, como es la comodidad, el ocio y entretenimiento de los pasajeros.

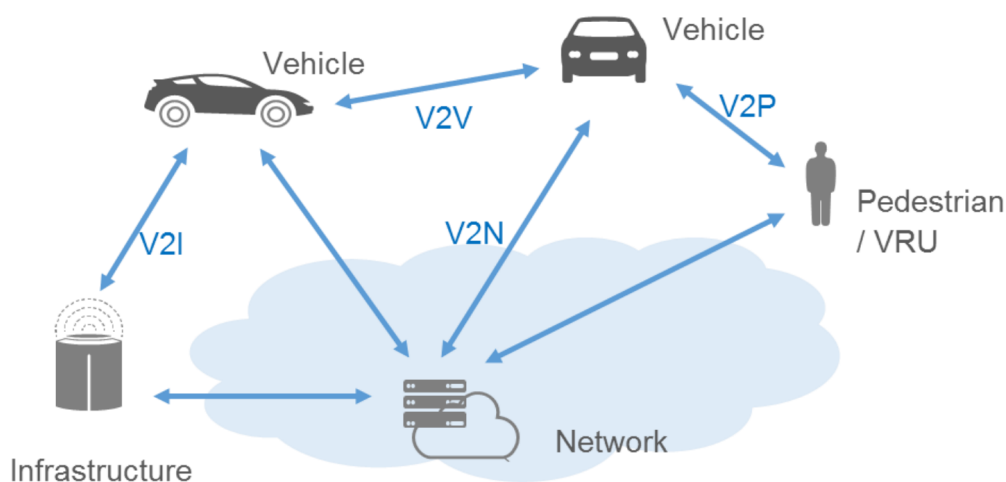
En este contexto, los C-ITS se refieren a un conjunto de tecnologías de comunicación que permiten la cooperación entre vehículos, infraestructuras de red, peatones, etc. Para establecer esa cooperación, las aplicaciones impulsadas por C-ITS se basan en varios tipos de comunicaciones:

- Vehicle-to-Vehicle (V2V): comunicación entre vehículos,
- Vehicle-to-Pedestrian (V2P): comunicación entre un vehículo y un dispositivo transportado por un individuo (por ejemplo, el smartphone de un peatón, ciclista, conductor o pasajero). Estos usuarios suelen denominarse VRUs (Vulnerable Road Users),

## 2.1 Aplicaciones para C-ITS

- Vehicle-to-Infrastructure (V2I): comunicación entre un vehículo y una unidad de carretera o RSU (Road Side Unit),
- Vehicle-to-Network (V2N): comunicación entre un vehículo y el servidor de aplicaciones V2X o servidor de aplicaciones C-ITS

Para englobar todos estos tipos de comunicaciones vehiculares mostrados en la Figura 2.1 se ha propuesto el término V2X (Vehicle-to-Everything).



**Figura 2.1:** Tipos de comunicaciones V2X (Fuente [Americas 16])

Las comunicaciones V2V y V2P se basan principalmente en las transmisiones broadcast entre vehículos o entre éstos y los VRUs, por ejemplo, para proporcionar información sobre la ubicación, velocidad y dirección de los mismos y, así, evitar accidentes u ofrecer otro tipo de servicios [Hernandez-Jayo 15].

La transmisión V2I se establece entre un vehículo y una RSU, la cual permite ampliar el alcance de un mensaje V2X recibido desde un vehículo pudiendo actuar como nodo de reenvío (por ejemplo, repetidor). Las comunicaciones V2I incluyen la comunicación entre los vehículos y los dispositivos de control del tráfico, como, por ejemplo, las señales de aviso próximas a las zonas de obras en las carreteras.

Las comunicaciones V2N se producen entre un vehículo y un servidor de aplicaciones V2X. También, se puede utilizar una RSU para las comunicaciones V2N, donde ésta se comporta como intermediaria entre el vehículo y el servidor, por ejemplo, para las operaciones de gestión de tráfico y la optimización de rutas.

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

De este modo, las comunicaciones V2X permiten una amplia gama de aplicaciones C-ITS que se han clasificado en cuatro grupos [ETSI 09]:

- **Seguridad, conducción automatizada y sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS)**, que son servicios que requieren alta fiabilidad y baja latencia en la transmisión de mensajes a altas velocidades. Algunos ejemplos son la advertencia de colisión, de pérdida de control, de puntos ciegos y de cambio de carril, así como las aplicaciones de seguridad para VRUs.
- **Conocimiento del entorno**, lo que implica una alta fiabilidad y requisitos de latencia menos estrictos que para las aplicaciones de seguridad. Ejemplos de ello son la advertencia de congestión y de peligro en el estado las carreteras como, por ejemplo, aviso de hielo o nieve.
- **Servicios de movilidad**, que incluyen comunicaciones para apoyar los trayectos intermodales, y la reducción de la congestión lo que implica el apoyo a dispositivos con conectividad intermitente y limitaciones de energía. Ejemplos de ello son los sistemas automatizados de aparcamiento y peaje, los avisos de tráfico y las aplicaciones que permiten el uso compartido dinámico de vehículos o bicicletas.
- **Servicios auxiliares y de confort**, conocidos como infotainment, que es un término general para los casos de uso que involucran vehículos y tienen un valor comercial, los cuales requieren altas velocidades de transmisión de datos y tipos de comunicaciones flexibles. Algunos ejemplos son la información local, la planificación de rutas, la difusión de mapas y la gestión de flotas. Estos servicios también se conocen como servicios de movilidad personal.

Dentro de estos servicios, el ETSI (European Telecommunications Standards Institute) ha definido un conjunto de casos de uso para realizar el despliegue inicial [ETSI 09]. Estos casos de uso son conocidos como aplicaciones del Día 1 y tienen como fin evitar los accidentes. Para este primer despliegue, los requisitos de servicio de las comunicaciones son bastante permisivos, ya que todos ellos se centran en informar o en aumentar el conocimiento de los conductores. Además,

las aplicaciones también son tolerantes a la pérdida de paquetes, considerando que los mensajes son repetidos por el vehículo originario o que la misma información es reenviada de manera redundante por diferentes vehículos.

Por otro lado, la mayoría de casos de uso presentados previamente tienen patrones de comunicación comunes, como son el intercambio periódico de mensajes cooperativos y las notificaciones asíncronas. Por lo general, los servicios de C-ITS necesitan conocer el estado de los vehículos y los sistemas desplegados en la carretera. Esto implica el intercambio periódico de paquetes de datos con información sobre localización, velocidad, dirección, etc. . Por otro lado, las notificaciones asíncronas se utilizan para informar sobre un evento específico. A diferencia de los mensajes de estado anteriores, la entrega fiable de estos mensajes a un solo terminal o a un grupo de ellos suele ser un requisito clave.

Por lo tanto, debido a la repetición de estas dos estrategias de comunicación en las aplicaciones de C-ITS, dentro de la arquitectura de referencia ISO/ETSI definida para comunicaciones de ITS [ETSI 10][ETSI 13], el ETSI ha definido dos servicios de mensajería básicos para proporcionar funcionalidades a las aplicaciones de su BSA (Basic Set Applications). Estos servicios de mensajería básicos con los mensajes CAM (Cooperative Awareness Message) [ETSI 11] y DENM (Decentralized Environmental Notification Message) [ETSI 14].

Los mensajes CAM surgen de la necesidad de una conciencia cooperativa en las carreteras, ya que es la base de múltiples aplicaciones de seguridad vial y eficiencia de tráfico. Esta conciencia cooperativa significa que los usuarios de las carreteras y la infraestructura vial comparten información sobre la posición, dirección y características de cada uno de ellos. El término «usuarios de la carretera» recoge todo tipo de vehículos (coches, camiones, motocicletas, bicicletas) e incluso peatones y los «equipos de infraestructura vial» incluyen señales de tráfico, semáforos y barreras. Los mensajes CAM son emitidos periódicamente por usuarios y equipos y permiten proporcionar a sus vecinos información de presencia, posición, y estado básico.

Por el contrario, los DENM son mensajes generados debido a eventos, cuyo fin es alertar a los usuarios de la carretera sobre un suceso peligroso. La construcción de un DENM se activa mediante una aplicación C-ITS. Un DENM contiene información relacionada con un peligro vial o condiciones de tráfico anormales, por lo

## **2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo**

---

que permite informar al conductor acerca del suceso y así, éste puede tomar las medidas adecuadas para reaccionar a la situación en consecuencia.

En resumen, los CAM se utilizan principalmente para proporcionar datos esenciales que permiten a la colaboración entre vehículos y entre éstos con la infraestructura, mientras que los DENM se generan debido a eventos viales anómalos y proporcionan al conductor información para reaccionar con tiempo ante situaciones peligrosas.

### **2.2 Niveles de automatización**

En las últimas décadas se ha mejorado la seguridad de los vehículos incluyendo nuevos avances tecnológicos y nuevas leyes de seguridad al volante, como por ejemplo, el uso obligatorio del cinturón de seguridad, airbags, etc. Sin embargo, el aumento de los dispositivos de seguridad parece ahora ser compensado por un aumento de las distracciones del conductor, como por ejemplo los teléfonos móviles. Se calcula que mas de un 90 % de los accidentes automovilísticos se deben a un error humano o a malas elecciones, por lo que es lógico pensar que la asistencia al conductor en los automóviles reducirá las muertes causadas por errores humanos [for Internet 13][Lynnette Reese 17].

En la actualidad, muchas compañías están interesadas en los futuros vehículos autónomos de una forma u otra, por lo que con el objetivo de proporcionar una terminología común para la evolución de la conducción autónoma el SAE (Society of Automotive Engineers) ha definido 6 niveles de automatización del vehículo. Esta evolución propuesta queda representada en la Figura 2.2 y las características principales de cada nivel son las siguientes:

- En el Nivel 0 o No automatizado el conductor es el responsable a tiempo completo de todas las tareas de conducción dinámica, incluso cuando se ve reforzado por sistemas de alerta o intervención.
- En el Nivel 1 o Conducción asistida se ofrece al conductor asistencia en la dirección o en la aceleración y deceleración utilizando para ello información del entorno obtenida a través de sensores. Esto es, el vehículo cuenta con algún sistema de automatización de la conducción, ya sea para el control

del movimiento longitudinal, o para el control del movimiento lateral, pero no ambas cosas a la vez. Un ejemplo común de automatización de nivel 1 es el control de crucero. Asimismo, el sistema no cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa, por lo que esta tarea recae en el conductor (por ejemplo puede reconocer vehículos, pero no un animal que cruza la carretera). En este nivel el conductor humano sigue siendo conductor y debe estar atento a todo lo que sucede.

- En el Nivel 2 o Automatización Parcial el vehículo cuenta con sistemas de automatización de la conducción tanto para el control del movimiento longitudinal, como para el control del movimiento lateral, ambos a la vez. Sin embargo, en este nivel el sistema tampoco cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa, por lo que de nuevo esta tarea recae en el conductor. Por tanto, en el Nivel 2 en la mayoría de los casos el conductor humano no tiene que realizar tareas relativas al movimiento, pero sigue siendo conductor y debe estar atento a todo lo que sucede. El piloto automático de Tesla, por ejemplo, se clasifica como Nivel 2.
- El Nivel 3 o Automatización Condicional cuenta con los sistemas de automatización de la conducción presentados en el Nivel 2 y, además, cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa. En este nivel se habla de que el conductor humano debe estar preparado para intervenir si el sistema lo solicita o si se produce un fallo o pérdida de las condiciones de funcionamiento, pasando a ser en ese momento conductor. Por ejemplo, el usuario tendrá que tomar el control de la conducción cuando el mal tiempo o las condiciones de la carretera ponen en peligro los sensores.
- En el Nivel 4 o Alta Automatización desaparece la figura del conductor humano. Este nivel cuenta con todos los sistemas de automatización del Nivel 3 y, además, en este nivel ya no es necesario que el usuario esté preparado para intervenir si se produce un fallo ya que el propio sistema de automatización de la conducción cuenta con un sistema de respaldo para actuar en caso de fallo del sistema principal. Aún así, el funcionamiento del sistema sigue limitado a ciertas condiciones y por tanto el vehículo puede encontrar-

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

se en situaciones en las que no pueda seguir conduciendo y se detenga por seguridad.

- El Nivel 5 o Automatización Total es bastante ambicioso, con un control total de la conducción realizado por el vehículo autónomo en todo momento. En este nivel se ofrecen todos los sistemas de automatización del Nivel 4, pero además, en el Nivel 5 no hay condiciones específicas limitantes para el funcionamiento del sistema, por lo que el vehículo podría seguir conduciendo en todo momento o circunstancia.

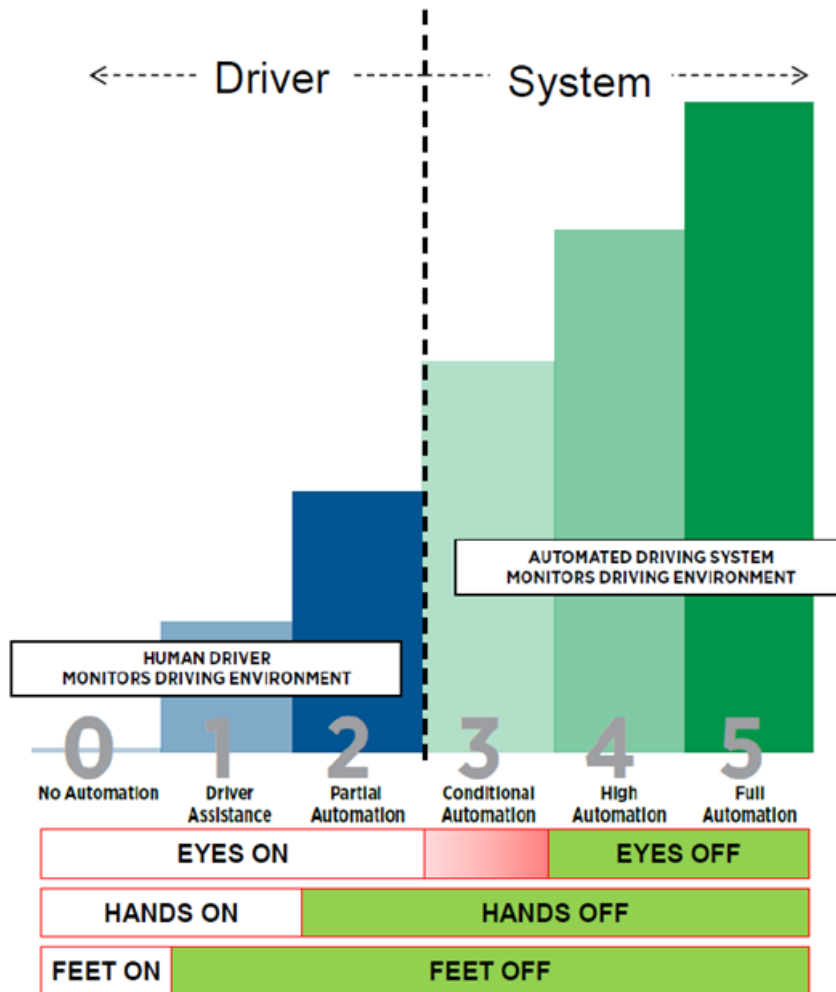


Figura 2.2: Niveles de automatización del vehículo (Fuente [Sjöberg 17])

## 2.2 Niveles de automatización

---

Para poder alcanzar estos niveles de automatización es necesario que la tecnología actual evolucione para permitir:

- Computación de alto rendimiento y eficiencia energética.
- Conectividad inalámbrica de alta capacidad, alta velocidad, penetrante y confiable con baja latencia.
- Creación de grandes centros de datos basados en la nube donde se producirá un procesamiento de datos de alto nivel y gran volumen.

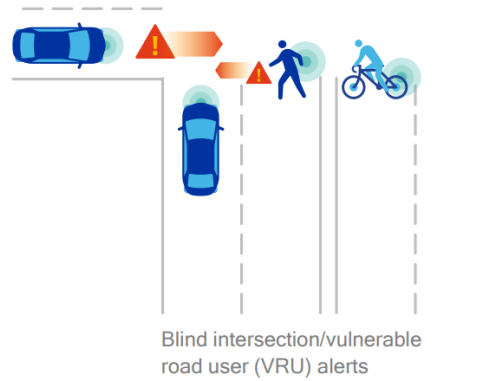
De las tres necesidades tecnológicas, la conectividad inalámbrica se enfrenta a los mayores desafíos técnicos, ya que las altas velocidades de los vehículos y la variabilidad del escenarios hace que en ocasiones sea difícil cumplir los estrictos requisitos de latencia y fiabilidad de las aplicaciones de seguridad. Por esto, en las ocasiones en las que no se pueda garantizar la fiabilidad, el sistema debe dejar de depender de las comunicaciones inalámbricas y, si es necesario, informar al conductor o incluso cambiar de una conducción en modo autónoma a modo manual.

Aún así, las comunicaciones V2X se producirán independientemente de que llegemos a una sociedad llena de vehículos de Nivel 5. Aunque haya aplicaciones de seguridad y eficiencia que sean parcialmente posibles solo con sensores, estas comunicaciones son necesarias en la automatización de los vehículos, ya que aportan las siguientes capacidades:

- Detección de objetos en puntos ciegos, gracias a que el radio de alcance de las comunicaciones es mayor que el de los sensores y además funcionan sin que exista visión directa entre usuarios. Esto ofrece un conocimiento del entorno de 360°, las comunicaciones funcionan igual durante la noche y con malas condiciones meteorológicas. La Figura 2.3 muestra un ejemplo.

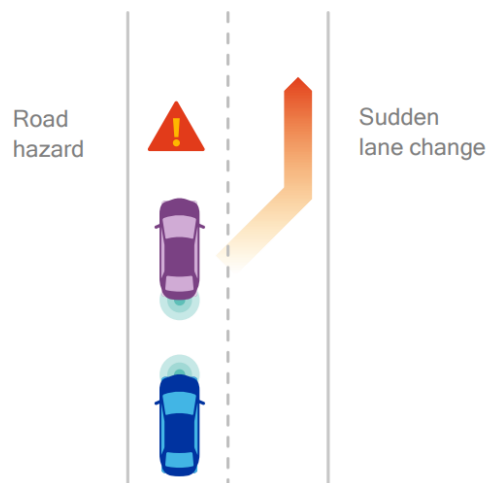
## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---



**Figura 2.3:** Detección de objetos NLOS para vehículo autónomo gracias a V2X (Fuente [Qualcomm 16])

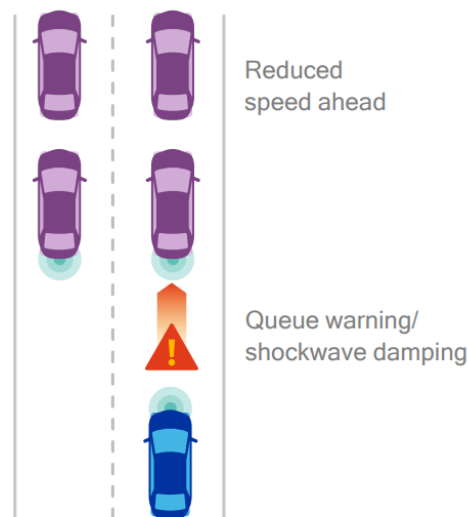
- Intercambio de intenciones, debido a que los vehículos comparten información sobre su intención de movimiento, datos recogidos por sus sensores e información de planificación de sus rutas para un mayor nivel de predictabilidad. Un ejemplo es representado en la Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Tráfico cooperativo de vehículos autónomos gracias a V2X (Fuente [Qualcomm 16])

## 2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares

- Mayor conocimiento del entorno, ya que las comunicaciones permiten ofrecer un mayor horizonte de consciencia para soportar alertas de seguridad suaves y advertencias graduales, como por ejemplo, que el vehículo que está tres posiciones por delante ha reducido su velocidad, hecho que además aumenta la comodidad del conductor mediante un movimiento más suave, tal y como se observa en la Figura 2.5



**Figura 2.5:** Circulación de coches autónomos seguros gracias a V2X (Fuente [Qualcomm 16])

## 2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares

Las comunicaciones V2X generan en la actualidad un gran interés social e industrial, ya que prometen reducir drásticamente las muertes en carretera, mejorar la movilidad y permitir un alto nivel de automatización del vehículo. Por tanto, es indispensable que estas comunicaciones funcionen de forma robusta en un entorno muy dinámico con altas velocidades relativas entre transmisores y receptores, y soporten la latencia extremadamente baja requeridas por las aplicaciones relacio-

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

nadas con la seguridad en autopistas rápidas, intersecciones urbanas abarrotadas y túneles.

Durante años, la tecnología elegida para estas comunicaciones V2X ha sido IEEE 802.11p. Sin embargo, esto cambió en 2015 cuando el 3GPP comenzó a desarrollar el nuevo estándar C-V2X que permite el despliegue de aplicaciones V2X basado en la banda ancha móvil. Dado que la seguridad de millones de usuarios de la carretera dependerá del rendimiento de estas tecnologías, es importante realizar un análisis exhaustivo de las mismas. Por tanto, en esta sección, se presentan brevemente estos dos estándares junto con sus arquitecturas asociadas y se resumen sus ventajas y desventajas cuando se aplican a las comunicaciones V2X.

### 2.3.1 IEEE 802.11p

La norma IEEE 802.11p se publicó en 2010 [IEEE 13] y, desde entonces, se han realizado múltiples pruebas en todo el mundo, incluso con miles de vehículos. Esta tecnología forma parte de la pila de protocolos de dos estándares: WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) y ITS-G5[Festag 15]. El primero de ellos es el que se utiliza en Estados Unidos para las comunicaciones vehiculares y su pila de protocolos se muestra en la Figura 2.6.

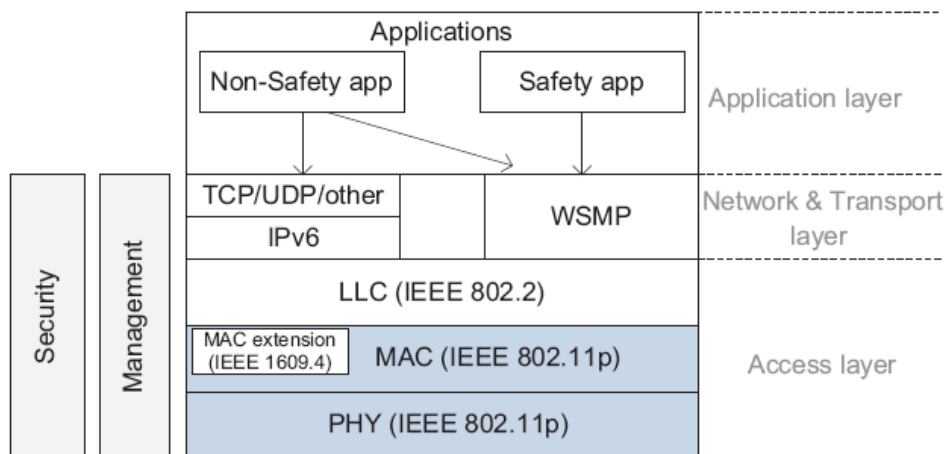
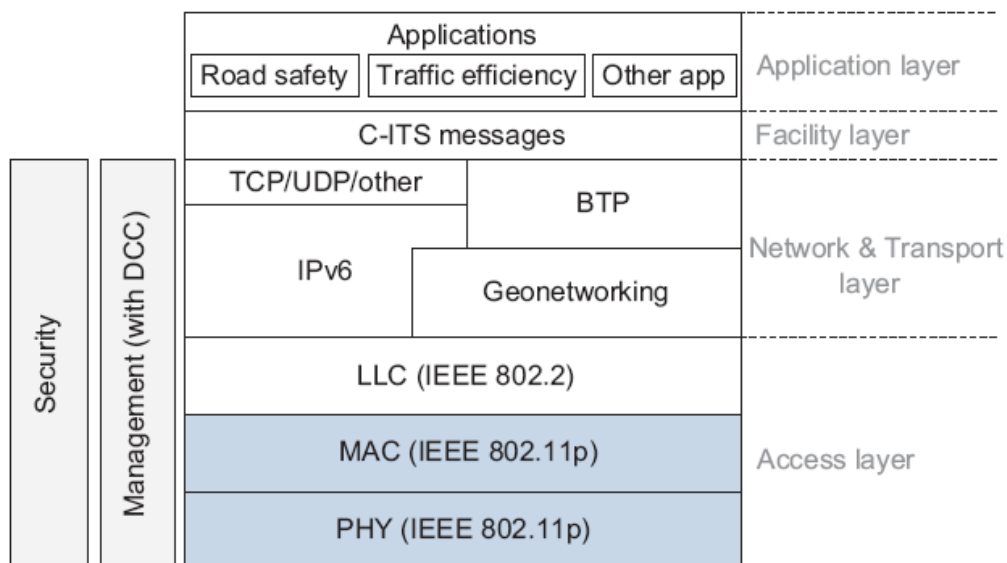


Figura 2.6: Pila de protocolos WAVE

## 2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares

Por otro lado, ITS-G5, que es una versión ligeramente modificada de WAVE, es el estándar que se sigue en Europa y su pila de protocolos se corresponde con la representada en la Figura 2.7.



**Figura 2.7:** Pila de protocolos ITS-G5

La principal diferencia entre estas dos arquitecturas de referencia radica en las capas superiores. Así, en comparación con WAVE, la pila de protocolos europea dispone de una capa de servicio situada entre la capa de red y transporte y la capa de aplicación.

Se observa como en ambas pilas de protocolos IEEE 802.11p es la tecnología encargada de las capas inferiores de la pila, es decir, la capa física (PHY) y la capa de control de acceso medio (MAC). Estas capas son prácticamente idénticas a excepción de las operaciones multicanal, que en WAVE se especifican mediante el estándar IEEE 1609.4 [IEEE 11], mientras que en ITS-G5 el uso de múltiples canales de frecuencia está respaldado por el mecanismo DCC (Decentralized Congestion Control) integrado en el módulo de gestión [Strom 11] [Festag 14] [IEEE 11] [Festag 15].

De este modo, las características técnicas más destacables de IEEE 802.11p son las siguientes:

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

- La capa PHY utiliza OFDM con 64 subportadoras (48 para datos, 4 para piloto y 12 para nulo).
- La separación entre canales es de 10 MHz, en lugar de 20 MHz como ocurre en 802.11a, para reducir la dispersión de retardo.
- La capa MAC adopta el mecanismo EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) que hereda el acceso CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance) y lo mejora proporcionando diferentes parámetros de acceso al medio para ofrecer prioridades de servicio.
- Ofrece un modo de funcionamiento ad hoc, conocido como OCB (Outside the Context of a BSS), que evita el proceso de autenticación y asociación para establecer un Basic Service Set (BSS) y, por lo tanto, simplifica el procedimiento de configuración, para adaptarse a las aplicaciones de seguridad que requieren conexiones de corta duración y requisitos de baja latencia.

Las principales particularidades que hacen que IEEE 802.11p sea actualmente el estándar reconocido para aplicaciones C-ITS son, en principio, su fácil despliegue, bajo coste y su soporte nativo de comunicaciones V2X en modo ad hoc.

Si a esto se le suma la gran cantidad de pruebas llevadas a cabo en escenarios reales y el gran número de dispositivos ya disponibles en el mercado, la principal ventaja de esta tecnología es que parece madura para un despliegue a gran escala.

Sin embargo, IEEE 802.11p también se enfrenta a múltiples inconvenientes como son:

- El problema de escalabilidad o, en otras palabras, el posible alto nivel de errores en condiciones de tráfico denso. Este problema es causado por el uso del protocolo CSMA/CA en la capa MAC, el cual sigue un principio de escucha antes de la transmisión. Opcionalmente, cada equipo anuncia su intención de transmitir antes de hacerlo para evitar colisiones entre los paquetes de datos. De este modo, cada vehículo escucha el canal durante un período de tiempo predeterminado. Si percibe que el canal está libre, el vehículo comenzará a transmitir; de lo contrario, el vehículo aplazará su acceso por un período de tiempo aleatorio dentro de una ventana de contención. De esta manera,

## 2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares

---

el rendimiento de CSMA/CA se deteriorará gravemente, generando especial preocupación por su fiabilidad en condiciones de tráfico abundante.

- La necesidad de desplegar una infraestructura de carretera formada por Road Side Units (RSUs), con la alta inversión que esto conlleva. Dado que la falta de infraestructura genera dificultades a la hora de garantizar ciertos niveles de servicio, la necesidad de un despliegue generalizado de infraestructura hace que se considere que IEEE 802.11p ofrece, en la actualidad, conectividad intermitente entre vehículos y dispositivos. Por lo tanto, no permite asegurar el cumplimiento de los estrictos requisitos de latencia y fiabilidad de las aplicaciones C-ITS relacionadas con la seguridad.
- La falta de planes claros para el futuro que se evidencia, por ejemplo, en el hecho de que las pilas y los estándares definidos en Europa y Estados Unidos no están armonizados, tal y como se observa en las figura 2.6 y 2.7. Como ejemplo se puede destacar que las versiones europea y estadounidense no son compatibles. Esto es así porque que en Estados Unidos, la FCC (Federal Communications Commission) ha asignado para las aplicaciones de C-ITS un ancho de banda de 75 MHz a lo largo del espectro de 5,850-5,925 GHz. Este ancho de banda total se subdivide en siete canales de 10 MHz para cada uno. En cambio, en Europa, el ancho de banda que se ha asignado a las aplicaciones C-ITS es de 50 MHz en el rango frecuencial de 5,875-5,925 GHz, el cual se subdivide en cinco canales de 10 MHz.
- La baja penetración en el mercado que origina que el despliegue de redes ad hoc sufra del típico problema de la gallina y el huevo, ya que se requiere un cierto número de vehículos equipados con IEEE 802.11p antes de que el enfoque sea efectivo.

### 2.3.2 Comunicaciones celulares C-V2X

Como se ha presentado en la sección anterior, algunas de las limitaciones de IEEE 802.11p se deben principalmente a tres causas:

1. La falta de un coordinador centralizado.

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

2. Su baja penetración en el mercado.
3. Su baja escalabilidad y futuro.

Estas limitaciones llevaron a los investigadores a pensar en el uso de las comunicaciones celulares para resolver estos problemas. Sin embargo, como se describe en [Sun 14][Cheng 15a][Xing 14a][Vinel 12], el LTE convencional no estaba preparado para sostener intrínsecamente las comunicaciones V2V ya que, en un sistema celular convencional, los paquetes deben ser retransmitidos por el eNodeB.

Por lo tanto, para aprovechar los puntos fuertes de ambas tecnologías, se promovió el estudio de redes heterogéneas para el soporte de aplicaciones C-ITS, como se observa en [d'Orey 15][Campolo 15][Trichias 12][Zheng 15]. En estas redes heterogéneas se utiliza IEEE 802.11p para las comunicaciones V2V y LTE para las comunicaciones con la infraestructura [Hernandez-Jayo 15] con el objetivo de abarcar los siguientes aspectos:

- Explotar la naturaleza de las comunicaciones locales y de corto alcance de la mayoría de las aplicaciones C-ITS.
- Ofrecer comunicaciones con mayores capacidades de servicio en un área mayor, independientemente de que los vehículos se encuentren dentro o fuera del área de cobertura de la estación base.
- Adaptarse a las rápidamente variables topologías de red causadas por la alta movilidad de los vehículos.
- Ser compatible con los estándares de las capas de alto nivel C-ITS existentes [ETSI 09].
- Ser beneficioso para diferentes partes: usuarios (incluyendo conductores, pasajeros, peatones, ciclistas, etc.), operadores de telecomunicaciones, vendedores de telecomunicaciones y fabricantes de automóviles.

A pesar de las ventajas que aportan las redes heterogéneas, todo dio un giro cuando a partir el 3GPP Release 12, LTE comenzó a implementar la funcionalidad Device-to-Device (D2D). Estas comunicaciones D2D ofrecen cuatro tipos diferentes de ganancia [Cheng 15a]:

## 2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares

---

- La ganancia de proximidad se origina de la alta velocidad de datos y el bajo consumo de energía de las comunicaciones D2D debido al rango de comunicación relativamente corto entre los transceptores.
- La ganancia de salto ya que cuando dos usuarios comunes (UEs) en una red celular se comunican a través de un enlace D2D, sólo se utilizan dos canales.
- La ganancia de reutilización que se debe al hecho de que los enlaces D2D y celulares pueden compartir simultáneamente los mismos recursos de radio.
- La ganancia de emparejamiento ocasionada por la capacidad de los UEs de seleccionar entre el modo de comunicación celular y D2D.

Sin embargo, el hecho de que esta tecnología no fue concebida para cumplir los estrictos requisitos de las comunicaciones V2X en términos de latencia, fiabilidad y movilidad, ha motivado a la comunidad investigadora a analizar la aplicabilidad de las técnicas D2D para comunicaciones V2V en diferentes trabajos, como [Campolo 15] [Vinel 12] [Cheng 15a] [Khelil 14a]. Paralelamente a los estudios académicos, una comprensión similar ha prevalecido en la comunidad del 3GPP.

En consecuencia, el estándar inicial C-V2X, para su inclusión en el Release 14, se completó en septiembre de 2016 durante la reunión de 3GPP RAN en Nueva Orleans. La descripción de este paquete de trabajo se encuentra en el RP-161894 [3GPP 16]. Uno de los puntos clave del Release 14 es que ofrece dos modos de transmisión:

- Transmisión a través de la red, que se realiza a través del interfaz Uu, y opera en la banda licenciada del espectro tradicional de banda ancha móvil.
- Transmisión directa, que se realiza a través del interfaz PC-5, que opera en la banda ITS (ITS 5.9 GHz) y es independiente de la red celular.

Además, una de las peculiaridades de C-V2X es que ofrece la posibilidad de operar sin asistencia de la red, lo que permite:

- Funcionar sin tarjeta SIM para las comunicaciones V2V directas.

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

- Implementar una selección autónoma de recursos, de modo que los vehículos son capaces de seleccionar los recursos que les permiten transmitir sin necesidad de soporte del eNodeB.
- Utilizan GNSS (Global Navigation Satellite System) para sincronizarse sin necesitar asistencia de la red.

Asimismo, las comunicaciones C-V2X son capaces de soportar una amplia variedad de casos de uso que requieren un mayor alcance o un mayor rendimiento de mensajes que el ofrecido hasta el momento. Esto se debe a las ventajas que aportan las características de la capa física de las comunicaciones C-V2X:

- La multiplexación de recursos puede ser FDM, lo que ofrece un mayor capacidad del enlace y, por tanto, un mayor alcance o un rendimiento más fiable en el mismo alcance.
- Las retransmisiones utilizan HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) lo que permite lograr capacidad del enlace más altos.
- La codificación turbo aumenta aún más la capacidad del enlace [Weithoffer 17].
- Explora la naturaleza periódica del tráfico de V2V combinando la detección de los recursos radio con transmisiones semipersistentes SPS (Semi-Persistent Scheduling).
- El acceso SC-FDM (Single-Carrier Frequency-Division Multiplexing) permite más potencia de transmisión con el mismo amplificador de potencia, lo que conduce a un mayor alcance o un mayor rendimiento en el mismo alcance.

Así, las comunicaciones C-V2X Release 14 ofrecen ventajas clave en múltiples dimensiones:

- Mayor fiabilidad a mayor alcance
- Funcionamiento en escenarios de alta densidad
- Organización descentralizada para reducir costes y complejidad

## 2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares

---

- Reutilización de las capas superiores de WAVE y ITS-G5
- Soporta las altas velocidades de los vehículos
- Evidente evolución a redes 5G

Sin embargo, las comunicaciones C-V2X también se enfrentan diversos problemas. El más importante es el tiempo de comercialización ya que, aunque la primera versión ya esté estandarizada en el Release 14, aún queda tiempo para que se comercialice. Además, hasta el Release 16 no serán implementadas las mejoras necesarias para ofrecer los estrictos requisitos de las comunicaciones V2V.

Además de esto, no está claro cómo se gestionarán los traspasos entre distintos operadores de redes móviles ni la cooperación de estos con los proveedores de servicios de aplicaciones.

Por lo tanto, para que triunfen las comunicaciones C-V2X es necesario una alineación y colaboración entre las empresas de comunicaciones, los agentes verticales y los organismos reguladores para la definición de normas que aseguren el éxito de la seguridad y la eficiencia de los vehículos. Para coordinar estas colaboraciones ha surgido el 5GAA, sobre el que se hablará en el Capítulo 3.

### 2.3.3 Comparativa

Tras presentar las capacidades y limitaciones de IEEE 802.11p y C-V2X, en esta sección se realiza un profundo análisis comparativo de ellas.

Para comenzar el análisis, en la Tabla 2.1 se comparan distintas características del diseño radio de las tecnologías. Con respecto a la sincronización se observa que IEEE 802.11p es asíncrona y, en cambio, C-V2X es una tecnología síncrona lo que ofrece una mayor eficiencia espectral ya que se genera menos sobrecarga a la hora de acceder a la red.

Analizando el ancho de canal y las modulaciones soportadas, IEEE 802.11p y C-V2X Rel-14 tienen las mismas características, sin embargo, está planificado ofrecer más posibilidades para futuros estándares. Por otro lado, comparando la multiplexación de recursos, la codificación, las retransmisiones y la forma de la onda se puede concluir que C-V2X es capaz de ofrecer un mayor alcance de servicio, o un mayor rendimiento para el mismo alcance que IEEE 802.11p.

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

Asimismo, el hecho de que C-V2X sea capaz de ofrecer SPS hace que se optimice la asignación de recursos en las aplicaciones C-ITS de naturaleza periódica, como es el caso de la mayoría de aplicaciones de seguridad. Por último, el estándar IEEE 802.11p no contempla el uso de MIMO (Multiple Input Multiple Output), mientras que C-V2X sí, lo que le permite ofrecer una eficiencia espectral mayor.

Características radio	IEEE 802.11p	C-V2X Rel-14/15	C-V2X Rel-16 (diseño previsto)
<b>Sincronización</b>	10/20 MHz	Rel-14 - 10/20 MHz Rel-15 - Nx20 MHz	10/20 MHz y banda ancha (¿40MHz)
<b>Multiplexación de recursos entre vehículos</b>	solo TDM	TDM y FDM	TDM y posible TDM
<b>Codificación de datos</b>	Convolutional	Turbo	LDPC
<b>Retransmisión HARQ</b>	No	Rel-14/15 - sí Rel-15 - posible comunicación ultra-fiable	Sí, con comunicación ultra-fiable
<b>Forma de onda</b>	OFDM	SC-FDM	Posiblemente OFDMA pero hay muchas opciones posible
<b>Selección de recursos</b>	CSMA-CA	Transmisión semi-persistente con listen-before-talk en el dominio de la frecuencia	Muchas opciones disponibles
<b>Soporte de MIMO</b>	Soporte no estandarizado	Diversidad en recepción con 2 antenas Diversidad en transmisión con 2 antenas (posible)	Soporta hasta 8 antenas en tx/rx Obligatorio 2 antenas en tx/rx
<b>Modulación</b>	Hasta 64QAM	Hasta 64 QAM	Hasta 256QAM

**Tabla 2.1:** IEEE 802.11p vs C-V2X: Características radio

Tras analizar las características radio, en la Tabla 2.2 se compara el funcionamiento técnico. Esta tabla muestra que a diferencia de C-V2X, el estándar IEEE 802.11p está finalizado y, por tanto, listo para comercializarse. También presenta

## 2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares

que ambas tecnologías cumplen los requisitos de latencia de las aplicaciones C-ITS, sin embargo, pronostica que los retardos ofrecidos por las tecnologías C-V2X serán inferiores a los brindados por IEEE 802.11p.

Además, evidencia las limitaciones de IEEE 802.11p en las comunicaciones V2I/I2V ya que es indispensable el despliegue de una red de RSUs, con su correspondiente inversión económica. Asimismo, la tabla refleja que ambas tecnologías funcionan sin asistencia de la red y lo hacen en el espectro ITS de 5,9 GHz. Por último, muestra una característica crítica de IEEE 802.11p que es la falta de un camino de evolución clara para el futuro que le permita competir con 5G.

Funcionamiento tecnológico	802.11p	C-V2X Rel-14/15	C-V2X Rel-16 (diseño previsto)
Especificación completa	Completa	Rel-14 completo Rel-15 (2018)	2019
Comunicaciones directas de baja latencia	✓	✓ (Rel-14 4ms)	✓ (1ms)
Comunicaciones con la infraestructura	Limitadas (solo a través de RSUs)	✓	✓
Funcionamiento sin asistencia de la red	✓	✓	✓
Funcionamiento en el espectro ITS de 5.9 GHz	✓	✓	✓
Trayectoria evolutiva		✓	✓

**Tabla 2.2:** IEEE 802.11p vs C-V2X: Funcionamiento tecnológico

Para finalizar la comparativa, en la Tabla 2.3 se exponen los casos de uso para los que están preparadas las tecnologías evaluadas y el rendimiento que ofrecen. Esta tabla evidencia que IEEE 802.11p y C-V2X permiten ofrecer aplicaciones de seguridad definidas dentro del conjunto de casos de uso Day 1. Además, se espera que C-V2X Rel-15 permita ofrecer aplicaciones de seguridad mejorada y que C-V2X Rel-16 sea capaz de alcanzar los requisitos de servicio necesarios para ofrecer conducción autónoma.

Esta tabla también muestra que en los requisitos de calidad de servicio como el soporte de alta densidad de vehículos, alta movilidad de los mismos, alcance y fre-

## 2. C-ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo

---

cuencia de transmisión, C-V2X ofrece como mínimo la misma calidad de servicio o mayor que IEEE 802.11p.

Casos de uso	802.11p	C-V2X Rel-14/15	C-V2X Rel-16(diseño previsto)
<b>Casos de uso objetivo</b>	Aplicaciones de Day 1 Solo seguridad	Aplicaciones de Day 1 Seguridad y seguridad mejorada	Casos de uso avanzado para conducción autónoma
<b>Soporte de alta densidad</b>	✓ Pérdidas de paquetes a altas densidades	✓ Puede garantizar que no se pierden paquetes a altas densidades	✓ Puede garantizar que no se pierden paquetes a altas densidades
<b>Soporte alta movilidad</b>	✓ Hasta velocidades relativas de hasta 500 km/h con receptores avanzados	✓ Hasta velocidades relativas de 500 km/h como requisito mínimo	✓ Hasta velocidades relativas de 500 km/h como requisito mínimo
<b>Alcance de transmisión (90 % error, velocidad relativa 280 km/h)</b>	Hasta ~225 m	Hasta 450m en modo directo Grandes distancias a través de la infraestructura celular	Hasta 450m en modo directo Grandes distancias a través de la infraestructura celular
<b>Frecuencia de transmisión habitual para tráfico periodico</b>	Cada 100 ms (50 ms también es posible)	Cada 100 ms (20 ms también es posible)	Soporta periodicidades de pocos ms

**Tabla 2.3:** IEEE 802.11p vs C-V2X: Casos de uso y rendimiento

Tal y como se deduce de la Tabla 2.3, el objetivo principal para los desarrolladores de la tecnología C-V2X es ser capaces de ofrecer todos los casos de uso que ofrece IEEE 802.11p y, además, ampliar la funcionalidad aún más.

Para finalizar esta comparativa, a continuación se exponen las razones por las cuales se eligió realizar este trabajo sobre comunicaciones C-V2X, que son:

### **2.3 Tecnologías elegibles para comunicaciones vehiculares**

---

- Ofrece comunicaciones V2V mejoradas en relación con IEEE 802.11p. En futuras versiones, C-V2X debería casi duplicar el tiempo de alerta/reacción del conductor en comparación con la tecnología IEEE802.11p.
- Facilita las comunicaciones V2I y V2N en comparación con IEEE 802.11p. C-V2X aprovecha la infraestructura celular existente, evitando la necesidad de construir una nueva infraestructura IEEE 802.11p en carreteras. Esta capacidad de aprovechar la infraestructura existente reduce los costes generales de implantación.
- Aprovecha el potencial de los operadores celulares para jugar un papel positivo en el desarrollo y promoción de los servicios C-V2X. Los operadores celulares tienen una amplia experiencia y capacidades en la gestión de servicios de telecomunicaciones complejas en áreas extensas.



*Un día sin risa,  
es un día perdido.*

Charlie Chaplin

# 3

## Comunicaciones C-V2X

**C**-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) es un concepto tecnológico que involucra el uso de estándares celulares para una amplia gama de casos de uso y aplicaciones que requieren conectividad vehicular. Muchos de estos casos de uso están relacionados con la seguridad, aunque también existen oportunidades de aplicación relacionadas con la eficiencia de la movilidad y el medio ambiente, de modo que la amplitud de los casos de uso está aumentando. El mercado de la conectividad y la seguridad de los vehículos es complejo, y C-V2X complementa y compete con otras tecnologías, como es el caso de ITS-G5.

### 3.1 Evolución a LTE-V2X

C-V2X es una tecnología que se está desarrollando como parte del proceso global del 3GPP para avanzar los sistemas celulares de tecnologías 4G a 5G. Este nuevo concepto y alternativa se introdujo por primera vez en el Release 14 del 3GPP como LTE-V2X.

Sin embargo, la idea de utilizar tecnologías celulares para las comunicaciones V2X comenzó años atrás, cuando ya en el año 2008 se proponían las redes celulares 3G como tecnología alternativa a IEEE 802.11p principalmente para las

### 3. Comunicaciones C-V2X

---

comunicaciones con la infraestructura (V2I) debido al valor añadido que ofrecen especialmente en valores de throughput [Santa 08].

En [Baiocchi 13] se propone una arquitectura integrada de comunicaciones celulares y de corto alcance para que los vehículos que no dispongan de comunicaciones IEEE 802.11p puedan acceder a las aplicaciones de C-ITS y, así, acelerar la introducción al mercado de dispositivos con capacidad de comunicación V2X. Asimismo, aprovechando el acceso heterogéneo de IEEE802.11p/3G a los contenidos y servicios locales, esta arquitectura tiene como objeto apoyar el despliegue de aplicaciones de infotainment basadas en la localización, como la diseminación de anuncios comerciales.

La posibilidad de LTE Broadcast introducida en el 3GPP Release 9 generó aún más interés en el uso de tecnologías celulares en redes vehiculares [Zhao 13a]. Esta capacidad de LTE Broadcast facilitaba las comunicaciones vehículo a infraestructura (V2I) y vehículo a red (V2N), aprovechando la infraestructura celular tradicional. Además, esta capacidad permitía transmitir mensajes desde los servidores V2X a varios vehículos simultáneamente, mientras que los vehículos individuales podían unificar los mensajes de vuelta al servidor. Esta capacidad permitió el despliegue de una amplia gama de aplicaciones, como la recepción de alertas en vehículos sobre accidentes o situaciones peligrosas en la carretera, o la conexión de los vehículos a sistemas de aparcamiento inteligentes para facilitar a los conductores la tarea de encontrar aparcamientos libres.

Otro ejemplo de integración de tecnologías es NAVI [d'Orey 15], donde se propone el uso de redes heterogéneas IEEE 802.11p/LTE para la diseminación de información. Así, este artículo propone utilizar las comunicaciones de corto alcance para las comunicaciones V2V y utilizar las comunicaciones LTE para comunicarse con la infraestructura.

Pero sin duda el mayor impulso para la tecnología C-V2X fue la definición de LTE Direct en el 3GPP Release 12 de LTE. Hasta este momento era evidente que las tecnologías celulares ofrecían mejor rendimiento para las comunicaciones V2I, pero esta nueva posibilidad de realizar comunicaciones D2D entre vehículos sin tener que pasar por la infraestructura incrementó aún más el interés del ámbito académico y de la industria por el estudio de la aplicación de tecnologías celulares a entornos vehiculares para el despliegue de aplicaciones de C-ITS.

Así, las comunicaciones D2D permitían que los dispositivos transmitieran a velocidades de datos más altas, con consumos de energía más bajos, latencias más bajas y eficiencia espectral mejorada. En base a estas ventajas, muchos trabajos analizaron la aplicabilidad de las técnicas de comunicación D2D para establecer las comunicaciones V2V, tales como [Cheng 15b][Khelil 14b].

Por lo general, las aplicaciones C-ITS relacionadas con la seguridad se basan en la transmisión de mensajes pequeños en el vecindario del vehículo, lo que les proporciona una naturaleza fuertemente localizada y capacidades de transmisión relativamente pequeñas. Además, este tipo de aplicaciones a menudo tienen que ser en tiempo real y ofrecer estrictos requisitos de fiabilidad y disponibilidad de acceso. Al comparar los requisitos de QoS de los servicios V2X y los beneficios potenciales de la comunicación directa D2D, se observa que el enlace directo D2D es un habilitador prometedor para la comunicación V2X relacionada con la seguridad. En primer lugar, la naturaleza localizada de las aplicaciones V2X es exactamente la idea que motiva la comunicación D2D. En segundo lugar, la baja latencia requerida por los servicios V2X coincide con la ganancia de salto de las transmisiones D2D. En tercer lugar, el requisito de fiabilidad de las comunicaciones V2X puede beneficiarse de la ganancia de proximidad proporcionada por el enlace D2D y, también, potencialmente de la gestión centralizada en el eNodeB. Por último, pero no por ello menos importante, la comunicación V2X basada en D2D también resulta atractiva para los operadores, ya que les permite reforzar nuevos modelos y oportunidades de negocio.

Siguiendo estas motivaciones, en [Khelil 14b] se evaluó la idoneidad de las técnicas existentes de D2D para las comunicaciones de V2V y se llegó a la conclusión de que, para cumplir con los estrictos requisitos de las aplicaciones de V2X, era necesaria una adaptación cuidadosa de los conceptos heredados de D2D para poder explotarlos en el ámbito de la seguridad vial. Un entendimiento similar se extendió entre la comunidad del 3GPP y como consecuencia, el 3GPP se planteó desarrollar el estándar LTE para dar soporte a nuevos servicios que satisficieran los requisitos y necesidades de la industria del automóvil para las avanzadas comunicaciones vehiculares.

El desarrollo de este Work Item relacionado con V2X comenzó en 2014 cuando la versión 13 del 3GPP (febrero de 2015) dio lugar a estudios de viabilidad sobre

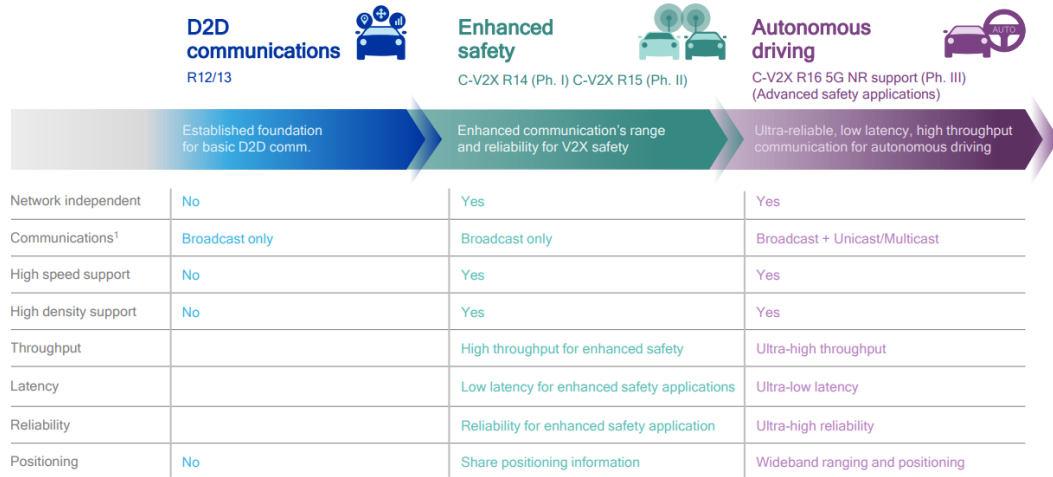
### **3. Comunicaciones C-V2X**

---

los requisitos potenciales y las modificaciones necesarias para soportar las especificaciones existentes para las comunicaciones V2X. Estos se implementaron en la versión 14 de 3GPP finalizada en junio de 2017, que incluye soporte completo para los servicios de C-V2X.

Los aspectos más sencillos que distinguen las comunicaciones D2D puras de las nuevas comunicaciones V2V están relacionados con la velocidad de los vehículos, la densidad de los mismos y las restricciones de latencia que establecen las aplicaciones de seguridad. Por ejemplo, uno de los objetivos del Work Item de V2V era desarrollar una solución capaz de soportar velocidades relativas de hasta 500 km/h, lo que inevitablemente implicaba cambios en la estructura de la capa física. Para satisfacer estos rigurosos requisitos, la densidad de las señales de referencia en el tiempo se ha duplicado en comparación con el establecido para las comunicaciones D2D.

## 3.2 5G para el coche autónomo



**Figura 3.1:** Evolución de 5G (Fuente [Qualcomm 17a])

La Figura 3.1 resume las principales diferencias existentes entre los Releases 12/13 cuya principal característica son las comunicaciones D2D, los Releases 14/15 que son la primera versión de C-V2X y proporcionan capacidades de seguridad mejoradas para los vehículos y lo que se espera alcanzar con el Release 16 que pretende ser un factor clave para la comercialización de coche autónomo.

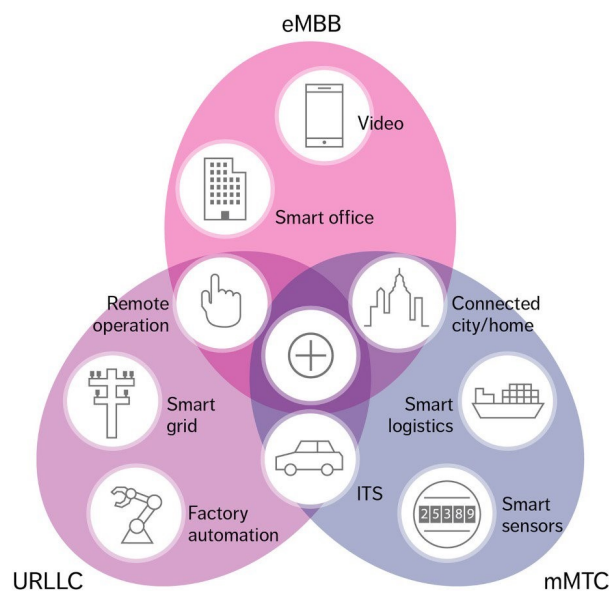
## 3.2 5G para el coche autónomo

Se espera que el tráfico mundial de datos móviles crezca en los próximos años un 45 % anual, lo que representa un aumento de diez veces el volumen actual entre 2016 y 2022 [Ericsson 16]. Este aumento se debe en gran medida a la adopción masiva del streaming de vídeo móvil. Además, el Internet de las Cosas (IoT) está convirtiéndose en realidad, y de los 29.000 millones de dispositivos conectados que se esperan para el año 2022, 18.000 millones serán dispositivos de IoT [Ericsson 16]. Por lo tanto, las futuras redes 5G tendrán que soportar estos nuevos y desafiantes casos de uso de una manera eficiente en cuanto a costes y energía.

En este contexto, los tres casos de uso principales que 5G debe soportar, como se ilustra en la Figura 3.2, son:

### 3. Comunicaciones C-V2X

---



**Figura 3.2:** Características y casos de uso de 5G (Fuente [Ericsson 17])

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB - enhanced Mobile BroadBand), que se refiere al soporte extendido de MBB convencional a través de velocidades de datos, capacidad y cobertura mejoradas.
- Comunicaciones ultra-fiables de baja latencia (URLLC - Ultra-Reliable Low-Latency Communications), requisito fundamental para aplicaciones críticas emergentes como Internet industrial, redes inteligentes, protección de infraestructuras, cirugía remota y sistemas inteligentes de transporte (ITS)
- Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC - massive Machine Type Communications) que son necesarias para apoyar el escenario previsto de IoT 5G con decenas de miles de millones de dispositivos y sensores conectados.

Hay dos vías que conforman la hoja de ruta de acceso por radio 5G en el 3GPP. Una se basa en la evolución de LTE y la otra en el acceso al 5G NR (New Radio). En la tecnología LTE-5G, las mejoras continuarán permitiendo soportar tantos requisitos 5G y casos de uso como sea posible. En cambio, la tecnología 5G NR

está libre de requisitos de retro-compatibilidad y, por lo tanto, es capaz de introducir cambios más relevantes, como el uso del espectro en frecuencias altas (onda milimétrica). Sin embargo, 5G NR está siendo diseñado de una manera escalable para que eventualmente pueda ser migrado a frecuencias que actualmente son servidas por LTE.

El 3GPP Release 15 establece unas bases sólidas para la definición del 5G NR que proporcionará una Banda Ancha Móvil mejorada. Estas nuevas características que ofrece 3GPP R15 son:

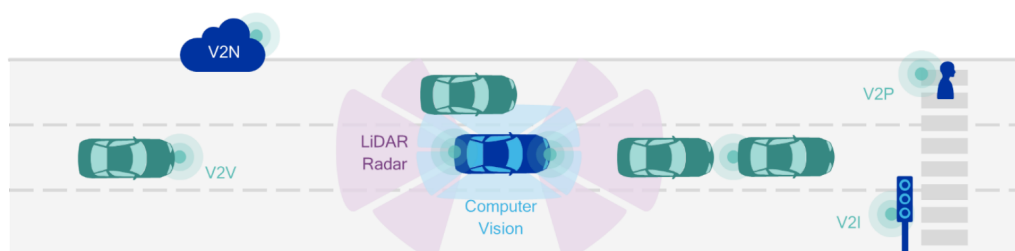
- Interfaz aérea escalable basada en OFDM que aborda eficientemente diversos espectros, despliegues y servicios. Esta característica ofrece altas velocidades de datos.
- Estructura de slots flexibles que se convierte en una característica clave para ofrecer comunicaciones baja latencia, URLLC y compatibilidad de reenvío.
- Codificación de canal avanzado que permite soportar eficientemente grandes bloques de datos y un canal de control confiable, con lo que aumenta la fiabilidad de las comunicaciones.
- MIMO masivo, que implica utilizar eficientemente un gran número de antenas para aumentar la cobertura/capacidad de cada usuario. En el 3GPP R14 LTE-V2X utiliza únicamente 2 antenas por dispositivo, pero puede que en 3GPP R16 el número de antenas sea superior.
- Ondas milimétricas (mmWave) que permiten ofrecer comunicaciones basadas en mayores velocidades de datos y ofrecen mejor capacidad del sistema.

Gracias a estas características, el nuevo 5G NR de C-V2X, en escenarios como el que se muestra en la Figura 3.3 es capaz de ofrecer al vehículo al vehículo autónomo las siguientes ventajas:

- Mejor percepción del entorno. En la actualidad los vehículo autónomos conocen su entorno gracias a las cámaras y sensores que tienen integrados. En cambio, si todos los vehículos fueran autónomos, éstos podrían intercambiar entre sí la información recogida de sus sensores a través de C-V2X con baja latencia y alto throughput.

### 3. Comunicaciones C-V2X

---



**Figura 3.3:** Vehículo autónomo con comunicaciones V2X (Fuente [5GAA 17])

- Planificación de rutas. La capacidad de intercambiar sus intenciones y trayectorias de manera más rápida, permite realizar maniobras de manera más segura y eficiente.
- Actualizaciones locales en tiempo real. Gracias C-V2X la infraestructura va a poder enviar en tiempo real mayor cantidad de información y con mayor periodicidad a los vehículos, como es necesario en el envío y actualización de mapas 3D en alta definición.
- Conducción coordinada. Por ejemplo, al pensar en aplicaciones como platooning se hace evidente la necesidad de intercambiar grandes volúmenes de información con muy baja latencia. Este intercambio de información en tiempo real permite que los vehículos autónomos conduzcan de manera más predecible y coordinada.

Por tanto, los requisitos a tener en cuenta en la especificación de las capas física y MAC del 3GPP R16 para el caso de uso de los coches autónomos son:

- Mayor throughput lo que requiere una frecuencia espectral alta para alcanzar tasas de transmisión de datos más altas.
- Menores latencias lo que requiere retardos de acceso inferiores a 1 ms para casos de uso críticos en el tiempo.
- Mayor fiabilidad lo que requiere el soporte de comunicaciones multicast y unicast con retro-alimentación eficiente.

- Velocidades de vehículos más altas lo que implica alcanzar tasas de transmisión más altas a velocidades relativas de hasta 500 km/h.
- Coexistencia armónica para que el Release 16 y el Release 14 puedan coexistir en el mismo canal/banda.
- Compatibilidad retrospectiva que permita que los vehículos que tengan implementado el Release 16 implementen también el Release 14 para aplicaciones de seguridad.

#### 3.2.1 5GAA

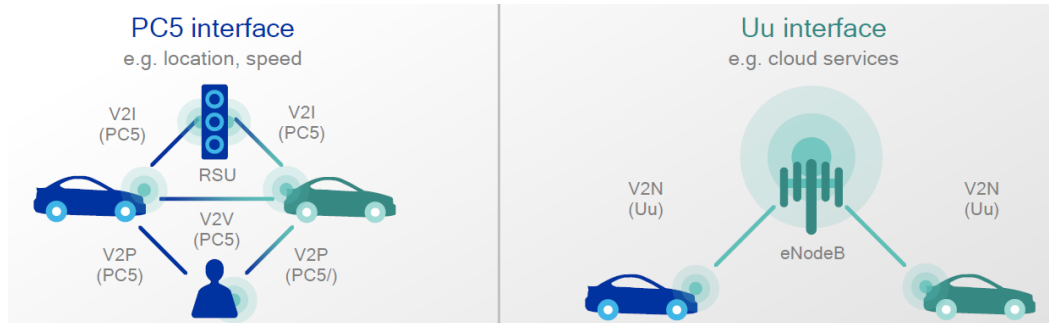
5G Automotive Association (5GAA) es una asociación global inter-industrial de vehículos conectados y autónomos que reúne a más de 50 empresas de los sectores de automoción y telecomunicaciones, incluyendo muchos fabricantes de automóviles de clase mundial. Su principal misión es desarrollar, probar y promover soluciones de comunicaciones, iniciar su estandarización y acelerar su disponibilidad comercial y su penetración en el mercado global para abordar las necesidades de movilidad y seguridad vial de la sociedad con aplicaciones como la conducción autónoma, el acceso ubicuo a los servicios y la integración en el transporte urbano inteligente. Esta asociación promueve principalmente la tecnología 5G como la solución para las comunicaciones V2X debido a las grandes ventajas que ésta ofrece frente a sus competidoras.

### 3.3 Modos de Servicio de V2X

Los sistemas C-ITS basados en LTE se benefician de la cobertura de las redes existentes y de la seguridad centralizada. Sin embargo, los nuevos casos de uso de los C-ITS son exigentes en términos de latencia y capacidad del sistema. Por lo tanto, la interfaz directa D2D, conocida como enlace sidelink (SL), y la interfaz radio de LTE han sido mejoradas en la Rel-14 para soportar estos requisitos.

De este modo, tal y como se observa en la Figure 3.4, el 3GPP Rel-14 define que los servicios V2X pueden prestarse a través de la interfaz PC5 y/o la interfaz Uu. El soporte de los servicios V2X a través de la interfaz PC5 es proporcionado

### 3. Comunicaciones C-V2X



**Figura 3.4:** Interfaces LTE para comunicaciones V2X (Fuente [Qualcomm 17b])

por la comunicación sidelink de V2X, que es un modo de comunicación mediante el cual los UEs se comunican entre sí directamente a través de la interfaz PC5 [3GPP 14]. Este modo de comunicación es compatible cuando la UE está servida por la estación base y cuando la UE está fuera de la cobertura de red. Sólo las UEs autorizadas para ser utilizadas en los servicios V2X pueden realizar la comunicación del enlace sidelink V2X.

#### 3.3.1 Servicio V2X a través del interfaz sidelink PC5

La UE que soporta la comunicación de enlace sidelink de V2X puede funcionar de dos modos en relación a la asignación de recursos:

1. Modo 3: asignación programada de recursos o asignación de recursos centralizada.
2. Modo 4: selección de recursos autónoma de la UE o asignación de recursos descentralizada.

Los modos 3 y 4 soportan comunicaciones directas V2V pero difieren en cómo se asignan los recursos de radio. Los recursos son asignados por la red celular en el modo 3. El modo 4 no requiere cobertura celular, y los vehículos seleccionan autónomamente sus recursos radio utilizando un esquema de programación distribuido apoyado por mecanismos de control de la congestión.

En la asignación programada de recursos, el UE necesita estar conectado a la red (RRC\_CONNECTED) para transmitir datos. En este caso, el UE solicita re-

### 3.3 Modos de Servicio de V2X

---

curso de transmisión al eNodeB y éste programa los recursos de transmisión para la transmisión de información y datos de control del enlace sidelink. Este tipo de asignación de recursos programada es compatible con la asignación de recursos semipersistente (SPS - Semi-Persistent Scheduling). Este tipo de asignación semipersistente es muy útil en redes vehiculares en las cuales los vehículos transmiten periódicamente sus mensajes CAM.

En la selección de recursos autónoma, los UEs son capaces de seleccionar por sí mismos los recursos a utilizar en la transmisión a partir de un conjunto de recursos establecido y seleccionar el formato de transporte para transmitir la información y los datos de control del enlace sidelink. Si se ha configurado la asignación de recursos de transmisión entre las zonas y los grupos para los enlaces sidelink V2X, el UE selecciona el grupo de recursos que tiene que utilizar para la transmisión a través del enlace sidelink V2X en función de la zona en la que se encuentra. Una vez conoce el grupo de recursos que tiene que utilizar, el UE realiza una detección para la selección de recursos sidelink. Basándose en los resultados de la detección, el UE selecciona algunos recursos específicos del enlace sidelink y reserva múltiples recursos para transmitir. El UE puede realizar hasta 2 procesos independientes paralelos de reserva de recursos.

Para ayudar al eNodeB a proporcionar recursos de sidelink, el UE en modo RRC\_CONNECTED podrá comunicar información geográfica sobre su localización al eNodeB. Es más, el eNodeB puede configurar el UE para que le envíe periódicamente la información completa sobre la ubicación geográfica a través del reporte de medidas de señalización existente.

Las zonas geográficas pueden ser configuradas por el eNodeB o preconfiguradas en el UE. Cuando las zonas están preconfiguradas, el área geográfica a la que dar cobertura es dividido en zonas geográficas utilizando un único punto de referencia fijo, es decir, coordenadas geográficas (0, 0), largo y ancho. El UE determina la identidad de la zona utilizando la longitud y la anchura de cada zona, el número de zonas en longitud, número de zonas en anchura y el único punto de referencia fijo. El largo y ancho de cada zona, el número de zonas en longitud y el número de zonas en anchura son proporcionados por el eNodeB cuando el UE está en cobertura y son preconfigurados cuando el UE está fuera de cobertura. La zona es configurable tanto en cobertura como fuera de cobertura.

### 3. Comunicaciones C-V2X

---

En caso de que el UE esté dentro de cobertura y decida realizar selección de recursos autónoma, el eNodeB puede proporcionar el mapeo entre las zonas y los grupos de recursos de transmisión de enlace sidelink V2X en la señalización de la RRC. Para los UEs que están fuera de cobertura, el mapeo entre las zonas y los grupos de recursos de transmisión de enlace sidelink V2X pueden preconfigurarse. Si se preconfigura un mapeo entre las zonas y el conjunto de recursos de transmisión de enlace sidelink V2X, el UE selecciona los recursos de transmisión del grupo de recursos correspondiente a la zona en la que se encuentra. Los grupos de recursos para la comunicación sidelink V2X no se configuran en función de la prioridad.

#### 3.3.2 Servicio V2X a través del interfaz radio Uu

Para la comunicación V2X a través del enlace ascendente Uu, el eNodeB puede configurar un máximo de 8 configuraciones SPS con diferentes parámetros y todas las configuraciones SPS pueden estar activas al mismo tiempo. La activación/desactivación de cada configuración SPS es señalada por eNodeB a través de PDCCH. Se utiliza la priorización de canales lógica existente para el enlace Uu. En este caso, para las comunicaciones V2X este enlace Uu establece un nivel de prioridad de 2.5 dentro de una escala que va de 0 a 9, en la que 0 es lo más prioritario y 9 lo menos prioritario, definiendo para este nivel de prioridad un retraso máximo de paquete de 50 ms y una tasa de error de  $10^{-2}$ .

El UE está autorizado para comunicar al eNodeB información cuando se produzca un cambio en la periodicidad estimada o en el desfase temporal de la llegada de los paquetes para que así el eNodeB pueda gestionar mejor las transmisiones SPS.

Aún soportando estas capacidades, esta interfaz radio Uu va a ser utilizada en servicios V2X para comunicaciones entre vehículos que estén muy distantes. Por ejemplo, cuando se produzca un accidente muy grave y sea necesario informar a vehículos que se encuentren a 1km o más de distancia del mismo para que tomen caminos alternativos y se eviten atascos y situaciones peligrosas.

## 3.4 Asignación programada de recursos radio

Una vez introducidos los modos de servicio que ofrece C-V2X, esta sección se va a centrar en presentar las posibilidades para la asignación de recursos radio en el Modo 3 en el cual es el eNodeB el encargado de realizar la asignación de recursos a través de la interfaz Uu del canal de control. Aunque esta asignación de recursos centralizada genere mayor overhead que el Modo 4, el Modo 3 ofrece la posibilidad de configurar asignación SPS para servicios periódicos que se producen en la transmisión de mensajes CAM en las redes vehiculares. Aún así, para controlar el overhead se necesitan nuevos métodos de asignación de recursos centralizados como el que se presenta en esta tesis.

La asignación de recursos radio juega un papel clave para mitigar la interferencia y optimizar la utilización de recursos para las comunicaciones vehiculares. Aunque generalmente se considera un problema de la capa MAC, existe una estrecha interacción con el diseño de la capa física [Ge 09].

Como se ha comentado a lo largo del documento, las comunicaciones D2D permiten la transmisión directa entre dispositivos en proximidad sin pasar por la estación base lo que permite transmitir mayor cantidad de información con un retardo mucho menor. Las comunicaciones D2D pueden realizarse:

- Dentro de banda: la comunicación celular y la comunicación D2D utilizan el mismo espectro licenciado al operador celular.
- Fuera de banda: la comunicación D2D utiliza espectro no licenciado (por ejemplo, la banda ISM libre de 2,4 GHz o la banda de 38 GHz de onda milimétrica) donde no se produce la comunicación celular. Ayuda a eliminar la interferencia entre D2D y los usuarios de teléfonos móviles, aunque la interferencia sigue estando presente en otros dispositivos electrónicos (como Bluetooth y WiFi) que operan en esta banda.

Las comunicaciones D2D dentro de banda pueden clasificarse a su vez en dos categorías:

- Underlay o Superposición donde los transmisores D2D acceden oportunamente a los recursos de tiempo-frecuencia, conocidos como Resource Block

### 3. Comunicaciones C-V2X

---

(RB), ocupados por los usuarios celulares. El esquema underlay conduce a un uso oportunista y, por lo tanto, más eficiente del espectro y más beneficioso para los operadores.

- Overlay o Subposición donde los transmisores celulares y D2D utilizan recursos ortogonales de tiempo-frecuencia (RBs). El esquema overlay es más fácil de implementar, pero menos eficiente.

La asignación de recursos es una cuestión crítica, especialmente en el modo dentro de banda, para crear y mantener enlaces directos entre pares D2D en una red celular y, así, mejorar la utilización del espectro y reducir la latencia de transmisión. A modo de ejemplo, en [Lin 14a] se propone una metodología de asignación de recursos simple donde el espectro se reparte de la siguiente manera:

- En las comunicaciones overlay el espectro disponible para los enlaces ascendentes (uplink) se divide en dos partes ortogonales con la fracción  $\eta$  asignada a la comunicación D2D y  $1 - \eta$  a la comunicación celular;
- En las comunicaciones underlay, el espectro se divide en bandas  $B$  y las UEs D2D pueden acceder de forma aleatoria e independiente a  $\beta B (\in [0, 1])$  de ellas. Los valores óptimos de  $\eta$  y  $\beta$  se calculan en función de unos objetivos de rendimiento.

Las comunicaciones D2D underlay pueden generar interferencias en la red celular existente si no se diseñan correctamente [Min 11]. Por lo tanto, la gestión de interferencias es uno de los problemas más críticos para las redes celulares D2D en las que coexisten las comunicaciones D2D y celulares en la red. Las soluciones más comunes para controlar la interferencia es restringir la potencia de transmisión de los enlaces D2D y la distancia entre los usuarios de la comunicación D2D [Phunchongharn 13].

Dentro de la extensa investigación llevada a cabo en el contexto de los sistemas tradicionales de D2D (por citar algunos artículos relevantes [Fodor 12] [Asadi 14] [Phunchongharn 13]), el trabajo presentado en [Feng 13] ofrece una excelente introducción al problema de la asignación de recursos radio (RRM - Radio Resource Management) underlay. En este trabajo, los autores proponen una solución RRM

### 3.4 Asignación programada de recursos radio

---

que realiza el control de admisión y la asignación de potencia para cada par admisible D2D y sus posibles socios UEs con el fin de maximizar el rendimiento del sistema al maximizar el SINR (Signal Interference Noise Ratio) de ambas comunicaciones. Una vez que obtienen todos los pares admisibles y sus correspondientes niveles de potencia, aplican un emparejamiento bipartito de peso máximo para definir los pares finales.

La mayoría de la literatura asume que el eNodeB es consciente de la información completa del estado instantáneo del canal (CSI - Channel State Information) de todos los enlaces celulares y D2D. Esto puede funcionar cuando los usuarios de D2D son estáticos o se mueven lentamente. Sin embargo, esta suposición es demasiado optimista para la comunicación V2V basada en D2D, donde los canales relacionados con el vehículo cambian rápidamente debido a la movilidad del vehículo [Zhao 13b]. Por lo tanto, los diseños tradicionales de asignación de recursos para comunicaciones D2D con CSI completo ya no son aplicables para comunicaciones V2V debido a la formidable sobrecarga de señalización para rastrear la variación del canal en una escala de tiempo tan corta.

Por lo tanto, la aplicación de técnicas D2D para apoyar las comunicaciones vehiculares exige un estudio más detallado de la gestión de los recursos radio que tenga en cuenta esta rápida variación del estado del canal. En esta línea, en [Cheng 15b] se realiza un análisis de viabilidad para evaluar la aplicabilidad de la asignación de recursos D2D underlay para el soporte de conexiones conjuntas V2V y V2I en redes celulares. Este estudio demuestra que las comunicaciones vehiculares asistidas por D2D underlay pueden superar el modo V2V-only tradicional, el modo V2I-only o el modo V2V overlay en términos de velocidades de transmisión alcanzables. Sin embargo, sólo unos pocos estudios han aplicado esta posibilidad de modo underlay a entornos vehiculares, entre ellos [Cheng 15b] [Khelil 14b] [Botsov 14] [Xing 14a] [Ren 15] [Sun 16].

En [Botsov 14] resuelven el problema de interferencia originado por la ganancia de reutilización dividiendo el área de cobertura celular en zonas y asignando un conjunto de recursos (RBs) a cada zona. Con este enfoque, garantizan un nivel de interferencia máximo aceptable causado por C-UE en la comunicación underlay Vehicle-to-Vehicle (V2V). Sin embargo, adolece de falta de escalabilidad, no tiene

### 3. Comunicaciones C-V2X

---

en cuenta los requisitos de calidad de servicio de las aplicaciones y su rendimiento depende totalmente de la definición de la zona y de la asignación de RBs asociada.

En cambio, en [Xing 14a] en lugar de dividir el área de cobertura en zonas y asignar un conjunto de RBs, los autores agrupan los vehículos de carretera en múltiples clusters. En su enfoque, cada RB del enlace ascendente puede asignarse a un solo grupo de vehículos, es decir, el número de recursos que son reutilizados por los vehículos es de hecho igual a la cantidad de grupos. Como resultado, logran su objetivo principal, que era minimizar el consumo de recursos de radio celular, pero su enfoque no satisface los requisitos de calidad de servicio para el despliegue de aplicaciones para sistemas inteligentes de transporte.

Además, en la asignación de recursos radio en sistemas tradicionales D2D, los objetivos principales son [Phunchongharn 13][Zulhasnine 10]:

1. Maximizar el throughput total de la red
2. Priorizar los enlaces celulares frente a las comunicaciones D2D

Sin embargo, en entornos vehiculares la mayoría de los mensajes son relativamente pequeños y tienen requisitos muy estrictos en términos de latencia y fiabilidad ya que se trata de mensajes para incrementar la seguridad en las carreteras. Por lo tanto, los objetivos mencionados anteriormente no son lo que se deben alcanzar en el despliegue de aplicaciones de seguridad para C-ITS. En consecuencia, es necesario definir unos objetivos distintos para la asignación de recursos en las comunicaciones V2V, como se plantea en [Ren 15] [Sun 16].

[Sun 16] propone un método analítico para transformar los requisitos de latencia y fiabilidad de las aplicaciones de seguridad V2V en limitaciones de optimización. Sin embargo, esta propuesta únicamente tiene en cuenta la transmisión de mensajes de seguridad, pero no propone cómo actuar para el resto de aplicaciones de C-ITS que tiene requisitos de servicio distintos. En cambio, en [Ren 15] se estudia el control de potencia de la asignación de recursos desde dos problemáticas diferentes: 1) para aplicaciones de eficiencia, gestión y entretenimiento el objetivo es maximizar la tasa de transferencia del conjunto de enlaces de la red y 2) el para las aplicaciones de seguridad el objetivo propuesto es maximizar la tasa mínima alcanzable entre todos los enlaces de la red correspondientes. Este artículo tiene

### 3.4 Asignación programada de recursos radio

---

otro punto a favor, y es que establecen que los vehículos espontáneamente se agruparán en clusters mientras circulan a lo largo de la carretera, pero no relacionan la metodología de asignación de recursos radio con estos clusters, lo que permitiría reutilizar recursos de una manera más eficiente.

Una vez definidos los objetivos de optimización, las metodologías tienen que descifrar el problema de asignación de recursos conocido como Resource Block Assignment Problem (RBAP). A lo largo de la historia, podría decirse que el método más utilizado para resolver el RBAP es el Hungarian Algorithm (HA) [Kuhn 55]. El HA es un algoritmo de optimización combinatoria originalmente diseñado para abordar problemas de asignación en un tiempo polinómico. En este sentido, es interesante señalar que el HA es un algoritmo determinista. Este método se ha aplicado a problemas de RBAP en trabajos como [Feng 13], [Sun 16] o [Sun 14]. Además, el HA se ha aplicado en otros campos como el transporte [Almoustafa 13] o la economía [Dütting 13]. Además del HA, se han propuesto otras alternativas en la literatura para resolver problemas similares a los del RBAP. En [Xing 14b], por ejemplo, se presentan dos métodos diferentes, el primero basado en programación dinámica, y el segundo consistente en un algoritmo codicioso. Por otro lado, en [Kaufman 13], se desarrolla un protocolo de espectro dinámico distribuido.

Aunque, como puede verse en la literatura, el HA es el algoritmo más utilizado para resolver RBAP, este método presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, el HA sigue un enfoque exacto con una alta complejidad para grandes escenarios. Además de eso, como se ha mencionado antes, el HA es un método determinista. Esto no es una desventaja por sí mismo, pero como se demuestra a continuación, la presencia de cierta aleatoriedad conduce a soluciones de mayor calidad. Existen muchos algoritmos en la comunidad científica que basan su ejecución en la aplicación de algún tipo de aleatoriedad. Podría decirse que la heurística y la metaheurística [Glover 06] son los métodos más utilizados y conocidos que pueden clasificarse en este grupo.

Una metaheurística es una técnica de optimización que resuelve un problema específico utilizando únicamente información general y conocimientos comunes a una amplia variedad de problemas de optimización con características similares. Además, la metaheurística explora el espacio de solución para lograr buenos resultados de optimización con independencia del problema. En este sentido, las

### 3. Comunicaciones C-V2X

---

ventajas de utilizar una metaheurística son su adaptabilidad y su fácil implementación. Además, la metaheurística es una técnica flexible y ha demostrado su eficacia en una amplia gama de campos [BoussaiD 13].

#### 3.5 Resumen y conclusiones del estado del arte

Las comunicaciones V2X son una tecnología revolucionaria capaz de transformar la industria del automóvil en el futuro. Esta tecnología permite la comunicación entre los vehículos (V2V), la infraestructura (V2I), otros dispositivos próximos (V2P) y la red (V2N). Este tipo de comunicaciones permiten mejorar la seguridad en las carreteras, la gestión del tráfico y la experiencia de viaje de los pasajeros.

Estas comunicaciones están siendo reguladas en Europa por el ETSI donde se conoce la tecnología como C-ITS y en Estados Unidos por el FCC donde denominan a la tecnología WAVE. Ambas tecnologías definen una pila de protocolos muy similar. Sin embargo, el problema llega en la capa de acceso donde hay más de una tecnología que permite el despliegue de estas tecnologías: ITS-G5/DSRC y C-V2X.

Después del análisis de ambas tecnologías y la comparativa realizada en el Capítulo 2, se puede concluir que C-V2X ofrece todas las funcionalidades ofrecidas por IEEE 802.11p, y además es capaz de ofrecer latencias más bajas mejorando así el tiempo de reacción del conductor y ofrece throughputs más altos posibilitando el despliegue de múltiples aplicaciones de infotainment.

Así, el capítulo 3 se dedica a realizar un estudio del estado del arte de las comunicaciones C-V2X. Este profundo análisis permite concluir que no existe ninguna solución para la asignación de recursos radio en redes celulares en las que coexistan usuarios celulares comunes y vehículos que:

- aproveche la ganancia de compartición de recursos que ofrecen las comunicaciones V2V underlay,
- organice los vehículos en clusters y aproveche esta organización para aplicar SPS en las comunicaciones V2V
- resuelva el problema RBAP a través de una metaheurística para reducir la complejidad del algoritmo

### **3.5 Resumen y conclusiones del estado del arte**

---

Como consecuencia, la solución propuesta en el capítulo 4 de esta tesis se centra en definir una metodología de asignación de recursos radioeléctricos que cumpla estos tres objetivos.



*El valor de las cosas no  
está en el tiempo que duran,  
sino en la intensidad con que  
suceden.*

Fernando Pessoa

# 4

## Explicación de la Metodología

Una vez contextualizada la problemática existente para el despliegue de las redes vehiculares a través de tecnologías celulares, en este capítulo se procederá a presentar el escenario al que este trabajo quiere dar solución, definir matemáticamente el problema concreto a resolver y describir la metodología que resuelve este problema con el fin de validar la hipótesis previamente planteada. De un modo general, se puede decir que la aportación principal de esta tesis es una nueva metodología para la asignación eficiente de recursos radio en redes celulares en las que coexisten usuarios celulares comunes, que denominaremos a partir de ahora C-UEs, y vehículos, designados a partir de este momento V-UEs. Debido a su interés científico y social (descrito en la Sección 1.3), en este trabajo doctoral se hará especial hincapié en la aplicación de esta técnica novel para el despliegue de distintos tipos de aplicaciones C-ITS y sus diferentes requisitos de calidad de servicio.

Por lo tanto, en este capítulo se dará protagonismo a la descripción de la metodología presentada en esta tesis. En un primer momento se presentará en la Sección 4.1 el escenario para el cual se ha diseñado la metodología propuesta. A continua-

## 4. Explicación de la Metodología

---

ción, en la Sección 4.2 se procederá a describir matemáticamente el problema a resolver, para proceder en la Sección 4.3 a describir de manera detallada las tres fases de la metodología propuesta que dan solución al problema y posibilitan la validación de la hipótesis de esta tesis. Al mismo tiempo, a fin de encuadrar la metodología presentada en la literatura actual, en la sección 4.4 se introducirán las principales aportaciones y contribuciones del modelo propuesto, y se mencionarán las originalidades y similitudes con las principales técnicas existentes.

### 4.1 Descripción del escenario

En esta sección se describe el escenario existente a la hora de desplegar aplicaciones de C-ITS en una red celular en la cual coexisten múltiples tipos de usuarios. Como se ha comentado previamente, el objetivo principal de esta tesis es diseñar una metodología que permita asignar recursos radio de manera espectralmente eficiente a los diversos tipos de usuarios, en este caso V-UEs y C-UEs, cumpliendo los requisitos de calidad de servicio que solicitan los mismos en cada momento en función de la aplicación o información a transmitir.

Para ello, el propósito de esta metodología se centra en ofrecer un Radio Resource Management (RRM) eficiente a través de la compartición de recursos entre las  $M$  comunicaciones V2V y las  $N$  comunicaciones celulares de los C-UEs que coexisten en el escenario. En este contexto, los V-UEs y los C-UEs comparten los recursos disponibles del enlace uplink y únicamente los V-UEs utilizan las comunicaciones Device-to-Device (D2D), las cuales en este escenario serán denominadas comunicaciones V2V.

Se ha decidido reutilizar únicamente los recursos del enlace uplink ya que, cuando se reasignan los recursos downlink, la transmisión de un V-UE puede causar alta interferencia co-canal en los C-UEs que estén recibiendo tráfico downlink. Sin embargo, reutilizando los recursos uplink la interferencia generada por la transmisión V2V afecta exclusivamente a la estación base, que generalmente se localiza lejos de los usuarios, C-UEs y V-UEs, y además, se asume que dispone de capacidades avanzadas de procesamiento de señal para mitigar las interferencias. Al mismo tiempo, la interferencia sufrida por las comunicaciones V2V puede ser gestionada a través de separación espacial.

Asimismo, hay otras buenas razones que favorecen la reutilización de los recursos uplink:

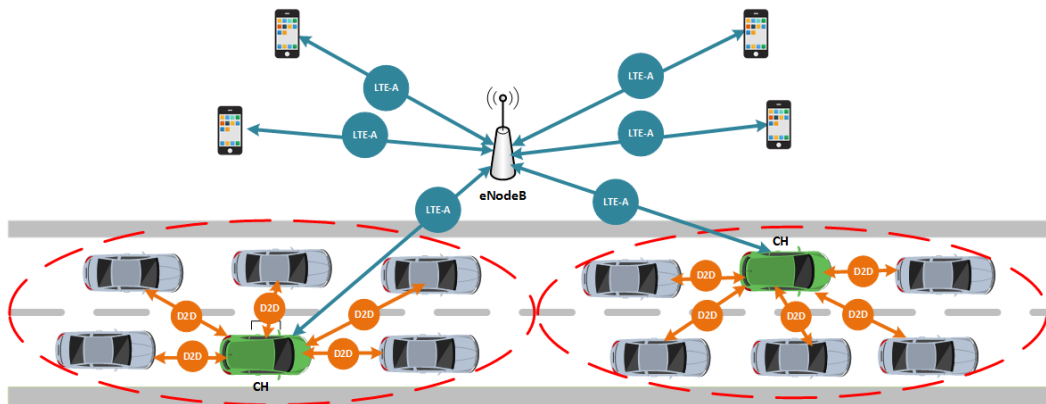
- En las comunicaciones celulares comunes los recursos uplink habitualmente están menos utilizados que los recursos downlink, por lo que compartir esos recursos uplink con las comunicaciones V2V puede mejorar el uso del espectro radioeléctrico.
- En el canal downlink siempre existen ciertas transmisiones de señalización, tales como señales de control o sincronización. Por lo tanto, para minimizar el impacto de las comunicaciones V2V en el rendimiento del canal downlink, sería necesario un cambio de diseño del mismo.
- En esquemas FDD (Frequency Division Duplexing), si se reutilizan recursos uplink los usuarios tienen que ser capaces de recibir a través del canal uplink, mientras que si se reusan los recursos downlink, los usuarios tienen que ser capaces de transmitir en el downlink. Junto a los problemas regulatorios, la segunda opción es más complicada de implementar ya que el diseño hardware implica unos requisitos de transmisión de señal RF más estrictos [Lin 14b].

Así, tras decidir utilizar un RRM con filosofía underlay para las comunicaciones V2V donde se reutilizan los recursos uplink, el escenario para el cual se va a implementar la nueva metodología, es el que se presenta en la Figura 4.1, el cual se puede descomponer en tres componentes principales: usuarios, arquitectura de red y entorno. Estos elementos que se presentan en detalle en los siguientes apartados.

### 4.1.1 Tipos de usuarios en el escenario propuesto

Los usuarios del sistema se mueven por el entorno y tienen acceso a los recursos que ofrece la infraestructura de red, también conocidos como Resource Blocks (RBs). Un RB es la unidad de recurso más pequeña que puede ser asignada a un usuario. Los usuarios emplean estos RBs para transmitir sus mensajes a otros usuarios pero, dependiendo del tipo de usuario y del tipo de mensaje que quieran transmitir, utilizan un enlace directo con la infraestructura o bien transmiten su mensaje a través de una comunicación V2V.

## 4. Explicación de la Metodología



**Figura 4.1:** Visión general del escenario

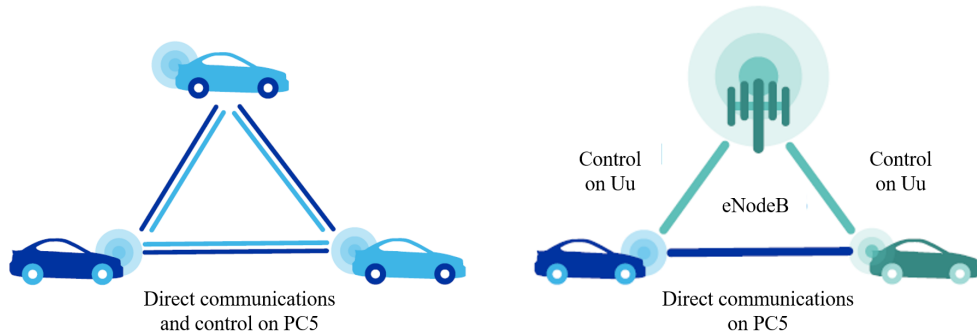
Así, como se observa en la Figura 4.1, los usuarios del sistema se dividen a su vez en usuarios celulares comunes, C-UEs, y usuarios vehiculares, V-UEs. Los C-UEs son usuarios celulares regulares, que utilizan la red celular para intercambiar información con otros usuarios, habitualmente lejanos. Por ejemplo, los C-UEs utilizan su canal uplink para enviar un correo electrónico, una fotografía, un vídeo o realizar una llamada de voz sobre IP. Por lo tanto, estos usuarios solicitan disponer de la capacidad de transmisión más alta posible en su canal uplink como requisito de calidad de servicio.

Por otro lado, están los usuarios V-UEs los cuales se organizan en clústeres. El clustering es una técnica que agrupa usuarios ubicados en un área geográfica cercana para conseguir una red más robusta y escalable. Por este motivo, es una metodología muy empleada en redes Vehicular Ad Hoc Network (VANET) para el despliegue de aplicaciones de C-ITS. En la mayoría de los casos, estos clústeres son definidos en base a características comunes, como por ejemplo el movimiento de los vehículos, la velocidad, la dirección o el área de cobertura, entre otros [Hernandez-Jayo 14] [Mammu 15].

La organización de redes puede basarse principalmente en dos tipos.

1. Organización descentralizada, en la que los vehículos se organizan de manera autónoma, sin utilizar ninguna infraestructura externa, únicamente a través de la información de los mensajes que intercambian entre ellos.

2. Organización centralizada, en la que la organización de la red se delega en una infraestructura fija, como por ejemplo la estación base.



**Figura 4.2:** Tipos de organización en redes vehiculares (Fuente [Qualcomm 17a])

Típicamente, en el caso de las redes vehiculares, las obras existentes en la literatura utilizan una organización descentralizada [o. Cherif 09][Gorrieri 16]. Sin embargo, las redes vehiculares a menudo coexisten con una infraestructura fija, como ocurre en el caso del sistema presentado en la Figura 4.1, en el cual la estación base dispone de una visión global de su área de cobertura y, por tanto, puede ofrecer una mejor gestión de los vehículos y ser la encargada de su agrupación en clústeres. Al mismo tiempo, en un entorno altamente dinámico como es el caso de las redes vehiculares en las que los nodos cambian de posición constantemente, un clustering descentralizado no es muy apropiado, ya que genera una gran cantidad de sobrecarga de mensajes en la red.

Por tanto, debido a que la creación de los clústeres queda fuera del alcance de esta tesis doctoral, en el sistema propuesto en este trabajo se ha definido un simple algoritmo de clustering centralizado que se ejecuta en la estación base. Este algoritmo (Algoritmo 1) organiza la red en clústeres basándose en quiénes son los vehículos más *famosos*, o dicho de otra manera, los vehículos con más vehículos vecinos a su alrededor. Para ello, este algoritmo se alimenta de la información que dispone la estación base acerca de la posición de los vehículos que se encuentran dentro de su área de cobertura.

#### 4. Explicación de la Metodología

---

**Algoritmo 1:** Clustering algorithm.

```
Data:  $V_t, radio$   
Result:  $Clu_t$   
1  $distancias = \text{calculoDistanciasEntreVehiculos}(V_t);$   
2  $vecinos = \text{calculoVecinos}(V_t, distancias, radio);$   
3  $popularidad = \text{recuentoNumeroDeVecinos}(distancias);$   
4 while haya vehículos sin agrupar do  
5    $ch = \text{obtenerVehiculoMasFamoso}(popularidad);$   
6    $Clu_t \leftarrow ch, vecinos(ch);$   
7    $V_t = \text{borradoDeVehiculos}(ch, vecinos(ch), V_t);$   
8    $popularidad = \text{borradoDePopularidad}(ch, vecinos(ch), popularidad);$   
9 end  
10 Return  $Clu_t;$ 
```

Así, al disponer de las posiciones de los vehículos, tal y como se presenta en Algoritmo 1, en primer lugar, se calculan las distancias entre los mismos. Al conocer el radio de cobertura de las comunicaciones de los vehículos, el algoritmo es capaz de determinar cuántos vecinos tiene cada vehículo, definiendo vecino como el vehículo que está dentro del área de cobertura de otro vehículo. Se obtiene así una lista con el número de vecinos que tiene cada vehículo, a partir de la cual, se obtiene el vehículo con el mayor número de vecinos y se selecciona éste como Cluster Head (CH) y a sus vecinos como Cluster Members (CMs). A continuación, se eliminan tanto el CH como los CMs de la lista de vehículos que quedan por organizar y de la lista de vehículos populares y, a continuación, se vuelve a repetir el mismo proceso hasta que todos los vehículos estén dentro de un clúster. Cuando no queden más vehículos por agrupar, el proceso de clustering finaliza y se informa a los vehículos de la solución obtenida a través un mensaje de broadcast transmitido a través de la infraestructura. El diseño de esta técnica de clustering está basada en las mismas bases que la metodología propuesta en [d'Orey 15], con la intención de cubrir el máximo área geográfica con el mínimo número de clústeres para así reducir la sobrecarga de mensajes generada en la red.

## 4.1 Descripción del escenario

---

Dentro de cada clúster, el CH es el responsable de actualizar la información de sus CMs en la infraestructura. Para ello, el CH se encarga de almacenar todos los mensajes Cooperative Awareness Message (CAM) que recibe de sus CMs, agregarlos y, periódicamente, enviarlos a la infraestructura. Además de esto, la novedad que aporta el uso de clústeres en esta tesis, es que el CH es el encargado de solicitar los recursos radioeléctricos para todos CMs a la infraestructura y, también, de asignar estos RBs a los vehículos una vez que la infraestructura se los concede. Esto es, los CMs cuando quieren solicitar RBs para transmitir su información, en lugar de pedir recursos directamente a la estación base, o eNodeB, se los solicitan a su CH. De este modo, el CH estima cuántos recursos necesita su clúster y se los solicita a la infraestructura. Esto permite reducir el número de conexiones con la estación base, y, por tanto, la sobrecarga generada por las mismas. Por otro lado, eso hace que la infraestructura a la hora de asignar recursos conciba al clúster como un único usuario, de modo que reduce la complejidad de los cálculos de interferencia a la hora de asignar recursos compartidos.

Formalmente, el conjunto de C-UEs, V-UEs y clústeres en el escenario en el intervalo de tiempo  $t$  se puede definir como  $C_t := \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ,  $V_t := \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  y  $CLU_t := \{clu_1, clu_2, \dots, clu_j\}$ , respectivamente. Durante el periodo de observación o simulación, usuarios adicionales pueden unirse o dejar el escenario, debido a sus rutas, hecho que hace variar la densidad de V-UEs y C-UEs a lo largo del tiempo y el espacio. Esto hace que sea necesario redefinir los clústeres cada cierto tiempo. Además, todos estos usuarios solicitan recursos, de modo que se define  $RB_t := \{rb_1, rb_2, \dots, rb_k\}$  como el conjunto de RBs ortogonales del enlace uplink que pueden ser asignados en un *frame*, considerando *frame* como la estructura periódica que permite la transmisión de datos. Además, este conjunto  $RB_t$  se divide en distintos grupos de RBs,  $RP_t := \{rp_1, rp_2, \dots, rp_k\}$ , donde cada  $rp_x$  está formado por un número variable de RBs dependiendo de las necesidades de transmisión de los usuarios, las cuales dependerán de la calidad de servicio a satisfacer.

En resumen, cada CH en función de las necesidades de transmisión de sus CMs, solicita un  $rp_x$  a la estación base y cuando lo recibe reparte los distintos RBs del  $rp_x$  asignado entre sus CMs.

## 4. Explicación de la Metodología

---

### 4.1.2 La arquitectura de red

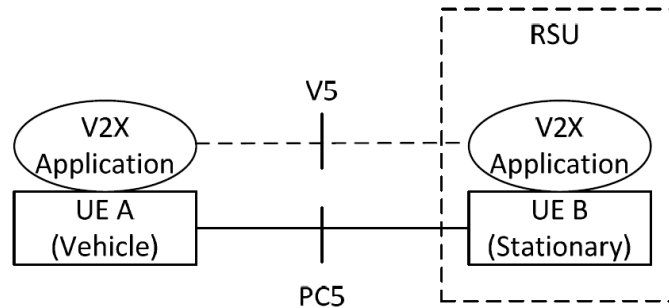
La arquitectura de red está formada, principalmente, por la infraestructura de la red celular y un servidor que permite el despliegue de las aplicaciones de C-ITS. Este servidor, denominado Servidor Vehicle-to-Everything (V2X), es donde se gestiona toda la información referente al estado de las carreteras y los vehículos, y donde, además, se ejecuta el algoritmo de clustering presentado en el Apartado 4.1.1. La definición de la infraestructura de red celular se basa en el estándar LTE Release 14 [3GPP 17].

En las especificaciones existentes de C-ITS los equipos de infraestructura de red que soportan las aplicaciones V2X e intercambian mensajes V2X con otras entidades, son conocidas como Road Side Units (RSUs). El 3GPP ha introducido este término de RSU para facilitar la lectura de sus documentos a la industria ITS, definiéndolo como una entidad lógica que combina la lógica de las aplicaciones V2X con las funcionalidades de un eNodeB o un UE en función de en qué equipo se implemente la RSU [3GPP 17]. La Figura 4.3a muestra la arquitectura existente cuando la RSU es implementada en un UE, donde ésta se comunica con los V-UEs a través del interfaz SideLink (PC5), ya que combina las funcionalidades del UE con la lógica del servidor V2X. En cambio, si la RSU es implementada en el eNodeB, como muestra la Figura 4.3b, la comunicación entre RSU y V-UEs se realiza a través del interfaz radio LTE-Uu, ya que en este caso, la RSU se compone del eNodeB, el Local Gateway (L-GW) que es el encargado de asignar localmente direcciones IP a los usuarios, y el servidor de aplicaciones V2X.

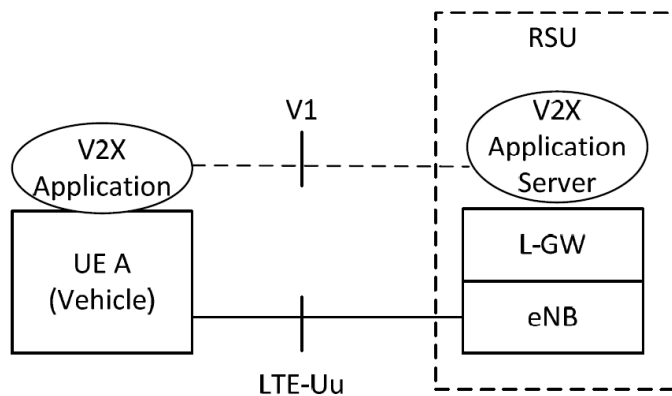
En consonancia con haber elegido una metodología de clustering centralizada, en esta tesis se ha seleccionado implementar la RSU en el eNodeB. De este modo, también disponemos del servidor V2X en la entidad lógica del RSU. Esto hace que los mensajes V2X generados por los vehículos y enviados a la red, o los generados por el servidor V2X y enviados a los vehículos, sean transparentes para el eNodeB.

Una de las funcionalidades que debe desplegar el servidor V2X es ser capaz de enviar información a un área concreta a través de envío Unicast o envío Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS), ya que por ejemplo, en aplicaciones de seguridad es necesario informar a las zonas interesadas sobre incidentes en la carretera. Esto provoca que la arquitectura de red propuesta en este documento disponga

## 4.1 Descripción del escenario



(a) RSU implementada en UE



(b) RSU implementada en eNodeB

**Figura 4.3:** Modos de implementación de RSU en red celular (Fuente [3GPP 17])

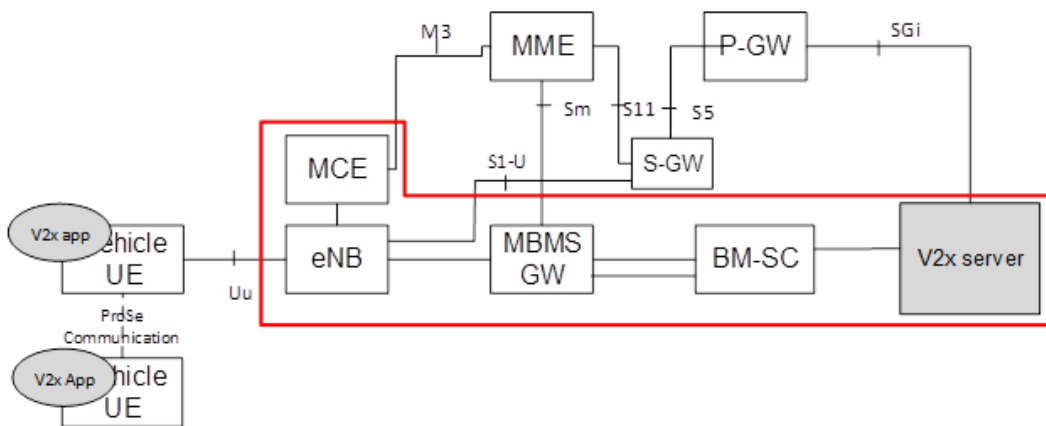
de los elementos de red que permiten implementar las transmisiones MBMS que son:

- Multi-cell/multicast Coordination Entity (MCE) definido como un nodo lógico que se encarga de la coordinación de recursos radioeléctricos y parámetros de transmisión entre las celdas de un área Multicast-Broadcast Single-Frequency Network (MBSFN).
- Broadcast Multicast Service Center (BM-SC) definido como el responsable de la autorización y autenticación de los proveedores de contenido, el cobro y la configuración general del flujo de datos a través de la red central.
- MBMS-GW que es un nodo lógico que maneja la multidifusión de paquetes IP desde el BM-SC a todos los eNodeBs involucrados en la transmisión en el

## 4. Explicación de la Metodología

área MBSFN. También maneja la señalización del control de sesión a través del Mobility Management Entity (MME).

En el sistema MBMS actual, el BM-SC, MBMS-GW y MME se encuentran en el núcleo de la red. Por tanto, el retardo de backhaul entre el BM-SC y el eNodeB no es despreciable cuando se calcula el retardo de extremo a extremo, especialmente cuando se utilizan las transmisiones MBMS para enviar mensajes de C-ITS desde el servidor V2X a los vehículos de la red. Así, para minimizar la latencia extremo a extremo, en esta tesis se deciden acercar los nodos MBMS al eNodeB tal y como se observa en la Figura 4.4. Esta opción parece especialmente apropiada en conjunción con una arquitectura distribuida MCE, es decir, en caso de que el eNodeB de alojamiento también incluya su propio MCE. Así, como se muestra en la Figura 4.4, todas las interfaces son internas, por lo que la latencia en las transmisiones dentro del V2X son mínimas.



**Figura 4.4:** Arquitectura de red celular para implementar comunicaciones V2X(Fuente [3GPP 06]).

Simultáneamente, al estar también el Packet-Data Network Gateway (P-GW) cerca del eNodeB, el retardo de backhaul puede reducirse significativamente, siendo beneficioso para cumplir mejor los estrictos requisitos de latencia de los servicios V2X. Asimismo, esto permite una gestión local del tráfico V2X en lugar de tener que atravesar el Evolved Packet Core (EPC). Esta característica simplifica el despliegue de aplicaciones de C-ITS ya que normalmente la mayoría de los mensa-

## 4.1 Descripción del escenario

jes V2X tienen impacto únicamente en zonas cercanas, como puede ser el área de cobertura de su eNodeB.

### 4.1.3 El entorno de aplicación

El entorno del escenario está definido por el espacio por el que circulan los V-UEs y los C-UEs. Siguiendo el informe técnico [3GPP 06], existen dos tipos de espacios: urbanos y autopistas. A continuación, en la Tabla 4.1 se muestran las principales características de los mismos.

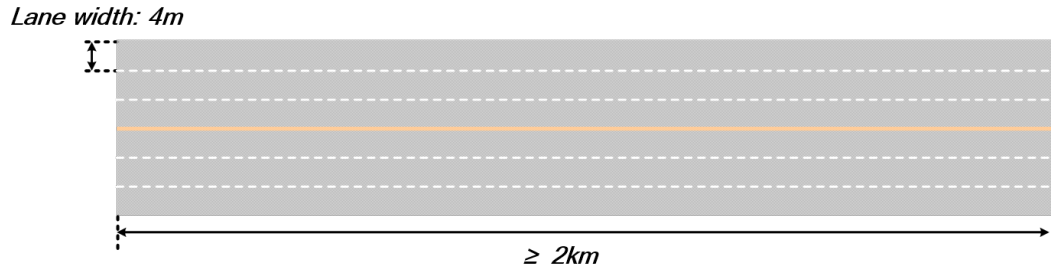
Parámetros	Caso Urbano	Caso Autopista
Número de carriles	2 en cada dirección (4 carriles en total en cada calle)	3 en cada dirección (6 carriles en total en la autopista)
Ancho de carril	3.5 m	4 m
Tamaño de la red vial	433 m * 250 m	N/A
Tamaño área de simulación	Mínimo [1299 m * 750 m]	Longitud autopista $\geq$ 2000 m.
Velocidad absoluta de los vehículos	15 km/h, 60 km/h	140 km/h, 70 km/h

**Tabla 4.1:** Entornos de simulación y patrones de movimiento

Comúnmente, la agrupación de los vehículos en clústeres es más utilizada en la literatura en casos de autopista ya que en este tipo de entornos, debido a la similitud de las rutas de los vehículos, los clústeres tienden a ser más estables. Por tanto, para validar la hipótesis de esta tesis se ha seleccionado estudiar el caso de autopista, donde los vehículos circulan por los 6 carriles y los C-UEs se pueden encontrar dentro de los vehículos o en cualquier otro punto dentro del área de cobertura del eNodeB, tal y como muestra la Figura 4.5. El análisis del funcionamiento de la metodología RRM diseñada en el caso urbano será una línea futura de trabajo de esta tesis, como se presentará en Sección 6.

## 4. Explicación de la Metodología

---



**Figura 4.5:** Entorno de simulación (Fuente [3GPP 06]).

Durante el período de observación o simulación, usuarios adicionales pueden unirse o salir del escenario en función de sus rutas, por lo que pueden variar las densidades de V-UEs y C-UEs a lo largo del tiempo y el espacio. Además, las propiedades del escenario afectan a la movilidad de los usuarios y a la fiabilidad de las comunicaciones.

Así, por el hecho de haber seleccionado el escenario de autopista, y ser éste un espacio en el que no existen múltiples edificios, podemos asumir que las comunicaciones entre los usuarios son de visión directa (Line of Sight (LOS)). Por tanto, siguiendo lo establecido en el informe técnico [3GPP 03], y siendo nuestro entorno una micro-celda, ya que el radio de cobertura que cubre la estación base es de menos de 2 km, las pérdidas de propagación en el entorno medidas en  $dB$  quedan definidas por 4.1.3.

$$\text{Pathloss} = 22,0 * \log_{10}(d) + 28,0 + 20 * \log_{10}(f_c) \quad (4.1)$$

siendo  $d$  la distancia en metros entre transmisor y receptor y  $f_c$  la frecuencia central de transmisión en  $GHz$ .

### 4.2 Formulación del problema

Tras presentar el escenario, este apartado se centra en introducir la problemática existente en el mismo a la hora de desplegar aplicaciones de C-ITS. Como ya se ha comentado, esta tesis tiene como objetivo ofrecer una solución eficiente para la asignación de recursos radio en una red celular subyacente donde las comunicaciones de los vehículos V-UEs coexisten con las comunicaciones celulares de usuarios comunes C-UEs. Se otorga la característica de eficiente, porque el objetivo es mejorar la eficiencia espectral de la red celular maximizando el número de usuarios servidos con el mínimo número de recursos radio.

Esta solución sigue un doble objetivo: en primer lugar, mitigar la interferencia entre las comunicaciones de los C-UEs y los V-UEs y, en segundo lugar, mejorar la calidad de servicio global percibida por el usuario. Para ello, es necesario tener en cuenta los requisitos de los distintos tipos de aplicaciones de C-ITS, ya que sus diferencias generan situaciones diversas en el momento de asignar recursos radio.

En la norma IEEE 802.11p/1609 [Jiang 08], los canales disponibles se dividen en canales de control y canales de servicio para aplicaciones de seguridad e infotainment, respectivamente. En términos generales, las aplicaciones de infotainment, como por ejemplo, el uso compartido de archivos[Karagiannis 11], vídeo bajo demanda (VoD)[Xu 13] y difusión de contenidos [Luan 14], suelen requerir una gran capacidad de transmisión o throughput. Sin embargo, las aplicaciones de seguridad, como por ejemplo, la alerta de emergencia y el intercambio de mensajes CAM, suelen exigir una mayor fiabilidad de la comunicación, sin dar tanta importancia al throughput, ya que el tamaño de sus mensajes suele ser pequeño. Así, las redes vehiculares basadas en tecnología IEEE 802.11p utilizan distintos canales para servir a estos dos tipos de aplicaciones, mientras que en las redes vehiculares basadas en tecnología celular todas las aplicaciones funcionan sobre el canal de servicio. De este modo, no es necesario modificar los canales de control previamente estandarizados, y además, ofrece una solución escalable a futuras tecnologías celulares, como 5G, ya que los mensajes V2X son transparentes para el eNodeB.

La manera de ofrecer solución a estos distintos tipos de servicio es gestionar la interferencia mutua generada entre la comunicación del C-UE con la comunica-

## 4. Explicación de la Metodología

---

ción V2V de los V-UEs es a través de la asignación de potencias de transmisión. Por tanto, de la misma manera que en [Ren 15], en esta tesis se analizan las dos posibles formas de servicio que se encuentran al asignar a los usuarios recursos radio compartidos en función del tipo de mensaje que deseen transmitir. Se definen, por tanto, dos modos de control de potencias (PC - Power Control) que son:

1. Sum-rate-oriented Power Control (SPC) cuando el V-UE solicita recursos para transmitir mensajes de infotainment, y por tanto, el objetivo es maximizar el throughput total de ambas comunicaciones.
2. Minimum-rate-oriented Power Control (MPC) cuando el V-UE necesita recursos para transmitir mensajes de seguridad o mensajes CAM. En este caso, el objetivo es maximizar el throughput del C-UE y minimizar el del V-UE, pero siempre cumpliendo con los requisitos mínimos de calidad de servicio.

En resumen, en cada intervalo de tiempo  $t$ , en el escenario hay  $N$  C-UEs y  $M$  V-UEs que solicitan  $RBs$  para transmitir sus mensajes. Los V-UEs solicitan los recursos a su CH. Éste es el encargado de solicitar los recursos para todo el clúster al eNodeB y de repartirlos entre sus CMs una vez le son asignados. Los C-UEs solicitan recursos directamente al eNodeB. El número de  $RBs$  que puede asignar el eNodeB en cada frame es fijo y limitado, por lo que es necesario tratar de dar servicio al mayor número de usuarios con el mínimo número de  $RBs$ . Además, el eNodeB debe tener en cuenta los requisitos de QoS de los usuarios, teniendo que proporcionar dos tipos de servicios: SPC y MPC. Para dar solución a la asignación de recursos desde el eNodeB se propone la metodología que se define en esta tesis y que se ha denominado RODEO (**R**rm **f**Or **u**n**D**erlay **v**Ehicle **c**Ommunications), la cual se explica en detalle en el Apartado 4.3.

### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO

Una vez formulado el problema en la sección anterior, abordaremos a continuación en profundidad la metodología de gestión de recursos radio propuesta, destinada a aportar una solución novedosa y eficaz que será desplegada y testada sobre el escenario contemplado, considerando los tipos de usuarios descritos previamente.

### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO

---

A partir de ahora se conocerá a esta metodología como RODEO. Como ya se ha mencionado brevemente, RODEO es una metodología V2V underlay, que permite que coexistan en el mismo canal una comunicación V2V y un enlace celular regular entre un C-UE y la estación base. Debido a esto, uno de los factores a tener en cuenta es la interferencia mutua que se generan entre ellos, ya que ésta puede afectar seriamente al rendimiento del sistema, causando una degradación significativa de la velocidad alcanzable tanto de los enlaces V2V como de los enlaces celulares entre C-UEs y la estación base. Por consiguiente, es necesario poner especial atención en la selección del canal de reutilización y la definición de las potencias de transmisión.

En un sistema D2D convencional, la mayoría de los esquemas centralizados de asignación de recursos radio necesitan conocer el Channel State Information (CSI) global instantáneo para lograr el rendimiento óptimo. Sin embargo, en una red vehicular en la cual los vehículos están en movimiento y, además, cambian de posición continuamente, este CSI preciso es más complejo de obtener. Además, si la estación base ejecuta la asignación de recursos con su periodo tradicional (es decir, cada 1ms), los V-UEs necesitan reportar sus canales cada milisegundo, lo que genera sobrecargas de red potencialmente grandes.

Por otro lado, en comparación con los usuarios de las comunicaciones D2D convencionales, las posiciones geográficas de los enlaces V2V presentan una fuerte correlación y previsibilidad, ya que los vehículos siempre viajan a lo largo de la carretera, de modo que sus futuras posiciones son altamente previsibles. Esto se ha tratado de aprovechar en la literatura [Botsov 14][Sun 14] llegando a la conclusión de que algoritmos dependientes de la posición de los vehículos permiten reducir significativamente la dependencia del CSI global instantáneo y la complejidad computacional de la solución, sin sacrificar demasiado rendimiento.

De este modo, RODEO trata de aprovecharse de las ventajas de ambas soluciones:

- utilizando las posiciones de los vehículos para reducir la complejidad computacional de la solución y

#### 4. Explicación de la Metodología

---

- al igual que en [Sun 16], estableciendo que la estación base ejecute la asignación de recursos con menor frecuencia para beneficiarse de las ventajas de un algoritmo que conozca la información de CSI.

Así, basándose en la posición de los vehículos y dividiendo el problema principal en tres subproblemas, RODEO ofrece una solución a la asignación de recursos radio en redes celulares en las que coexisten C-UEs y V-UEs. Los tres subproblemas definidos se muestran en la Figura 4.6 y son los siguientes:

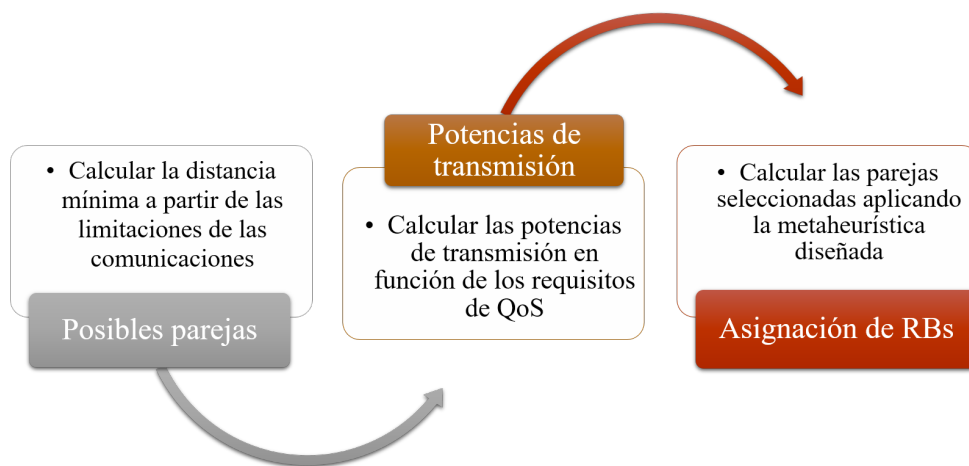


Figura 4.6: Metodología RODEO

## 4.3 Descripción de la Metodología RODEO

---

1. Emparejamiento de usuarios (UPP - User Pairing Problem). Esta fase de la metodología se encarga de decidir si un C-UE y un V-UE pueden compartir el mismo RB para transmitir sus mensajes. Para ello, se calcula la distancia mínima que debe haber entre un transmisor C-UE y un transmisor V-UE para mitigar la interferencia generada. Conociendo esta distancia, se pueden determinar todos los pares posibles y así, se reduce la complejidad computacional. Cómo se calcula esta distancia mínima se presenta en la Sección 4.3.1.
2. Selección de potencias de transmisión (TPCP - Transmission Power Control Problem). Esta segunda fase se encarga de determinar cuales deben ser las potencias de transmisión de cada pareja, si finalmente a ésta se le asigna un RB. Para el cálculo de potencias se tiene en cuenta el tipo de aplicación de C-ITS para la cual solicita recursos el V-UE. El procedimiento seguido para la selección de las potencias de transmisión está explicado en la Sección 4.3.2.
3. Asignación de recursos (RBAP - Radio Resource Allocation Problem). Esta tercera y última fase de la metodología es la que se encarga de dar el resultado final. Para ello, evalúa la situación como un problema de optimización combinatoria que resuelve a través de la metaheurística paralela que se describe en la Sección 4.3.3.

### 4.3.1 Problema de Emparejamiento de C-UEs y V-UEs

El eNodeB sólo puede asignar el mismo RB a un C-UE y a un V-UE si se cumplen las restricciones definidas por las ecuaciones (4.2)–(4.5). Sabiendo que  $\varepsilon_n^c$  y  $\varepsilon_m^d$  representan el Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) de la comunicación C-UE-eNodeB  $n$  y de la comunicación V2V  $m$ , respectivamente,  $P_n^c$  y  $P_m^d$  simbolizan la potencia de transmisión del transmisor C-UE  $n$  y V-UE  $m$  respectivamente, y  $g_{nB}$ ,  $g_m$ ,  $h_{mB}$ ,  $h_{mn}$  indican las ganancias de canal de los enlaces.

#### 4. Explicación de la Metodología

---

$$\varepsilon_n^c = \frac{P_n^c * g_{nB}}{\sigma^2 + P_m^d * h_{mB}} \geq \varepsilon_{min}^c \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_m^d = \frac{P_m^d * g_m}{\sigma^2 + P_n^c * h_{mn}} \geq \varepsilon_{min}^d \quad (4.3)$$

$$P_n^c \leq P_{max}^c \quad (4.4)$$

$$P_m^d \leq P_{max}^d \quad (4.5)$$

Estas limitaciones implican que el requisito mínimo de SINR debe garantizarse para ambas comunicaciones, tal y como muestran las ecuaciones (4.2) y (4.3), y que la potencia de transmisión del C-UE y del V-UE debe ser inferior a la potencia máxima permitida establecida por el estándar, como representan las Ecuaciones (4.4) y (4.5). En ambas expresiones,  $\sigma^2$  simboliza la potencia del ruido blanco gaussiano existente en cada canal.

Además, también existen las potencias mínimas de transmisión que son las que garantizan que el mensaje llegue al receptor, y están definidas por la Ecuación (4.6) en el caso del C-UE y la Ecuación (4.7) en el caso del V-UE. La potencia de transmisión es mínima cuando no hay interferencia y sólo garantizamos el mínimo SINR.

$$P_{min}^c = \frac{\sigma^2 * \varepsilon_n^c}{g_{nB}} \quad (4.6)$$

$$P_{min}^d = \frac{\sigma^2 * \varepsilon_m^d}{g_m} \quad (4.7)$$

### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO

---

Por lo tanto, los valores de potencia de transmisión que el sistema debe asignar al C-UE y al V-UE quedan delimitados por las potencias máximas y mínimas establecidas, tal y como establecen la Ecuación (4.8) y a la Ecuación (4.9), respectivamente.

$$P_{n,min}^c < P_n^c \leq P_{max}^c \quad (4.8)$$

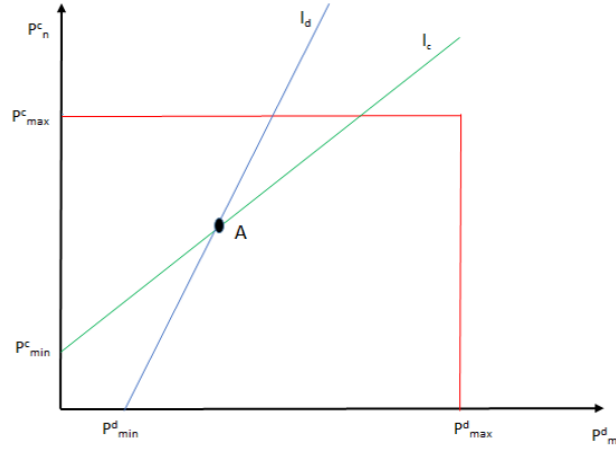
$$P_{m,min}^d < P_m^d \leq P_{max}^d \quad (4.9)$$

El proceso de emparejamiento se puede entender fácilmente observando la Figura 4.7, donde el rectángulo representado delimita las potencias máximas de transmisión asignadas al C-UE (eje de ordenadas) y al V-UE (eje de abscisas), y las líneas  $l_c$  y  $l_d$  representan las limitaciones de las ecuaciones (4.2) y (4.3).

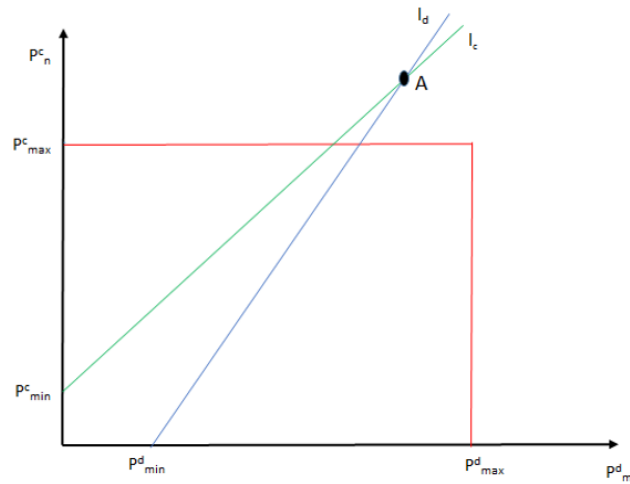
El área a la derecha de  $l_d$  determina las posibles combinaciones de potencias de transmisión que cumplen con la restricción de la Ecuación (4.3) y el área sobre  $l_c$  define las posibles combinaciones de potencias de transmisión que cumplen con la Ecuación (4.2). Por lo tanto, el área entre ambas líneas contiene todas las posibles combinaciones de potencias de transmisión que cumplen con todas las restricciones necesarias para compartir un RB entre un C-UE y un V-UE.

De este modo, si la intersección de ambas líneas es denotada mediante el punto A, y éste se encuentra dentro del rectángulo de potencias máximas de transmisión, implica que el C-UE y el V-UE analizados se pueden emparejar, como se muestra en la Figura 4.7a. Sin embargo, si la intersección de ambas rectas está fuera del rectángulo definido por las potencias máximas de transmisión, como en la Figura 4.7b, ese par C-UE y V-UE no puede compartir el mismo RB, ya que no satisface todas las restricciones anteriores.

#### 4. Explicación de la Metodología



(a) Pareja posible



(b) Pareja imposible

**Figura 4.7:** Representación de los requisitos de emparejamiento.

A partir de la Figura 4.7 se deduce también que el punto A comprende el par de potencias de transmisión mínimas que cumplen todas las restricciones de emparejamiento. Puesto que las ecuaciones de  $l_d$  y  $l_c$  son las ecuaciones representadas en (4.10).

$$l_d \longrightarrow P_n^c = \frac{g_m}{\varepsilon_{min}^d * h_{nm}} * P_m^d - \frac{\sigma^2}{h_{nm}} \quad (4.10)$$

$$l_c \longrightarrow P_n^c = \frac{\varepsilon_{min}^c * h_{mB}}{g_{nB}} * P_m^d + \frac{\varepsilon_{min}^c * \sigma^2}{g_{nB}}$$

### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO

Calculando la intersección de ambas líneas se obtienen las coordenadas del punto A, las cuales vendrán definidas por la ecuación (4.11).

$$\begin{cases} P_A^c = \frac{\sigma^2(g_j \varepsilon_{min}^c + \varepsilon_{min}^c \varepsilon_{min}^d h_{mB})}{g_j g_{nB} - \varepsilon_{min}^d h_{mB} h_{nm}} \\ P_A^d = \frac{\sigma^2(g_{nB} \varepsilon_{min}^d + \varepsilon_{min}^c \varepsilon_{min}^d h_{nm})}{g_j g_{nB} - \varepsilon_{min}^d h_{mB} h_{nm}} \end{cases} \quad (4.11)$$

Debido a que el desvanecimiento, más comúnmente conocido por *fading*, afecta de forma aleatoria a la calidad de la señal celular con el tiempo, la posición geográfica o la frecuencia radio, es necesario tener en cuenta esta propiedad aleatoria en la parametrización del enlace de canal. Al considerar tanto el desvanecimiento rápido, *fast fading*, debido a la propagación multitrajecto como el desvanecimiento lento, *slow fading*, debido a la sombra o shadowing, la ganancia de canal entre C-UE  $n$  y el eNodeB  $B$  puede expresarse como

$$h_{nB} = K \cdot \beta_{nB} \cdot \zeta_{nB} \cdot d_{nB}^{-\alpha} \quad (4.12)$$

donde  $K$  es una constante determinada por los parámetros del sistema,  $\beta_{nB}$  es la ganancia de desvanecimiento rápido con distribución exponencial,  $\zeta_{nB}$  es la ganancia de desvanecimiento lento con distribución log-normal,  $\alpha$  es el exponente de pérdidas, y  $d_{(nB)}$  es la distancia entre C-UE  $n$  y el eNodeB. De la misma manera, se define la ganancia del canal de comunicación V2V como  $g_m$ , la ganancia del canal entre el transmisor  $m$  del par V2V y el eNodeB como  $h_{mB}$ , y la ganancia del canal entre el C-UE  $n$  y el V-UE  $m$  como  $h_{nm}$ .

Por lo tanto, habiendo obtenido las potencias mínimas de transmisión para C-UE y V-UE, la distancia mínima entre el transmisor C-UE y V-UE que puede satisfacer todas las restricciones, puede ser calculada obteniendo el valor de  $h_{nm}$  de  $P_A^d$  y luego, encontrando los valores de  $d_{nm}$ . De este modo, conociendo la distancia mínima el eNodeB puede descartar múltiples pares imposibles, simplificando el problema.

## 4. Explicación de la Metodología

---

$$L_{nm} = \begin{cases} \left( \frac{k\beta_{nm}\zeta_{nm}\varepsilon_{min}^d \varepsilon_{min}^c P_{max}^c h_{mB}}{P_{max}^c g_{nB} g_m - \sigma^2 \varepsilon_{min}^c [g_m - \varepsilon_{min}^d * h_{mB}]} \right)^{\frac{1}{\alpha}} & \text{if } \frac{P_{max}^c * g_{nB}}{\sigma^2 + P_{max}^d * h_{mB}} \geq \varepsilon_{min}^c \\ \left( \frac{k\beta_{nm}\zeta_{nm}\varepsilon_{min}^d \varepsilon_{min}^c [P_{max}^c h_{mB} + \sigma^2]}{g_{nB} [P_{max}^d g_m - \varepsilon_{min}^d \sigma^2]} \right)^{\frac{1}{\alpha}} & \text{if } \frac{P_{max}^c * g_{nB}}{\sigma^2 + P_{max}^d * h_{mB}} \geq \varepsilon_{min}^c \end{cases}$$

Una vez entendido el modo de selección de las posibles parejas, es necesario recordar que una de las originalidades de RODEO es que la solicitud de RBs al eNodeB no la ejecuta cada C-UE, sino que para reducir la sobrecarga en la red, esta solicitud de recursos la realiza el CH de cada clúster en función de las necesidades de sus CMs. Por lo tanto, el emparejamiento no se realiza de un C-UE con un V-UE, si no que este emparejamiento se realiza de un C-UE con un clúster.

Así, en vez de calcular la distancia mínima definida entre cada C-UE y cada V-UE, exclusivamente se calculan las distancias de cada C-UE con el vehículo más cercano que tengan de cada clúster. Se elige el V-UE del clúster más cercano al C-UE para trabajar sobre el peor de los casos, ya que éste es el que más interferencia generaría al C-UE en caso de que finalmente sea éste al que el CH le asigne ese RB. El hecho de emparejar C-UEs con clúster en lugar de con V-UEs implica una gran simplificación en la ejecución del algoritmo.

### 4.3.2 Asignación de Potencias de Transmisión

En el Apartado 4.3.1 se ha explicado cómo se seleccionan los posibles emparejamientos de C-UE y V-UE. Una vez obtenido ese conjunto de pares, el siguiente paso es definir las posibles potencias de transmisión de cada par en función de los requisitos de calidad de servicio (QoS) que requiera cada usuario. Así, con las potencias de transmisión predefinidas, es posible calcular un valor para cada pareja que permita ponderarlas.

De este modo, tal y como se ha introducido en el Apartado 4.2, dentro del TPCP existen dos subproblemas: el SPC, donde los V-UEs envían mensajes de infotainment, y el MPC, donde los V-UEs envían mensajes CAM o de seguridad.

En el caso del SPC, el objetivo es maximizar el throughput total transmitido por la pareja en un RB. Así, como muestra la Ecuación 4.13, el throughput total de la

### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO

---

pareja creada es la suma de el throughput alcanzado por la comunicación del C-UE más el throughput conseguido por la comunicación del V-UE.

$$\begin{aligned} Throughput_{RB} &= Throughput_{C-UE} + Throughput_{V-UE} = \\ &= [\log_2(1+\varepsilon_n^c) + \log_2(1+\varepsilon_m^d)] * BW \end{aligned} \quad (4.13)$$

siendo  $\varepsilon_n^c$  y  $\varepsilon_m^d$  el SINR de las comunicaciones C-UE y V-UE, respectivamente, y  $BW$  el ancho de banda del RB. Para maximizar el throughput total, una de las particularidades de RODEO es que para ser justo y no dar prioridad a una comunicación frente a la otra, maximiza el throughput de cada una de las comunicaciones, como se ve en la Ecuación 4.14.

$$\begin{aligned} max(Throughput_{RB}) &= \\ &= [max(\log_2(1+\varepsilon_n^c)) + max(\log_2(1+\varepsilon_m^d))] * BW \end{aligned} \quad (4.14)$$

Visto que el throughput depende del SINR de cada comunicación, que a su vez depende de las potencias de transmisión establecidas, 4.15, el objetivo de RODEO es maximizar el SINR de ambas comunicaciones, es decir, en el enlace V2V y en el C-UE con el eNodeB.

$$\begin{aligned} \varepsilon_n^c &= \frac{g_m * P_n^c}{N + h_{nm} * P_m^d} \\ \varepsilon_m^d &= \frac{g_m * P_m^d}{N + h_{mb} * P_n^c} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Para seleccionar las potencias de transmisión, se parte de las restricciones iniciales (4.2)–(4.5), donde dependiendo de las condiciones del C-UE y el V-UE, pueden darse tres casos diferentes como se contempla en la Figura 4.8.

El primero ocurre cuando tanto  $l_d$  como  $l_c$  intersectan con  $P_{max}^c$ , tal y como se observa en la Figura 4.8a. En este caso, el par de potencias de transmisión óptimas es el definido por el punto D, el cual es la intersección de  $l_c$  con  $P_{max}^c$  y queda definido por la Ecuación 4.16.

#### 4. Explicación de la Metodología

---

$$\begin{cases} P_{CUE}^D = P_{max}^c \\ P_{VUE}^D = (P_{max}^c - \frac{\varepsilon_{min}^c * N}{g_{nb}}) * \frac{g_{nb}}{\varepsilon_{min}^c * h_{mb}} \end{cases} \quad (4.16)$$

El segundo caso se produce cuando  $l_d$  y  $l_c$  cortan con  $P_{max}^d$ , tal y como representa la Figura 4.8b. En este caso, el punto B es el elegido, que se obtiene calculando la intersección de  $l_d$  con  $P_{max}^d$  y queda definido por la Ecuación 4.17.

$$\begin{cases} P_{CUE}^B = \frac{g_m * P_{max}^d}{h_{nm} * \varepsilon_{min}^d} - \frac{N}{h_{nm}} \\ P_{VUE}^B = P_{max}^d \end{cases} \quad (4.17)$$

Por último, el tercer caso aparece cuando  $l_d$  corta con  $P_{max}^c$  y  $l_c$  interseca con  $P_{max}^d$ , y por tanto, las potencias de transmisión seleccionadas son las definidas por el Punto O, 4.18.

$$\begin{cases} P_{CUE}^O = P_{max}^c \\ P_{VUE}^O = P_{max}^d \end{cases} \quad (4.18)$$

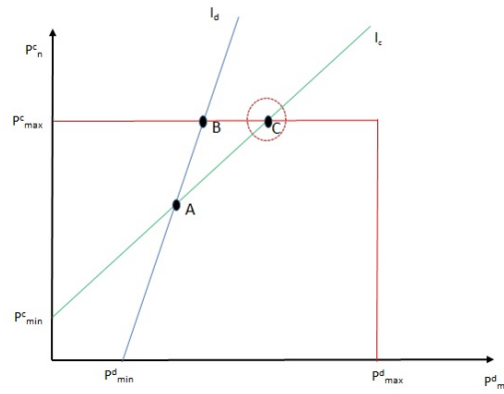
En el segundo tipo de servicio, MPC, en lugar de maximizar el throughput transmitido en el RB, se busca maximizar el throughput transmitido por el C-UE mientras que se maximiza la tasa mínima alcanzable por las comunicaciones V2V. Debido a que el throughput total es la suma del throughput alcanzado por la comunicación del C-UE más el throughput conseguido por la comunicación del V-UE, como muestra la Ecuación 4.13, en este caso la ecuación a optimizar es la presentada en la Ecuación 4.19.

$$\begin{aligned} Throughput_{RB} = \\ = [\max(\log_2(1 + \varepsilon_n^c)) + \min(\log_2(1 + \varepsilon_m^d))] * BW \end{aligned} \quad (4.19)$$

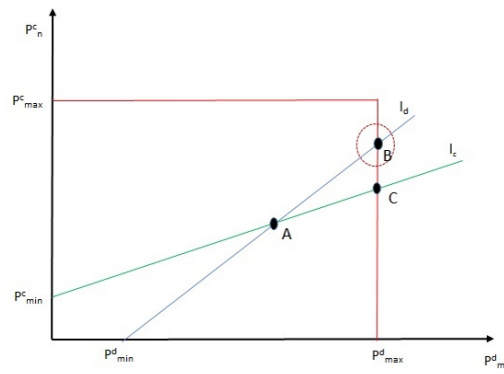
Al igual que para el caso SPC, si para determinar las potencias de transmisión en el caso MPC se parte de las restricciones iniciales (4.2)–(4.5), se dan tres casos diferentes como se muestra en la Figura 4.9.

El primero se presenta cuando  $l_d$  y  $l_c$  intersectan con  $P_{max}^c$ , como muestra la Figura 4.9a. En este caso, el par de potencias de transmisión óptimas está definido

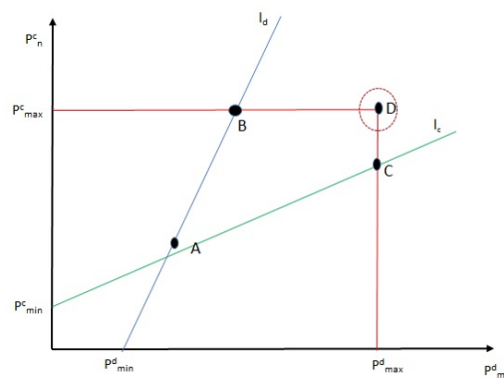
### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO



(a) Caso 1



(b) Caso 2



(c) Caso 3

Figura 4.8: Definición de potencias de transmisión para SPC

## 4. Explicación de la Metodología

---

por el punto C. Este punto es la intersección de  $l_d$  con  $P_{max}^c$  y queda definido por la Ecuación 4.20.

$$\begin{cases} P_{CUE}^C = P_{max}^c \\ P_{VUE}^C = (P_{max}^c + \frac{N}{h_{nm}}) * \frac{h_{nm} * \epsilon_{min}^d}{g_m} \end{cases} \quad (4.20)$$

El segundo caso se produce cuando  $l_d$  y  $l_c$  cortan con  $P_{max}^d$ , tal y como representa la Figura 4.8b. En este caso, el punto E es el elegido, que se obtiene calculando la intersección de  $l_d$  con  $P_{max}^d$  y queda definido por la Ecuación 4.21

$$\begin{cases} P_{CUE}^E = \frac{g_m * P_{max}^d}{h_{nm} * \epsilon_{min}^d} - \frac{N}{h_{nm}} \\ P_{VUE}^E = P_{max}^d \end{cases} \quad (4.21)$$

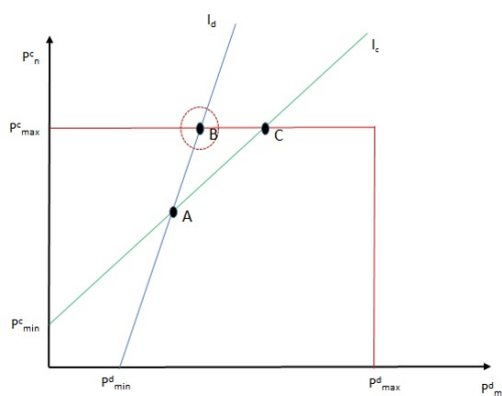
Por último, el tercer caso aparece cuando  $l_d$  corta con  $P_{max}^c$  y  $l_c$  interseca con  $P_{max}^d$  y entonces el par de potencias de transmisión seleccionadas coincide con el punto C, 4.20.

### 4.3.3 Metaheurística de Asignación de Recursos Radio

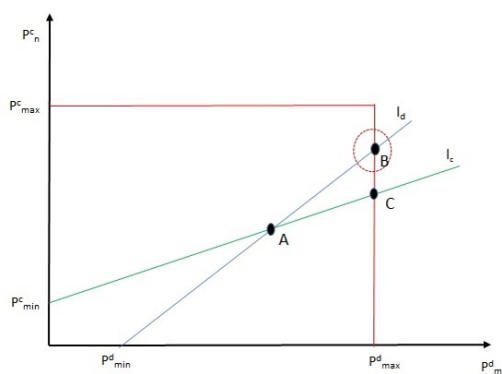
En esta sección se describe el algoritmo desarrollado para hacer frente al problema de asignación de recursos radioeléctricos RBAP. En este caso, se ha formulado el RBAP como un problema de optimización combinatoria [Du 13]. La optimización combinatoria es uno de los campos más estudiados dentro de la inteligencia artificial, pudiendo ser aplicada a múltiples campos de aplicación como la logística, industria o medicina.

Debido al interés científico y social inherente a los problemas surgidos en esta área, se publican gran cantidad de trabajos de investigación en esta área, tanto en revistas [Kasperski 15], como en congresos [Bezerra 14], y también en libros [Levin 15]. Existen diferentes tipos de problemas dentro de este tipo de optimización. En este estudio específico, se ha modelado el RBAP como un problema de diseño combinatorio [Colbourn 10]. De acuerdo con esto, en la literatura se pueden encontrar múltiples metaheurísticas que son capaces de tratar este tipo de problemas. En este

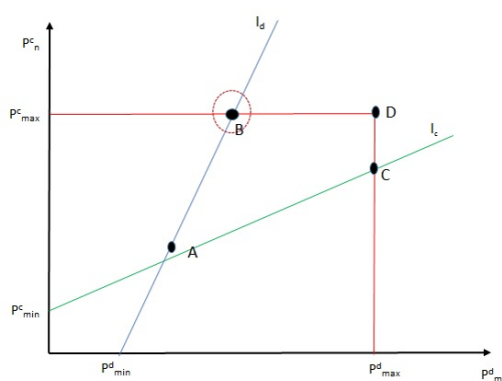
### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO



(a) Caso 1



(b) Caso 2



(c) Caso 3

**Figura 4.9:** Definición de potencias de transmisión para MPC

#### 4. Explicación de la Metodología

---

sentido, algunos de estos métodos se basan en una sola búsqueda, como el *Simulated Annealing* [Kirkpatrick 83] y la *Tabu Search*[Glover 89], y otros se basan en una búsquedas múltiples (algoritmos basados en poblaciones), como el *algoritmo genético*[Goldberg 89], y algoritmo de *colonia de hormigas*[Dorigo 05].

Las metaheurísticas también se pueden clasificar en algoritmos de búsqueda y algoritmos constructivos. Los algoritmos basados en búsqueda parten de una solución inicial completa o un conjunto inicial de soluciones completas que se modifican hasta llegar a una solución final, mientras que los algoritmos constructivos parten de una solución parcial o un conjunto de soluciones parciales que se construyen hasta llegar a una solución final completa.

En este estudio, se ha diseñado un algoritmo de búsqueda basado en poblaciones para resolver el RBAP. La filosofía de la técnica presentada consiste en contar con una población de individuos autónomos, que realizan búsquedas locales en paralelo, pudiendo así explorar una mayor parte del espacio de soluciones. Por esta razón, la técnica desarrollada ha sido llamada Multiple and Parallel Block Solver Algorithm (MP-BSA).

Como se ha mencionado, el RBAP está formulado como un problema de diseño combinatorio. El objetivo de este problema es encontrar una configuración que garantice la QoS, minimizando el número de RBs utilizados y maximizando el rendimiento total para cada uno de los tipos de servicio ofrecidos, SPC y MPC. Por lo tanto, el problema ha sido tratado como un multiobjetivo jerárquico con una función objetivo de dos niveles. Para entender esta función objetivo, es conveniente aclarar que se parte de tres conjuntos diferentes, conteniendo el throughput transmitido por cada usuario, C-UE y V-UE, si éstos transmiten solos en el RB, y el throughput alcanzado por cada par C-UE-V-UE si transmiten ambos en el mismo RB:

$$X : \{Thr_{C-UE_1}, Thr_{C-UE_2}, Thr_{C-UE_3}, \dots, Thr_{C-UE_n}\}$$

$$Y : \{Thr_{V-UE_1}, Thr_{V-UE_2}, Thr_{V-UE_3}, \dots, Thr_{V-UE_m}\}$$

$$Z : \{Thr_{C-UE,V-UE_1}, Thr_{C-UE,V-UE_2}, \dots, Thr_{C-UE,V-UE_l}\}$$

Con todo esto, la función de objetivo de dos niveles que se ha de minimizar es la siguiente:

### 4.3 Descripción de la Metodología RODEO

$$\sum_{i=1}^n x_i \sum_{j=1}^m y_j \sum_{k=1}^l z_k \quad (4.22)$$

$$\sum_{i=1}^n Thr_{C-UE_i} x_i \sum_{j=1}^m Thr_{V-UE_j} y_j \sum_{k=1}^l Thr_{C-UE, V-UE_k} z_k \quad (4.23)$$

El primer objetivo, definido por la ecuación (4.22), consistente en minimizar el número de RBs utilizados, ya que cuantos menos RBs se utilicen, menos espectro radioeléctrico se consume. A continuación, y considerando soluciones con el mismo número de bloques de recursos, el objetivo es maximizar el rendimiento total de ambas comunicaciones (4.23). Para entender correctamente estas funciones, hay que señalar que  $x_i$ ,  $y_i$  y  $z_i$  son variables binarias, que son 1 si en la solución está presente los C-UEs, V-UEs y parejas VUE-CUE correspondientes.

Como se puede leer en algunos estudios de la literatura [Osaba 17], un factor importante a la hora de desarrollar cualquier algoritmo, u operador, es la codificación utilizada para representar las soluciones parciales o completas del problema. Por esta razón, la codificación elegida debe describirse con claridad, ya que dependiendo de la representación utilizada, algunos operadores pueden o no aplicarse. En este estudio se ha utilizado la representación de permutación. Así, cada solución está representada por una permutación de los diferentes elementos del entorno. Además, cada bloque de recursos está dividido por un punto y coma y los elementos de la misma pareja. A modo de ejemplo, y teniendo en cuenta un sistema con cuatro C-UEs y cuatro V-UEs, una posible solución podría representarse de la siguiente manera:

$$X : \{C - UE_{02}, V - UE_{03}; C - UE_{01}, V - UE_{04}; \\ C - UE_{03}, V - UE_{01}; C - UE_{04}; V - UE_{02}\}$$

En este caso, esta solución en concreto está compuesta por tres pares ( $\{C - UE_{02}, V - UE_{03}\}$ ,  $\{C - UE_{01}, V - UE_{04}\}$ ,  $\{C - UE_{03}, V - UE_{01}\}$ ) y dos elementos únicos ( $C - UE_{04}$  y  $V - UE_{02}$ ).

La forma de trabajo del MP-BSA desarrollado se ha resumido en el Algoritmo 2. Como puede comprobarse, los primeros pasos del MP-BSA son generar aleatoriamente la población inicial y definir la función objetivo descrita anteriormente.

#### 4. Explicación de la Metodología

---

A continuación, se inicia un proceso iterativo, en el que cada individuo de la población realiza una pequeña modificación en su estructura. Si esta nueva solución generada mejora la anterior, se acepta. En cualquier otro caso, la nueva solución es descartada. Para la modificación de individuos se ha utilizado el conocido operador de intercambio, que ha sido ampliamente utilizado en otros campos [Larrañaga 99]. Para este movimiento, en primer lugar, se seleccionan aleatoriamente dos elementos de la solución. A continuación, se intercambia la posición de estos dos elementos. Después de este intercambio, los bloques se vuelven a construir. Este paso se utiliza con el objetivo de no generar soluciones inviables. Por esta razón, puede ser que las nuevas soluciones tengan un número de bloques diferente al anterior. Tomando el individuo anterior  $X$ , y asumiendo que, por ejemplo,  $C - UE_{01}$  y  $C - UE_{04}$  se han seleccionado aleatoriamente:

$$X : \{C - UE_{02}, V - UE_{03}; C - UE_{01}, V - UE_{04};$$

$$C - UE_{03}, V - UE_{01}; C - UE_{04}; V - UE_{02}\}$$

Un posible nuevo individuo podría ser el siguiente:

$$X' : \{C - UE_{02}, V - UE_{03}; C - UE_{04}, V - UE_{04};$$

$$C - UE_{03}, V - UE_{01}; C - UE_{01}; V - UE_{02}\}$$

Finalmente, este proceso iterativo se repite hasta que se alcanza el criterio de finalización. En este caso, este criterio está compuesto por dos condiciones: un número fijo de generaciones totales y un número concreto generaciones sin mejoras en la mejor solución encontrada. Si se cumple cualquiera de estas condiciones, el algoritmo termina su ejecución y se devuelve la mejor solución encontrada en toda la ejecución.

## 4.4 Principales aportaciones del modelo propuesto

### Algoritmo 2: Pseudocódigo del MP-BSA propuesto.

```
Data:  $VUE\_Throughput\_Matrix$ ,  
 $C - UE\_Throughput\_Matrix$ ,  $Paired\_Throughput\_Matrix$ ,  
Result: Best individual found  
1 Definir el objetivo de la función  $f(x)$ ;  
2 Inicializar la población inicial  $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ ;  
3 repeat  
4   for cada individuo  $x_i$  de la población do  
5     Generar una nueva solución  $x'_i$  a partir  $x_i$ ;  
6     if  $f(x'_i) > f(x_i)$  then  
7       Aceptar la nueva solución;  
8     end  
9   end  
10 until hasta que no se alcance el criterio de finalización;  
11 Ordenar los individuos y devolver el actual mejor individuo de la  
    población;
```

## 4.4 Principales aportaciones del modelo propuesto

Después de haber descrito en detalle la metodología propuesta en esta tesis doctoral, en esta sección se recogen las aportaciones y los aspectos originales de la contribución en comparación, principalmente, con lo establecido por el estándar LTE V2X Release 14 [3GPP 06].

A grandes rasgos se puede decir que la aportación principal de esta tesis consiste en una nueva metodología denominada RODEO para la asignación eficiente de recursos radioeléctricos en redes celulares en las que coexisten C-UEs y V-UEs. Concretamente, las novedades de esta metodología son las siguientes:

- RODEO es una metodología de asignación de recursos que utiliza comunicaciones V2V underlay para aprovechar la ganancia de reutilización a través de los recursos radioeléctricos uplink de los usuarios celulares comunes.
- En RODEO se emplea el clustering, metodología comúnmente utilizado en redes vehiculares, en redes celulares para gestionar las comunicaciones de los vehículos. Así, debido a que el CH se encarga de las comunicaciones con la infraestructura, se puede reducir la carga generada a la estación base.

#### 4. Explicación de la Metodología

---

- RODEO presenta una metodología para la reutilización de recursos radio basada en tres pasos: emparejamiento de usuarios, selección de potencias de transmisión y optimización de asignación de recursos a través de metaheurísticas.
- RODEO adapta su forma de funcionamiento en función de los requisitos de servicio de las aplicaciones de C-ITS, para así mejorar la calidad de servicio global percibida por el usuario.

Analizando las diferencias con el estándar, la principal es que LTE V2X utiliza una metodología overlay en la que los C-UEs y V-UEs no comparten recursos. Esto es así, ya que en LTE V2X se define un rango de frecuencias reservadas para las comunicaciones celulares comunes y otro rango de frecuencias reservadas para las comunicaciones V2V.

Por otro lado, otra gran diferencia es que la asignación de recursos en LTE V2X a los vehículos puede ser descentralizada. Así, los vehículos al conocer su posición geográfica, son capaces de determinar qué recursos deben utilizar para sus transmisiones. En cambio, en RODEO la asignación es centralizada, es el eNodeB el que asigna recursos al CH y éste el que se los reparte entre sus CMs.

Es interesante mencionar que existe una mayor cantidad de diferencias entre las distintas técnicas además de las listadas en este apartado. En esta pequeña sección se han querido mencionar tan solo las originalidades más significativas.

*No intentes ser mejor que nadie. Solo trata de ser mejor de lo que fuiste ayer.*

Anónimo

# 5

## Experimentación y resultados

Con el propósito de comprobar que la metodología de asignación de recursos planteada es una técnica prometedora y que los resultados ofrecidos por la misma son competitivos, se ha llevado a cabo una extensa experimentación. Debido a la falta de recursos y al gran coste que supone la implementación de una metodología como RODEO en un entorno real, para poder llevar a cabo estos estudios, ha sido necesario desarrollar un entorno de simulación que permita reproducir escenarios de la manera más realista posible.

Dentro de ese entorno de simulación, el cual se explica en la sección 5.1, se ha implementado RODEO. Gracias a esto, es posible evaluar el rendimiento ofrecido por esta metodología ante los problemas SPC (Sum-rate-oriented Power Control) y MPC (Minimum-rate-oriented Power Control) presentados en la Sección 4.2.

Para contrastar los resultados obtenidos por RODEO, estos serán comparados con los obtenidos por las dos metodologías presentadas en la sección 5.2. Con todo esto, las tres metodologías serán evaluadas en una serie de circunstancias y sus resultados serán valorados a través de diversas métricas que serán presentadas la sección 5.3.

## 5. Experimentación y resultados

---

Todos estos aspectos relacionados con la experimentación serán minuciosamente detallados a lo largo de este capítulo. Por último, los resultados obtenidos de esta experimentación junto al correspondiente análisis de los mismos y conclusiones extraídas se presentan en las secciones 5.4 y 5.5, para los problemas MPC y SPC, respectivamente.

### 5.1 Entorno de experimentación

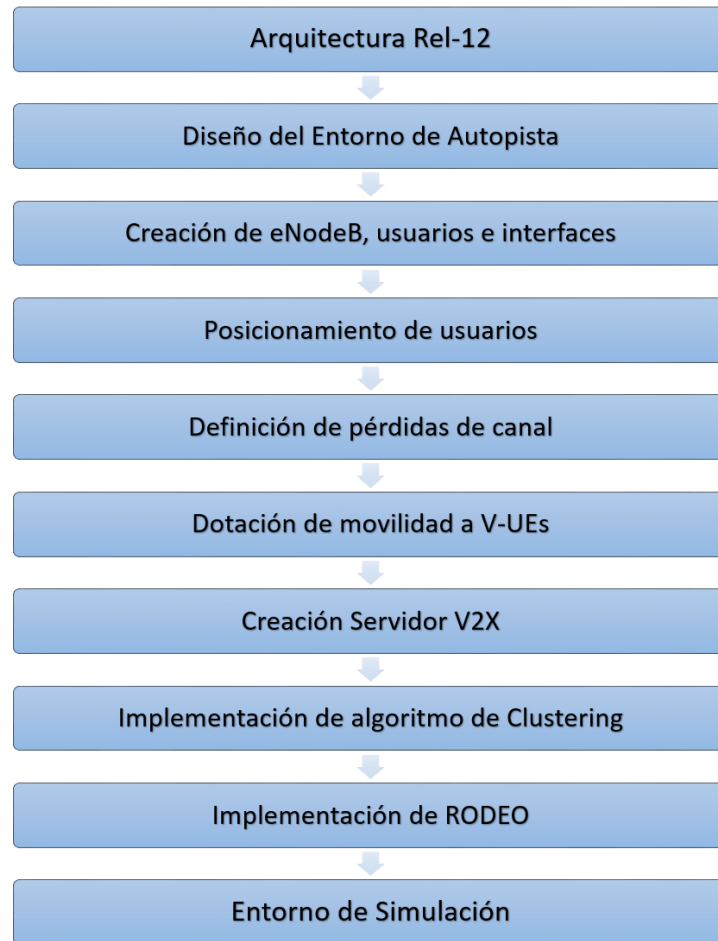
Para desarrollar el entorno de simulación se ha partido de un simulador basado en MATLAB que implementa la arquitectura de LTE Rel-13. Este simulador es un recurso desarrollado por Nokia Bell Labs para uso interno y el cual se ha podido utilizar para la experimentación de este trabajo gracias a la estancia de investigación realizada en su centro de Breslavia (Polonia). Los pasos seguidos para adaptar el entorno de simulación primitivo al necesario para la experimentación de este trabajo se encuentran recogidos en la Figura 5.1

En este entorno, en primer lugar, se ha diseñado el escenario definido en la sección 4.1. Tal y como se explica en la sección 4.1.3, el contexto reproducido en el simulador es el Entorno de Autopista definido en el documento [3GPP 06]. Por tanto, se ha diseñado una autopista de 1 km con 6 carriles, 3 en cada dirección, con un ancho de carril de 4 metros.

A continuación, el siguiente paso ha sido definir al eNodeB y a los distintos tipos de usuarios (C-UEs y V-UEs). El eNodeB se posiciona en el centro de la carretera, pero distanciado 20 metros del borde de la misma, los V-UEs se posicionan aleatoriamente en alguno de los 6 carriles que conforman la autopista y los C-UEs se posicionan o dentro de los vehículos o en el área existente entre los vehículos y el eNodeB. Tal y como se explica en la sección 4.1.1, los C-UEs sólo se comunican con la infraestructura, por lo tanto, sólo disponen en este caso de la interfaz Uu. En cambio, los V-UEs son capaces de comunicarse con la infraestructura a través de su interfaz Uu, pero también, tienen la posibilidad de comunicarse con otros V-UEs al disponer de la interfaz PC-5. Estas interfaces están explicadas en la sección 3.3 del capítulo 3.

El hecho de que los usuarios se encuentren en una autopista permite asumir que las comunicaciones entre los mismos se establecen en situaciones de visión

## 5.1 Entorno de experimentación



**Figura 5.1:** Desarrollo del entorno de simulación.

directa. Por esta razón, y porque la autopista se encuentra dentro de una microcelda cubierta por un única estación base, se han definido las pérdidas de propagación en el entorno de simulación basándose en lo establecido para comunicaciones de este tipo en el informe técnico [3GPP 03].

A continuación, se ha dotado a los vehículos de movilidad consiguiendo que recorran el carril de autopista en el cual han sido posicionados. Esta movilidad, y en concreto la velocidad a la que se produce, afecta a las variaciones rápidas del canal debido al efecto Doppler que se genera. Para esta experimentación se ha definido una velocidad constante de 120 km/h.

## 5. Experimentación y resultados

---

Después de otorgar movilidad a los V-UEs, se ha creado el servidor V2X dentro de la arquitectura de red y se ha implementado en él el algoritmo de clustering expuesto en la sección 4.1.1. Este algoritmo se ejecutará periódicamente e irá cambiando su solución a medida que los V-UEs se desplacen y se modifique la lista de los vecinos que se encuentran en el área de cobertura de cada V-UE.

El siguiente paso ha sido la implementación de RODEO como metodología para la asignación de recursos radio, lo que ha desembocado en la disposición del entorno de simulación.

### 5.2 Metodologías de referencia

En esta sección se presentan las metodologías con las cuales se compara RODEO para validar y demostrar sus ventajas con respecto al estado del arte. Para que la comparativa fuera justa, todas las metodologías asignan los recursos de manera centralizada, esto es, es el eNodeB el que se encarga de realizar esa asignación de recursos. Dentro de las metodologías de asignación de recursos centralizadas, RODEO se compara con:

- La metodología underlay [Zulhasnine 10] en la cual el eNodeB selecciona el C-UE con la ganancia de canal deseada más alta para compartir su RB con el V-UE que sufre la interferencia más baja de esta C-UE. El método se ejecuta definiendo siempre las potencias máximas de transmisión. Para encajar el esquema en nuestro entorno de simulación y cumplir con la restricción SINR para cada V-UE, se reduce la potencia de transmisión de la V-UE correspondientes hasta que se satisfaga las restricciones de calidad de servicio. Comparar RODEO con otra metodología underlay permite observar y comparar los rendimientos de ambas metodologías de una manera más justa, especialmente en cuanto a eficiencia espectral.
- La metodología overlay para comunicaciones V2V con asistencia de red definida en el 3GPP Release 14. Esta metodología también se encuentra implementada en el entorno de simulación. La comparación entre esta metodología y RODEO permite, especialmente, extraer las ventajas y desventajas que

### 5.3 Métricas utilizadas para la evaluación de los resultados

---

ofrecen las metodologías overlay frente a las underlay y analizar el interés de proponer metodologías underlay para futuras comunicaciones C-V2X.

### 5.3 Métricas utilizadas para la evaluación de los resultados

A continuación, se introducen las métricas que van a permitir evaluar la metodología RODEO y compararla con las distintas técnicas presentadas en la Sección 5.2. Estas métricas son:

- El rendimiento, o más conocido en inglés como throughput, definido como la cantidad de bits por segundo que se transmiten en cada uno de los enlaces.
- La potencia de transmisión, definida como la cantidad de vatios que consumen los usuarios del sistema para transmitir su información.
- La eficiencia espectral, definida como la cantidad de bytes transmitidos por RB. Ésta es una métrica de evaluación clave, ya que al ser el espectro radioeléctrico un bien escaso y limitado, es necesario que la solución elegida sea lo más eficiente posible.
- Rendimiento energético, definido como el número de bytes transmitidos por vatio, permite evaluar la cantidad de información que se transmite por unidad de potencia consumida.
- Eficiencia energética, definida como la potencia transmitida por RB, valora el consumo de potencia por unidad de recurso radioeléctrico.

Cada una de estas métricas es evaluada desde tres perspectivas:

1. Resultados obtenidos para las comunicaciones de los C-UEs
2. Resultados obtenidos para las comunicaciones de los V-UEs
3. Resultados globales obtenidos teniendo en cuenta todos los usuarios

## 5. Experimentación y resultados

---

La evaluación desde estas tres perspectivas permite identificar si las metodologías son justas o, si por el contrario, alguna de las metodologías premia a algún colectivo de usuarios a costa de penalizar al otro.

Además, estas métricas se evalúan en función de diversas variables presentadas a continuación.

1. El volumen de tráfico generado por los usuarios, entendido como la variación del tamaño del paquete transmitido por cada uno de ellos, lo que permite evaluar cómo varían los valores de las métricas en función del patrón de tráfico de los usuarios. Este análisis es especialmente interesante en el problema MPC, ya que el patrón de tráfico de los V-UEs se mantiene constante y sólo varía el volumen de tráfico de los C-UEs. Esto permite analizar cómo se ven afectadas las comunicaciones de los V-UEs en función de la cantidad de información que generan los C-UEs. Por otro lado, en el problema SPC ambos usuarios generan el mismo volumen de tráfico independientemente de si son V-UEs o C-UEs.
2. La relación entre el número de C-UEs y el número de V-UEs, manteniendo siempre el número de usuarios totales constante, en este caso 50 usuarios. Esta métrica permite evaluar en qué situaciones se obtiene mejor desempeño de las metodologías propuestas, si en los escenarios en los que predomina el número de C-UEs o en los escenarios en los que predomina el número de vehículos. Los diferentes escenarios evaluados son los siguientes.
  - Escenario 1: 5 C-UEs, 45 V-UEs
  - Escenario 2: 10 C-UEs, 40 V-UEs
  - Escenario 3: 15 C-UEs, 35 V-UEs
  - Escenario 4: 20 C-UEs, 30 V-UEs
  - Escenario 5: 25 C-UEs, 25 V-UEs
  - Escenario 6: 30 C-UEs, 20 V-UEs
  - Escenario 7: 35 C-UEs, 15 V-UEs
  - Escenario 8: 40 C-UEs, 10 V-UEs
  - Escenario 9: 45 C-UEs, 5 V-UEs

### 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

En esta Sección se presentan los resultados obtenidos por RODEO y por el resto de técnicas implementadas ante la resolución del problema MPC. Para ello, se realiza la experimentación presentada en las secciones previas.

Esta experimentación se evalúa desde los tres puntos de vista anteriormente presentados, que son la perspectiva de las comunicaciones de los C-UEs, la de las comunicaciones de los V-UEs y la del conjunto global de comunicaciones de los usuarios. Además, los resultados se examinan en función de las dos variables presentadas en la Sección 5.3, que son el volumen de tráfico generado por los C-UEs y la proporción de C-UEs/V-UEs que se encuentra en cada escenario. Así, la evaluación de los resultados obtenidos ante el problema MPC se realiza mediante el análisis del throughput, del rendimiento energético, de la eficiencia energética y de la eficiencia espectral, métricas descritas con anterioridad en este capítulo.

#### 5.4.1 Evaluación de los resultados de throughput

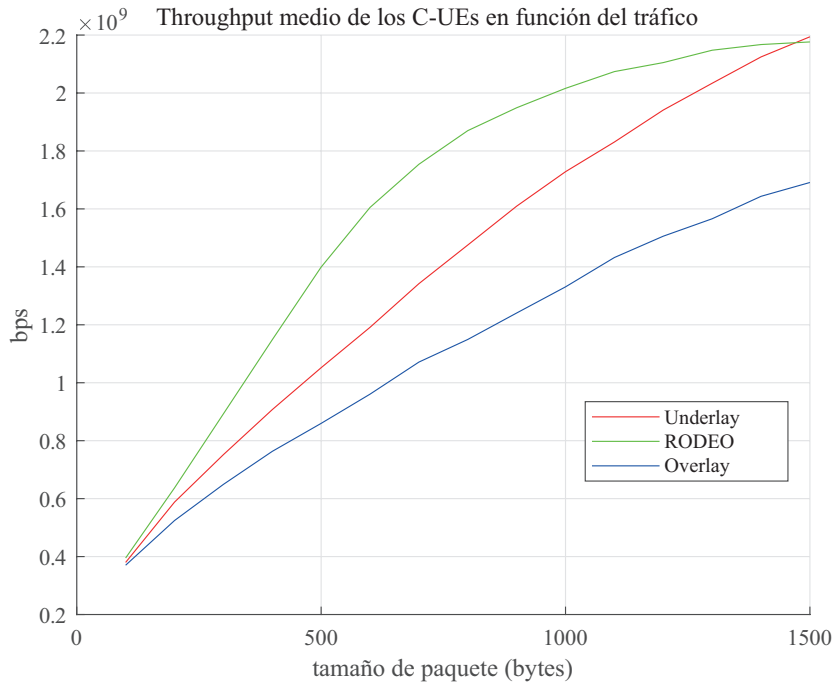
Esta sección se dedica a presentar y analizar los resultados obtenidos de throughput obtenidos por RODEO y las metodologías con las que se compara desde las tres perspectivas definidas en los distintos escenarios presentados.

En primer lugar, en la Figura 5.2 se recopilan los resultados de throughput alcanzados por las comunicaciones de los C-UEs.

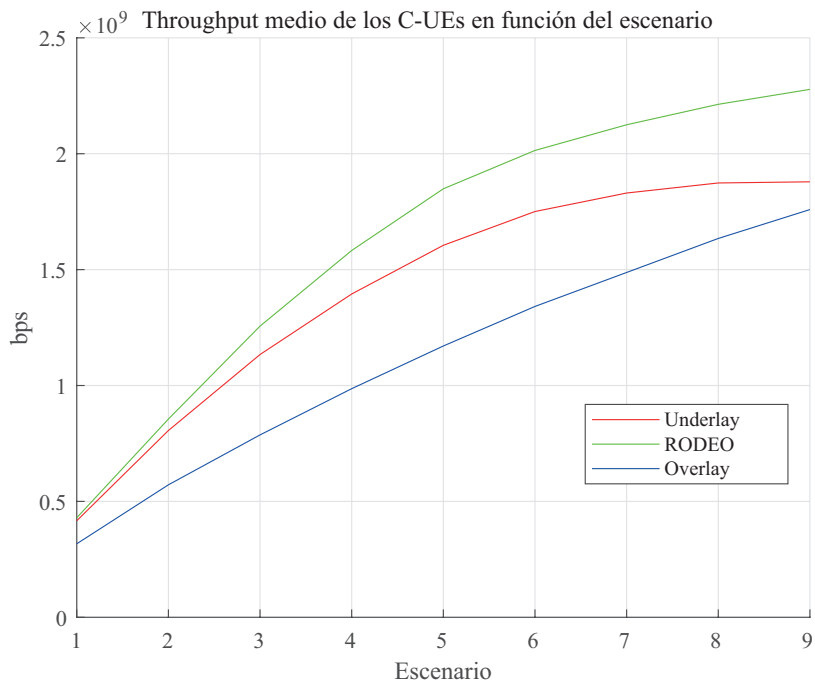
La Figura 5.2a ofrece los resultados medios de throughput alcanzados por las comunicaciones de los C-UEs en función del volumen de información transmitido por los mismos. En esta gráfica se demuestra que el throughput que ofrece RODEO a los C-UEs es superior al ofrecido por las otras dos metodologías con las que se compara. Esto es así ya que en RODEO se trata de reducir las interferencias generadas entre las comunicaciones de los C-UEs y las comunicaciones V2V lo que permite alcanzar un mayor throughput debido a la baja interferencia. Aunque sea obvio, esta figura evidencia que el throughput que se concede a los C-UEs aumenta a medida que ellos solicitan transmisiones de paquetes de mayor tamaño.

Por último, la Figura 5.2b presenta los mismos resultados del throughput ofrecido por las distintas metodologías a los C-UEs pero, en este caso, evaluados en función de la proporción de C-UEs/V-UEs existente en cada uno de los escenarios

## 5. Experimentación y resultados



(a) Throughput medio de los C-UEs en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Throughput medio de los C-UEs en función del escenario

**Figura 5.2:** Resultados de throughput de los C-UEs para MPC

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

---

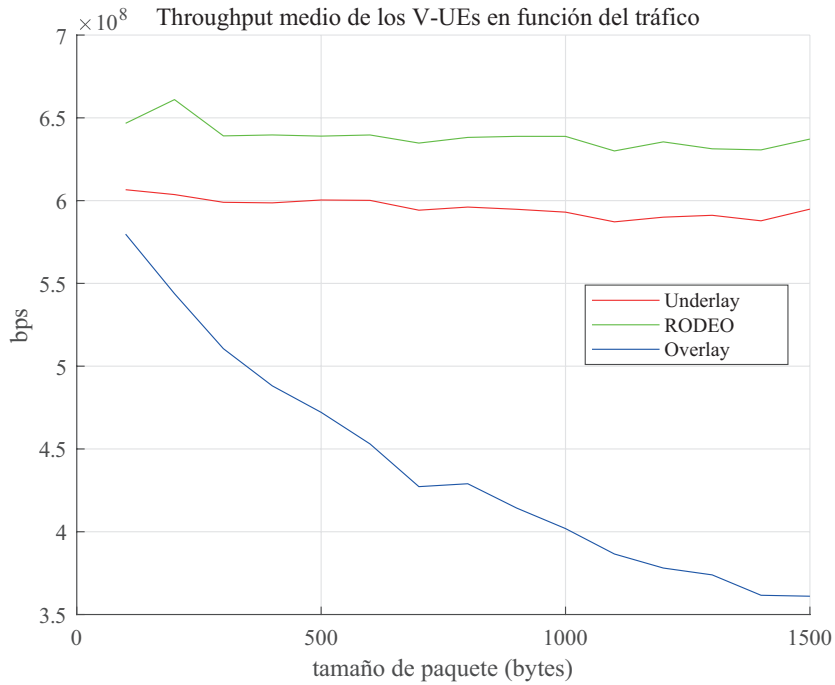
en los que se lleva a cabo la experimentación. Esta gráfica señala que en las tres metodologías el throughput de los C-UEs aumenta a medida que aumenta el número de éstos en el escenario. Asimismo, estos resultados evidencian que el throughput que ofrece RODEO a los C-UEs ante el problema MPC es superior al que ofrecen el resto de metodologías evaluadas.

A continuación, la Figura 5.3 presenta los resultados de throughput obtenidos para las comunicaciones V2V. Al estar evaluando el rendimiento de las metodologías ante el problema MPC, es necesario recordar antes de evaluar los resultados, que el tráfico que generan los V-UEs en este problema son mensajes CAM periódicos.

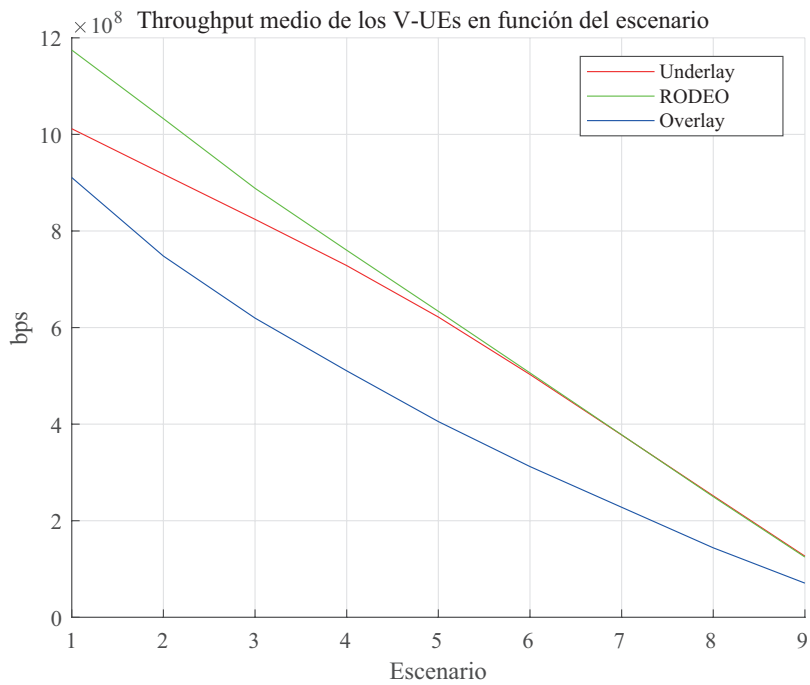
De este modo, cada una de las líneas de la Figura 5.3b revela los resultados de throughput alcanzados por las comunicaciones de los V-UEs en cada uno de los escenarios definidos en función del patrón de tráfico generado por los C-UEs. Lo más llamativo de esta gráfica es la tendencia lineal de los resultados obtenidos en todos los escenarios para las tres metodologías. Sin embargo, esta tendencia lineal se debe al envío periódico de mensajes CAM. Los resultados de throughput alcanzados en cada uno de los escenarios cambia debido a la variación del número de V-UEs en los escenarios, lo que implica que se generan distinto número de mensajes CAM. La generación de los mensajes CAM está definida por el 3GPP TR 36.885 v14.0.0 (2016-06) [3GPP 06]. Este Technical Report define que el patrón de transmisión de mensajes CAM enviado por los vehículos consiste en transmitir periódicamente un mensaje de 300 bytes seguido de cuatro mensajes de 190 bytes. En esta experimentación, el periodo de transmisión de mensajes CAM establecido es 100 ms.

La Figura 5.3a representa los valores medios de throughput alcanzados en las comunicaciones de los V-UEs en obtenidos a partir de los resultados de la figura anterior. En este caso, se muestran los valores medios de throughput alcanzados a través de la transmisión de mensajes CAM en función del volumen de tráfico generado por lo C-UEs. A partir de esta figura se puede concluir que a las metodologías underlay no les afecta el incremento del flujo de información generada por los C-UEs. Sin embargo, para la metodología Overlay, en la cual cada usuario dispone de recursos propios, al generar los C-UEs mayor cantidad de información y, por tanto, demandar un mayor número de recursos radio para transmitir dicha información,

## 5. Experimentación y resultados



(a) Throughput medio de los V-UEs en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Throughput medio de los V-UEs en función del escenario

**Figura 5.3:** Resultados de throughput de los V-UEs para MPC

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

---

los V-UEs tienen menor acceso a los recursos. Esto se podría solucionar añadiendo prioridad a las comunicaciones de los V-UEs. Resaltar también, que en esta gráfica se demuestra que RODEO ofrece valores más altos de throughput a las comunicaciones de V-UEs que las otras dos metodologías con las que se compara. Esto se debe a que RODEO está diseñado para optimizar las comunicaciones V2V y las otras metodologías se centran más en priorizar las comunicaciones de los C-UEs.

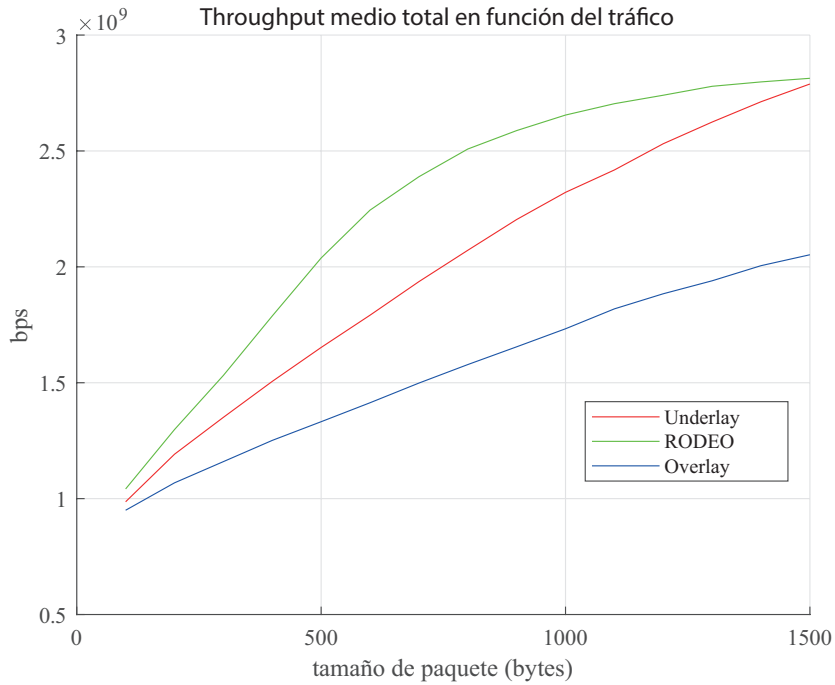
Para finalizar este análisis de throughput ofrecido por las distintas metodologías frente al problema MPC, se evalúa el throughput total conseguido por el conjunto global de usuarios, el cuál se representa en las gráficas de la Figura 5.4.

De este modo, siguiendo el mismo patrón de evaluación que en las perspectivas anteriores, la Figura 5.4 presenta el throughput total ofrecido al conjunto de usuarios en función de la cantidad de tráfico generada por los C-UEs. En esta gráfica se observa como las tres metodologías siguen una tendencia creciente en la que el throughput proporcionado al conjunto de usuarios aumenta a medida que aumenta el tráfico generado por los C-UEs.

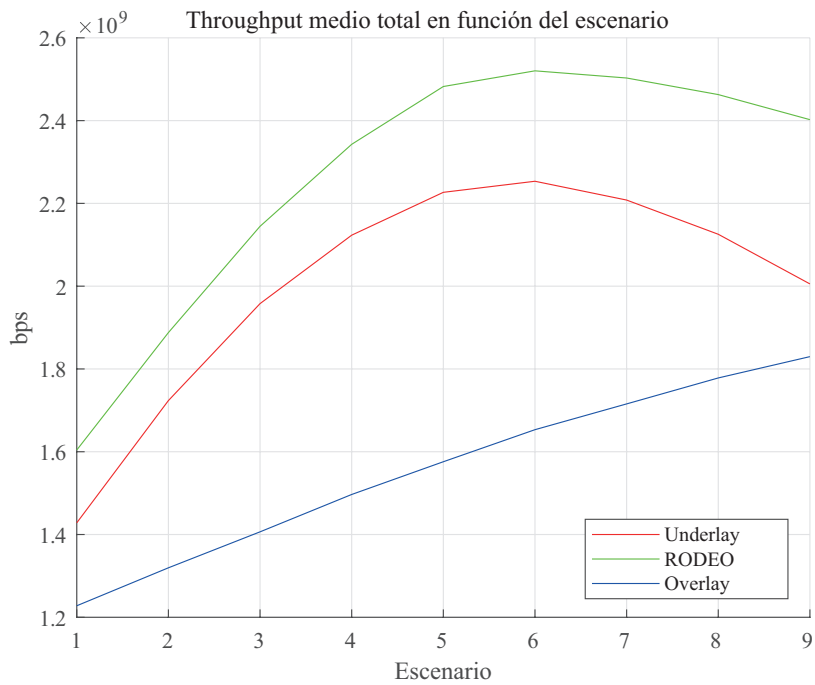
A continuación, la Figura 5.4a muestra el throughput medio alcanzado por el total de usuarios calculado a partir de los resultados representados en la gráfica anterior. Estos valores medios muestran que RODEO ofrece un throughput superior al ofrecido por el resto de metodologías evaluadas. Además, también refleja que el throughput proporcionado por el sistema aumenta a medida que los C-UEs solicitan más recursos para transmitir mayor cantidad de información.

Para finalizar este análisis de throughput, la Figura 5.4b representa los valores de throughput ofrecidos por cada metodología al conjunto de usuarios en función del escenario evaluado. Esta representación, además de evidenciar que RODEO es el que ofrece mayor throughput a sus usuarios, resalta las diferencias existentes entre las metodologías underlay y overlay. Así, se observa que las metodologías underlay alcanzan sus valores máximos en los escenarios 5, 6 y 7 en los cuales la compartición de recursos es mucho más probable debido al ratio C-UEs/V-UEs. Sin embargo, el throughput alcanzado por la solución Overlay indica que se alcanza mayor throughput a medida que aumenta el número de C-UEs, ya que son los usuarios que generan mayor cantidad de información bajo las circunstancias establecidas en simulaciones llevadas a cabo en esta tesis.

## 5. Experimentación y resultados



(a) Throughput medio en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Throughput medio en función del escenario

**Figura 5.4:** Resultados de throughput total para MPC

### 5.4.2 Evaluación de los resultados de rendimiento energético

En esta sección se analizan los resultados obtenidos de la experimentación para la métrica relativa al rendimiento energético, entendida como el número de bytes transmitidos por vatio consumido. Se inicia la evaluación de los resultados de rendimiento energético en la Figura 5.5, donde se presenta el rendimiento energético que ofrecen las 3 metodologías evaluadas a las comunicaciones de los C-UEs.

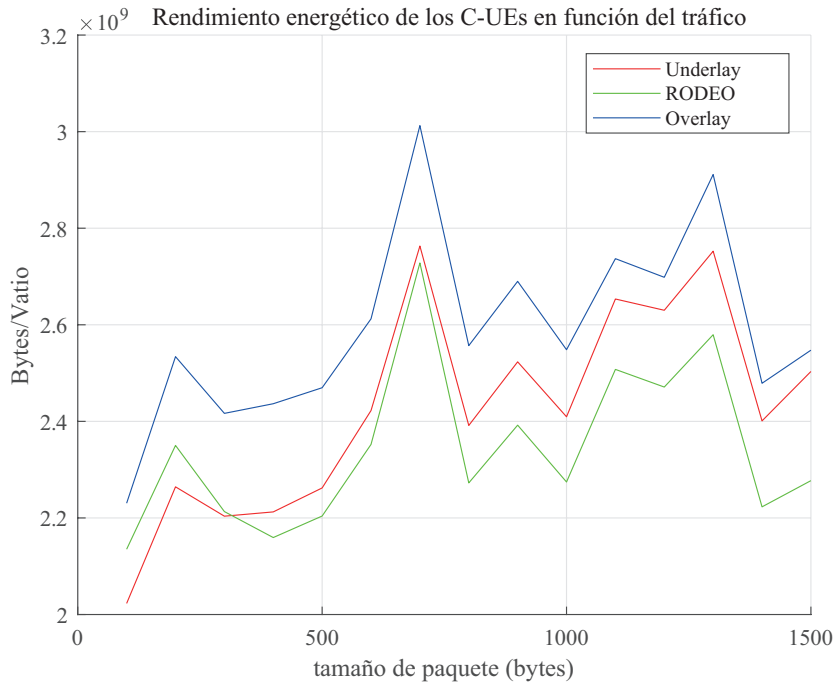
En la Figura 5.5a se muestran los resultados de rendimiento energético de las comunicaciones de los C-UEs en función del volumen de tráfico que transmiten los mismos. Se observa como en este caso, el rendimiento energético que ofrece RODEO es inferior al que ofrecen el resto de las metodologías. Además, se observa como el mejor rendimiento energético es ofrecido por la solución overlay. Esto es así, ya que en la solución overlay no se producen interferencias y, por tanto, con la misma potencia de transmisión el throughput que alcanza un usuario es mayor, que cuando se comparten RBs y se generan interferencias. Además, también se observa como las 3 soluciones obtienen sus mejores rendimientos con paquetes de 700 y 1300 bytes.

Por otro lado, la Figura 5.5b representa el rendimiento energético de las comunicaciones de los C-UEs en función de los escenarios. En este caso, RODEO también ofrece peores rendimientos a los C-UEs, y es la solución overlay la que ofrece los mejores rendimientos. Además de esto, la gráfica evidencia que el rendimiento energético alcanza sus valores mínimos en el escenario 5, donde tenemos tantos C-UEs como V-UEs y por tanto se generan mayores interferencias al realizarse más particiones de recursos.

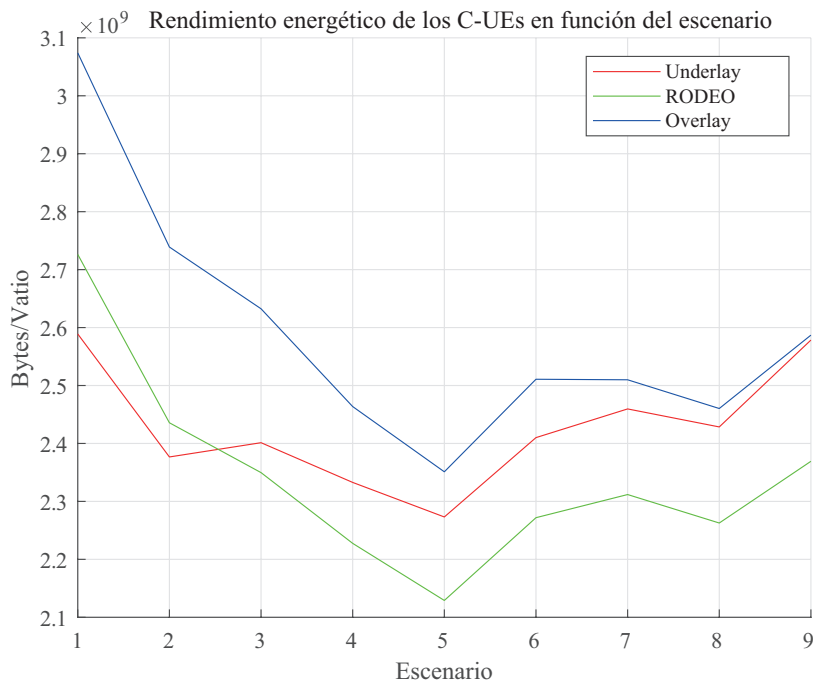
La Figura 5.6 muestra los resultados de rendimiento energético ofrecido por las 3 metodologías a los usuarios V-UE para la transmisión de sus mensajes CAM. La Figura 5.6a muestra estos rendimientos en función del tipo de tráfico que transmiten los C-UEs. En esta figura se observa como RODEO ofrece mejor rendimiento energético a las comunicaciones V2V que el resto de las metodologías, esto es importante ya que los CAM son mensajes periódicos que se envían muchas más veces que el resto de mensajes.

En la Figura 5.6b se observa como RODEO es la metodología que ofrece mejor rendimiento energético en los escenarios del 1 al 4 en los que predominan los V-

## 5. Experimentación y resultados



(a) Rendimiento energético de los C-UEs en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Rendimiento energético de los C-UEs en función del escenario

**Figura 5.5:** Resultados de rendimiento energético de los C-UEs para MPC

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

---

UEs. Esto es así ya que RODEO es una metodología diseñada para escenario donde exista una densidad de vehículos considerable. En esta figura también se observa que el peor valor de rendimiento energético de RODEO se alcanza en el escenario 5 donde existe la misma cantidad de V-UEs que de C-UEs y, por tanto, las interferencias generadas entre las comunicaciones son mayores. Y, además, tiene sentido que desde el escenario 5 hasta el escenario 9 la solución overlay ofrezca mejor rendimiento energético que RODEO, ya que en la solución Overlay no se producen interferencias por compartir recursos. En cambio, si comparamos con la otra solución Underlay, el rendimiento energético ofrecido por RODEO es potencialmente mejor.

Para finalizar este análisis, la Figura 5.7 presenta los resultados del rendimiento energético total ofrecido al conjunto de usuarios por cada una de las metodologías. En la Figura 5.7a se observa el rendimiento energético total de las comunicaciones en función de la cantidad de tráfico transmitido por los C-UEs. En esta gráfica se observa cómo RODEO ofrece resultados algo mejores en muchos casos que la solución overlay, aunque muy similares. Por otro lado, la solución Underlay es la que peor rendimiento energético ofrece al conjunto de comunicaciones. Esta gráfica evidencia que el rendimiento energético total sigue una tendencia decreciente a medida que aumenta el tráfico generado por los C-UEs. Esto es, el rendimiento energético del conjunto global de las comunicaciones alcanza su mayor valor cuando los C-UEs transmiten poco tráfico y, por el contrario, el rendimiento va empeorando a medida que estos paquetes van creciendo.

La Figura 5.7b representa el rendimiento energético total en función de la proporción C-UEs/V-UEs existente en los escenarios evaluados. En este caso se observa que el rendimiento energético disminuye a medida que aumenta el número de C-UEs y disminuye el número de V-UEs. Se observa también que en la mayoría de los escenarios, el rendimiento energético ofrecido por RODEO es algo superior al ofrecido por las otras dos metodologías analizadas.

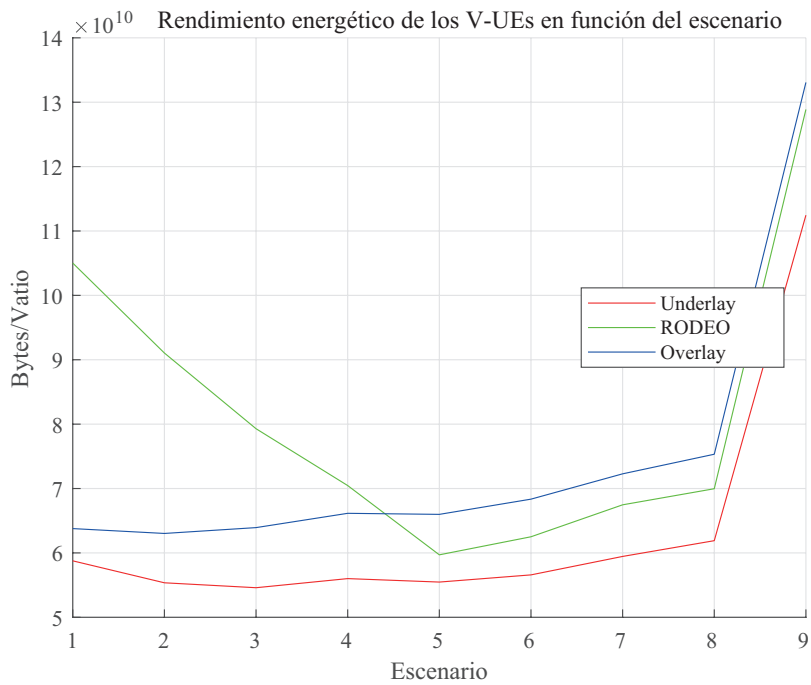
### 5.4.3 Evaluación de los resultados de eficiencia energética

En esta sección se analiza la eficiencia energética entendida como los vatios consumidos por RB. En la Figura 5.8 se presentan los resultados de rendimiento energéti-

## 5. Experimentación y resultados



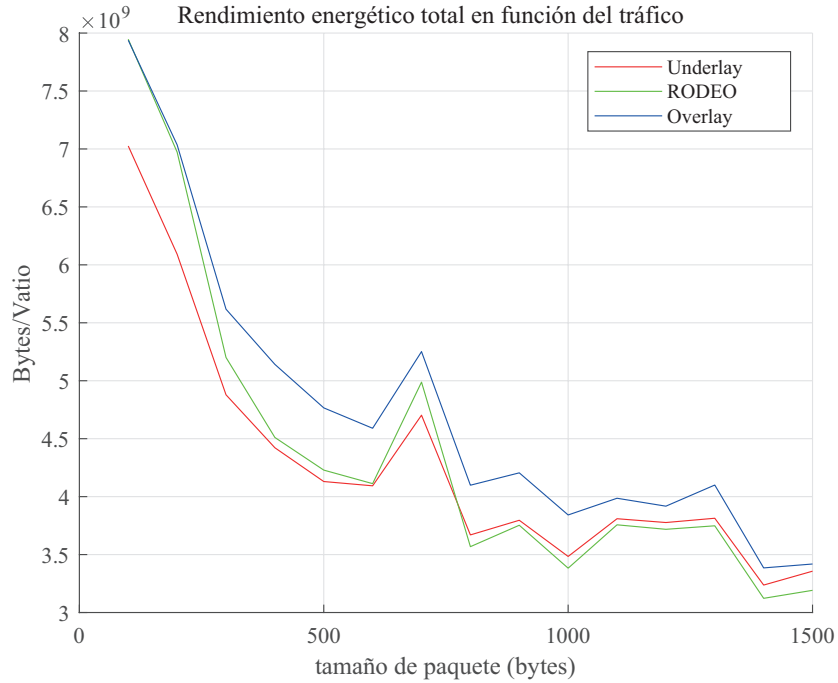
(a) Rendimiento de los V-UEs en función del tipo de tráfico del C-UE



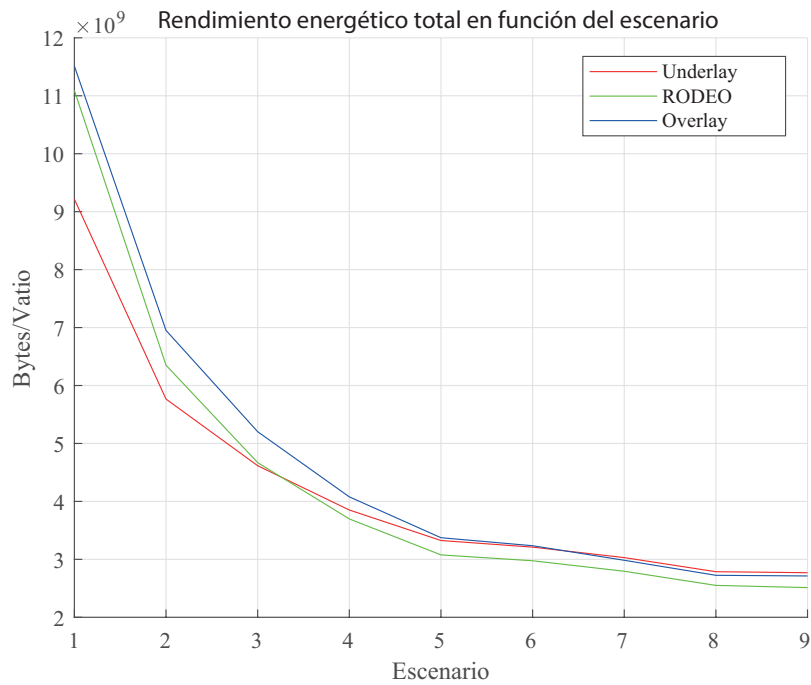
(b) Rendimiento de las comunicaciones V2V en función del escenario

**Figura 5.6:** Resultados del rendimiento energético de los V-UEs para MPC

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC



(a) Rendimiento medio total en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Rendimiento medio total en función del escenario

**Figura 5.7:** Resultados del rendimiento energético total para MPC

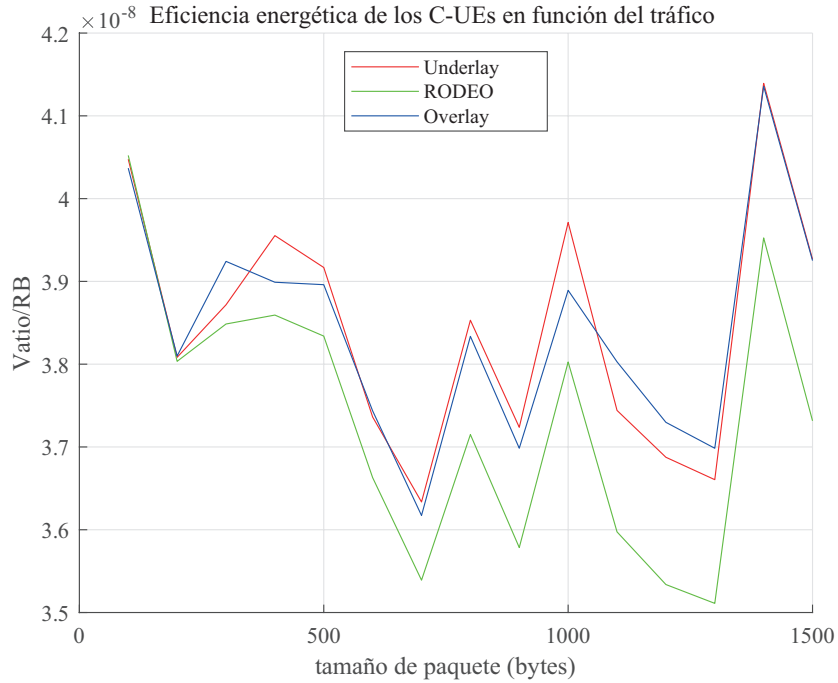
## 5. Experimentación y resultados

---

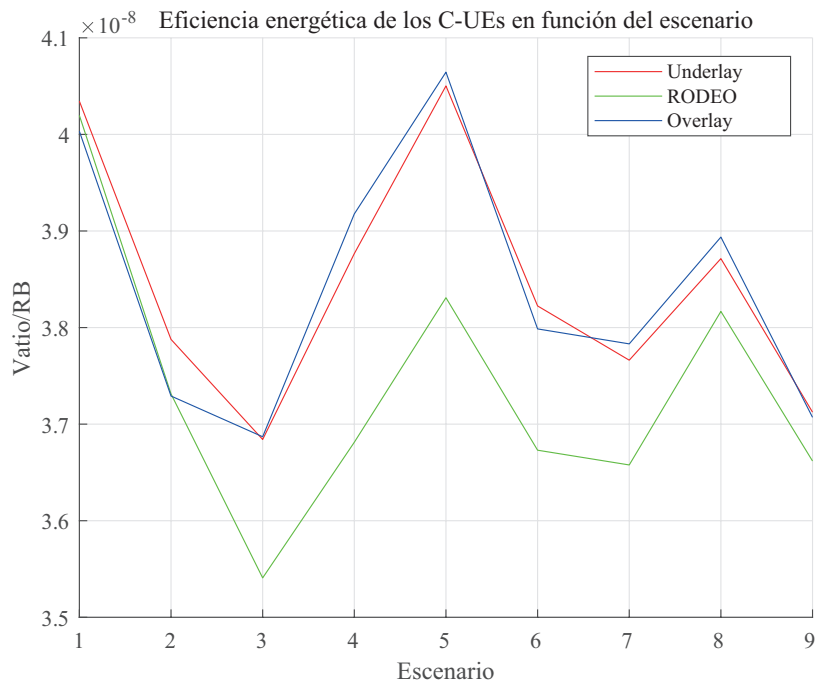
co que ofrecen las 3 soluciones a los C-UEs. En este caso, la Figura 5.8a muestra que si se aplica la metodología RODEO, los C-UEs transmiten con menos potencia por cada RB. Además, a partir de estos resultados se concluye que la eficiencia energética de las comunicaciones de los C-UEs no es directamente proporcional al tráfico generado por los mismos.

Por otro lado, la Figura 5.8b representa la eficiencia energética de las comunicaciones de los C-UEs en función del escenario. En este caso se observa que en el Escenario 3, en el cual hay 35 V-UEs y 15 C-UEs, los C-UEs transmiten con la mínima potencia por RB. También demuestra que en la mayoría de escenarios, RODEO asigna potencias de modo que se necesita un consumo de energía menor por RB. Estos resultados demuestran que la eficiencia energética de las comunicaciones de los C-UEs tampoco siguen correlación con la proporción de C-UEs/V-UEs existentes en el escenario.

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC



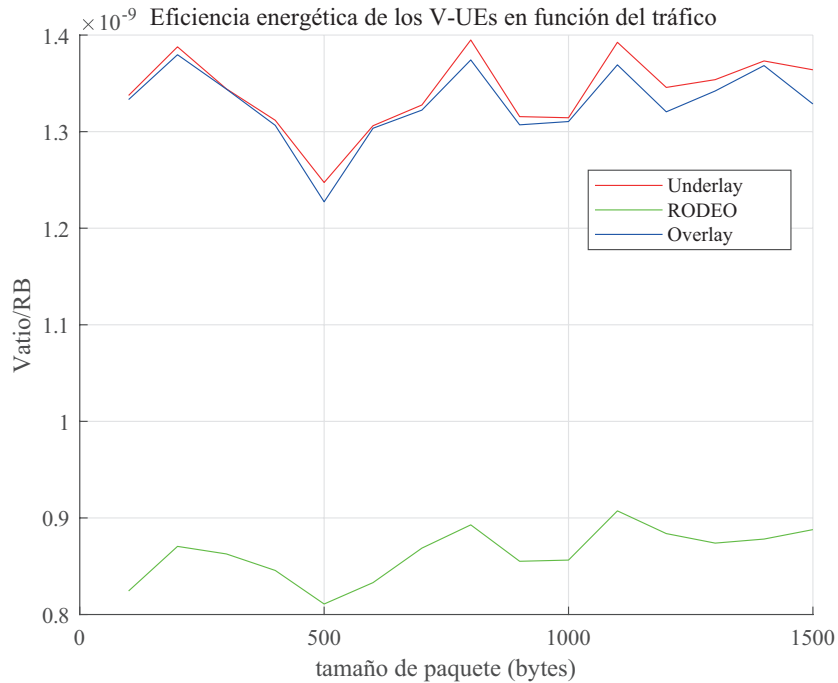
(a) Eficiencia de los C-UEs en función del tipo de tráfico del C-UE



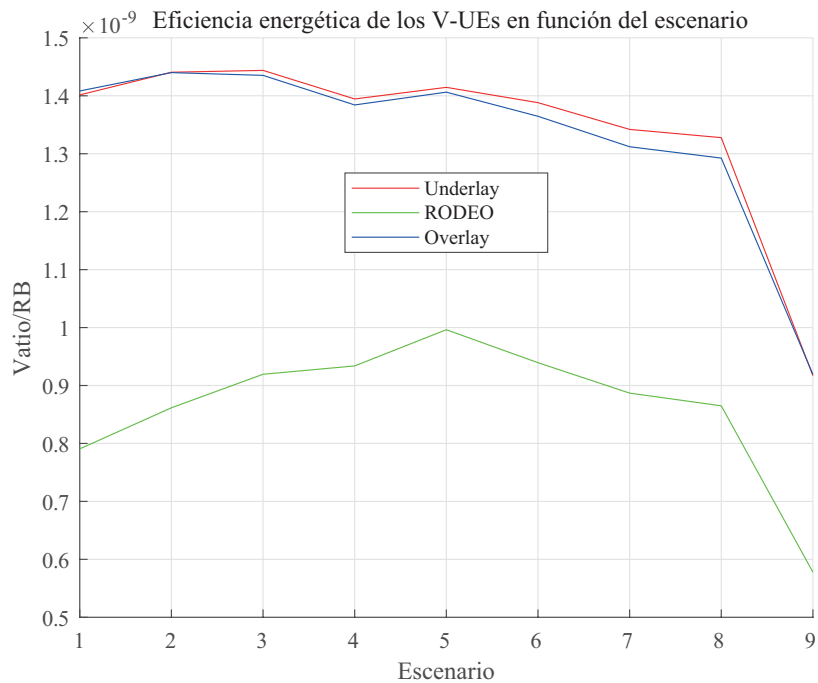
(b) Eficiencia de los C-UEs en función del escenario evaluado

**Figura 5.8:** Resultados de eficiencia energética de los C-UEs para MPC

## 5. Experimentación y resultados



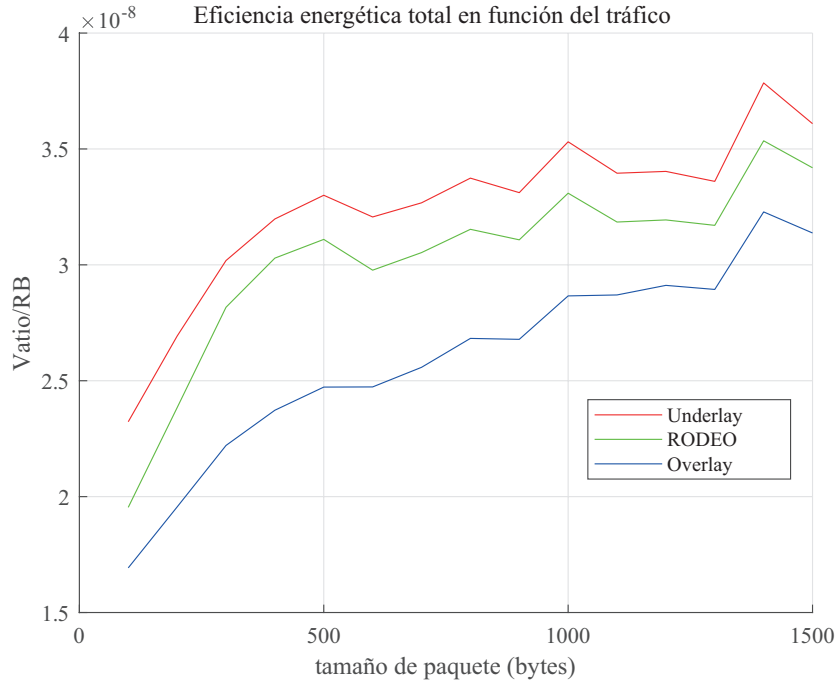
(a) Eficiencia energética de los V-UEs en función del tipo de tráfico del C-UE



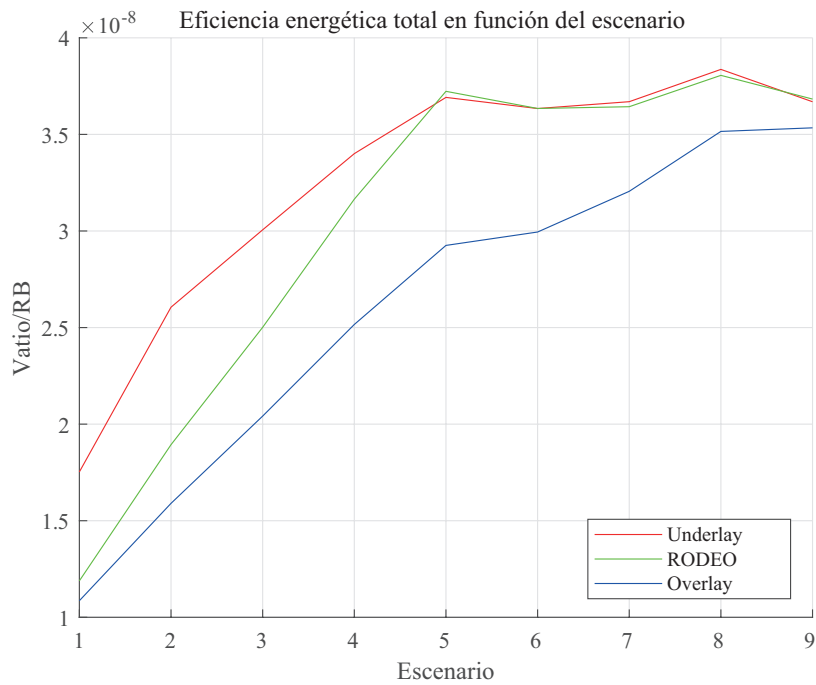
(b) Eficiencia energética de los V-UEs en función del escenario

**Figura 5.9:** Resultados de eficiencia energética de los V-UEs para MPC

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC



(a) Eficiencia energética media total en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Eficiencia energética media total en función del escenario

**Figura 5.10:** Resultados de eficiencia energética total para MPC

## 5. Experimentación y resultados

---

La Figura 5.9 muestra los resultados de eficiencia energética obtenidos de las comunicaciones de los V-UEs. En la Figura 5.9a se presenta esta eficiencia energética en función del volumen de tráfico generado por los C-UEs. Esta gráfica evidencia que la eficiencia energética ofrecida por RODEO para la transmisión de mensajes CAM es mucho mejor que la ofrecida por las otras dos metodologías, ya que cuanto menos potencia se consume por RB menos interferencias se generan y más throughput se puede ofrecer a los usuarios. Además se observa que la eficiencia energética ofrecida a los V-UEs por las otras dos soluciones es muy similar. Esta gráfica no muestra ninguna correlación entre la eficiencia energética de las comunicaciones de los V-UEs y el volumen de tráfico generado por los C-UEs.

Por otro lado, la Figura 5.9b muestra la eficiencia energética de las comunicaciones V2V donde se refleja que RODEO consume mucha menos energía por RB que las otras dos opciones. Además, evidencia que el peor resultado de eficiencia energética de RODEO se produce en el Escenario 5 donde coexisten 25 C-UEs y 25 V-UEs por lo que es el escenario en el cual se comparten más RBs y, por tanto, donde los V-UEs transmiten con mayor potencia para alcanzar correctamente su destino sin ser tan afectados por las interferencias.

Este análisis se finaliza con la Figura 5.10, la cual representa el rendimiento energético total del conjunto de usuarios. En este caso, la Figura 5.10a muestra los resultados de rendimiento energético de las 3 metodologías en función del tipo de tráfico transmitido por los C-UEs y se observa que el más eficiente energéticamente hablando es la solución Overlay. Esto es así ya que en esta solución únicamente transmite un usuario por cada RB. Sin embargo, RODEO muestra ser más eficiente energéticamente hablando que la solución Underlay. Estos resultados llevan a la conclusión de que independientemente de la metodología utilizada, la eficiencia energética empeora a medida que los C-UEs introducen más tráfico en la red.

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

---

Por otro lado, la figura 5.10b muestra en este caso la eficiencia energética total en función del escenario evaluado. Así, presenta que en todos los escenarios la solución Overlay es la más eficiente energéticamente hablando, seguida por RODEO. Y además, muestra como para todas las metodologías, la eficiencia energética ofrecida al conjunto global de comunicaciones empeora a medida que aumenta el número de C-UEs y disminuye el número de V-UEs en el escenario.

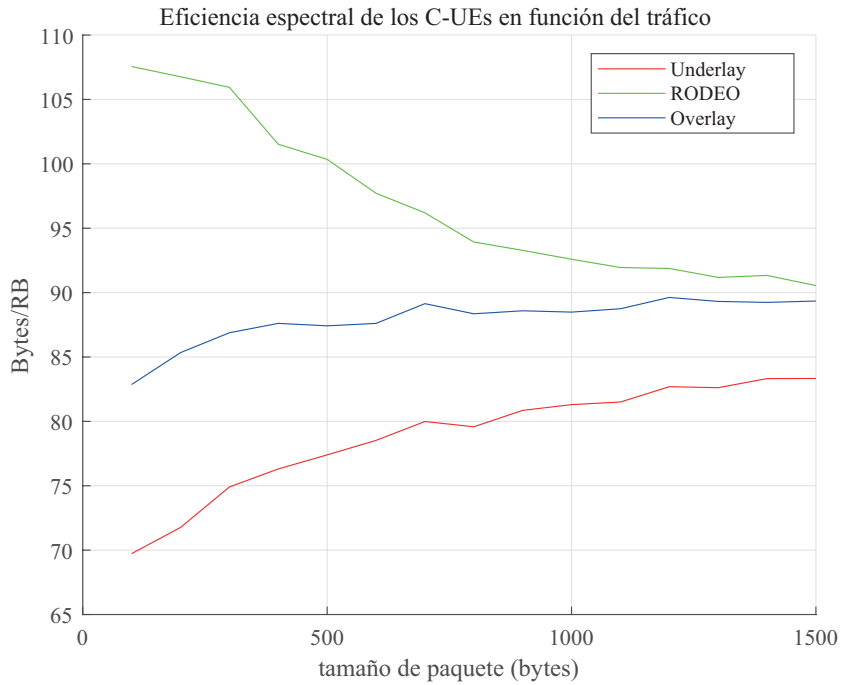
### 5.4.4 Evaluación de los resultados de eficiencia espectral

En este apartado se presentan los resultados de la eficiencia espectral, definida ésta como el throughput transmitido por resource block. En primer lugar, la Figura 5.11 muestra los resultados de eficiencia espectral alcanzados por las comunicaciones de los C-UEs.

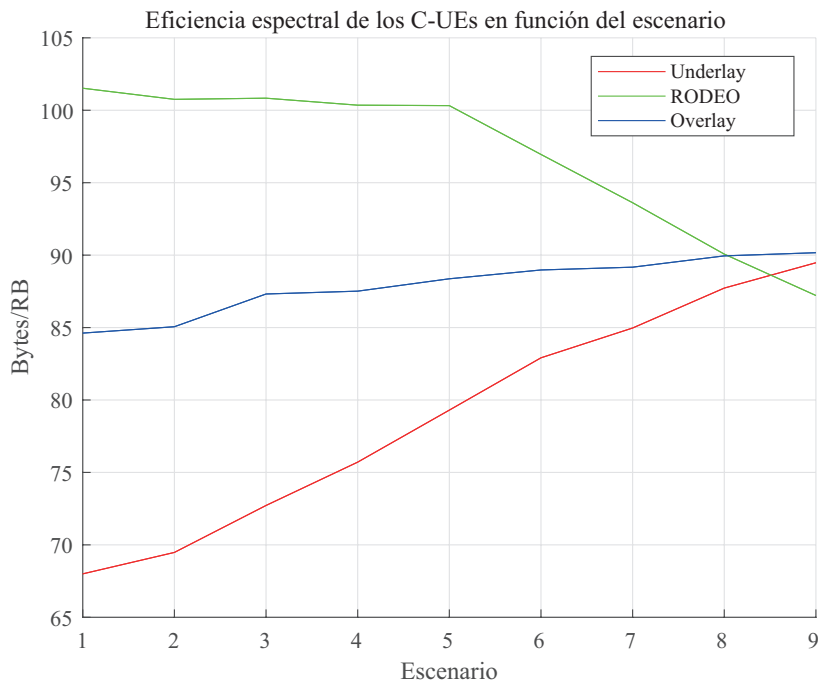
En la Figura 5.11a se presenta esta eficiencia espectral en función del volumen de tráfico generado por los C-UEs. Esta figura muestra que la eficiencia espectral de las soluciones Underlay y Overlay crecen a medida que aumenta el tráfico generado por los C-UEs en la red. Sin embargo, se puede extraer de la figura que la eficiencia espectral que ofrece RODEO a las comunicaciones de los C-UEs decrece a medida que ellos introducen más tráfico en la red. Aún así, en esta gráfica se observa que RODEO ofrece en todos los casos estudiados una eficiencia mayor que las otras soluciones evaluadas.

La Figura 5.11b muestra los resultados de eficiencia espectral de las comunicaciones de los C-UEs en función del escenario valorado. Esta figura muestra como para la mayoría de los escenarios, la eficiencia espectral que ofrece RODEO es superior a la ofrecida por las otras dos soluciones evaluadas ya que es capaz de transmitir más bytes en cada RB. Los casos en los que las otras dos soluciones ofrecen mejor eficiencia espectral es en los escenarios en los que el número de V-UEs es muy bajo.

## 5. Experimentación y resultados



(a) Eficiencia espectral de los C-UEs en función del volumen de tráfico



(b) Eficiencia espectral de los C-UEs en función del escenario

**Figura 5.11:** Resultados de eficiencia espectral de los C-UEs para MPC

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

---

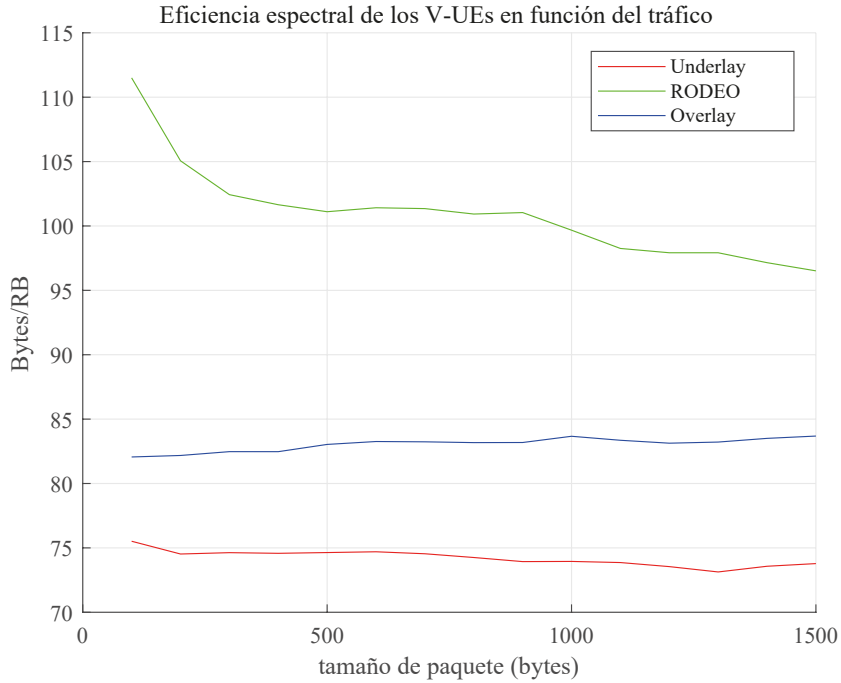
La Figura 5.12 muestra los resultados de eficiencia espectral obtenidos de las comunicaciones de los V-UEs. En la Figura 5.12a se presenta esta eficiencia espectral en función del volumen de tráfico generado por los C-UEs. Esta gráfica evidencia que la eficiencia media ofrecida por RODEO a las comunicaciones de los V-UEs es superior a la ofrecida por las soluciones Overlay y Underlay, siendo esta última la que peores resultados ofrece. Esta gráfica también evidencia que la eficiencia espectral de las comunicaciones de los V-UEs no está directamente relacionada con el volumen de tráfico generado por los C-UEs.

Por otro lado, la Figura 5.12b refleja la eficiencia espectral de las comunicaciones V2V donde se refleja que RODEO es la solución que ofrece mayor eficiencia espectral en todos los escenarios, aunque la eficiencia empeora al disminuir el número de V-UEs en el escenario.

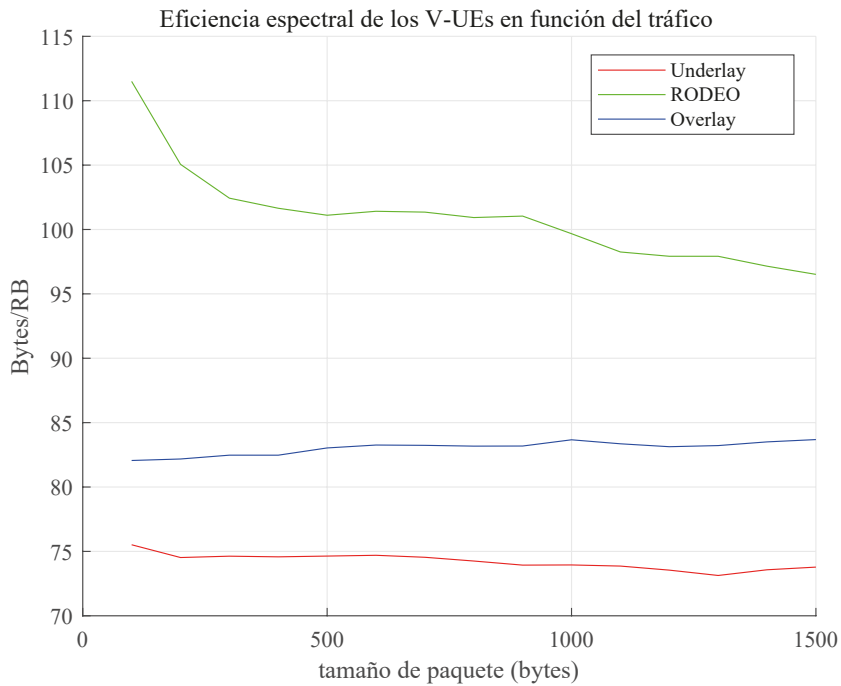
Este análisis finaliza con la Figura 5.13, la cual representa el eficiencia espectral total del conjunto de usuarios. En este caso, la Figura 5.13a muestra los resultados de eficiencia espectral de las 3 metodologías en función del volumen de tráfico transmitido por los C-UEs y se observa que RODEO ofrece los mejores resultados, aunque, a diferencia de la Overlay y Underlay, RODEO empeora su eficiencia espectral a medida que crece el volumen de tráfico generado por los C-UEs.

Al mismo tiempo, la Figura 5.13b muestra en este caso la eficiencia espectral total en función del escenario evaluado. En este caso se observa que RODEO alcanza su valor máximo en el escenario 5, en el cual existe el mismo número de C-UEs y V-UEs, y que la solución Underlay ofrece mejor eficiencia espectral en el Escenario 9, en el cual el número de V-UEs es muy bajo. Esto es así ya que al ser RODEO una solución diseñada para redes vehiculares, en los escenarios en los que hay pocos V-UEs, la eficiencia espectral se reduce considerablemente.

## 5. Experimentación y resultados



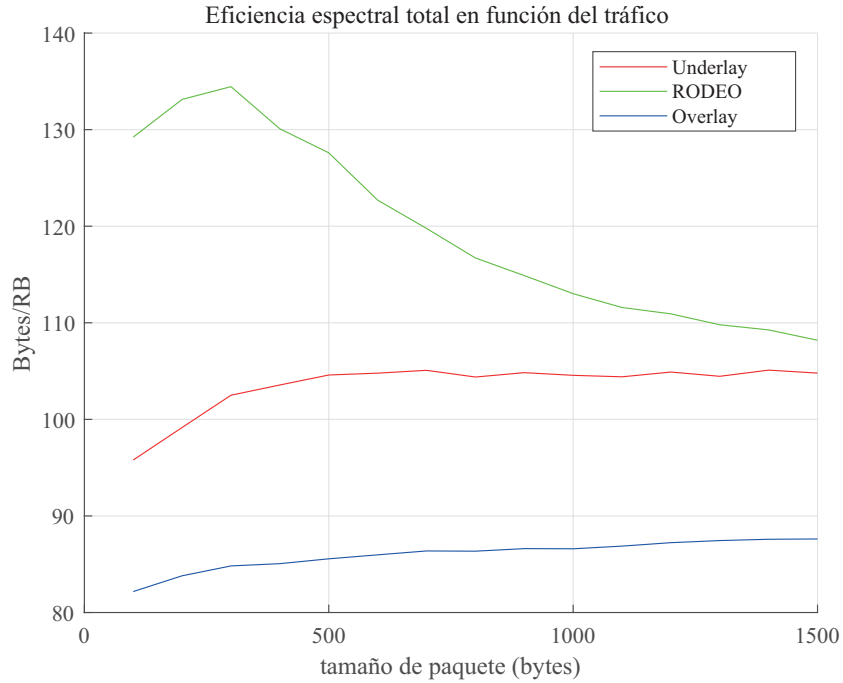
(a) Eficiencia espectral de los V-UEs en función del tipo de tráfico del C-UE



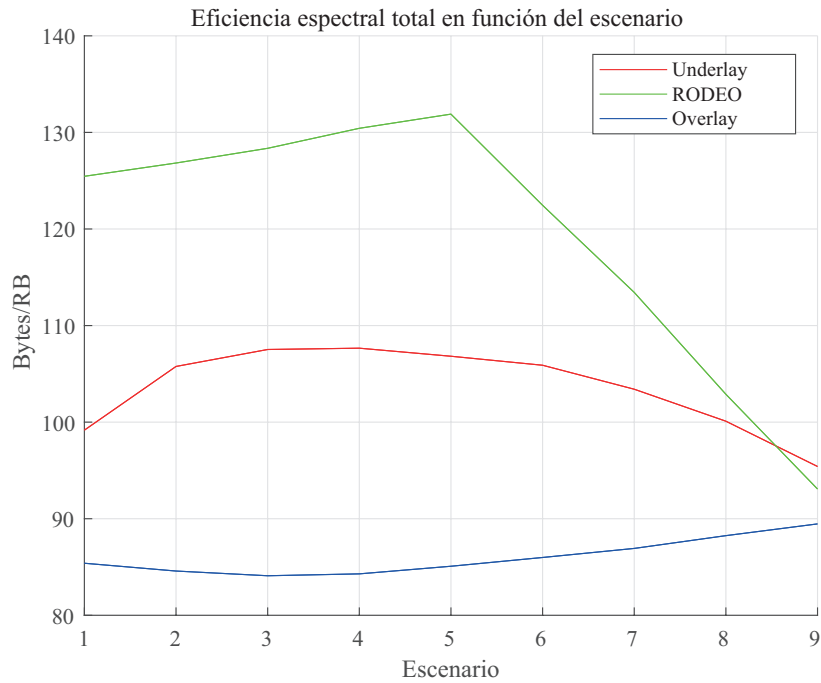
(b) Eficiencia espectral de los V-UEs en función del escenario

**Figura 5.12:** Resultados de eficiencia espectral de los V-UEs para MPC

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC



(a) Eficiencia espectral total en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Eficiencia espectral total en función del escenario

**Figura 5.13:** Resultados de eficiencia espectral total para MPC

## 5. Experimentación y resultados

### 5.4.5 Evaluación de resultados y conclusiones

Esta sección se dedica a recopilar los resultados medios de las métricas evaluadas y las principales conclusiones obtenidas durante la Sección 5.4. De este modo, la Tabla 5.1 presenta los resultados medios alcanzados por las tres metodologías evaluadas para cada una de las métricas definidas en el problema MPC.

Parámetro	Underlay	RODEO	Overlay
Throughput medio C-UEs (bps)	$2,1149 * 10^{10}$	$2,4337 * 10^{10}$	$1,6758 * 10^{10}$
Throughput medio V-UEs (bps)	$8,9375 * 10^9$	$9,5803 * 10^9$	$6,5811 * 10^9$
Throughput medio total (bps)	$3,0087 * 10^{10}$	$3,3917 * 10^{10}$	$2,3339 * 10^{10}$
Rendimiento energético C-UEs (Bytes/Watts)	$3,6416 * 10^{10}$	$3,5140 * 10^{10}$	$3,8880 * 10^{10}$
Rendimiento energético V-UEs (Bytes/Watts)	$9,5099 * 10^{11}$	$1,2239 * 10^{12}$	$1,1198 * 10^{12}$
Rendimiento energético total (Bytes/Watts)	$6,4287 * 10^{10}$	$6,6201 * 10^{10}$	$7,1292 * 10^{10}$
Eficiencia energética C-UEs (Watts/RB)	$5,7676 * 10^{-7}$	$5,6022 * 10^{-7}$	$5,7640 * 10^{-7}$
Eficiencia energética V-UEs (Watts/RB)	$2,0117 * 10^{-8}$	$1,2951 * 10^{-8}$	$1,9937 * 10^{-8}$
Eficiencia energética total (Watts/RB)	$4,8776 * 10^{-7}$	$4,5396 * 10^{-7}$	$3,9014 * 10^{-7}$
Eficiencia espectral C-UEs (Bytes/RB)	78,9371	96,8372	87,9112
Eficiencia espectral V-UEs (Bytes/RB)	74,2130	100,9361	83,0430
Eficiencia espectral total (Bytes/RB)	103,5269	119,3846	86,0127

**Tabla 5.1:** Resumen de los resultados obtenidos para el problema MPC

Gracias a esta tabla, se infiere que la metodología que peores resultados ofrece a sus usuarios es la metodología Underlay. Se concluye también que futuras versiones de RODEO deben prestar atención al rendimiento energético ofrecido a las comunicaciones de los C-UEs, ya que es la metodología que peor resultado ofrece en esta métrica. Comparando RODEO con Overlay se observa que la solución propuesta en este trabajo ofrece mejores resultados en un mayor número de métricas. Aún así, Overlay ofrece mejores resultados totales de rendimiento energético y eficiencia energética, por lo que futuras versiones de RODEO deben tratar de mejorar estas métricas.

Tras el resumen de resultados, a continuación se reúnen las conclusiones obtenidas a partir de cada una de las métricas evaluadas. Así, la evaluación de los resultados de throughput ha desembocado en la obtención de las siguientes conclusiones:

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

---

- El throughput de las comunicaciones de los C-UEs es directamente proporcional al volumen de tráfico generado por los mismos y al número de C-UEs existentes en el escenario
- RODEO es la metodología que ofrece mayor throughput a las comunicaciones de los C-UEs en todos los escenarios y para los volúmenes de tráfico evaluados.
- El throughput alcanzado por las comunicaciones de los V-UEs en las metodologías underlay es independiente del volumen de tráfico generado por los C-UEs.
- El throughput ofrecido por la metodología overlay a las comunicaciones de los V-UEs disminuye a medida que aumenta el throughput solicitado por los C-UEs.
- RODEO es la metodología que proporciona mayor throughput a las comunicaciones V2V para todos los volúmenes de tráfico generados por los C-UEs y en todos los escenarios en los que se ha llevado a cabo la experimentación.
- La mejora ofrecida por RODEO en el throughput de las comunicaciones V2V es más significativa en los escenarios en los que el número de V-UEs es mayor.
- El throughput total del conjunto de usuarios crece a medida que aumenta el tráfico generado por los C-UEs.
- El throughput total alcanza sus valores máximos para las metodologías underlay en los escenarios en los que existe un número similar de C-UEs y V-UEs.
- El throughput total ofrecido por la metodología Overlay crece a medida que aumenta el número de C-UEs en el escenario.
- RODEO es la solución que ofrece mejores resultados de throughput al conjunto global de usuarios.

Del análisis de resultados obtenidos en relación al rendimiento energético se adquieren las siguientes conclusiones:

## 5. Experimentación y resultados

---

- El rendimiento energético de las comunicaciones de los C-UEs aparentemente no depende del volumen de tráfico generado por los C-UEs.
- El rendimiento energético de las comunicaciones de los C-UEs es mínimo para las soluciones underlay en el escenario donde existen el mismo número de C-UEs y V-UEs.
- RODEO es la metodología que peor rendimiento energético ofrece a las comunicaciones de los C-UEs.
- Overlay es la metodología que mejor rendimiento ofrece a las comunicaciones de los C-UEs.
- El rendimiento energético de las comunicaciones V2V aparentemente no depende del volumen de tráfico generado por los C-UEs.
- RODEO es la metodología que ofrece un mejor rendimiento energético a las comunicaciones V2V
- RODEO alcanza valores de rendimiento energético más altos en los escenarios en los que predomina el número de V-UEs.
- El rendimiento energético total de las comunicaciones no depende del volumen de tráfico generado por los C-UEs
- El rendimiento energético total de las comunicaciones disminuye a medida que aumenta el número de V-UEs en el escenario.
- RODEO es la metodología que ligeramente ofrece un mejor rendimiento energético.

A continuación, se indican las conclusiones obtenidas en relación a la eficiencia energética:

- La eficiencia energética de las comunicaciones de los C-UEs aparentemente no tiene ninguna dependencia del tráfico generado por los C-UEs
- La eficiencia energética de las comunicaciones de los C-UEs aparentemente no depende de la proporción de C-UEs/V-UEs existentes en el escenario.

## 5.4 Experimentación y resultados del problema MPC

---

- RODEO es la metodología que ofrece mejores resultados de eficiencia energética a las comunicaciones de los C-UEs.
- La eficiencia energética de las comunicaciones de los V-UEs aparentemente no depende del volumen de tráfico generado por los C-UEs.
- RODEO es la metodología que ofrece mejores resultados de eficiencia energética a las comunicaciones de los V-UEs.
- La eficiencia energética de las comunicaciones de los V-UEs ofrecida por RODEO alcanza su peor resultado en el momento en el que número de C-UEs y V-UEs en el escenario es el mismo.
- La eficiencia energética del conjunto de comunicaciones se ve afectada por el volumen de tráfico generado por los C-UEs en la red, ya que los valores alcanzados por ésta empeoran a medida que aumenta el tráfico generado por los C-UEs en la red
- La eficiencia energética del conjunto de comunicaciones se ve afectada por la proporción C-UEs/V-UEs en el escenario, , ya que los valores alcanzados por esta métrica empeoran a medida que aumenta el número de C-UEs y disminuye el de V-UEs en el escenario.
- Overlay es la metodología que mejor eficiencia energética ofrece al conjunto global de comunicaciones, seguida de RODEO.

Por último, las conclusiones relacionadas con la eficiencia espectral son las siguientes:

- La eficiencia espectral que ofrece RODEO a las comunicaciones de los C-UEs decrece a medida que éstos introducen más carga en la red y a medida que aumenta su número en el escenario
- RODEO es la solución que ofrece mejores resultados de eficiencia espectral a las comunicaciones de los C-UEs para todos los volúmenes de tráfico y para casi todos los escenarios.

## 5. Experimentación y resultados

---

- La eficiencia espectral de las comunicaciones V2V aparentemente no es afectada por el volumen de tráfico que generan los V-UEs, pero si depende del número de V-UEs existentes en el escenario.
- RODEO es la solución que ofrece mejores resultados de eficiencia espectral a las comunicaciones de los V-UEs para todos los volúmenes de tráfico y para todos los escenarios.
- La eficiencia espectral total ofrecida a los usuarios aparentemente no está directamente relacionada con el volumen de tráfico generado por los C-UEs, pero especialmente en RODEO sí está relacionada con el número de V-UEs y C-UEs existentes en el escenario.
- RODEO es la solución que ofrece mejores resultados de eficiencia espectral a las comunicaciones de los C-UEs para todos los volúmenes de tráfico y para todos los escenarios en los que hay un número significativo de V-UEs.

### 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC

Esta Sección muestra y analiza los resultados obtenidos de la experimentación realizada para evaluar el funcionamiento ante el problema SPC de las metodologías de asignación de recursos presentadas en la Sección 5.2. A diferencia del problema MPC en el cual el tráfico generado por los V-UEs era constante, en este caso cada V-UE genera la misma cantidad de tráfico que un C-UE. Al igual que en la Sección 5.4, esta evaluación se realiza desde las tres perspectivas de usuarios y en función de las dos variables presentadas en la Sección 5.3, que son el volumen de tráfico generado por los usuarios y la relación entre el número de C-UEs y V-UEs existentes en el escenario. Así, la evaluación de estos resultados se realiza mediante el análisis del throughput, del rendimiento energético y de la eficiencia radioeléctrica, métricas descritas previamente en misma sección.

#### 5.5.1 Evaluación de los resultados de throughput

En esta sección se analiza el throughput ofrecido a los usuarios por cada una de las metodologías propuestas en función del tipo de escenario evaluado desde las

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC

---

tres perspectivas posibles: la de los C-UEs, la de los V-UEs y la del conjunto de usuarios.

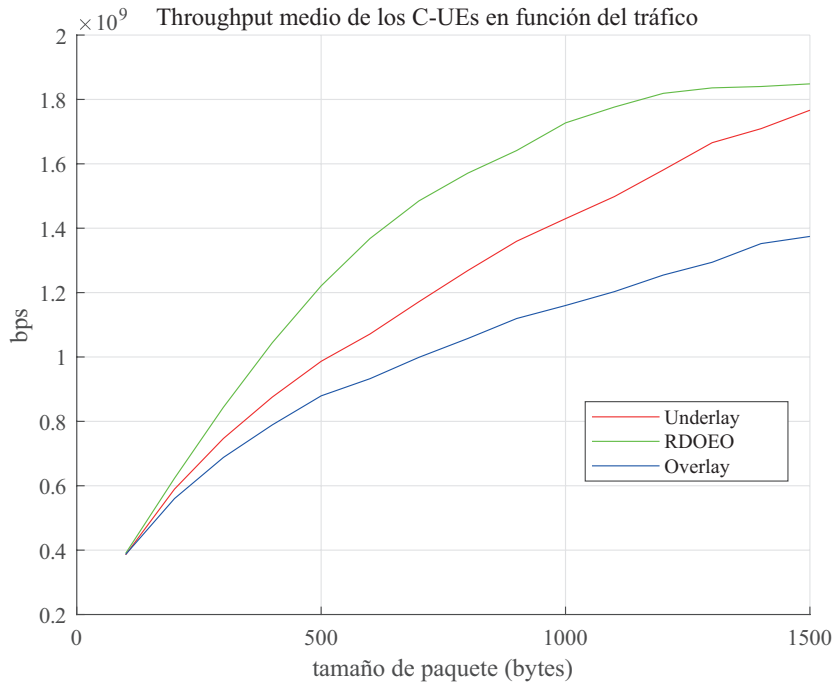
Se inicia el análisis con la Figura 5.14 la cual presenta los resultados de throughput alcanzados por los C-UEs. En la Figura 5.14a se representa esta métrica en función del volumen de tráfico transmitido por los usuarios para cada una de las metodologías evaluadas. Los resultados muestran que RODEO permite a los C-UEs transmitir más información por segundo que lo que ofrecen el resto de metodologías. Esto es así ya que en su diseño RODEO se ha pensado para minimizar la interferencia generada entre las comunicaciones, y es por esto por lo que es capaz de ofrecer más throughput a sus usuarios. Además, esta figura constata que el throughput de los C-UEs crece a medida que éstos generan más tráfico en la red.

La Figura 5.14b muestra los valores medios de throughput ofrecidos a los C-UEs por las tres metodologías evaluadas en función de los múltiples escenarios definidos en la experimentación. En esta figura se observa que RODEO ofrece mayor throughput a los C-UEs en todos los escenarios evaluados y que, además, a medida que aumenta el número de C-UEs en el escenario el throughput que alcanzan los mismos es mayor. El throughput ofrecido por RODEO a los C-UEs es mayor ya que la interferencia con las comunicaciones V2V es menor que en la metodología Underlay y es mayor que la que ofrece la metodología Overlay porque ésta tiene que repartir su espectro entre las comunicaciones de los C-UEs y los V-UEs.

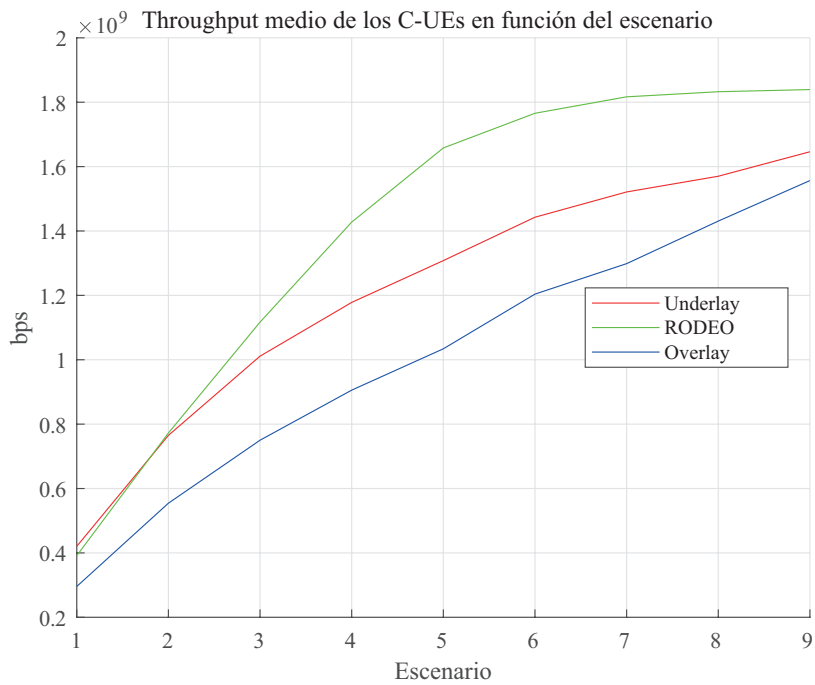
El análisis del throughput ofrecido a los V-UEs por cada una de las metodologías de asignación de recursos radio continúa en la Figura 5.15. Así, en la Figura 5.15a se muestra el throughput alcanzado por los V-UEs en función del volumen de tráfico generado por los usuarios. Estos resultados evidencian que RODEO ofrece mayor capacidad de transmisión de información a los V-UEs que el resto de metodologías. Además, estos resultados demuestran que a medida que aumenta el tráfico generado por los V-UEs, las metodologías ofrecen una mayor capacidad de transmisión para estas comunicaciones V2V.

Por otro lado, la Figura 5.15b demuestra que el throughput que se ofrece a los V-UEs decrece a medida que disminuye el número de los mismos en el escenario. Además, muestra que RODEO ofrece mejor desempeño que las otras dos metodologías evaluadas en todos los escenarios analizados. Esto es así ya que RODEO se

## 5. Experimentación y resultados



(a) Throughput medio de los C-UEs en función del volumen de tráfico



(b) Throughput medio de los C-UEs en función del escenario

**Figura 5.14:** Resultados de throughput de los C-UEs para SPC

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC

---

ha diseñado para dar prioridad a los vehículos frente a las comunicaciones de los C-UEs.

Para finalizar el análisis del throughput ofrecido ante el problema SPC, en la Figura 5.16 se presenta el throughput total conseguido entre el global de usuarios en función del volumen de tráfico generado en la experimentación. De este modo, la Figura 5.16a presenta el throughput total ofrecido por cada una de las metodologías de asignación de recursos evaluada en función del tamaño de paquete transmitido por los usuarios. Esta representación demuestra que RODEO ofrece mayor throughput a sus usuarios que el resto de metodologías. Además, la segunda mejor solución es la metodología Underlay, esto es así ya que al compartir recursos radioeléctricos entre usuarios, éstos son capaces de transmitir más información consumiendo menos recursos radioeléctricos.

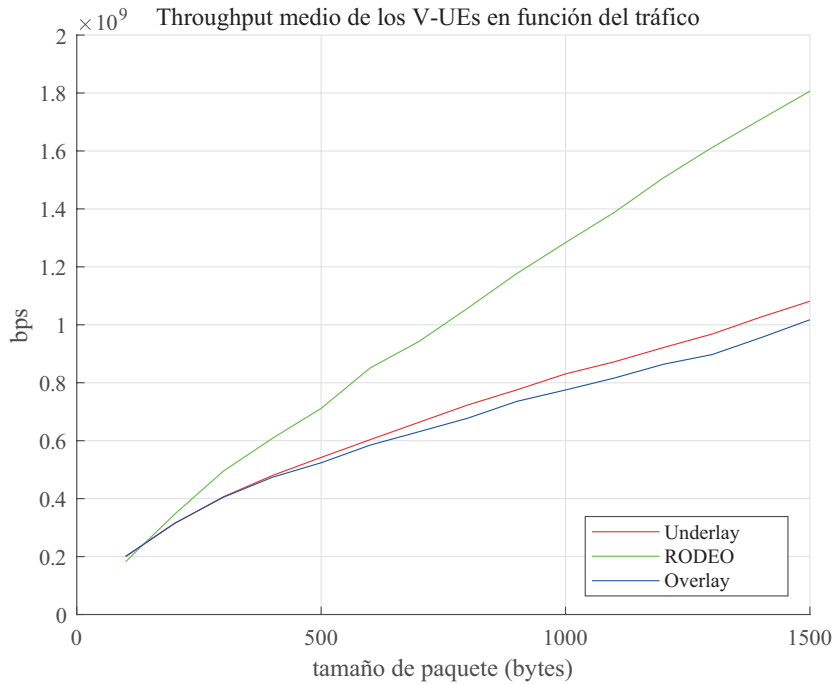
Por último, la Figura 5.16b muestra el throughput medio alcanzado por el conjunto de usuarios en función del escenario evaluado. Así, se observa como RODEO alcanza su valor máximo de throughput en el escenario 5, en el cual existe el mismo número de C-UEs y V-UEs y, por tanto, existe mayor probabilidad de compartición de recursos. Asimismo, esta gráfica vuelve a demostrar desde el punto de vista del throughput, RODEO desempeña la asignación de recursos radioeléctricos mejor que sus oponentes.

### 5.5.2 Evaluación de los resultados de rendimiento energético

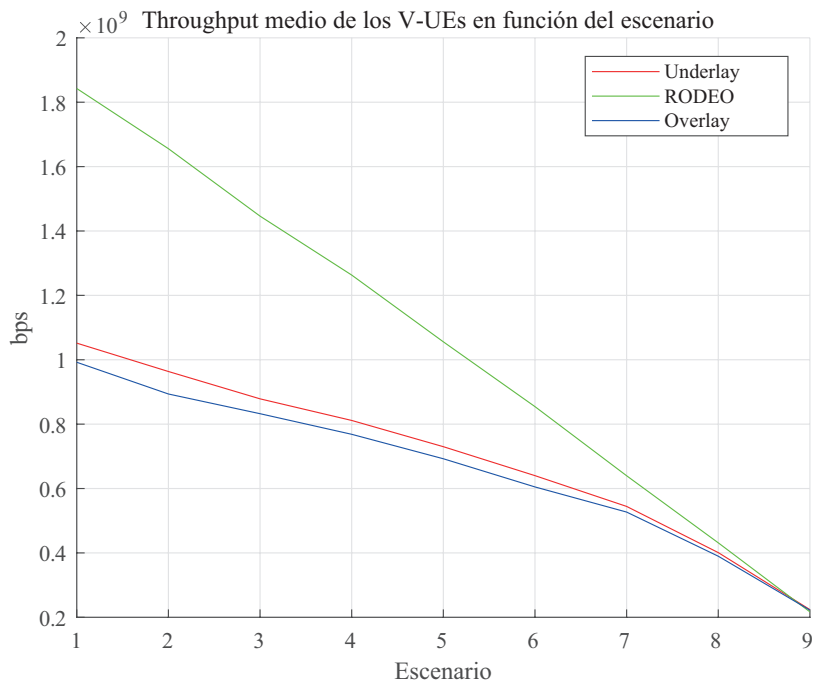
Esta sección se ocupa de mostrar y analizar los resultados de rendimiento energético ofrecido a los usuarios por las tres metodologías evaluadas. Se inicia el análisis evaluando la cantidad de bytes transmitidos por vatio consumido ofrecidos a los C-UEs, tal y como muestra la Figura 5.17. La Figura 5.17a representa los resultados de rendimiento energético alcanzado por los C-UEs para cada una de las metodologías propuestas en función del volumen de tráfico generado por los usuarios. Esta figura muestra que el rendimiento energético ofrecido a los C-UEs por RODEO es menor que el ofrecido por cualquiera de las otras dos alternativas, aunque ésta crece a medida que aumenta el volumen de tráfico generado por los usuarios.

En la misma línea, la Figura 5.17b evidencia que RODEO ofrece peores resultados que las otras dos metodologías en todos los casos y que la metodología

## 5. Experimentación y resultados



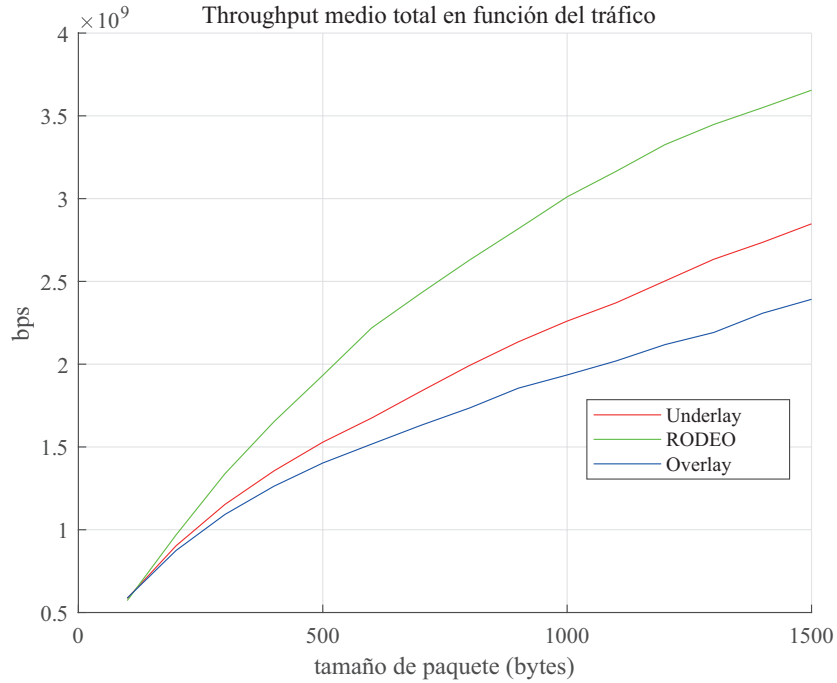
(a) Throughput medio de los V-UEs en función del volumen de tráfico



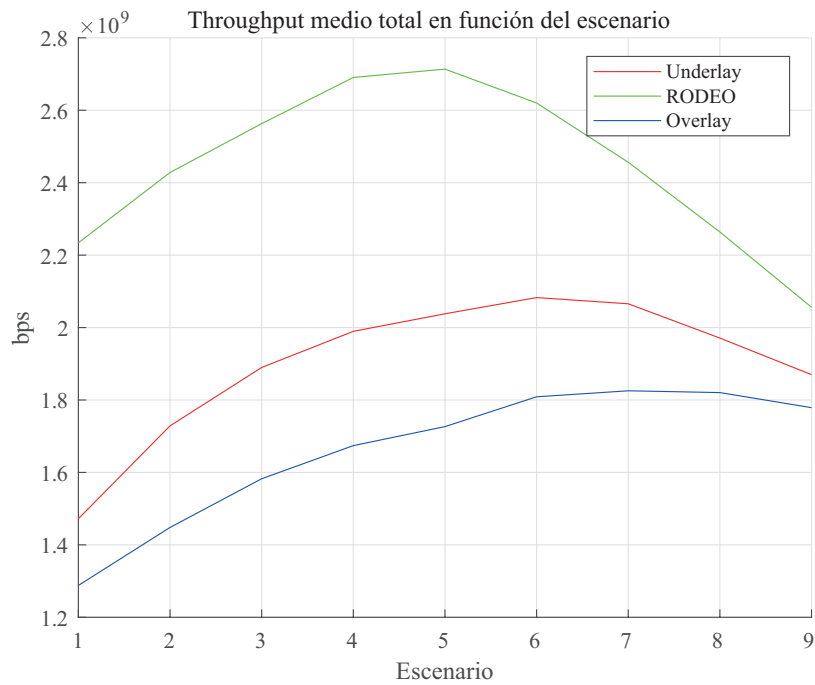
(b) Throughput medio de los V-UEs en función escenario

**Figura 5.15:** Resultados de throughput de los V-UEs para SPC

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC



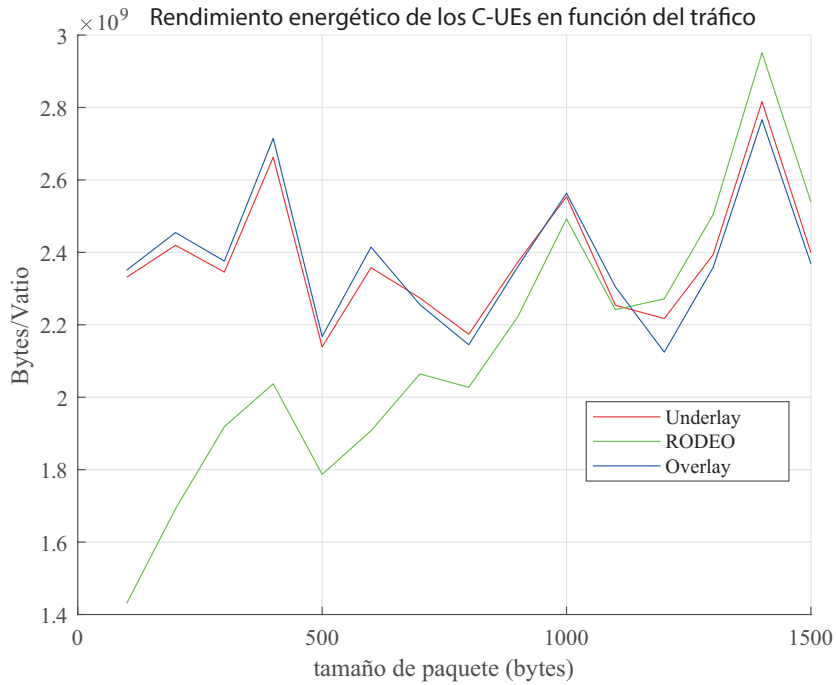
(a) Throughput medio en función del volumen de tráfico



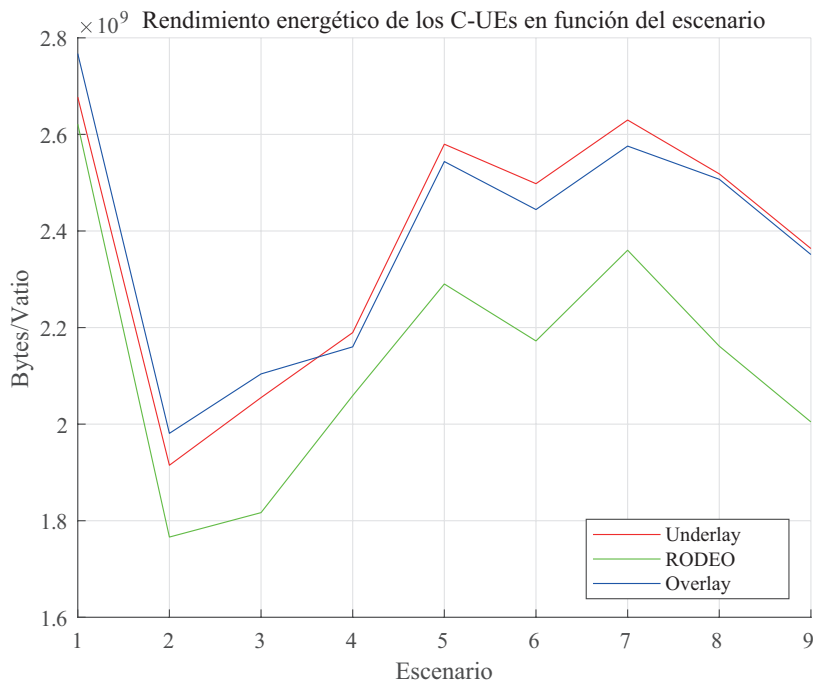
(b) Throughput medio en función del escenario

**Figura 5.16:** Resultados de throughput total para SPC

## 5. Experimentación y resultados



(a) Rendimiento energético de los C-UEs en función del volumen de tráfico



(b) Rendimiento energético de los C-UEs en función del escenario

**Figura 5.17:** Resultados de rendimiento energético de los C-UEs para SPC

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC

---

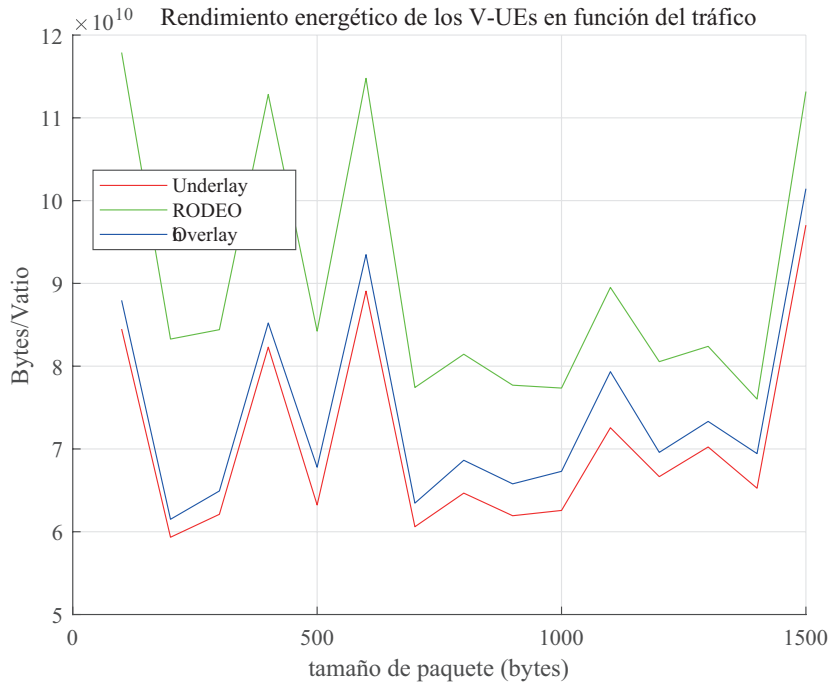
Underlay y Overlay ofrecen unos resultados muy similares. Asimismo, esta figura refleja que los valores mínimos de rendimiento energético alcanzados por las tres metodologías ocurren en el escenario 5. Esto es lógico ya que en el escenario 5 al haber el mismo número de C-UEs que de V-UEs la interferencia que se genera entre ellos es máxima, y por tanto, los C-UEs tienen que transmitir con mayores potencias para alcanzar los mismos valores de throughput. Esto es, para que un byte llegue correctamente a su destino, en el Escenario 5 los C-UEs necesitan transmitir con mayor potencia.

A continuación, en la Figura 5.18 se representan los resultados de rendimiento energético de los V-UEs obtenidos para cada una de las metodologías de asignación de recursos valoradas. La Figura 5.18a representa los resultados de rendimiento obtenidos por los V-UEs en función del volumen de tráfico transmitido por los usuarios. Esta figura muestra que RODEO ofrece mejor rendimiento energético a los V-UEs que el resto de las metodologías. Es decir, es capaz de transmitir más bytes consumiendo la misma potencia que el resto de metodologías. De esta figura también se extrae que la solución Underlay es la que peor rendimiento energético ofrece a los V-UEs.

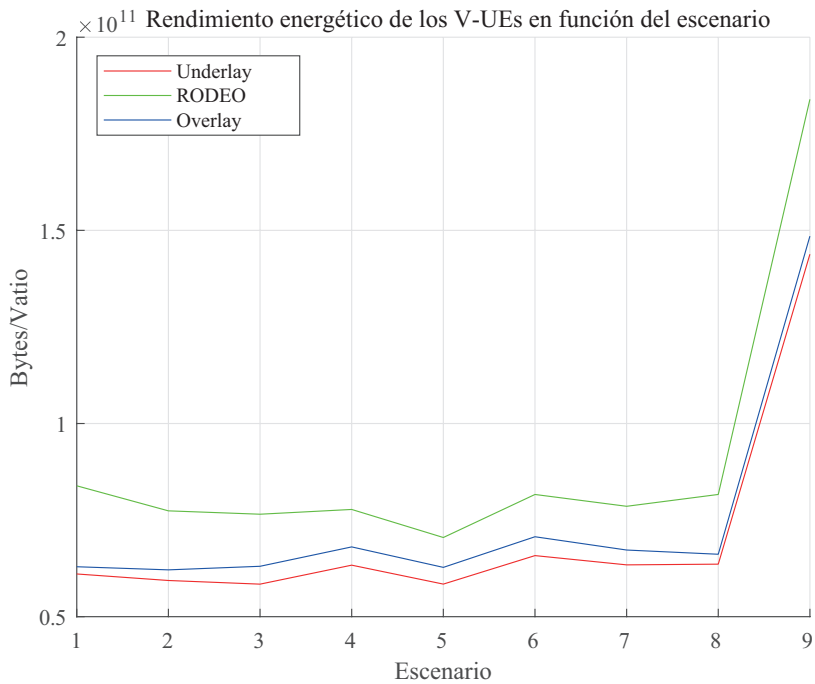
Los resultados del rendimiento energético de los V-UEs en función del escenario evaluado son mostrados en la Figura 5.18b. Estos resultados evidencian que RODEO también ofrece mejor funcionamiento en todos los escenarios. Además, se observa que el rendimiento energético aumenta considerablemente en los escenarios 8 y 9 en los cuales se reduce el número de V-UEs. Esto se debe a que el número de emparejamientos es menor, y por tanto, éstos son mejores.

Para finalizar esta evaluación del rendimiento energético de las comunicaciones ante el problema SPC, la Figura 5.19 representa los resultados obtenidos valorando el conjunto global de usuarios del sistema. Así, la Figura 5.19a representa los resultados del rendimiento energético medio alcanzado por el conjunto de comunicaciones establecidas en la simulación. Esta figura muestra que el rendimiento de RODEO incrementa a medida que incrementa el tráfico que generan los usuarios en la red. Esto se debe a que ante el problema SPC RODEO maximiza la potencia para alcanzar mayor throughput en ambas comunicaciones. Así, aun cuando se transmite poca información, la potencia de transmisión de RODEO es alta. Por lo tanto, observando los resultados se puede concluir que RODEO ofrece mejor rendimiento

## 5. Experimentación y resultados



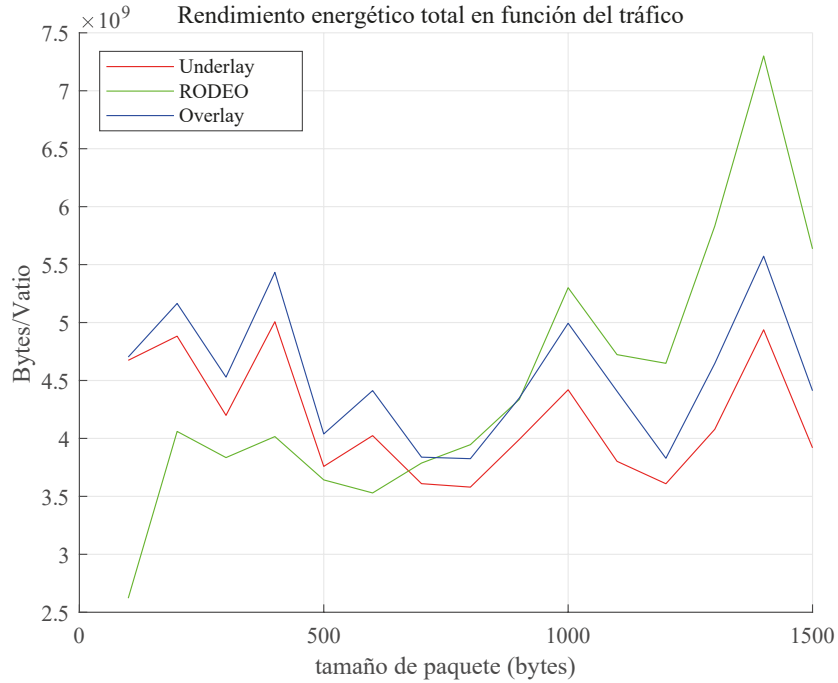
(a) Rendimiento energético de los V-UEs en función del volumen de tráfico transmitido



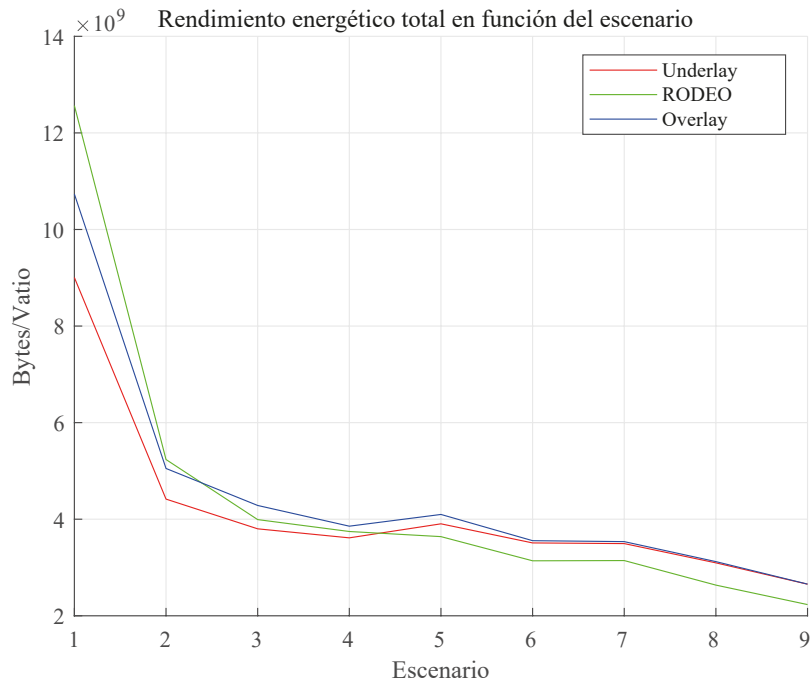
(b) Rendimiento energético de los V-UEs en función del escenario

**Figura 5.18:** Resultados del rendimiento energético de los V-UEs para SPC

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC



(a) Rendimiento medio total en función del volumen de tráfico transmitido



(b) Rendimiento medio total en función del escenario

**Figura 5.19:** Resultados de rendimiento energético total para SPC

## 5. Experimentación y resultados

---

energético cuando el tráfico de la red es elevado. Asimismo, se observa como las soluciones Underlay y Overlay ofrecen un rendimiento energético similar.

Por último, la Figura 5.19b muestra el rendimiento energético de los usuarios representado en función del escenario evaluado. Esta gráfica demuestra que el rendimiento de RODEO es mayor en los escenarios en los cuales predomina el número de V-UES frente al número de C-UEs.

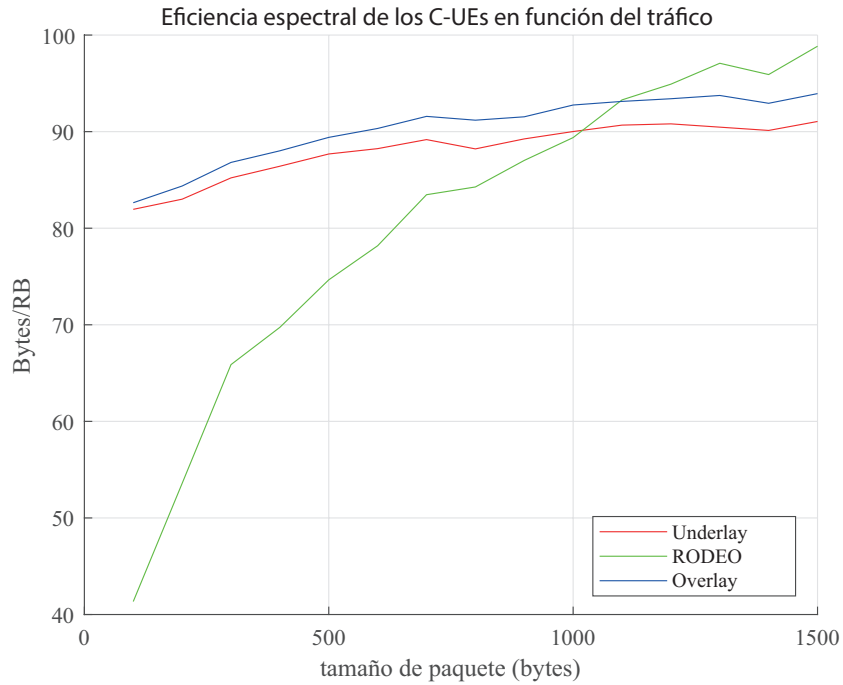
### 5.5.3 Evaluación de los resultados de eficiencia espectral

Esta sección se dedica a presentar y evaluar los resultados de eficiencia obtenidos en la experimentación, entendiendo la eficiencia como el número de bytes transmitidos por RB. Así, el análisis comienza en la Figura 5.20 evaluando la eficiencia de las comunicaciones de los C-UEs para el problema SPC. La Figura 5.20a muestra los resultados obtenidos de eficiencia en función del volumen de tráfico generado por los usuarios. Esta gráfica evidencia que las metodologías Underlay y Overlay con las que se compara RODEO ofrecen unas comunicaciones mucho más eficientes a los C-UEs que RODEO. Esto es así porque RODEO se centra en optimizar las comunicaciones de los V-UEs y, por el contrario, las metodologías Underlay y Overlay se focalizan en optimizar las comunicaciones de los C-UEs. Aun así, se observa que la eficiencia de RODEO crece a medida que el volumen de tráfico generado por los usuarios aumenta.

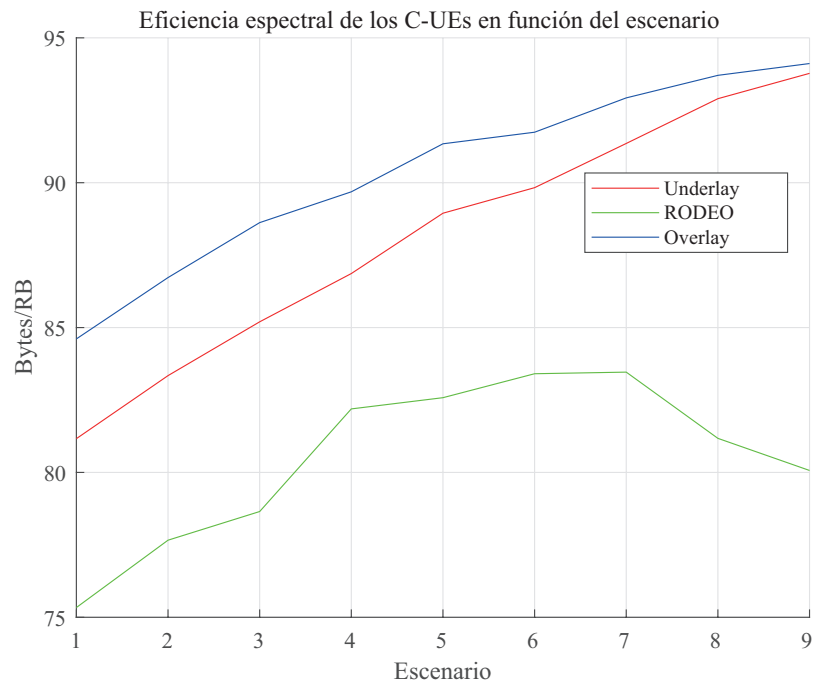
La Figura 5.20b también muestra que RODEO es el menos eficiente en todos los escenarios evaluados y que la metodología overlay es la que mejores resultados de eficiencia espectral ofrece. Esto es lógico ya que en la solución overlay, cada usuario tiene su propio RB para transmitir por lo que no tiene que preocuparse de las interferencias generadas por la compartición de recursos radioeléctricos.

Tras observar el mal desempeño de RODEO en las comunicaciones de los C-UEs, en la Figura 5.21 se presentan los resultados de eficiencia de las comunicaciones V2V. Así, la Figura 5.21a demuestra que en el caso de las comunicaciones de los V-UEsk, RODEO ofrece mejor eficiencia radioeléctrica que las otras dos metodologías evaluadas independientemente del volumen de tráfico generado por los usuarios.

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC



(a) Eficiencia espectral de los C-UEs en función del volumen de tráfico



(b) Eficiencia espectral de los C-UEs en función del escenario

**Figura 5.20:** Resultados de eficiencia espectral de los C-UEs para SPC

## 5. Experimentación y resultados

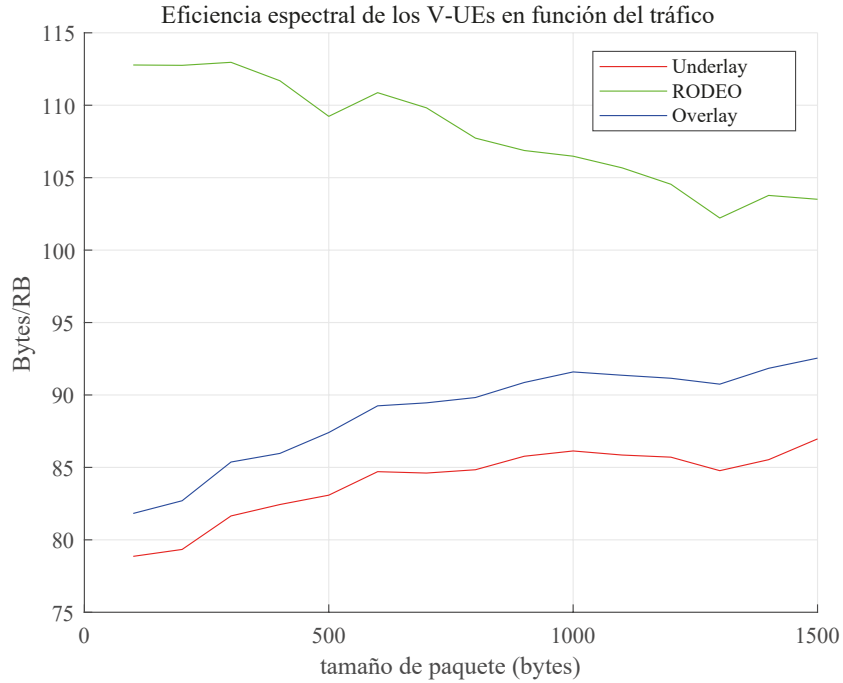
---

Por otro lado, la Figura 5.21b muestra los resultados de eficiencia espectral de las comunicaciones V2V en los distintos escenarios. Esta gráfica revela que para estas comunicaciones el desempeño radioeléctrico de RODEO es mayor que el alcanzado por las otras dos metodologías en todos los escenarios evaluados. Asimismo, esta gráfica desvela que la eficiencia radioeléctrica que ofrece RODEO decrece a medida que disminuye el número de V-UEs en el escenario.

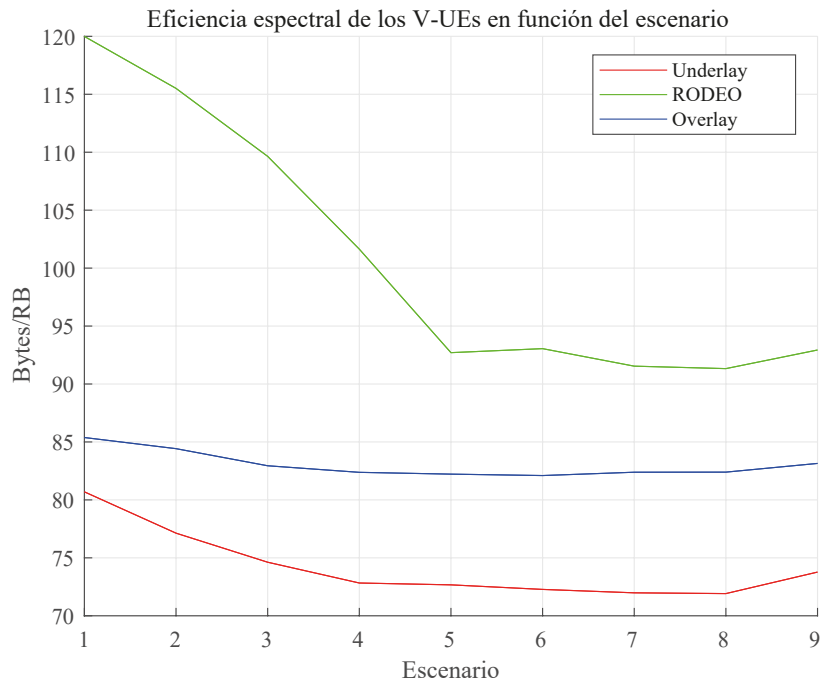
Por último, en la Figura 5.22 se presentan los resultados de eficiencia ofrecidos al conjunto de usuarios. En la Figura 5.22a se muestra cómo varía la eficiencia radioeléctrica en función del volumen de tráfico generado por los usuarios. Esta gráfica muestra que RODEO aumenta la eficiencia ofrecida a sus usuarios a medida que el volumen de tráfico generado por los mismos crece. También se observa que la metodología Underlay ofrece mejores resultados de eficiencia radioeléctrica que la metodología Overlay. Esto es así ya que en un mismo RB la metodología Underlay puede transmitir información de un C-UEs y un V-UEs simultáneamente.

De igual manera, la Figura 5.22b muestra estos resultados de eficiencia en función del escenario evaluado, donde se percibe que RODEO ofrece mayor eficiencia al global de usuarios que el resto de metodologías siempre y cuando el número de V-UEs sea mayor que el de C-UEs. En el resto de los casos, las otras dos metodologías con las que se compara ofrecen mejor eficiencia radioeléctrica.

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC



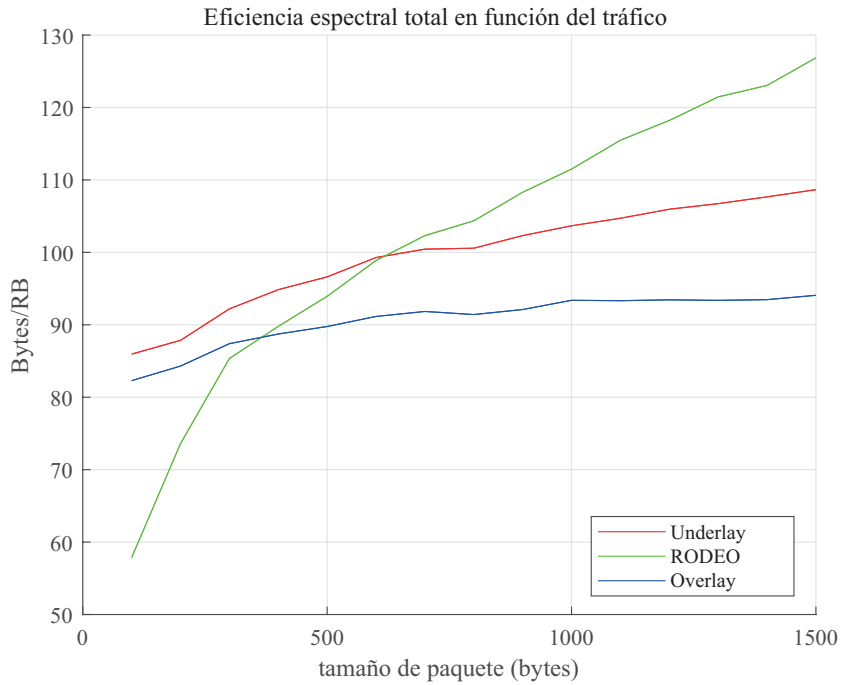
(a) Eficiencia espectral de los V-UEs en función del volumen de tráfico generado



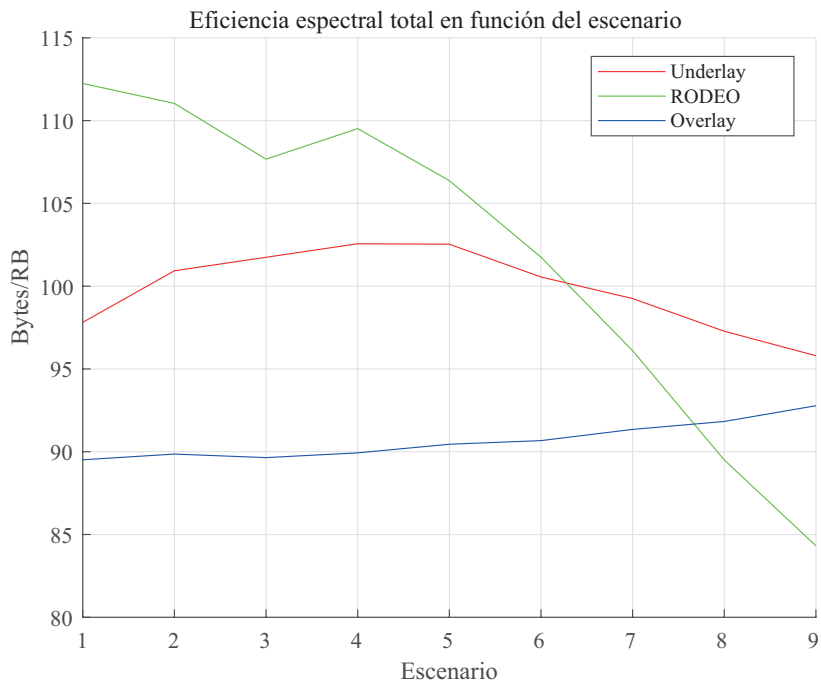
(b) Eficiencia espectral de los V-UEs en función del escenario

**Figura 5.21:** Resultados de eficiencia espectral de los V-UEs para SPC

## 5. Experimentación y resultados



(a) Eficiencia media total en función del tipo de tráfico del C-UE



(b) Eficiencia media total en función del escenario

**Figura 5.22:** Resultados del eficiencia espectral total para SPC

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC

### 5.5.4 Evaluación de resultados y conclusiones

Esta apartado se encarga de recopilar los resultados presentados a lo largo de la Sección 5.5 y de discutir las conclusiones obtenidas a lo largo de la misma. Por tanto, la Tabla 5.2 presenta los resultados medios alcanzados por las tres metodologías evaluadas para cada una de las métricas definidas en el problema SPC.

Parámetro	Underlay	RODEO	Overlay
Throughput medio C-UEs (bps)	$1,2070 * 10^9$	$1,4023 * 10^9$	$1,0033 * 10^9$
Throughput medio V-UEs (bps)	$6,9383 * 10^8$	$1,0451 * 10^9$	$6,5811 * 10^8$
Throughput medio total (bps)	$1,9008 * 10^9$	$2,4474 * 10^9$	$1,6614 * 10^9$
Rendimiento energético C-UEs (Bytes/Watts)	$2,3807 * 10^9$	$2,1391 * 10^9$	$2,3816 * 10^9$
Rendimiento energético V-UEs (Bytes/Watts)	$7,0804 * 10^{10}$	$9,0200 * 10^{10}$	$7,4611 * 10^{10}$
Rendimiento energético total (Bytes/Watts)	$4,1662 * 10^9$	$4,4809 * 10^9$	$4,5436 * 10^9$
Eficiencia radioeléctrica C-UEs (Bytes/RB)	88,1526	80,5037	90,3858
Eficiencia radioeléctrica V-UEs (Bytes/RB)	84,0173	108,0614	88,7930
Eficiencia radioeléctrica total (Bytes/RB)	99,8301	102,0588	90,6697

**Tabla 5.2:** Resumen de los resultados obtenidos para el problema SPC

Los valores medios recogidos en la tabla evidencian que RODEO es la metodología que ofrece mayor throughput en todos los casos y que la metodología Overlay es la que menor throughput ofrece a sus usuarios. Analizando el rendimiento energético se observa que RODEO ofrece un rendimiento energético muy alto a los V-UEs pero el bajo rendimiento energético ofrecido a los C-UEs hace que sea la metodología Overlay la que mejor rendimiento energético ofrezca al conjunto global de usuarios. Y, por último, a pesar de que RODEO ofrece una baja eficiencia radioeléctrica a las comunicaciones de los C-UEs, los buenos resultados de eficiencia radioeléctrica que ofrece a los V-UEs hacen que en el conjunto global RODEO sea la solución que alcance una mayor eficiencia radioeléctrica.

Para finalizar con el análisis de la experimentación frente al problema SPC, a continuación se recopilan las conclusiones obtenidas de cada una de las métricas evaluadas en esta sección. El análisis de los resultados de throughput ha desembocado en la obtención de las siguientes conclusiones:

- El throughput de las comunicaciones de los C-UEs es directamente proporcional al volumen de tráfico generado por los mismos y al número de C-UEs existentes en el escenario

## 5. Experimentación y resultados

---

- RODEO es la metodología que ofrece mayor throughput a las comunicaciones de los C-UEs en todos los escenarios y para los volúmenes de tráfico evaluados.
- El throughput alcanzado por las comunicaciones de los V-UEs crece a medida que aumenta el tráfico generado por los mismos y decrece a medida que disminuye el número de V-UEs en el escenario.
- RODEO es la metodología que proporciona mayor throughput a las comunicaciones V2V para todos los volúmenes de tráfico generados por el conjunto de usuarios y en todos los escenarios en los que se ha llevado a cabo la experimentación.
- La mejora ofrecida por RODEO en el throughput de las comunicaciones V2V es más significativa en los escenarios en los que el número de V-UEs es mayor.
- El throughput total del conjunto de usuarios crece a medida que aumenta el tráfico generado por los mismos.
- RODEO es la solución que ofrece mejores resultados de throughput al conjunto global de usuarios y ofrece sus mejores valores en los escenarios donde el número de C-UEs y V-UEs es similar.
- Las soluciones underlay ofrecen mejores resultados que la solución Overlay para todos los volúmenes de tráfico generados por los usuarios y en todos los escenarios evaluados.

Del análisis de resultados obtenidos en relación al rendimiento energético se adquieren las siguientes conclusiones:

- El rendimiento energético de las comunicaciones de los C-UEs aparentemente no depende del volumen de tráfico generado por los usuarios ni del escenario evaluado
- RODEO es la metodología que peor rendimiento energético ofrece a las comunicaciones de los C-UEs.

## 5.5 Experimentación y resultados del problema SPC

---

- El rendimiento energético de las comunicaciones V2V aparentemente no depende del volumen de tráfico generado por los C-UEs.
- RODEO es la metodología que ofrece un mejor rendimiento energético a las comunicaciones V2V
- RODEO alcanza valores de rendimiento energético más altos en los escenarios en los que predomina el número de V-UEs.
- El rendimiento energético total de las comunicaciones no depende del volumen de tráfico generado por los C-UEs
- El rendimiento energético total de las comunicaciones disminuye a medida que aumenta el número de V-UEs en el escenario.
- RODEO es la metodología que ligeramente ofrece un mejor rendimiento energético.

Por último, las conclusiones obtenidas en relación a la eficiencia radioeléctrica se indican a continuación:

- La eficiencia radioeléctrica de las comunicaciones de los C-UEs sigue una tendencia creciente a medida que aumenta el tráfico generado por los usuarios. Esta tendencia es mucho más pronunciada en el caso de RODEO.
- La eficiencia radioeléctrica de las comunicaciones de los C-UEs para las soluciones Underlay y Overlay sigue una tendencia creciente a medida que aumenta el número de C-UEs en el escenario.
- RODEO es la metodología que peores resultados de eficiencia radioeléctrica ofrece para las comunicaciones de los C-UEs.
- La eficiencia radioeléctrica de las comunicaciones de los V-UEs está directamente relacionada con el tráfico generado por los usuarios. Sin embargo, en el caso de las soluciones Underlay y Overlay, el número de bytes que transmiten por RB crece a medida que aumenta el volumen de tráfico en la red y en RODEO aparentemente decrece con el aumento del tráfico.

## 5. Experimentación y resultados

---

- RODEO es la metodología que ofrece mejores resultados de eficiencia radioelétrica a las comunicaciones de los V-UEs.
- La eficiencia radioelétrica de las comunicaciones de los V-UEs decrece a medida que disminuye el número de V-UEs en el escenario.
- La eficiencia radioelétrica de las comunicaciones de los V-UEs ofrecida por RODEO alcanza su peor resultado en el momento en el que número de C-UEs y V-UEs en el escenario es el mismo.
- La eficiencia radioelétrica del conjunto de comunicaciones crece a medida que aumenta el tráfico en la red
- La eficiencia radioelétrica ofrecida por RODEO mejora sustancialmente a medida que aumenta el volumen de tráfico generado por los usuarios es alto.
- RODEO es la solución que mejor eficiencia energética ofrece en todos los escenarios donde el número de V-UEs es mayor que el número de C-UEs.

*Si crees que puedes,  
ya estás a medio camino.*

Theodore Roosevelt

# 6

## Conclusiones y líneas futuras

**E**n este documento se han descrito minuciosamente las actividades realizadas durante el transcurso de esta tesis doctoral. En el primer capítulo se introduce al lector en la problemática y el interés científico y social que han provocado su desarrollo. Además, este primer capítulo introductorio presenta la hipótesis a validar durante este trabajo y la metodología de investigación que se ha llevado a cabo durante el mismo. Con los capítulos 2 y 3 se ha contextualizado e introducido al lector en el complejo mundo de las comunicaciones vehiculares y de sus limitaciones, permitiendo así presentar las mejoras que éstas pueden ofrecer al futuro coche autónomo. Tras el minucioso análisis de la literatura relacionada, se ha procedido a la descripción la metodología propuesta para verificar la hipótesis planteada. A continuación, se ha dado paso a la experimentación correspondiente, cuyo análisis de los resultados obtenidos han derivado en el cumplimiento de los objetivos definidos y en la validación de la hipótesis impuesta.

Este último capítulo se centra en remarcar las conclusiones obtenidas de la investigación y propone las líneas futuras de investigación necesarias para el despliegue de las comunicaciones vehiculares. Así, la primera parte del capítulo se centra en presentar las conclusiones generales (sección A.1), tanto las relacionadas con la metodología de asignación de recursos propuesta, como las vinculadas a la tesis co-

## 6. Conclusiones y líneas futuras

---

mo concepto genérico. Finalmente, se enuncian las líneas futuras de investigación (sección A.2), donde se presentarán por un lado las relacionadas con la asignación de recursos radio en redes celulares, así como algunas líneas de investigación necesarias para el despliegue de las comunicaciones vehiculares y su cooperación con el coche autónomo.

### 6.1 Aportaciones y conclusiones generales

La principal contribución de esta tesis es la metodología de asignación de recursos radio para redes vehiculares denominada RODEO, la cual soluciona la asignación de recursos en escenarios donde coexisten usuarios celulares comunes y vehículos. El fin de RODEO, al igual que el de todas las metodologías de asignación de recursos, es satisfacer los requisitos de calidad de servicio de los enlaces de comunicaciones de todos los usuarios, tanto celulares como vehiculares. Sin embargo, su diseño es particular ya que se centra especialmente en los requisitos de servicio necesarios para el despliegue de aplicaciones en sistemas de transporte inteligente cooperativo o C-ITS.

A su vez, RODEO busca optimizar el uso del espectro radioeléctrico ya que éste es un bien escaso y limitado. Por lo tanto, los procesos que describe se basan en una red underlay en la cual, gestionando las potencias de transmisión de los consumidores, usuarios celulares comunes y vehículos pueden transmitir en el mismo intervalo frecuencia-tiempo, conocido como Resource Block (RB). Por tanto, el objetivo final de RODEO es tratar de utilizar el mínimo número de RBs satisfaciendo la calidad de servicio demandada por las aplicaciones del conjunto global de usuarios.

Dado que la peculiaridad de RODEO es dar prioridad a las comunicaciones de los vehículos para el despliegue de las aplicaciones de C-ITS, y asumiendo que el objetivo de las comunicaciones de los usuarios comunes siempre es alcanzar el máximo throughput posible en función de las necesidades, la experimentación llevada a cabo se ha centrado en validar dos problemas principales:

- SPC - Sum-rate-oriented Power Control: cuando el vehículo solicita recursos para transmitir mensajes de infotainment, y por tanto, el objetivo es maximizar el throughput total de ambas comunicaciones.

## 6.1 Aportaciones y conclusiones generales

---

- MPC - Minimum-rate-oriented Power Control: cuando el V-UE necesita recursos para transmitir mensajes de seguridad o mensajes CAM. En este caso, el objetivo es maximizar el throughput usuario común y minimizar el del vehículo pero siempre cumpliendo con los requisitos mínimos de calidad de servicio que permitan en ambos casos obtener enlaces satisfactorios.

Respecto a la experimentación llevada a cabo, RODEO se ha comparado con dos metodologías diferentes:

- Una metodología de comunicaciones V2V underlay que sigue la misma filosofía de reutilización de recursos que RODEO y permite comparar de manera justa ambas metodologías,
- Una metodología de comunicaciones V2V overlay que sigue la misma filosofía por la cual se ha decantado el 3GPP para la estandarización de las comunicaciones LTE-V2X y, por tanto, permite comparar ambas filosofías de asignación de recursos radio.

Una vez detalladas todas las aportaciones presentadas en esta tesis, conviene resumir las contribuciones realizadas durante el transcurso de este trabajo a la comunidad científica.

La primera contribución del trabajo desarrollado en esta tesis se presentó y publicó en el Vehicular Networking Conference 2016 (VNC 2016) el artículo titulado “Efficient cluster-based resource allocation for co-existing vehicle and cellular user”[de la Iglesia 16]. La presentación del citado artículo en esta destacada conferencia dentro del mundo de las redes vehiculares sirvió para validar el interés en la metodología dentro de la comunidad y recibir interesantes aportaciones e ideas de mejora.

La contribución más destacable de esta tesis es la solicitud de patente europea realizada con el título “Procedure for managing radioelectric resources in 5G cellular networks for reuse of resources in vehicle-to-vehicle communications”, la cual todavía se encuentra en proceso de verificación. La segunda aportación más relevante es la publicación del artículo titulado “Smart Bandwidth Assignment in an Underlay Cellular Network for Internet of Vehicles”[de la Iglesia 17] en la revista Sensors la cual es una revista JCR del primer cuartil con un factor de impacto

## 6. Conclusiones y líneas futuras

---

en el año 2017 de 2.677. El trabajo realizado en este artículo fue presentado en el Workshop on Wireless Vehicular Communications, WWVC 2017.

Asimismo, a finales de mayo de 2018 se envió un artículo a la conferencia UCAmI 2018: 12th International Conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence titulado “RODEO: a novel methodology to perform V2V communications in the scope of Internet of Vehicles. An energy performance analysis”, en el que se presentan los resultados de RODEO que no se habían publicado en la revista Sensors.

Otro de los méritos alcanzados gracias al desarrollo de este trabajo es la estancia de 6 meses llevada a cabo en Nokia Bell Labs (NBL) en Breslavia (Polonia). Esta estancia significó un gran avance en el desarrollo de esta tesis gracias a las ideas y aportes técnicos realizados por el supervisor y los compañeros de NBL. El grupo de comunicaciones V2X formaba parte del grupo de investigación de 5G, en el cual me integraron como si fuera uno más del equipo. Gracias a esta acogida pude colaborar en propuestas de proyectos, estar al tanto de los proyectos de investigación en los que colabora NBL, participar en reuniones de brainstorming para desarrollo de patentes, asistir y presentar en conferencias y eventos demos desarrolladas en NBL, etc. Por ejemplo, uno de los proyectos en los que colaboré estaba relacionado con el uso de redes 5G para la aplicación de platooning. Para este proyecto NBL había desarrollado una demo la cual yo presenté en el Nokia Bell Labs InnoDay 2017 [Wroclaw 17b], en la conferencia code::dive 2017 [Wroclaw 17a] y en el VNC 2017 [Ochocki 16].

Gracias al trabajo realizado durante la estancia en NBL sobre platooning, se ha iniciado una colaboración con el grupo RISE SICS Swedish en la cual se está trabajando en un artículo titulado “Platooning Applications: Communication Challenges and Open Issues”, que será enviado a la revista IEEE Communications Surveys and Tutorials a principios de octubre de 2018. En este trabajo se aporta principalmente el conocimiento adquirido sobre las capacidades que 5G puede aportar a la aplicación platooning y se realiza una comparativa con la otra tecnología alternativa, IEEE 802.11p.

Después de haber mencionado las principales aportaciones de esta tesis, las conclusiones que pueden extraerse en relación al trabajo realizado son las siguien-

## 6.1 Aportaciones y conclusiones generales

---

tes. Conviene aclarar que estas conclusiones han conducido al cumplimiento de la hipótesis y los objetivos planteados en la sección 1.2:

- La experimentación realizada ha demostrado que la particular estrategia de adaptación de potencias de transmisión en función de la distancia entre los usuarios compartidores de recursos junto con la meta-heurística utilizada para la selección de parejas, son elementos que mejoran la calidad media de las soluciones obtenidas frente a las logradas por el resto de técnicas utilizadas.
- De acuerdo con la experimentación llevada a cabo en este estudio, puede observarse cómo RODEO mejora de forma amplia los resultados de throughput ofrecidos a cada usuario en comparación con las demás técnicas empleadas. Esta mejora se manifiesta en los 2 problemas evaluados.
- En lo relacionado a la eficiencia espectral, RODEO destaca sobre el resto de alternativas en ambos problemas evaluados, consiguiendo transmitir mayor cantidad de datos utilizando el mismo número de RBs. Como bien se ha remarcado en apartados anteriores, al ser el espectro un recurso limitado, esta característica es especialmente apreciada en situaciones del mundo real.
- En términos de eficiencia energética se consiguen alcanzar resultados prometedores en el problema MPC tanto para las comunicaciones de los usuarios celulares comunes, como para las comunicaciones vehiculares. Esto implica que RODEO consigue que todos los usuarios transmitan con menor potencia en cada RB que en el resto de las técnicas evaluadas. Esto implica que RODEO reduce el consumo energético necesario para transmitir la misma cantidad de información que el resto de metodologías con las que se ha comparado.
- Acorde con los resultados de rendimiento energético, RODEO se desmarca por ser capaz de transmitir más bytes por vatio consumido que el resto de las técnicas con las que se compara.
- Se ha logrado contribuir de una manera notable a la comunidad científica mediante una solicitud de patente y la publicación en revistas y congresos.

## 6. Conclusiones y líneas futuras

---

Con todo esto, se puede afirmar que la metodología de asignación de recursos propuesta en esta tesis es una técnica competitiva en cuanto a rendimiento se refiere y original conceptualmente hablando, la cual ofrece unos resultados prometedores, presentando unos valores de throughput y eficiencia espectral destacables.

### 6.2 Líneas futuras de trabajo

Como ya se ha comentado a lo largo de este documento, las comunicaciones vehiculares y su posible aplicación a los vehículos autónomos son un tema en auge y en constante expansión dentro de la sociedad. Por esto, y debido al potencial de la metodología propuesta y a la posible contribución al avance científico, se ha trazado un plan de futuro, el cual es descrito en esta sección.

Es preciso comenzar mencionando que las líneas futuras de trabajo surgidas de esta tesis pueden dividirse en dos campos de diferente naturaleza. El primer campo se centra en RODEO como metodología para la asignación de recursos radio y sus posibles mejoras y el otro campo se centra en temas relacionados con las comunicaciones vehiculares que necesitan ser tratados. Por tanto, las líneas de trabajo futuro de RODEO son las siguientes:

- Extender la experimentación realizada en este trabajo para analizar también los resultados de retardo de las comunicaciones y la sobrecarga añadida a las comunicaciones.
- Optimizar el algoritmo de emparejamiento para que múltiples comunicaciones V2V puedan utilizar el mismo RB de modo que se mejore aún más la eficiencia espectral alcanzada por RODEO.
- Adaptar RODEO para que se pueda implementar en entornos urbanos de manera eficiente. Este punto requiere especial atención, ya que en estos escenarios donde la densidad de usuarios es mayor y, por tanto, el área de cobertura de un eNodeB es menor, las distancias entre los usuarios son menores y las interferencias entre comunicaciones aumentan. Por tanto, es interesante para la comunidad científica encontrar una metodología que gestione de manera óptima las interferencias en entornos urbanos.

En segundo lugar, las temáticas relacionadas con las comunicaciones vehiculares que aún tienen interés científico son:

- Combinación del vehículo autónomo y las comunicaciones vehiculares. Este tema tiene especial interés ya que es necesario investigar y realizar pruebas de campo que demuestren que las comunicaciones mejoran el funcionamiento y la seguridad de los vehículos autónomos. Por tanto, es necesario definir qué parámetros son relevantes y establecer cómo medir la mejora que aportan las comunicaciones a estos vehículos.
- Ciberseguridad de las comunicaciones. Actualmente la Unión Europea está haciendo un esfuerzo extra en establecer un sistema que sea capaz de ofrecer comunicaciones seguras, donde solo usuarios autenticados puedan transmitir, se asegure la validez de los mensajes y la privacidad de los usuarios.
- Posicionamiento de los vehículos. Este es un tema con gran interés científico, ya que para el despliegue de aplicaciones de seguridad es necesario reducir el error de posicionamiento que se obtiene con el posicionamiento GPS. Es necesario recordar que la base de las comunicaciones vehiculares es el envío de mensajes CAM donde cada vehículo envía su posición y dirección, y en la actualidad con la precisión de los GPS comerciales no es posible diferenciar en qué carril está cada vehículo.
- Compatibilidad de tecnologías en la banda de 5,9 GHz. Debido a la actual competencia entre las tecnologías celulares y IEEE 802.11p y la falta de determinación por parte de los gobiernos, es de vital importancia definir métodos de compatibilidad que permitan a ambas tecnologías funcionar en la misma frecuencia. Es más, al implementar por encima la misma pila de protocolos, y siendo el objetivo mejorar la seguridad en las carreteras, sería interesante definir un sistema que permita entender los mensajes independientemente de la tecnología utilizada para transmitirlos.
- Asegurar el intercambio de información crítica (safety-critical). Es necesario definir una normativa o una metodología que asegure que la procedencia de los datos que se están transmitiendo a través de las comunicaciones vehiculares son fiables, ya que es posible que un vehículo autónomo decida cómo

## **6. Conclusiones y líneas futuras**

---

continuar con su marcha en función de la información que reciba a través de este tipo de comunicaciones. Por lo tanto, no solo es necesario asegurar que los mensajes no han sido modificados de origen a destino, si no que es crítico asegurar que la generación o procedencia de la información es confiable.

*Believe you can and  
you are halfway there.*

Dawn Gluskin

APÉNDICE



## Conclusions and further work

**T**his document describes in detail the activities carried out during the course of this doctoral thesis. The first chapter introduces the reader to the problems and the scientific and social interest that have led to its development. In addition, this first introductory chapter presents the hypothesis to be validated during this work and the research methodology that has been carried out during it. With chapters 2 and 3, the reader has been contextualized and introduced to the complex world of vehicle communications and their limitations, in addition to presenting the improvements that these communications can offer to the future autonomous car. After a thorough analysis of the related literature, the proposed methodology to verify the hypothesis has been described. This was followed by the corresponding experimentation, whose analysis of the obtained results led to the fulfilment of the objectives defined and the validation of the hypothesis imposed.

This last chapter focuses on highlighting the conclusions obtained from the research and proposes the future lines of research needed for the deployment of vehicular communications. Thus, the first part of the chapter focuses on presenting the general conclusions, both those related to the proposed resource allocation

## A. Conclusions and further work

---

methodology and those related to the thesis as a generic concept. Finally, the future lines of research (section A.2) are set out, where those related to the allocation of radio resources in cellular networks will be presented, as well as some lines of research necessary for the deployment of vehicular communications and their integration with the connected and autonomous car.

### A.1 Contributions and general conclusions

The main contribution of this thesis is the methodology for assigning radio resources in vehicular networks. This methodology is called RODEO and it solves the assignment of radio resources in scenarios where regular cellular users and vehicles coexist. The purpose of RODEO, as such as all other resource allocation methodologies, is to satisfy the quality of service requirements of the communications links of all users, both cellular and vehicular. However, its design is particular as it focuses especially on the service requirements necessary for the deployment of applications for cooperative intelligent transport systems or C-ITS.

In addition, RODEO seeks to optimize the use of the radioelectric spectrum since it is a scarce and limited asset. Therefore, the processes it describes are based on an underlay network in which, by managing the transmission powers of clients, regular cellular users and vehicles can transmit in the same frequency-time interval, known as Resource Block (RB). Therefore, the final objective of RODEO is to use the minimum number of RBs satisfying the quality of service demanded by the applications of the global set of users.

Given that the peculiarity of RODEO is to give priority to vehicle communications for the deployment of C-ITS applications, and assuming that the objective of common user communications is always to achieve the maximum throughput possible depending on the needs, the experimentation carried out has focused on validating two main problems:

- SPC - Sum-rate-oriented Power Control: when the vehicle requests resources to transmit infotainment messages, and therefore, the goal is to maximize the total throughput of both communications.

## A.1 Contributions and general conclusions

---

- MPC - Minimum-rate-oriented Power Control: when the V-EU needs resources to transmit safety messages or CAM messages. In this case, the objective is to maximize the common user throughput and minimize the vehicle throughput but always complying with the minimum quality of service requirements that allow in both cases to obtain satisfactory links.

Regarding the experimentation carried out, RODEO has been compared with two different methodologies:

- A V2V underlay communications methodology that follows the same philosophy of reuse gain as RODEO and allows a fair comparison of both methodologies.
- A V2V overlay communications methodology that follows the same philosophy that 3GPP has chosen for the standardization of LTE-V2X communications and, therefore, makes it possible to compare both radio resource allocation philosophies.

Once all the contributions presented in this thesis have been detailed, it is appropriate to summarize the contributions made during the course of this work to the research community.

The first contribution of the work developed in this thesis was presented and published in the Vehicular Networking Conference 2016 (VNC 2016) with the article entitled “Efficient cluster-based resource allocation for co-existing vehicle and cellular user” [de la Iglesia 16]. The presentation of this article in this outstanding conference within the world of vehicular networks served to validate the interest in the methodology within the community and to receive interesting contributions and ideas for improvement.

The most significant contribution of this thesis is the European patent application entitled “Procedure for managing radioelectric resources in 5G cellular networks for reuse of resources in vehicle-to-vehicle communications”, which is still in the process of being verified. The second most relevant contribution is the publication of the article entitled “Smart Bandwidth Assignment in an Underlay Cellular Network for Internet of Vehicles”. The work done in this article was presented at the Workshop on Wireless Vehicular Communications, WWVC 2017.

## A. Conclusions and further work

---

Also, at the end of May 2018 an article entitled “RODEO: a novel methodology to perform V2V communications in the scope of Internet of Vehicles. An energy performance analysis” was sent to the conference UCAmI 2018: 12th International Conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence. This article shows the results of RODEO that had not been published in the journal *Sensors*.

Another of the merits achieved thanks to the development of this work is the 6-month stay at Nokia Bell Labs (NBL) in Wroclaw (Poland). This stay meant a great advance in the development of this thesis thanks to the ideas and technical contributions made by the supervisor and colleagues at NBL. The V2X communications group was part of the 5G research group, in which they integrated the doctoral candidate as if she were one more of the team. Thanks to this welcome, the doctoral candidate was able to collaborate on project proposals, keep abreast of research projects in which NBL collaborates, participate in brainstorming meetings for the development of patents, attend and present at conferences and demo events held at NBL, etc. For example, one of the projects in which she participated was related to the use of 5G networks for the application of platooning. For this project NBL had developed a demo that the doctoral candidate presented at the Nokia Bell Labs InnoDay 2017 [Wroclaw 17b], at the code conference::dive 2017 [Wroclaw 17a] and at the VNC 2017 [Ochocki 16].

Thanks to the work done during her stay at NBL on platooning, the doctoral candidate is collaborating with the RISE SICS Swedish group in the development of an article entitled “Platooning Applications: Communication Challenges and Open Issues”, which will be sent to the *IEEE Communications Surveys and Tutorials* magazine in early October 2018. In this work, the knowledge acquired about the capabilities that 5G can contribute to the platooning application is mainly contributed and compared with the other alternative technology, IEEE 802.11p.

After having mentioned the main contributions of this thesis, the conclusions that can be drawn in relation to the work carried out are presented bellow. It should be made clear that these conclusions have led to the fulfilment of the hypothesis and the objectives set out in the section on hypothesis:

## A.1 Contributions and general conclusions

---

- The experimentation carried out has shown that the particular strategy of adapting transmission powers according to the distance between resource sharing users, together with the meta-heuristics used for the selection of partners, are elements that improve the average quality of the solutions obtained compared to those achieved by the other techniques used.
- According to the experimentation carried out in this study, it can be observed how RODEO greatly improves the throughput results offered to each user compared to the other techniques used. This improvement is evident in the 2 problems evaluated.
- In terms of spectral efficiency, RODEO stands out from the rest of the alternatives in both problems evaluated, managing to transmit more data using the same number of RBs. As noted in previous sections, as spectrum is a limited resource, this feature is especially appreciated in real-world situations.
- In terms of energy efficiency, promising results have been achieved in the MPC problem, both for communications for regular cellular users and for vehicular communications. This implies that RODEO gets all users to transmit with less power in each RB than in the rest of the techniques evaluated. This means that RODEO reduces the energy consumption needed to transmit the same amount of information as the other methodologies it has been compared to.
- According to the energy efficiency results, RODEO stands out for being able to transmit more bytes per watt consumed than the rest of the techniques it is compared to.
- A significant contribution to the scientific community has been made through a patent application and publication in journals and conferences.

Therefore, it can be said that the resource allocation methodology proposed in this thesis is a competitive technique in terms of performance and originality, which offers promising results, presenting outstanding values of throughput and spectral efficiency.

### A.2 Future work

As it has already been commented throughout this document, vehicular communications and their possible application to autonomous vehicles is a growing and constantly expanding topic within society. For this reason, and due to the potential of the proposed methodology and the possible contribution to scientific progress, a plan for the future has been drawn up, which is described in this section.

It is necessary to begin by mentioning that the future lines of work arising from this thesis can be divided into two fields of different nature. The first field focuses on RODEO as a methodology for the allocation of radio resources and their possible improvements, and the other field focuses on issues related to vehicular communications that need to be addressed. Therefore, the future lines of work of RODEO are the following:

- Extend the experimentation carried out in this work to also analyse the communications delay results and the added overload to the communications.
- Optimize the pairing algorithm so that multiple V2V communications can use the same RB to further improve the spectral efficiency achieved by RODEO.
- Adapt RODEO so that it can be implemented in urban environments efficiently. This point requires special attention, since in these scenarios where the density of users is higher and therefore the coverage area of an eNodeB is smaller, the distances between users are shorter and the interference between communications increases. Therefore, it is interesting for the scientific community to find a methodology that optimally manages interference in urban environments.

Secondly, the topics related to vehicle communications that are still of scientific interest are:

- Combination of autonomous vehicle and vehicular communications. This topic is of particular interest as there is a need for research and field testing to demonstrate that communications improve the operation and safety of autonomous vehicles. In addition, it is necessary to define which parameters

are relevant and to establish how to measure the improvement that communications bring to these vehicles.

- **Cybersecurity of communications.** The European Union is currently making an extra effort to establish a system that is capable of providing secure communications, where only authenticated users can transmit, ensuring the validity of messages and the privacy of users.
- **Vehicle positioning.** This is a topic of great scientific interest, since for the deployment of security applications it is necessary to reduce the positioning error obtained with GPS positioning systems. It is necessary to remember that the basis of vehicle communications is the sending of CAM messages where each vehicle sends its position and direction, and at present with the precision of commercial GPS it is not possible to differentiate which lane each vehicle is in.
- **Compatibility of technologies in the 5.9 GHz band.** Due to the current competition between cellular and IEEE 802.11p technologies and the lack of determination on the part of governments, it is vitally important to define compatibility methods that allow both technologies to operate at the same frequency. Moreover, by implementing the same stack of protocols above and with the objective of improving road safety, it would be interesting to define a system that allows messages to be understood independently of the technology used to transmit them.
- **Ensure the exchange of critical information (safety-critical).** It is necessary to define a standard or methodology to ensure that the source of the data being transmitted through vehicular communications is reliable, since in few years an autonomous vehicle could decide how to continue its journey based on the information it receives through this type of communications. Therefore, it is not only necessary to ensure that messages have not been modified from origin to destination, but also it is critical to ensure that the generation or origin of the information is reliable.



APÉNDICE

# B

## Acrónimos

**BM-SC** Broadcast Multicast Service Center

**CAM** Cooperative Awareness Message

**CH** Cluster Head

**CM** Cluster Member

**CSI** Channel State Information

**CSMA** Carrier Sense Multiple Access

**C-UE** Common User Equipment

**C-ITS** Cooperative Intelligent Transportation Systems

**DL** downlink

**D2D** Device-to-Device

**EPC** Evolved Packet Core

**ETSI** European Telecommunications Standards Institute

## **B. Acrónimos**

---

**FCD** Floating Car Data

**FDD** Frequency Division Duplexing

**HA** Hungarian Algorithm

**HARQ** Hybrid Automatic Repeat Request

**I2V** Infrastructure-to-Vehicle

**ICT** Information and Communication Technologies

**IoT** Internet of Things

**IoV** Internet of Vehicles

**ITS** Intelligent Transportation Systems

**LOS** Line of Sight

**LTE-A** LTE-Advanced

**LTE** Long Term Evolution

**L-GW** Local Gateway

**M2M** Machine to Machine

**MAC** Medium Access Control

**MBMS** Multimedia Broadcast Multicast Services

**MBMS-GW** MBMS gateway

**MBSFN** Multicast-Broadcast Single-Frequency Network

**MCE** Multi-cell/multicast Coordination Entity

**MME** Mobility Management Entity

**MPC** Minimum Rate Oriented Power Control

**P-GW** Packet-Data Network Gateway

---

**QoS** Quality of Service

**RB** Resource Block

**RBAP** Resource Block Assignment Problem

**RRM** Radio Resource Management

**RSRP** Reference Signal Received Power

**RSU** Road Side Unit

**SC-FDMA** Single Carrier Frequency Division Multiple Access

**SINR** Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

**SPC** Sum Rate Oriented Power Control

**SPS** Semi-Persistent Scheduling

**UE** User Equipment

**UL** uplink

**V2I** Vehicle-to-Infrastructure

**V2V** Vehicle-to-Vehicle

**V2X** Vehicle-to-Everything

**VANET** Vehicular Ad Hoc Network

**V-UE** Vehicular User Equipment

**VRU** Vulnerable Road User



# Bibliografía

- [3GPP 03] 3GPP. *3GPP TR 36.814. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)*. Report V9.0.0, 3GPP, 2010-03. Available at <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36814-900.pdf>, (accessed on 17 October 2017).
- [3GPP 14] 3GPP. *3GPP TS 23.303: "Technical Specification Group Services and System Aspects; Proximity-based services (ProSe)*. Technical specification, 3GPP, September 2014.
- [3GPP 16] 3GPP. *RP-161894 LTE-based V2X Services*. 3GPP TSG RAN Meeting 73 RP-161894, 3GPP, Nueva Orleans, Estados Unidos, Septiembre 2016.
- [3GPP 17] 3GPP. *3GPP TS 23.285 version 14.4.0 Release 14 - Architecture enhancements for V2X services*. Rapport technique ETSI TS 123 285 V14.4.0, ETSI, Octubre 2017.
- [3GPP 06] 3GPP. *3GPP TR 36.885. Study on LTE-based V2X Services (Release 14)*. Report V14.0.0, 3GPP, 2016-06. Available at [http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/36\\_series/36.885/](http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/36_series/36.885/), (accessed on 17 October 2017).
- [5GAA 17] 5GAA. *5G and Automotive Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X)*. Rapport technique, 5G Autonotive Association, 2017.
- [Almoustafa 13] Samira Almoustafa, Said Hanafi and Nenad Mladenović. *New exact method for large asymmetric distance-constrained vehicle routing problem*. European Journal of Operational Research, Vol. 226, No. 3, pp. 386-394, 2013.
- [Americas 16] 5G Americas. *V2X Cellular Solutions*. Report V1.0, 5G Americas, Octubre 2016. Disponible en [http://www.5gamericas.org/files/2914/7769/1296/5GA\\_V2X\\_Report\\_FINAL\\_for\\_upload.pdf](http://www.5gamericas.org/files/2914/7769/1296/5GA_V2X_Report_FINAL_for_upload.pdf), (accedido el 3 de junio de 2018).

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Asadi 14] A. Asadi, Q. Wang and V. Mancuso. *A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks*. IEEE Communications Surveys Tutorials, Vol. 16, No. 4, pp. 1801–1819, Fourthquarter 2014.
- [Baiocchi 13] A. Baiocchi and F. Cuomo. *Infotainment services based on push-mode dissemination in an integrated VANET and 3G architecture*. Journal of Communications and Networks, Vol. 15, No. 2, pp. 179–190, April 2013.
- [Bezerra 14] Leonardo CT Bezerra, Manuel López-Ibáñez and Thomas Stützle. *Automatic design of evolutionary algorithms for multi-objective combinatorial optimization*. In Parallel Problem Solving from Nature, pp. 508–517. Springer, 2014.
- [Botsov 14] M. Botsov, M. Klügel, W. Kellerer and P. Fertl. *Location dependent resource allocation for mobile device-to-device communications*. In 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1679–1684, April 2014.
- [BoussaiD 13] Ilhem BoussaiD, Julien Lepagnot and Patrick Siarry. *A Survey on Optimization Metaheuristics*. Inf. Sci., Vol. 237, pp. 82–117, July 2013.
- [Campolo 15] Claudia Campolo, Antonella Molinaro and Riccardo Scopigno. *From Today's VANETs to Tomorrow's Planning and the Bets for the Day After*. Veh. Commun., Vol. 2, No. 3, pp. 158–171, July 2015.
- [Cheng 15a] X. Cheng, L. Yang and X. Shen. *D2D for Intelligent Transportation Systems: A Feasibility Study*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 1784–1793, Aug 2015.
- [Cheng 15b] X. Cheng, L. Yang and X. Shen. *D2D for Intelligent Transportation Systems: A Feasibility Study*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 1784–1793, Aug 2015.
- [Colbourn 10] Charles J Colbourn. *Crc handbook of combinatorial designs*. CRC press, 2010.
- [de la Iglesia 16] I. de la Iglesia, U. Hernandez-Jayo, M. Januszewski, J. Stanczak, E. Osaba and R. Carballado. *Poster: Efficient cluster-based resource allocation for co-existing vehicle and cellular users*. In 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), pp. 1–2, Dec 2016.
- [de la Iglesia 17] Idoia de la Iglesia, Unai Hernandez-Jayo, Eneko Osaba and Roberto Carballado. *Smart Bandwidth Assignment in an Underlay Cellular Network for Internet of Vehicles*. Sensors, Vol. 17, No. 10, 2017.

- [d'Orey 15] P. M. d'Orey, N. Maslekar, I. Iglesia and N. Zahariev. *NAVI: Neighbor-Aware Virtual Infrastructure for Information Collection and Dissemination in Vehicular Networks*. In IEEE Vehicular Technology Conf. - VTC-Spring, volume 1, pp. 1–6, May 2015.
- [Dorigo 05] M. Dorigo and C. Blum. *Ant colony optimization theory: A survey*. Theoretical Computer Science, Vol. 344, No. 2, pp. 243–278, 2005.
- [Du 13] Ding-Zhu Du and Panos M Pardalos. *Handbook of combinatorial optimization: supplement, volume 1*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [Dütting 13] Paul Dütting, Monika Henzinger and Ingmar Weber. *Sponsored search, market equilibria, and the Hungarian Method*. Information Processing Letters, Vol. 113, No. 3, pp. 67–73, 2013.
- [Ericsson 16] Ericsson. *Ericsson Mobility Report 2016*. Report, Ericsson, November 2016. Available at <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2016/ericsson-mobility-report-november-2016.pdf>, (accessed on 20 March 2018).
- [Ericsson 17] Ericsson. *Evolving LTE to fit the 5G future*. Article, Ericsson, January 2017. Available at <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2017/evolving-lte-to-fit-the-5g-future>, (accessed on 20 March 2018).
- [ETSI 09] ETSI. *ETSI TR 102 638 V1.1.1 - Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions*. Technical Report ETSI TR 102 638 V1.1.1, ETSI, Junio 2009.
- [ETSI 10] ETSI. *Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture*. Report ETSI EN 302 665, European Telecommunications Standards Institute, Septiembre 2010. Disponible en [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/302665/01.01.01\\_60/en\\_302665v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302665/01.01.01_60/en_302665v010101p.pdf), (accedido el 16 de noviembre de 2017).
- [ETSI 11] ETSI. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service*. Report ETSI TS 102 637-2, European Telecommunications Standards Institute, Marzo 2011.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [ETSI 13] ETSI. *Intelligent transport systems - Communications Access for Land Mobiles (CALM) - Architecture*. Report ISO 21217, International Organization for Standardization, Abril 2013.
- [ETSI 14] ETSI. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specification of Decentralized Environmental Notification Basic Service*. Report ETSI EN 302 637-3, European Telecommunications Standards Institute, Noviembre 2014. Disponible en [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/30263703/01.02.02\\_60/en\\_30263703v010202p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263703/01.02.02_60/en_30263703v010202p.pdf), (accedido el 6 de junio de 2018).
- [Feng 13] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, G. Y. Li, G. Feng and S. Li. *Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 61, No. 8, pp. 3541–3551, August 2013.
- [Festag 14] A. Festag. *Cooperative intelligent transport systems standards in europe*. IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 12, pp. 166–172, December 2014.
- [Festag 15] Andreas Festag. *Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G*. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 132, No. 7, pp. 409–416, Nov 2015.
- [Fodor 12] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, G. Miklós and Z. Turányi. *Design aspects of network assisted device-to-device communications*. IEEE Communications Magazine, Vol. 50, No. 3, pp. 170–177, March 2012.
- [for Internet 13] Center for Internet and Society at Stanford Law School. *Global status report on road safety 2015*. Report, Center for Internet and Society at Stanford Law School, 2013. Available at [urlhttp://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/12/human-error-cause-vehicle-crashes](http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/12/human-error-cause-vehicle-crashes) (accessed on 16 November 2017).
- [Ge 09] W. Ge, J. Zhang, J. E. Wieselthier and X. Shen. *PHY-aware distributed scheduling for ad hoc communications with physical interference model*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 5, pp. 2682–2693, May 2009.
- [Glover 89] F. Glover. *Tabu search, part I*. INFORMS Journal on Computing, Vol. 1, No. 3, pp. 190–206, 1989.

- [Glover 06] Fred W Glover and Gary A Kochenberger. Handbook of metaheuristics, volume 57. Springer Science & Business Media, 2006.
- [Goldberg 89] D.E. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley Professional, 1989.
- [Gorrieri 16] Andrea Gorrieri, Marco Martalò, Stefano Busanelli and Gianluigi Ferrari. *Clustering and sensing with decentralized detection in vehicular ad hoc networks*. Ad Hoc Networks, Vol. 36, No. Part 2, pp. 450 – 464, 2016. Vehicular Networking for Mobile Crowd Sensing.
- [Hernandez-Jayo 14] Unai Hernandez-Jayo, Aboobeker Sidhik Koyamparambil Mammu and Idoia De-la Iglesia. *Reliable Communication in Cooperative Ad hoc Networks*. Reliable Communication in Cooperative Ad hoc Networks, Contemporary Issues in Wireless Communications, Dr. Mutamed Khatib (Ed.), InTech, 2014. Disponible en <https://www.intechopen.com/books/contemporary-issues-in-wireless-communications/reliable-communication-in-cooperative-ad-hoc-networks>, (accedido el 13 de noviembre de 2017).
- [Hernandez-Jayo 15] Unai Hernandez-Jayo, Idoia De-la Iglesia and Jagoba Perez. *V-Alert: Description and Validation of a Vulnerable Road User Alert System in the Framework of a Smart City*. Sensors, Vol. 15, No. 8, pp. 18480–18505, 2015.
- [IEEE 11] IEEE. *1609.4-2010-IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)–Multi-channel Operation*. Standard IEEE 1609.4, IEEE, February 2011.
- [IEEE 13] IEEE. *IEEE Standard for Information technology– Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks– Specific requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications–Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz*. IEEE Std 802.11ac-2013 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012, IEEE Std 802.11aa-2012, and IEEE Std 802.11ad-2012), pp. 1–425, Dec 2013.
- [Jiang 08] D. Jiang and L. Delgrossi. *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*. In VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 2036–2040, May 2008.
- [Karagiannis 11] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin and T. Weil. *Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Ar-*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- chitectures, Challenges, Standards and Solutions*. IEEE Communications Surveys Tutorials, Vol. 13, No. 4, pp. 584–616, Fourth 2011.
- [Kasperski 15] Adam Kasperski and Paweł Zieliński. *Combinatorial optimization problems with uncertain costs and the OWA criterion*. Theoretical Computer Science, Vol. 565, pp. 102–112, 2015.
- [Kaufman 13] Brett Kaufman, Jorma Lilleberg and Behnaam Aazhang. *Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc device-to-device users*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 12, No. 3, pp. 1038–1049, 2013.
- [Khelil 14a] A. Khelil and D. Soldani. *On the suitability of Device-to-Device communications for road traffic safety*. In 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 224–229, March 2014.
- [Khelil 14b] A. Khelil and D. Soldani. *On the suitability of Device-to-Device communications for road traffic safety*. In 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 224–229, March 2014.
- [Kirkpatrick 83] S. Kirkpatrick, C.D. Gellat and M.P. Vecchi. *Optimization by simulated annealing*. Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [Kuhn 55] Harold W Kuhn. *The Hungarian method for the assignment problem*. Naval research logistics quarterly, Vol. 2, No. 1-2, pp. 83–97, 1955.
- [Larrañaga 99] Pedro Larrañaga, Cindy M. H. Kuijpers, Roberto H. Murga, Inaki Inza and Sejla Dizdarevic. *Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators*. Artificial Intelligence Review, Vol. 13, No. 2, pp. 129–170, 1999.
- [Levin 15] Mark Sh Levin. *System Configuration and Combinatorial Optimization*. In Modular System Design and Evaluation, pp. 89–109. Springer, 2015.
- [Lin 14a] X. Lin, J. G. Andrews and A. Ghosh. *Spectrum Sharing for Device-to-Device Communication in Cellular Networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 13, No. 12, pp. 6727–6740, Dec 2014.
- [Lin 14b] X. Lin, J. G. Andrews, A. Ghosh and R. Ratasuk. *An overview of 3GPP device-to-device proximity services*. IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 4, pp. 40–48, April 2014.
- [Luan 14] T. H. Luan, L. X. Cai, J. Chen, X. S. Shen and F. Bai. *Engineering a Distributed Infrastructure for Large-Scale Cost-Effective Content Dissemination*

- over Urban Vehicular Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 63, No. 3, pp. 1419–1435, March 2014.
- [Lynnette Reese 17] Editor-in-Chief Lynnette Reese. *Car-to-Cloud: Level 5 Autonomy Depends on 5G*. Report, Embedded Intel Solutions and Embedded Systems Engineering, 2017. Available at [urlhttp://eecatalog.com/chipdesign/2017/04/06/car-to-cloud-level-5-autonomy-depends-on-5g/](http://eecatalog.com/chipdesign/2017/04/06/car-to-cloud-level-5-autonomy-depends-on-5g/) (accessed on 16 November 2017).
- [Mammu 15] Aboobeker Sidhik Koyamparambil Mammu, Unai Hernandez-Jayo, Nekane Sainz and Idoia de la Iglesia. *Cross-Layer Cluster-Based Energy-Efficient Protocol for Wireless Sensor Networks*. Sensors, Vol. 15, No. 4, pp. 8314–8336, 2015.
- [Min 11] H. Min, W. Seo, J. Lee, S. Park and D. Hong. *Reliability Improvement Using Receive Mode Selection in the Device-to-Device Uplink Period Underlying Cellular Networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 10, No. 2, pp. 413–418, February 2011.
- [o. Cherif 09] M. o. Cherif, S. M. Senouci and B. Ducourthial. *A new framework of self-organization of vehicular networks*. In 2009 Global Information Infrastructure Symposium, pp. 1–6, June 2009.
- [Ochocki 16] M. Ochocki, V. Vukadinovic, M. Januszewski and I. de la Iglesia. *Demo: Communication requirements of CACC for high-density platooning*. In 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), pp. 1–2, Dec 2016.
- [OMS 16] OMS. *Global status report on road safety 2015*. Report, World Health Organization, 2016. Available at [www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2015/en/](http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/), (accessed on 15 November 2017).
- [Osaba 17] E. Osaba, R. Carballedo, F. Diaz, E. Onieva, A.D. Masegosa and A. Perallos. *Good practice proposal for the implementation, presentation, and comparison of metaheuristics for solving routing problems*. Neurocomputing, 2017.
- [Phunchongharn 13] P. Phunchongharn, E. Hossain and D. I. Kim. *Resource allocation for device-to-device communications underlying LTE-advanced networks*. IEEE Wireless Communications, Vol. 20, No. 4, pp. 91–100, August 2013.
- [Qualcomm 16] Qualcomm. *Accelerating C-V2X commercialization*. Report technique, Qualcomm, 2016. Disponible en <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/accelerating-c-v2x-commercialization.pdf>, (aaccedito el 29 May 2018).

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Qualcomm 17a] Qualcomm. *Accelerating C-V2X commercialization*. Rapport technique, Qualcomm, 2017. Disponible en <https://www.qualcomm.com/documents/path-5g-cellular-vehicle-everything-c-v2x>, (accedido el 20 de marzo de 2018).
- [Qualcomm 17b] Qualcomm. *The Case for Cellular V2X for Safety and Cooperative Driving*. Presentation, Qualcomm, March 2017.
- [Ren 15] Y. Ren, F. Liu, Z. Liu, C. Wang and Y. Ji. *Power Control in D2D-Based Vehicular Communication Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 64, No. 12, pp. 5547–5562, Dec 2015.
- [Santa 08] J. Santa, A. Moragon and A. F. Gomez-Skarmeta. *Experimental evaluation of a novel vehicular communication paradigm based on cellular networks*. In 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 198–203, June 2008.
- [Sjöberg 17] Katring Sjöberg. *V2X communication – standardization and regulation in Europe*. Rapport technique, VOLVO GTT, Halmstad, Sweeden, 2017.
- [Strom 11] E. G. Strom. *On Medium Access and Physical Layer Standards for Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe*. Proceedings of the IEEE, Vol. 99, No. 7, pp. 1183–1188, July 2011.
- [Sun 14] W. Sun, E. G. Ström, F. Brännström, Y. Sui and K. C. Sou. *D2D-based V2V communications with latency and reliability constraints*. In 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), pp. 1414–1419, Dec 2014.
- [Sun 16] W. Sun, E. G. Ström, F. Brännström, K. C. Sou and Y. Sui. *Radio Resource Management for D2D-Based V2V Communication*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 65, No. 8, pp. 6636–6650, Aug 2016.
- [Trichias 12] K. Trichias, Hans Leo van den Berg, J. de Jongh and R. Litjens. Modeling and evaluation of lte in intelligent transportation systems, pp. 48–59. University of Bern, 6 2012.
- [Vinel 12] A. Vinel. *3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE: Which Technology is Able to Support Cooperative Vehicular Safety Applications?* IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 1, No. 2, pp. 125–128, April 2012.
- [Weithoffer 17] S. Weithoffer and N. Wehn. *Enhanced decoding for high-rate LTE Turbo-Codes with short block lengths*. In 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pp. 967–972, May 2017.

- [Wroclaw 17a] Nokia Bell Labs Wroclaw. *code::dive 2017*. Rapport technique, Nokia Bell Labs Wroclaw, Noviembre 2017. Disponible en <http://codedive.pl/index/year2017>, (accedido el 29 May 2018).
- [Wroclaw 17b] Nokia Bell Labs Wroclaw. *InnoDay 2017*. Rapport technique, Nokia Bell Labs Wroclaw, Octubre 2017. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=lyIA870V2oE>, (accedido el 29 May 2018).
- [Xing 14a] W. Xing, N. Wang, C. Wang, F. Liu and Y. Ji. *Resource Allocation Schemes for D2D Communication Used in VANETs*. In 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), pp. 1–6, Sept 2014.
- [Xing 14b] Weijun Xing, Ning Wang, Chao Wang, Fuqiang Liu and Yusheng Ji. *Resource allocation schemes for D2D communication used in VANETs*. In IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1–6. IEEE, 2014.
- [Xu 13] C. Xu, F. Zhao, J. Guan, H. Zhang and G. M. Muntean. *QoE-Driven User-Centric VoD Services in Urban Multihomed P2P-Based Vehicular Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 62, No. 5, pp. 2273–2289, Jun 2013.
- [Zhao 13a] Q. Zhao, Y. Zhu, C. Chen, H. Zhu and B. Li. *When 3G Meets VANET: 3G-Assisted Data Delivery in VANETs*. IEEE Sensors Journal, Vol. 13, No. 10, pp. 3575–3584, Oct 2013.
- [Zhao 13b] Z. Zhao, X. Cheng, M. Wen, B. Jiao and C. X. Wang. *Channel Estimation Schemes for IEEE 802.11p Standard*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 5, No. 4, pp. 38–49, winter 2013.
- [Zheng 15] K. Zheng, Q. Zheng, P. Chatzimisios, W. Xiang and Y. Zhou. *Heterogeneous Vehicular Networking: A Survey on Architecture, Challenges, and Solutions*. IEEE Communications Surveys Tutorials, Vol. 17, No. 4, pp. 2377–2396, Fourthquarter 2015.
- [Zulhasnine 10] M. Zulhasnine, C. Huang and A. Srinivasan. *Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network*. In 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, pp. 368–375, Oct 2010.