

UNIVERSITAT DE VALENCIA



Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información,
Comunicaciones y Computación.

**Modelo de negociación autonómica para la asignación dinámica
de recursos en entornos distribuidos.
Aplicación a sistemas de aparcamiento inteligente.**

Tesis Doctoral

José Francisco García Calderaro

Directores
Juan José Martínez Durá
Vicente Ramón Tomás López

Marzo 2024

*A ti Rakel, por tu comprensión y apoyo,
y a Mikonos, mi compañero de paseos inseparable.*

Agradecimientos

Ha sido mucha gente con la que he trabajado desde los inicios de mi investigación y que han contribuido de una forma u otra en el desarrollo de este trabajo. En primer lugar me gustaría agradecer especialmente a mis directores de tesis, Juan J. Martínez y Vicente R. Tomás, su tiempo, comprensión y confianza. Gracias por orientarme y dirigirme a lo largo de todo el proceso.

Quisiera agradecer también a los componentes del grupo AiA y en especial a sus responsables, Luis Amable y Vicente R. Tomás, la posibilidad de trabajar en el marco de los sistemas multiagentes. Gracias por todo el apoyo tanto científico como humano.

Agradecer también a los componentes del grupo de investigación del LISITT, y a sus responsables, las facilidades dadas para poder llevar a cabo mi trabajo. Y a mis compañeros por todo el apoyo que me han prestado durante este largo proceso.

También me gustaría agradecer a mi familia y a mis amigos por todo el ánimo que me han proporcionado a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Mis últimas palabras de agradecimiento son para mi mujer, Rakel, porque sin tu apoyo nada de esto hubiese sido posible, y cómo no, para mi compañero inseparable Mikonos que siempre está ahí para sacarme una sonrisa y obligarme a salir a pasear y a despejarme.

A todos, gracias.

Índice General

Resumen	IX
Resum	XI
Abstract	XIII
Glosario	XV
1. Introducción	1
1.1. Motivación.	1
1.2. Planteamiento del problema.	3
1.3. Objetivos.	4
1.4. Organización de la memoria.	4
2. Revisión tecnológica y científica	7
2.1. Introducción	8
2.2. Sistemas autónomos	9
2.2.1. Propiedades de los sistema autónomos	9
2.3. Agentes inteligentes en entornos de negociación	13
2.4. Protocolos de negociación	15
2.4.1. Protocolos de negociación mediante votaciones	16
2.4.2. El sistema de votación Borda	17
2.5. Sistemas inteligentes de aparcamiento	18
2.5.1. Sistema de negociación centralizado	22
2.6. Conclusiones	24
3. Protocolo de negociación autónomo basado en votaciones para la asignación de recursos en entornos distribuidos con múltiples urnas	27
3.1. Introducción	28
3.2. El entorno de negociación	29
3.2.1. Agentes y recursos	29
3.2.2. Estados potenciales	31
3.2.3. Situación de conflicto	35
3.3. El protocolo de votaciones encadenadas	35
3.3.1. Definición de preferencias en un proceso de votación	35
3.3.2. Descripción Borda extendido	36
3.3.3. Función de utilidad	37
3.3.4. Resolución de la votación y de conflicto	37

3.3.5.	Protocolo de interacciones encadenado y resolución de la negociación	38
3.3.6.	Ejemplo de aplicación del protocolo	41
3.4.	Evaluación del protocolo	45
3.4.1.	Análisis de convergencia y eficiencia computacional	45
3.4.2.	Bienestar social	46
3.4.3.	Propiedades de los sistemas autónomos	46
3.5.	Conclusiones	47
4.	Modelo de negociación autónoma para la gestión de plazas de aparcamiento en entornos interurbanos.	49
4.1.	Introducción	50
4.2.	Dominio de aplicación	51
4.3.	Definición del problema	52
4.4.	Entorno de negociación	53
4.4.1.	Concepto de reserva y pre-reserva de una plaza de aparcamiento	54
4.4.2.	Definición de las estrategias de elección de áreas	55
4.4.3.	Situación de conflicto	56
4.5.	Protocolo de negociaciones encadenadas	57
4.5.1.	Un sistema de negociación distribuido	57
4.5.2.	Definición de preferencias en el entorno de transporte interurbano	58
4.5.3.	Cálculo del peso de los votos en las negociaciones	59
4.5.4.	Importancia de la ponderación de preferencias.	60
4.5.5.	Función de utilidad	65
4.5.6.	Resolución de la votación y de conflicto	65
4.5.7.	Resolución mediante negociaciones encadenadas	67
4.6.	Evaluación del protocolo	72
4.6.1.	Análisis de convergencia y eficiencia computacional	72
4.6.2.	Bienestar social	73
4.6.3.	Propiedades de los sistema autónomos	73
4.7.	Conclusiones	74
5.	Un entorno autónomo para la gestión de plazas de aparcamiento en tráfico interurbano	77
5.1.	Introducción	78
5.2.	Modelo de conocimiento del sistema	78
5.2.1.	Dominio de la topología de la red de carreteras interurbana	79
5.2.2.	Dominio del comportamiento del tráfico	79
5.2.3.	Dominio de los sistemas de información de tráfico	80
5.2.4.	Dominio de la gestión del tráfico de vehículos pesados	81
5.3.	Diseño del sistema	82
5.3.1.	Modelo de organización	83
5.3.2.	Modelo de agentes	84
5.3.3.	Modelo de interacciones	85
5.4.	Plataforma para la ejecución y prueba del modelo de negociación	86
5.4.1.	Implementación	88
5.4.2.	Creación de escenarios	88
5.4.3.	Funcionalidad del agente interfaz	90
5.4.4.	Funcionalidad del agente camión. Aplicación móvil	91

5.4.5. Ejemplo de utilización	92
5.5. Evaluación de las propiedades de los sistemas autónomos	95
5.6. Conclusiones	97
6. Pruebas y Resultados	99
6.1. Introducción	99
6.2. Pruebas de validación del protocolo	100
6.2.1. Análisis de la eficiencia en función del número de plazas	101
6.2.2. Análisis de la eficiencia en función de la distribución de camiones	102
6.2.3. Determinación de la importancia de la ponderación de las preferencias.	104
6.2.4. Estimación del grado de satisfacción de la solución para los conductores.	105
6.3. Pruebas de robustez del protocolo	107
6.3.1. Análisis de escalabilidad.	107
6.3.2. Resiliencia del protocolo.	110
6.3.3. Evaluación del precio de la anarquía.	110
6.4. Conclusiones	112
7. Conclusiones	115
7.1. Consecución de los objetivos	115
7.2. Aportaciones	116
7.2.1. Protocolo de negociación autónomo basado en votaciones en entornos dis- tribuidos	116
7.2.2. Modelo de negociación autónoma para la gestión de plazas de aparcamiento en entornos interurbanos.	118
7.2.3. Un entorno autónomo para la gestión de plazas de aparcamiento en tráfico interurbano	119
7.3. Líneas de investigación y trabajos abiertos.	120
Bibliografía	121
A. Publicaciones	129
A.1. Derivadas de la Tesis	129
A.2. Relacionadas con la Tesis	130

Lista de Figuras

2.1. Fotografía aérea de un área de servicio. Fuente iStock.	19
2.2. Ejemplo distribución según protocolo centralizado.	23
3.1. Estado E_1 para el recurso R_2 . El proveedor tiene recursos suficientes.	31
3.2. Estado E_2 para el recurso R_2 . El proveedor no tiene recursos suficientes pero otros proveedores sí.	32
3.3. Estado E_3 . No hay recursos suficientes en el sistema.	33
3.4. Grafos de estados en los que se encuentra el sistema según se reciben solicitudes. . .	34
3.5. Interacciones entre los clientes y los proveedores.	40
3.6. Evolución de solicitudes de recursos.	42
3.7. Distribución de recursos después de la negociación.	44
4.1. Ejemplo de un entorno de una carretera de larga distancia.	52
4.2. Ejemplo de preferencias de áreas alcanzables 1.	55
4.3. Ejemplo de preferencias de áreas alcanzables 2.	56
4.4. Ejemplo de preferencias de áreas alcanzables 3.	56
4.5. Ejemplo distribución según protocolo distribuido.	58
4.6. Caso de estudio simple.	61
4.7. Ejemplo de evolución del escenario.	64
4.8. Etapas de asignación y reasignación.	69
4.9. Etapa de consolidación.	70
4.10. Etapas de asignación y reasignación después de la consolidación.	71
5.1. Modelo de conocimiento de la red viaria interurbana.	79
5.2. Modelo <i>DATEX II</i> . Publicaciones sobre aparcamiento	80
5.3. Ejemplo de relación entre los diferentes modelo de conocimiento para un agente camión. .	82
5.4. Arquitectura del sistema. La figura muestra los principales agentes del sistema. . . .	83
5.5. Protocolo de interacción para la liberación de una plaza de aparcamiento.	86
5.6. Red de carreteras modelada. Se incluyen las principales características de las áreas de descanso de la E-15 en la Comunidad Valenciana.	87
5.7. Menú de configuración inicial de la plataforma.	89
5.8. Interfaz de la plataforma para la simulación de escenarios.	91
5.9. Múltiples imágenes de la aplicación móvil del camión.	92
5.10. Interfaz gráfico del sistema. En esta captura se muestra el registro de la pre-reserva en la plataforma del camión <i>Truck</i>	93
5.11. Cierre de área desde la plataforma.	94
5.12. Ejemplo de auto-configuración de un área.	95

5.13. Ejemplo de auto-optimización de un camión.	96
5.14. Ejemplo de auto-recuperación de un área.	96
6.1. Manta de simulaciones para comparar la asignación de plazas con y sin aplicar el protocolo de negociación y homoneizando o no el número de plazas.	101
6.2. Punto kilométrico máximo alcanzable de camiones lanzados en las simulaciones. . . .	103
6.3. Valores medios de las simulaciones realizadas para comparar la asignación de camio- nes con y sin aplicar el protocolo de negociación con las tres funciones de distribución.104	104
6.4. Porcentaje de camiones que aparcen ilegalmente según el método de ponderación del peso del voto utilizado.	105
6.5. Comparación del grado de satisfacción de los conductores.	107
6.6. Evolución del número de negociaciones en relación con el número de camiones. . . .	108
6.7. Evolución del tiempo de ejecución en relación con el número de camiones.	109
6.8. Asignación de camiones en función del porcentaje de benevolencia de los conductores y de las plazas de aparcamiento reales de las zonas.	110
6.9. Resultados de ocupación obtenidos con diferentes modelos de asignación de aparca- miento.	111

Lista de Tablas

2.1. Cuatro aspectos de la auto-gestión tal como son y serían ahora con los sistemas autonómicos	10
3.1. Preferencias de los clientes por los recursos y los instantes temporales donde se realizan las solicitudes por los recursos.	41
3.2. Conjunto de soluciones completo a partir de los proveedores que ofrecen recursos por los que los clientes han mostrado su interés en un proceso centralizado.	42
3.3. Conjunto de soluciones indicando en cada una quiénes conservan recurso en el proveedor B y quién perdería la negociación.	43
3.4. Pesos de ejemplo de los clientes implicados en la negociación en el proveedor P_B , y preferencias.	43
3.5. Valor asignado a cada solución posible según la votación de los clientes implicados.	44
4.1. Parámetros de los camiones ejemplo: tiempos de conducción y preferencias alcanzables ordenadas según el criterio del área más lejana.	61
4.2. Pre-reservas existentes en el sistema en el momento previo a la aparición del camión C_5 en el sistema.	62
4.3. Conjunto de soluciones formado por las distintas combinaciones de los camiones que conseguirían pre-reserva en el área A_4 . En la solución S_0 el camión C_5 no obtendría pre-reserva en el área. En la solución S_1 sería el camión C_4 el que no obtendría la plaza, mientras que en la S_2 sería el camión C_3	62
4.4. Para cada camión se presenta un ejemplo de pesos y numero de preferencias.	63
4.5. Resolución de la votación utilizando el <i>Método 1</i> : parámetro máximo de normalización. en este caso, la solución ganadora es la S_2	63
4.6. Resolución de la votación con <i>Método 2</i> . Porcentaje según el número de preferencias para la normalización.	63
4.7. Resultado de la distribución de plazas según el método de cálculo utilizado.	64

Resumen

Los avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) están permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones inteligentes. Entre ellas destacan, los sistemas autónomos, como una evolución de los sistemas autónomos, utilizando como base el comportamiento del sistema nervioso humano. En este tipo de sistemas, los agentes que lo forman deben interactuar entre ellos para poder lograr sus objetivos. Esta interacción se realiza mediante protocolos y mecanismos de negociación.

En el ámbito de los Sistemas Inteligentes de Transporte y en relación con los sistemas multi-agente se presenta el desafío del desarrollo de agentes con capacidades de razonamiento que puedan operar en entornos abiertos, y la definición de protocolos y modelos que permitan la aplicación de estos protocolos en dichos entornos.

Esta tesis doctoral define un nuevo protocolo de negociación autónomo basado en votaciones para la asignación de recursos en entornos altamente poblados y saturados. Para la resolución de las votaciones se ha realizado una nueva extensión del sistema de votaciones Borda. El sistema es distribuido, y los proveedores no tienen conocimiento de la situación del resto de proveedores, por lo que una negociación en un proveedor puede causar una serie de negociaciones encadenadas que distribuirá los recursos existentes entre los clientes que los necesitan buscando conseguir el mayor bienestar social posible.

A continuación, se ha definido un modelo de negociación autónoma para la aplicación del protocolo en entornos interurbanos. Para ello se ha adaptado el protocolo a las características de estos sistemas altamente dinámicos, y se han modelado los distintos dominios involucrados en el sistema. De este modo, el modelo se aplica a la asignación de plazas de aparcamiento en corredores de larga distancia, que se asignarán de forma automática y adaptándose en cada momento a las características del entorno. Estas reservas inicialmente no están aseguradas y pueden ir variando según las necesidades de los camioneros y capacidades de las áreas, pero se asegurarán cuando estén próximos al área y ya no puedan acceder a otra.

El diseño definido integra los elementos propios del protocolo (agentes área y camión), con los agentes necesarios para interactuar con el mundo real (agentes para difundir información en paneles y otros medios) y el agente interfaz para la monitorización del sistema. Además, también integra los propios de la plataforma de implementación utilizada.

Para la demostración de la viabilidad del protocolo propuesto se ha implementado una plataforma para la simulación de entornos reales. Para los experimentos se ha escogido el segmento de la carretera transeuropea E-15 en su paso de norte a sur por la Comunidad Valenciana. La implementación, se ha realizado en un marco de desarrollo de agentes en Java, JADE, e incluye una aplicación para móviles Android implementada usando JadeAndroid.

La pruebas han demostrado el correcto comportamiento del protocolo tanto en lo relativo a la

evaluación de las propiedades autonómicas del sistema desarrollado, como de su eficiencia, robustez, escalabilidad y resiliencia.

Resum

Els avanços en les Tecnologies de la Informació i la Comunicació (TIC) estan permetent el desenvolupament de noves aplicacions intel·ligents. Entre elles destaquen, els sistemes autonòmics, com una evolució dels sistemes autònoms, utilitzant com a base el comportament del sistema nerviós humà. En esta mena de sistemes, els agents que el formen han d'interactuar entre ells per a poder aconseguir els seus objectius. Esta interacció es realitza mitjançant protocols i mecanismes de negociació.

En l'àmbit dels Sistemes Intel·ligents de Transport i en relació amb els sistemes multiagent es presenta el desafiament del desenvolupament d'agents amb capacitats de raonament que puguin operar en entorns oberts, i la definició de protocols i models que permeten l'aplicació d'estos protocols en aquests entorns.

Esta tesi doctoral definix un nou protocol de negociació autonòmic basat en votacions per a l'assignació de recursos en entorns altament poblats i saturats. Per a la resolució de les votacions s'ha realitzat una nova extensió del sistema de votacions Borda. El sistema és distribuït, i els proveïdors no tenen coneixement de la situació de la resta de proveïdors, per la qual cosa una negociació pot causar una sèrie de negociacions encadenades que distribuirà els recursos existents entre els clients que els necessiten buscant aconseguir el major benestar social possible.

S'ha definit un model de negociació autonòmica per a l'aplicació del protocol en entorns interurbans. S'ha adaptat el protocol a les característiques d'aquests sistemes altament dinàmics, i s'han modelat els diferents dominis involucrats en el sistema. D'esta manera, el model s'aplica a l'assignació de places d'aparcament en corredors de llarga distància, que s'assignaran de manera automàtica i adaptant-se dinàmicament a les característiques de l'entorn. Aquestes reserves inicialment no estan assegurades i poden anar variant segons les necessitats dels camioners i capacitats de les àrees, però s'asseguraran quan siguen pròxims a l'àrea i ja no poden accedir a una altra.

El disseny definit integra els elements propis del protocol (agents àrea i camió), amb els agents necessaris per a interaccionar amb el món real (agents per a difondre informació en panells i altres mitjans) i l'agent interfície per al monitoratge del sistema. A més, també integra els propis de la plataforma d'implementació utilitzada.

Per a la demostració de la viabilitat del protocol proposat s'ha implementat una plataforma per a la simulació d'entorns reals. Per als experiments s'ha triat el segment de la carretera transeuropea E-15 en el seu pas de nord a sud per la Comunitat Valenciana. La implementació, s'ha realitzat en un marc de desenvolupament d'agents a Java, JADE i inclou una aplicació per a mòbils Android implementada usant JadeAndroid.

La proves han demostrat el correcte comportament del protocol quant a l'avaluació de les propietats autonòmiques del sistema desenvolupat, com de la seua eficiència, robustesa, escalabilitat i resiliència.

Abstract

Advances in Information and Communication Technologies (ICT) are enabling the development of new intelligent applications. These applications include the autonomic systems, as an evolution of autonomous systems, using the behaviour of the human nervous system as a basis. In this type of system, the agents that make up the system must interact with each other in order to achieve their objectives. This interaction is carried out by means of protocols and negotiation mechanisms.

In the field of Intelligent Transport Systems and in relation to multi-agent systems, the challenge is to develop agents with reasoning capabilities that can operate in open environments, and to define protocols and models that allow the application of these protocols in such environments.

This doctoral thesis defines a new voting-based autonomic negotiation protocol for resource allocation in highly populated and saturated environments. A new extension of the Borda voting system has been implemented for the resolution of the votes. Suppliers have no knowledge of the availability status of the resources of the rest of the suppliers, so that a negotiation in one supplier can cause a series of chained negotiations that will distribute the existing resources among the customers who need them, trying to achieve the highest possible social welfare.

An autonomous negotiation model has then been defined to implement the protocol in interurban environments. For this purpose, the protocol has been adapted to the characteristics of these highly dynamic systems. Also, the different domains involved in the system have been modelled. As a result, the model is applied to the allocation of parking spaces in long-distance corridors, which will be allocated automatically and adapted constantly to the characteristics of the environment. These reservations are initially not secured and may vary according to the needs of the truck drivers and the capacities of the areas, but they will be secured when trucks are close to the area and can no longer access another area.

The defined design integrates the protocol's own elements (area and truck agents), together to the agents needed to interact with the real world (agents for disseminating information on panels and other media) and the interface agent for monitoring the system. In addition, it also integrates those of the implementation platform used.

In order to demonstrate the viability of the proposed protocol, a platform for the simulation of real environments has been implemented. For the experiments, the segment of the E-15 trans-European road has been chosen, concretely the segment that crosses the Valencian Community from north to south. The implementation has been carried out in a Java Agent DEvelopment framework, JADE, and includes an Android mobile app implemented using JadeAndroid.

The experiments have demonstrated the correct behaviour of the protocol in terms of the evaluation of the autonomic properties of the developed system, as well as its efficiency, robustness, scalability and resilience.

Glosario

AiA	Applying intelligent Agents
AMS	Control de sistema inteligente
AOP	Agent Oriented Programming
ATT	Agentes de Tráfico y Transporte
BDI	Belief Desire Intention
CGT	Centro de Gestión de Tráfico
CVIS	Cooperative Vehicle-Infraestructure Sytems
DF	Facilitador de directorios
ECAI	European Conference on Artificial Intelligence
EE.UU	Estados Unidos de América
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
I2I	Infrastructure-to-Infrastructure
I2V	Infrastructure-to-vehicle
IA	Inteligencia Artificial
IJCAI	International Joint Conference on Artificial Intelligence
IoT	Internet of Things
IRTIC	Instituto de Robótica y Tecnologías de la información y la Comunicación de la U.V.
ITP	Intelligent Truck Parking
ITS	Intelligent Transport System
LISITT	Laboratorio Integrado de Sistemas Inteligentes y Tecnologías de la información de Tráfico
MAPE	Redes móviles ad hoc
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PNA	Punto Nacional de Acceso
PRTR	Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
SIT	Servicio de Información de Tráfico
SMA	Sistema MultiAgente
TC	Tiempo de Conducción
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TM	Tiempo Máximo de conducción
UE	Unión Europea
V2V	Vehicle To Vehicle
VANET	Redes vehiculares ad hoc
VCG	Vickrey-Clarke-Groves

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación.

La Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, se plantea como una oportunidad para mejorar la vida de todas las personas. El impacto de la consecución de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que se incluyen en la agenda y que fueron definidos por Naciones Unidas [1], se han convertido en uno de los componentes básicos de la evaluación de la investigación científica, tal y como se indica en [2], donde se presentan las principales conclusiones del 12 Taller Internacional sobre Agentes en el Tráfico y el Transporte (ATT) celebrado en la 31^a Conferencia Internacional sobre Inteligencia Artificial y la 25 Conferencia Europea sobre Inteligencia Artificial (IJCAI-ECAI), que tuvo lugar en Viena (Austria) el 25 de julio de 2022.

Los autores resaltan los siguiente objetivos:

- Objetivo 9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. También, se debe introducir y promover el uso y desarrollo de nuevas tecnologías que faciliten el comercio internacional y aseguren un uso eficiente de los recursos.
- Objetivo 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles como principales ODS relacionados con el tráfico y el transporte.

A estos objetivos habría que añadir el Objetivo 13. Acción por el clima, todos con un alto impacto en el sector del transporte fomentando la innovación y adopción de tecnologías incluyendo soluciones inteligentes y uso de datos para conseguir mejorar la planificación y eficiencia de la forma más sostenible posible.

Por otra parte, en 2020, el sector del transporte de mercancías por carretera representó más del 53 % del total de las mercancías transportadas dentro de la Unión Europea (UE) [3]. Los vehículos pesados son responsables del 28 % de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte por carretera, siendo el 6 % de las emisiones totales de la UE.

El estacionamiento de camiones en corredores de larga distancia se presenta como un desafío significativo en la logística del transporte. La escasez de áreas de estacionamiento con el número de plazas adecuadas para camiones a lo largo de corredores de larga distancia plantea un problema crítico para los conductores y las empresas de transporte. La demanda constante de servicios de carga y la limitada disponibilidad de espacios de estacionamiento contribuyen a la complejidad de encontrar áreas seguras y convenientes para que los camioneros descansen o realicen paradas intermedias.

Tal y como indica en [4] los camioneros al circular por Europa se enfrentan a una inseguridad latente, y, donde se señala que aproximadamente el 72 % de las zonas de aparcamiento de camiones no son seguras, y los robos en España llegan a los 1.500 y el 50 % se producen en zonas preparadas para el descanso.

En este contexto, encontrar soluciones innovadoras y sostenibles para abordar la escasez de espacios de estacionamiento se ha convertido en una prioridad en la gestión logística y en la planificación del transporte de larga distancia. En los últimos años, los avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y la consolidación de la Internet de las Cosas (IoT, de sus siglas en inglés Internet of Things) ha permitido el desarrollo de soluciones basadas en el vehículo conectado [5, 6].

Un vehículo conectado es aquel vehículo que dispone de capacidad para enviar información fuera del vehículo y también qué puede recibirla desde el exterior. Así pues, los vehículos conectados pueden enviar y recibir datos, proporcionando información en tiempo real sobre su velocidad y ubicación. Esta información puede utilizarse para mejorar el flujo del tráfico y reducir la congestión [7, 8, 9, 10]. En este contexto, en [11] se describe e implementa un nuevo sistema inteligente basado en comunicaciones de infraestructura a vehículo (I2V, de sus siglas en inglés Infrastructure to Vehicle) para áreas periurbanas, con el objetivo de reducir la congestión del tráfico mediante el uso de información de tráfico pública y actualizada y sistemas de transporte inteligentes.

Por consiguiente, los vehículos conectados pueden dar soporte al desarrollo de nuevos sistemas inteligentes que permitan el desarrollo de aplicaciones para mejorar, no solo la información de áreas de servicio y plazas disponibles, si no también para su reserva previa.

Actualmente, formo parte del grupo de investigación *LISITT (Laboratorio Integrado de Sistemas Inteligentes y Tecnologías de la información de Tráfico)* (integrado en el IRTIC - Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y la Comunicación de la Universitat de València). El LISITT centra sus principales líneas de trabajo e investigación en el desarrollo de Sistemas Inteligentes de Transporte.

Por otra parte, también colaboro con el grupo de investigación *AiA (Applying intelligent Agents)* de la Universitat Jaume I de Castellón que centra su investigación en el desarrollo de sistemas inteligentes. En el marco de los sistemas multiagentes, las líneas principales de investigación son: 1) desarrollo teórico de modelos y entornos multiagentes, b) desarrollo e implementación de protocolos de negociación y c) la aplicación de los sistemas inteligentes a los Sistemas Inteligentes de Transporte.

En 2013, el grupo *AiA* participó en la red Europea *Autonomic Road Transport Support Systems. TUD COST ACTION TU1102*. El objetivo principal de esta red era abordar la creación de sistemas autónomos para la gestión del tráfico. El análisis y los estudios realizados, en el grupo *AiA*, sobre las interacciones y los protocolos de negociación existentes determinó la necesidad de crear un nuevo protocolo para poder negociar sobre la provisión de plazas de aparcamiento, donde los camiones negocian en un entorno de información incompleta.

En 2015, formé parte del programa *Pioneers into practice* de la Climate-Kic de la Unión Europea, como parte del cual realicé una estancia en el departamento de Ingeniería y Ciencia de los Computadores en la Universidad Jaume I, y en la *School of Engineering & Applied Science* de la Universidad de Aston en Birmingham. Fue en este momento donde presenté los primeros resultados de la investigación en curso y se fraguaron las bases de la presente tesis doctoral.

1.2. Planteamiento del problema.

En esta Tesis Doctoral se plantea y aborda el problema de la negociación automática mediante votaciones en entornos distribuidos, donde los clientes compiten, de forma anónima, por un conjunto de recursos que ofrecen un conjunto de proveedores. En concreto, el protocolo se ha aplicado al dominio del tráfico interurbano de camiones, siendo los proveedores las áreas de descanso que ofrecen sus recursos, en este caso plazas de aparcamientos a los clientes que son los camiones.

Para ello, se pretende definir un protocolo de negociación teórico y evaluar su funcionamiento para determinar la viabilidad del mismo. Para el desarrollo de este protocolo en primer lugar, se ha realizado un análisis y una revisión científica de los protocolos de negociación y de los componentes que un protocolo, y especialmente los de votación, debían contener.

Así pues, el primer paso para el diseño de un protocolo de interacción mediante negociación consiste en la definición del entorno donde va a tener lugar la negociación, donde además de los participantes en la misma se debe definir el conocimiento que cada participante tiene del resto, la importancia o valoración que cada agente le asigna al recurso a negociar y qué problemas tendría el agente si se alcanzara una situación de conflicto y no pudiera obtener el recurso.

Una vez definido el entorno, es necesario definir los componentes de un protocolo de negociación. Según [12], un protocolo debe contener, además de la definición del entorno:

- a) Las reglas de encuentro, que definen el modo en que los agentes conocen las diferentes soluciones y cómo votan por ellas.
- b) La función de utilidad que les permite cuantificar el peso de su voto para cada solución y votar en consecuencia.
- c) La situación de conflicto donde se especifica lo que ocurre en el entorno si no se llega a un acuerdo en el protocolo.
- d) Los estados de información de los agentes que definen el conocimiento que estos tienen del entorno y del estado de la negociación.

A pesar de que los componentes de los protocolos de negociación están definidos e identificados, su especificación e implementación depende en gran manera de las características intrínsecas del dominio de aplicación donde va a ejecutarse el protocolo. Por consiguiente, una vez validado el protocolo teórico, es necesario realizar un análisis detallado del dominio de aplicación, y realizar su adaptación teniendo en cuenta los resultados del análisis.

Finalmente, será necesario desarrollar un banco de pruebas para evaluar el protocolo de negociación y los resultados frente a diferentes situaciones. Para llevar a cabo este proceso de evaluación, es fundamental diseñar un conjunto exhaustivo de pruebas que cubran todos los escenarios posibles. Estas pruebas no solo deben examinar el comportamiento del protocolo en sí, sino también evaluar la respuesta del entorno ante diversas situaciones.

La realización de pruebas que abarquen una amplia gama de condiciones posibles garantizará una validación más completa y precisa del protocolo, permitiendo identificar posibles vulnerabilidades o áreas de mejora. En última instancia, este enfoque robusto de pruebas contribuirá a la fiabilidad y eficacia del protocolo en el dominio de aplicación.

1.3. Objetivos.

El objetivo principal de esta tesis doctoral es *diseñar un nuevo protocolo de negociaciones distribuidas y encadenadas que permita a los agentes involucrados en la negociación mejorar el aparcamiento de camiones en redes de carreteras interurbanas* cumpliendo las restricciones de tráfico. Esta tesis propone la definición del protocolo teórico, para tras su evaluación, adaptarlo a la gestión de plazas de aparcamiento. Para conseguir este objetivo general deben resolverse los siguientes subobjetivos:

- Proponer un modelo de negociación distribuido, mediante votaciones, para acordar la utilización de recursos por diferentes clientes. Este modelo desarrolla un marco de negociaciones encadenadas, donde cuando un cliente no obtiene el recurso que proporciona un proveedor, genera una nueva negociación, encadenada a la primera, en otro proveedor. Así pues, los resultados de las votaciones en un proveedor condicionan la evolución de la negociación en otros proveedores y, por consiguiente, en la solución final.
- Estudiar y analizar el dominio del aparcamiento de camiones en entornos interurbanos y la problemática existente en los actuales sistemas inteligentes de aparcamiento. Este estudio debe proporcionar el conocimiento necesario del entorno que identifique sus componentes, características y restricciones. El resultado del análisis debe determinar la viabilidad de aplicar el protocolo de negociaciones encadenadas en este dominio.
- Adaptar el protocolo de negociación a un entorno real: el aparcamiento de camiones en entornos interurbanos estudiado en el subobjetivo anterior. Esta adaptación va a requerir modificar algunas de sus características propias del protocolo sin modificar sus principales características: protocolo distribuido y autónomo para la negociación de múltiples recursos mediante negociaciones encadenadas.
- Diseñar e implementar un sistema multiagente como alternativa a las actuales soluciones de gestión de incidencias, incorporando el protocolo de negociación propuesto, que sirva como banco de pruebas para evaluar el protocolo. El sistema debe considerar diversos aspectos clave como: 1) cumplir con las principales propiedades de los sistemas autónomos, 2) crear e integrar un modelo de representación de conocimiento genérico específicamente diseñado para el ámbito del dominio de aplicación, 3) diseñar un modelo de interacciones que cumpla con los estándares establecidos por la Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA). Este modelo de interacciones deberá incluir el protocolo de negociación. Por último, se implementará la plataforma multiagente que respalde eficazmente las funcionalidades del sistema mediante el entorno de programación JADE (Java Agent DEvelopment framework).

1.4. Organización de la memoria.

La presente memoria de la tesis se estructura en los siguientes capítulos:

- En el presente capítulo se realiza una introducción al problema y la motivación que me ha llevado a realizar la presente tesis doctoral. También se describe como se ha planteado el problema a resolver.

- En el capítulo dos se presenta una revisión tecnológica y científica de las principales líneas de investigación que se abordan en la tesis. En él, se definen los sistemas autónomos, sus propiedades y su relevancia en el desarrollo de sistemas distribuidos e inteligentes. También se describen los protocolos de negociación, prestando especial interés a la negociación mediante votaciones.

Por último, el capítulo introduce el entorno del tráfico interurbano y los sistemas inteligentes de transporte aplicados al aparcamiento de camiones, identificando la necesidad de utilizar protocolos inteligentes y distribuidos.

- En el capítulo tres se describe el nuevo protocolo de negociación propuesto. Este protocolo presenta una novedosa aproximación a la negociación mediante votaciones en entornos distribuidos. Esta propuesta permite las negociaciones sobre recursos que ofrecen diferentes proveedores, donde existe un conjunto de posibles soluciones. Los resultados de las soluciones pueden provocar nuevas negociaciones encadenadas hasta que se resuelva la asignación de los recursos solicitados por los clientes.
- En el capítulo cuatro se presenta la adaptación y aplicación del protocolo de modelo de negociación al aparcamiento de vehículos pesados en entornos interurbanos. El protocolo se adapta a la gestión de plazas de aparcamiento de las áreas de servicio que se encargan en la red viaria.

Para ello, se define el entorno y el protocolo de negociación, el comportamiento, las características y las restricciones propias del aparcamiento de camiones.

- En el capítulo cinco se describe el sistema multiagente autónomo que permitirá desarrollar un banco de pruebas del protocolo y del dominio del aparcamiento de pesados.

Primero se ha elaborado el modelo de conocimiento del sistema que utilizarán los agentes. Posteriormente, se ha descrito al diseño del sistema, abordando el desarrollo de modelos para la organización, los agentes y las interacciones. También se describe cómo se ha llevado a cabo la implementación del sistema, incluyendo la creación de una plataforma SW para simular su funcionamiento en entornos de tráfico reales.

Por último, el capítulo expone el concepto de escenario y cómo se pueden crear para el desarrollo de los bancos de pruebas, incluyendo un caso de uso.

- En el capítulo seis se presentan las pruebas realizadas para evaluar el protocolo y el sistema propuesto desde dos puntos de vista: 1) la validación de los resultados del protocolo frente al aparcamiento de camiones y 2) la eficiencia computacional del mismo, con diferentes configuraciones de intensidad de vehículos.
- En el capítulo siete se formulan las conclusiones de la tesis y el trabajo realizado, incluyendo los logros obtenidos y las líneas de investigación y trabajo futuras.
- Anexo. Al final del documento se ha añadido un anexo con las publicaciones derivadas del trabajo de esta tesis.

Capítulo 2

Revisión tecnológica y científica

Contenidos

2.1. Introducción	8
2.2. Sistemas autonómicos	9
2.2.1. Propiedades de los sistema autonómicos	9
2.3. Agentes inteligentes en entornos de negociación	13
2.4. Protocolos de negociación	15
2.4.1. Protocolos de negociación mediante votaciones	16
2.4.2. El sistema de votación Borda	17
2.5. Sistemas inteligentes de aparcamiento	18
2.5.1. Sistema de negociación centralizado	22
2.6. Conclusiones	24

En este capítulo se presenta una revisión tecnológica y científica de las tres líneas de investigación en las que se centra esta tesis: a) los sistemas autonómicos, b) los protocolos de negociación y c) los sistemas inteligentes de transporte, y en concreto su aplicación a los sistemas inteligentes de aparcamiento.

En el primer apartado se introduce el ámbito de aplicación de la tesis y la relación existente entre las tres líneas de investigación descritas.

Posteriormente, en el segundo apartado, se introducen los sistemas autonómicos, describiéndolos y diferenciándolos de los tradicionales sistemas autónomos.

En el tercer apartado se presenta la importancia de los protocolos de negociación, y se describen los protocolos de negociación basados en votaciones.

Y por último, se introducen los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, de sus siglas en inglés Intelligent Transport Systems), y su aplicación a los Sistemas Inteligentes de Aparcamiento (ITP, de sus siglas en inglés Intelligent Truck Parking). Además, en este apartado, se describe una primera aproximación a la gestión de sistemas ITP a través de negociación mediante votaciones de forma centralizada.

2.1. Introducción

El Observatorio del Transporte y Logística de España en su Informe Anual (2022), en su apartado 3.5.3, resume los principales datos del sector y profundiza en los datos sociales y económicos del transporte por carretera. En el mismo se indica que en el año 2020 en la UE, el 49 % de las empresas de transporte en el sector del Transporte y Almacenamiento, eran empresas de transporte de mercancías por carreteras, representando un valor en la producción del 36 %. Con un incremento del número de vehículos de un 4,5 % respecto a 2019 y un estancamiento en la creación de nuevas empresas autorizadas por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana para el transporte de mercancías por carreteras, lo que supuso un incremento de 3 vehículos en la ratio de número de vehículos por empresa. Siendo las principales tendencias por las que se caracteriza la flota destinada al transporte por carretera las siguientes: los vehículos de menor dimensión (de menos de 3,5 toneladas) y el envejecimiento de la flota [13].

El programa de apoyo al transporte sostenible y digital, incluido en el Componente 6 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), incluye entre sus medidas la construcción y mejora de áreas de aparcamiento seguras para vehículos comerciales, así como la provisión de servicios de información. En la Línea 4 del programa, Transporte por carretera seguro, sostenible y conectado, se indica la necesidad de fomentar la implantación de sistemas de transporte inteligente en el sector del transporte por carretera [14].

En el Reglamento delegado (UE) 2022/2012 del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [15], de julio de 2022, se modifican los procedimientos y requisitos necesarios para la inclusión de áreas de aparcamiento seguras y protegidas en el Punto Nacional de Acceso (PNA). Los PNA son desarrollados en las directivas de la UE para fomentar el desarrollo de aplicaciones ITS. En este caso, la inclusión de la información de áreas de aparcamiento favorecerá el desarrollo de aplicaciones ITPs que permitirán buscar estacionamientos apropiados y contribuirán a la protección de los conductores y las mercancías. Por último, y no menos importante, estas aplicaciones facilitarán el cumplimiento de los periodos de descanso legalmente establecido, basados en la disponibilidad de información sobre los aparcamientos y en el intercambio de datos entre los aparcamientos, los centros y los vehículos.

Los avances en las TIC están permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones inteligentes. Entre ellas destacan, los sistemas autonómicos, como una evolución de los sistemas autónomos. Estos sistemas permiten tomar decisiones basados en protocolos y mecanismos de negociación cuya base fundamental es la Inteligencia Artificial (IA), que como se destaca en [2] es fundamental para el sector del tráfico y el transporte. Ya en el 2001, el vicepresidente de IBM Paul Horvitz, introdujo el paradigma de la computación autonómica, comparando su funcionamiento con la del sistema nervioso central y el cerebro, como solución a la complejidad de gestión de datos mediante sistemas informáticos que pueden autogestionarse según protocolos establecidos [16, 17].

La computación autonómica permite reducir los costos y aumentar la eficiencia utilizando la gestión de recursos y aplicaciones [16] mediante desarrollos donde intervienen agentes inteligentes. Estos agentes interactúan a lo largo de su ciclo vital y para ello necesitan mecanismos que faciliten el proceso de acuerdos mediante la definición de reglas de decisión y de resolución de conflictos. Estos procesos se denominan protocolos de negociación y para su resolución se pueden utilizar distintas estrategias. Una de ellas es la utilización de votaciones que permiten tomar decisiones de forma consensuada entre diferentes agentes sociales.

2.2. Sistemas autónomos

El desarrollo e implementación de las TIC como elementos facilitadores de la vida diaria en casi todos los sectores, supone una alta demanda de especialistas para su puesta en marcha y mantenimiento. Como se ha comentado anteriormente, en 2001, IBM desarrolló un nuevo paradigma donde se reducía al máximo la participación humana y que denominó *sistemas autónomos*. Este tipo de sistemas se fundamentan en el comportamiento del sistema nervioso humano [17, 16, 18]. El objetivo principal de estos sistemas es dar respuesta a la complejidad de los cambios que se producen de forma continua en los diferentes contextos de aplicación [19].

Los sistemas autónomos dan respuesta a la gestión de datos con redes complejas, como son las redes de quinta o sexta generación (5G y 6G). Este tipo de sistemas permiten que la red se gestione a sí misma con un mínimo o ninguna intervención humana [20].

Estos sistemas tienen la capacidad de operar y tomar decisiones de manera independiente, sin intervención humana directa [21, 22]. En el Manifiesto de informática autónoma se describe con el objetivo de conseguir desarrollo sistemas de alta complejidad autogestionados [17]. La relevancia de los sistemas autónomos, además, radica en su capacidad para mejorar la eficiencia, reducir errores y adaptarse a entornos cambiantes cuyo origen puede ser de un comportamiento del usuario, de los recursos o de interacciones con otros sistemas [18], lo que lleva a un mejor rendimiento y una mayor autonomía en diversas aplicaciones y sectores.

Estos sistemas, al cambiar su comportamiento en función del contexto de ejecución, también se denominan sistemas 3A (*Automatic, Adaptive, and Aware*) [16] y también son conocidos como sistemas autoadaptativos, por el tipo de comportamiento: auto o *self* [23, 20].

Un sistema autónomo que se optimiza automáticamente es aquel que puede mejorar su propio rendimiento al completar con éxito trabajos computacionales [23]. La capacidad de un sistema autónomo para adaptarse a los cambios del entorno se denomina “autoconfiguración” [23].

2.2.1. Propiedades de los sistema autónomos

Los sistemas autónomos tienen como principal objetivo asignar recursos en base a la adaptación del contexto cambiante [21], y cuentan con ocho características principales [17, 21]:

1. Autogestionarse en función de objetivos de alto nivel: el sistema aprenderá y se adaptará a nuevos componentes.
2. Deben autoconfigurarse en función del entorno.
3. Alcanzar los objetivos establecidos encontrando de forma continua la eficiencia y mejora de su funcionamiento.
4. Mantener el funcionamiento inicial, detectando y solucionando errores de forma autónoma.
5. Protegerse a sí mismo de posibles ataques, defendiendo el sistema en su conjunto.
6. Conocer el contexto y adaptarse.
7. Tomar decisiones de forma continua en un entorno abierto.
8. Satisfacer la calidad de los servicios.

Las propiedades que se deben analizar para determinar el grado de automaticidad de un sistema son: [16, 21, 24, 25]:

- **Auto-configuración.** Pretende lograr que los sistemas se configuren a sí mismos de acuerdo a políticas de alto nivel representando objetivos de nivel de negocio. Se aclara que este concepto permite solamente especificar lo que se desea y no cómo se va a hacer. Cuando se introduce un nuevo componente, el resto del sistema se adapta a su presencia. Por ejemplo, podría ser necesario incorporar una nueva bifurcación si en un sistema de control de autopistas aparece una nueva carretera que conecta con ella [25].
- **Auto-optimización.** Los sistemas autónomos continuamente buscan como mejorar su funcionamiento, identificando oportunidades para hacerse a sí mismos más eficientes. Estos sistemas tienden a actualizar su función encontrando, verificando y aplicando las últimas actualizaciones.

Dichas decisiones de mejora deben recoger y agregar información de la experiencia de los administradores humanos como consejeros. Con el tiempo, lo que se pretende hacer es llegar a un punto de toma de decisiones a bajo nivel. Lo resaltable de esta propiedad es que su precisión está en función de los datos de entrada y la validez de los datos del modelo [25].

- **Auto-recuperación.** Se basa en la capacidad de detectar componentes de software y hardware que estén fallando, eliminarlos o reemplazarlos con otros componentes sin interrumpir la operación del sistema.

Incluye también predecir problemas y predecir fallas. Los posibles fallos pueden venir, por ejemplo, desde los datos de entradas por estar incompletos o de salida.

- **Auto-protección.** Es la propiedad que hace que el sistema se defina como un todo a gran escala, relacionando problemas que surgen de ataques o fallos no corregidos por las medidas de auto-recuperación, anticipándose a problemas basados en los informes y toma pasos para prevenir/mitigar estas situaciones [18].

En la Tabla 2.1 se muestran las diferencias de los sistemas convencionales y los autónomos [17, 23]:

	Computación Convencional	Computación Autónoma
Auto-configuración	Los centros de datos corporativos tienen múltiples proveedores y plataformas. La instalación, configuración e integración de sistemas requiere mucho tiempo y es propenso a errores.	Configuraciones automatizadas de componentes y sistemas. Sigue políticas de alto nivel. El resto de sistemas se ajusta de forma automática y sin problemas.
Auto-optimización	Los sistemas tienen cientos de parámetros no lineales configurados manualmente y su número aumenta en cada versión.	Los componentes y sistemas buscan de forma continua mejorar el rendimiento y eficacia.
Auto-recuperación	La existencia de problemas puede requerir de programadores.	Detecta los errores, hace un diagnóstico y los repara.
Auto-protección	La detección y recuperación es manual.	La detección y recuperación es automática.

Tabla 2.1: Cuatro aspectos de la Auto-gestión tal como son y serían ahora con los sistemas autónomos [17].

Estas características han ido aumentando con el paso de los años, incluyendo la: autoanticipación, autoadaptable, autoconsciente, autocrítico, autodefinición, autodestrucción, autodiagnóstico, autogobierno, autoinstalables, autogestionables, automonitoreantes, autoorganización, autorrecuperación, autorreflexión, autosimulación, autoestabilizante [18].

En un sentido más amplio, los sistemas autogestionados deberían ser capaces de controlar todos los comportamientos antes mencionados. Como una parte del paradigma de computación autónoma de IBM, la autogestión es una solución inteligente que interactúa con el contexto mediante interfaces de gestión y que será capaz de predecir, diagnosticar y evitar problemas de forma independiente a las funciones de la red [23, 20]. También permite una reconfiguración y optimización de la red con una administración reducida en tiempo real en contraposición de la computación autónoma que centra sus esfuerzos en la informática cerrada [26].

En el sexto y en el séptimo programa marco de la EU se desarrollaron numerosos proyectos con el objetivo de desarrollar arquitecturas y diseñar protocolos que permitieran generar características autonómicas explotables desde protocolos ya existentes [26]. Además, en [27, 28] se destaca la necesidad de aunar esfuerzos centrados en la estandarización debido al incremento en la complejidad del contexto y la necesidad de conectividad cada vez es mayor, unido con la necesidad de mayor autoorganización, autogestión, automatización e interoperabilidad.

Dentro de los sistemas ITS se pueden definir dos tipos de aplicaciones [25, 29]: el gestor autonómico y el recurso gestionado. El gestor puede estar en el mundo virtual mientras que el recurso gestionado podría ser un recurso de computación. Así pues, los métodos desarrollados para gestionar el tráfico en tiempo real suelen basarse en la respuesta inmediata, mientras que desde el método científico se deben basar en el aprendizaje y ajuste a las condiciones cambiantes, coordinando los recursos y su autorregulación [25], es decir, estar dotados de propiedades autonómicas, para poder definir el objetivo deseado y el conjunto de propiedades.

La literatura científica encontrada sobre sistemas de autonómicos de aplicación al sector del transporte presenta algunos ejemplos de aplicación de los sistemas autonómicos en el sector del tráfico como:

- Facilitar que la gestión de tráfico no dependa solamente de un operador, ya que recibe mucha información en un periodo muy corto de tiempo y no es capaz de tomar decisiones. Para ello se desarrolló un modelo de sistemas autonómicos en varios niveles, con un caso práctico para la regulación de dos semáforos en un cruce en Sofia. El trabajo concluye que el modelo permite integrar diferentes niveles de un sistema común cumpliendo con el objetivo de los sistemas autonómicos [21].
- Gestión de redes para la mejora de la calidad de aire y reducción del carbono originado por el tráfico rodado. Para ello se desarrolló un sistema con capacidad de razonar en una capa de una plataforma de datos. Mediante la computación autónoma, teniendo en cuenta la reducción de gastos y la máxima eficiencia de los recursos se aplicó el sistema en un caso de estudio que demostró la auto-optimización de la elección de un carril y una carretera [24].
- Otros ejemplos de aplicación de sistemas autonómicos para entornos complejos es su aplicación en los ecosistemas de servicios digitales [18] y en la nube [21].

Existen dos visiones para la gestión del tráfico con sistemas autonómicos. La primera aplicando la autonomía a la propia informática y a las comunicaciones, y la segunda más global basada en el desarrollo de modelos y herramientas de simulación propia [30]. En los últimos años se ha

incrementado el desarrollo de aplicaciones y el interés científico tanto en los sistemas de transporte inteligentes y cómo son las redes vehiculares ad hoc (VANET), que permiten dar información del estado de las carreteras a los conductores [31].

Tanto los sistemas ITS como las VANET, junto con las redes móviles ad hoc (MAPE), son ejemplos de sistemas que comparten el diseño autónomo, dado que para ser eficientes deben funcionar de forma autónoma, adecuarse a las variabilidades del entorno y a sus cambios, así como operar con auto-configuración, auto-optimización, auto-recuperación y auto-protección [31]. Estos sistemas además necesitan de decisiones en las fases de análisis, planificación y ejecución [19]. La estructura, más habitual de control necesaria para procesar la información en los sistemas de computación autónoma es el ciclo MAPE que desarrolló IBM, el cual se centra en: monitorizar (M), analizar (A), planificar (P) y controlar la ejecución (E) [29].

Dentro de los ITS hay múltiples ejemplos prácticos de uso de las redes vehiculares. Un ejemplo son los camiones de un pelotón que se comunican entre sí para compartir información sobre el estado de circulación en la carretera. Otro ejemplo, donde los vehículos además de comunicarse entre sí se comunican con estaciones de datos que se encuentran en la carretera y controlan elementos de gestión del tráfico (paneles, semáforos, ...) según la información que reciben de los vehículos [32]. En [33] se realiza una revisión detallada de los métodos y algoritmos existentes para la gestión automatizada del flujo de tráfico, centrándose en la detección de puntos de congestión y las posibles aplicaciones del IoT en este ámbito.

Además, la literatura muestra que el marco multiagente tiene un impacto prometedor en la mejora de la eficiencia en la gestión del tráfico al permitir la comunicación inteligente y la coordinación entre múltiples agentes, como vehículos, señales de tráfico y peatones. Así, este enfoque tiene el potencial de reducir la congestión del tráfico, mejorar la seguridad y optimizar la utilización de recursos en los sistemas de transporte urbano [34, 35, 36, 37].

La autoadaptación y autoorganización, tienen como objetivo mantener el autocontrol aunque exista una complejidad creciente [32, 38], por ejemplo, en contextos o escenarios abiertos como en el caso de la gestión de tráfico o de movimiento de barcos [38].

En el sector de transporte son necesarias investigaciones en sistemas autónomos, debido a los cambios que se producen en el contexto: el aumento del tráfico, los cambios normativos y la lentitud de la implementación de nuevas infraestructuras [21]. Estos cambios son uno de los problemas más frecuentes en el tiempo, además de la calidad de los servicios que se presentan [30]. El reto del desarrollo de los ITS para la gestión autónoma del tráfico debe de ir acompañado de el conocimiento del sector que permita ofrecer soluciones a tareas complejas sin que las personas usuarias de los sistemas lo perciban [25].

Algunas de las teorías, métodos y diseños empleados actualmente para alcanzar alguna o algunas de estas propiedades autónomas para sistemas de tráfico y transporte proceden del ámbito de la IA, fundamentalmente en áreas de planificación automática [39, 40], sistemas multiagentes [41, 42, 43], o el aprendizaje computacional [41, 44, 45]. Sin embargo, muy pocos protocolos y métodos del área de la teoría de juegos algorítmica con un enfoque autónomo se han propuesto para la gestión de tráfico, a pesar de ser ésta un área con un importante potencial para afrontar estos retos debido a su propia naturaleza interactiva [40].

Así pues, el desarrollo de sistemas que utilicen criterios para maximizar la eficiencia del más perjudicado, de racionalidad en la toma de decisiones estratégicas o minimizar el precio de la anarquía, son habituales en el diseño de protocolos de negociación en este ámbito de teoría de juegos algorítmica. No obstante, todavía no han sido analizados en el ámbito del aparcamiento

inteligente y dinámica de vehículos pesados como elementos formales con los que promover la exhibición de comportamientos autónomos.

2.3. Agentes inteligentes en entornos de negociación

El desarrollo de sistemas autónomos implica diferentes agentes inteligentes que actúan de forma individual e interactúan entre ellos para lograr sus objetivos. En [46] se indica que la negociación automática entre agentes autónomos es necesaria cuando éstos tienen objetivos que entran en conflicto, y a su vez, tienen deseo de cooperar.

En [47] se describe que los agentes son el elemento principal y los programas se desarrollan programando su comportamiento, sus objetivos y su modo de resolver una tarea colaborativa, siendo adecuados cuando es necesario una distribución o un cálculo de concurrencia para establecer comunicación entre distintos componentes. Ya en 1995, los sistemas multiagente se reconocieron como un área de la tecnología de la informática y son una rama básica de la IA, sin embargo, no han sido utilizados de forma extensiva, debido en gran parte a que los sistemas convencionales son más sencillos y necesitan de menor coordinación entre grupos de programadores [47].

Existen muchas aplicaciones prácticas cuya programación se basa en agentes, desde aplicaciones para el control energético a sistemas para simular el comportamiento y avance del coronavirus. Desde el año 2005 se realiza un concurso de programación multiagente, con el objetivo de movilizar la investigación en este campo. En el año 2022, se celebró la 16 edición, cuyo propósito fue conseguir organizar agentes con visión local para unir y desarrollar estructuras complejas [48].

En [49] se presentan las futuras ciudades con complejos sistemas autónomos coordinados en tiempo real: flotas de coches sin conductor, sistemas de reparto de paquetería mediante drones, ... Muchos de estos sistemas autónomos deberán coordinarse a lo largo de regiones amplias y distantes. Estos problemas comúnmente se han abordado desde un diseño local de algoritmos, pero los nuevos retos expuestos hacen que el problema de esta coordinación se aborde desde el punto de vista de la teoría de juegos, y los sistemas de negociación [50]. Incluso, en [51] se presenta sistemas multiagentes autónomos que se organizan en coaliciones para su aplicación en múltiples áreas.

En [22] se trata el problema de la optimización en sistemas descentralizados autónomos. En este caso se aplican los sistemas multiagentes al control de tráfico urbano. En [52] se realiza una revisión a los sistemas multiagente y las redes complejas en sistemas de ingeniería.

Implementación de agentes

A continuación, se presentan algunos de los lenguajes/entornos de programación para el diseño y desarrollo de estos sistemas complejos multiagente. En la revisión sistematizada realizada en [47], se describen entre otros:

- GOAL: basa sus decisiones en reglas.
- Jason: cuyos agentes reaccionan en función de la información de las bibliotecas.
- JADE es una plataforma de código abierto para el desarrollo de agentes peer-to-peer basados en aplicaciones. Además de la abstracción del agente, también proporciona: ejecución y composición de tareas. El modelo de comunicación de agentes de igual a igual se basa en el paso de mensajes asíncronos, y un Servicio de página amarilla que admite el mecanismo

de descubrimiento de publicación y suscripción. Basados en JADE los sistemas se pueden distribuir entre máquinas con diferentes sistemas operativos. Ha sido utilizado por muchos lenguajes (por ejemplo, Jason y JaCaMo) como infraestructura de distribución.

- JADEL (JADE Language), una extensión de JADE que proporciona soporte para la construcción de agentes y MAS sobre JADE sin tener que utilizar Java directamente; posteriormente, en los autores presentan Jadescript, una extensión de JADEL. Jadescript se caracteriza por una fuerte sintaxis expresiva inspirada en gran medida por lenguajes de scripting modernos para promover la legibilidad y hacer que los programas de agentes más similar al pseudocódigo.
- Jadex permite la programación de agentes software inteligentes en XML y Java. La abstracción del agente se basa en el modelo BDI (Belief Desire Intention) y proporciona varias características tales como infraestructura de tiempo de ejecución para agentes, múltiples estilos de interacción, soporte de simulación, formación automática de redes superpuestas y un amplio conjunto de herramientas para su ejecución.
- LightJason, una plataforma basada en Java altamente escalable para programación orientada a agentes en sistemas BDI concurrentes. LightJason se basa en un lenguaje lógico que se extiende permitiendo añadir algoritmos de Inteligencia Artificial a la arquitectura software construida.
- AgentSpeak(L) es un lenguaje de programación basado en programación lógica con expresiones lambda, definición de reglas y planes múltiples, acciones de reparación explícita, asignaciones multivariantes, ejecución paralela y variables seguras para subprocesos.
- Lenguaje AOP (Agent Oriented Programming). Programación orientada a aspectos. Permite una modularización de las aplicaciones permitiendo la separación de responsabilidades.

De los sistemas de implementación revisados se ha elegido JADE ya que implementa el lenguaje de comunicación estándar FIPA-ACL [53] y además, implementa por defecto, algunos agentes ligados a la plataforma, que implementan los servicios definidos por FIPA:

- Sistema de administración de agentes (AMS). Existe un agente AMS para cada instancia de la plataforma Jade en ejecución. Es el responsable de supervisar el acceso y uso de la plataforma.
- Facilitador de directorios (DF). Es el agente encargado de suministrar el servicio de páginas amarillas y puede conectarse a otros agentes facilitadores para crear una estructura federada de sistemas multiagente.
- El agente sniffer. Este agente puede interceptar los mensajes entre distintos agentes y mostrarlos gráficamente para facilitar la depuración del sistema.
- Introspector. Este agente permite controlar el ciclo de vida de los agentes y analizar los mensajes que un agente intercambia, tanto los que envía como los que recibe.

En definitiva, JADE proporciona un conjunto de herramientas, bibliotecas y protocolos para facilitar la creación de aplicaciones basadas en agentes, permitiendo que el programador se centre en la implementación del sistema.

2.4. Protocolos de negociación

Durante su ciclo de vida los agentes deben interactuar con otros agentes del sistema para poder lograr estos objetivos. Esta interacción puede ser de diferentes tipos: coordinada (colaborativa) o competitiva [54]:

- Coordinada. En una negociación coordinada, los agentes colaboran estrechamente para alcanzar un objetivo mutuo que implique lograr un resultado beneficioso para todas las partes involucradas.
- Competitivas. En este tipo de negociación, los agentes tienen intereses diferentes, incluso opuestos, por lo que compiten entre sí para maximizar sus propios intereses. A menudo esta competición no considera la satisfacción mutua.

La negociación competitiva es una de las interacciones que más se ha estudiado en la literatura [54, 55] debido que la gran mayoría de los sistemas compiten para obtener recursos.

El diseño de mecanismos es la herramienta que permite modelar las interacciones. En el caso de los sistemas autónomos y la negociación automática, el diseño de mecanismos provee un marco de negociación que permita la interacción de los participantes [12]. Este marco de negociación, que debe ser conocido y aceptado por todos los participantes, define las normas que describen la negociación: cuál es el tiempo máximo que puede durar la negociación, cuál es el contenido de las ofertas y qué ocurre si no se alcanza un acuerdo.

Estos mecanismos deben definir el vocabulario, el lenguaje de comunicación y las reglas que definen la negociación. El conjunto de estos elementos se denomina protocolo de negociación [56]. Los componentes de un protocolo de negociación son [12]:

- El entorno de negociación, con los jugadores (cualquier tipo de entidad que requiere un recurso) que intervienen en la negociación, los roles que cada uno de ellos puede desarrollar, los servicios, recursos y las estrategias que determinan los servicios a negociar.
- Las reglas de encuentro, donde se define el modo en que los jugadores realizan las ofertas y contraofertas, la función de utilidad que permite cuantificar una oferta y determinar cuándo se acepta o no, y por último cuando se implementan los servicios acordados.
- La situación de conflicto donde se especifica lo que ocurre en el entorno si no se llega a un acuerdo en el protocolo. Esto es, si se sobrepasa el tiempo máximo de la negociación o si alguno de los jugadores implicados en ella la abandonan, o, no consiguen los recursos que necesitan.
- Los estados de información de los jugadores que definen el conocimiento que estos tienen del entorno de la negociación y las estrategias de los jugadores que permiten determinar cuál es la siguiente acción que un jugador debe tomar en el siguiente instante de tiempo.
- Los escenarios de negociación en los que los jugadores se pueden encontrar, el conjunto de posibles resultados dependiendo de la composición de la agenda y cuáles son las estrategias óptimas que maximizan el beneficio de los jugadores durante la negociación.

En [46] se abarca los enfoques de los tipos de negociación automática existente definido como el proceso de interacción a través del cual múltiples agentes software intentan llegar a un acuerdo al respecto del reparto de unos recursos limitados:

- Negociación basada en teoría de juegos. En este tipo de negociación encontramos dos ramas: la cooperativa y la no cooperativa. La negociación cooperativa se basa en buscar una solución dado un conjunto de resultados posibles. La solución debe satisfacer una serie de propiedades, como la estabilidad o justicia.

Por ejemplo, que dos negociadores consigan la mitad del recurso por el que se negocia. Sin embargo, en la negociación no cooperativa se especifican un conjunto de reglas que son conocidas de antemano por los participantes.

- Negociación basada en heurísticas. Cuando se relajan algunos supuestos debido principalmente a que por motivos analíticos se hace imposible conseguir resultados a partir de estrategias óptimas, es necesario aplicar otro tipo de reglas basadas en experiencias previas para tomar decisiones rápidas y eficientes. La heurística nos permite simplificar la complejidad del proceso de negociación. La aprobación de una determinada heurística viene determinada por la comparación empírica con otras heurísticas [46, 12].
- Negociación basada en Argumentación. En el contexto de la negociación un argumento se puede entender como una metainformación utilizada para hacer más atractiva una propuesta [57].

En [46] se postula que las aproximaciones heurísticas y de teoría de juegos a la negociación automática asumen que las utilidades de los agentes o preferencias están perfectamente caracterizadas antes de las interacciones. También se indica que un punto clave es disponer de un mecanismo que permita valorar y comparar propuestas por lo que en ciertas ocasiones (preferencias incoherentes, recursos limitados para obtener toda la información, ...) no son convenientes.

Así pues, en el protocolo presente se asegura que los agentes involucrados tendrán la información suficiente para generar propuestas que serán valoradas donde se obtendrá siempre una solución ganadora que será la base de la evolución del sistema. Este mecanismo se basa en la realización de la negociación mediante votaciones.

2.4.1. Protocolos de negociación mediante votaciones

Los sistemas de votación se han utilizado a lo largo de la historia para múltiples tipos de elecciones. En [58], se presentan los mecanismos de votación como los métodos más utilizados para resolver problemas de la vida diaria en los que un conjunto de agentes debe tomar una decisión social consensuada. En él, se expone que el objetivo de un mecanismo de votación consiste en determinar una regla de elección social que tome como entrada las preferencias individuales de los agentes y produzca como salida una relación de preferencia social con algunas propiedades deseables definidas [59]. En [60], se definen cuáles deben ser los criterios deseables para los resultados obtenidos que se presentan en [58]:

- Criterio Pareto: Si cada votante prefiere una alternativa x a una alternativa y , una regla de votación no debería producir y como ganadora.
- Criterio del ganador Condorcet: Si una alternativa x obtendría una mayoría de votos en contienda de a pares contra cada una de las otras alternativas, la alternativa x debería ser ganadora.
- Criterio del perdedor Condorcet: Una alternativa y que perdería en contienda de a pares por mayoría contra cada una de las otras alternativas, no debería ser elegida como la ganadora.

- Criterio de monotonicidad: Si una alternativa x es ganadora bajo una regla de votación, y uno o más votantes cambian sus preferencias en una manera favorable a x (sin cambiar el orden en que ellos prefieren las otras alternativas), entonces x aún debería ser la ganadora.
- Criterio de la mayoría: Si una mayoría de votantes tienen una alternativa x como su primera elección, una regla de votación debería elegir x como ganadora.

En este sentido, se va a analizar los métodos básicos de votación existentes y sus variantes. Cuando solo hay dos candidatos parece claro cómo debe realizarse una votación para ver quién gana esta votación. Pero cuando hay varios candidatos, ¿cuál será el mejor método para resolver la votación?

En [61], se analizan distintas posibilidades, junto con la paradoja del perjuicio que puede tener un votante si se abstiene. Una primera posibilidad a la solución de la votación suele ser utilizar el método de la *Pluralidad*, donde cada votante elige a un único candidato y el más votado gana. Aunque este siga siendo uno de los métodos de votación más populares, las críticas a este método son múltiples pues es posible que el candidato elegido no sea el preferido por la mayoría.

En [62, 61] se analizan los dos métodos principales que emergieron hace más de 2 siglos (Condorcet en 1785 y Borda en 1781) intentando encontrar un método en el que el ganador no pudiera perder en una comparación por pares entre candidatos.

Estos dos métodos han estado en contraposición. Condorcet propone elegir el candidato que venciera a cualquier otro en las comparaciones por pares (aunque es posible que este candidato no exista). Mientras que Borda asignó puntos a cada candidato, crecientes linealmente en relación a su posición en las preferencias del votante, proponiendo que el votante fuera el que obtuviera mayor número de puntos.

De este modo, han salido varias familias derivadas de cada uno de los métodos, aplicando variante a la formulación original planteada por sus creadores [62]:

- No posicionales. Basados en Condorcet.
- Posicionales. Basados en Borda.

Otra posible rama de estudio se basa en la resolución de la negociación mediante subastas. Es interesante en este aspecto el uso de las subastas Vickrey-Clarke-Groves (VCG) [63] donde los clientes presentan ofertas informando de su valoración de los productos sin conocer la valoración de las demás. En este tipo de subastas los clientes deben pagar el daño que hagan a la sociedad (a quien no consigue recurso).

Es interesante este tipo de subasta en el caso de estudio de la tesis dado que este tipo de subastas aseguran que decir la verdad es una estrategia dominante, por lo que todos deben decir la verdad pues no tiene sentido no hacerlo. En [64] se presenta un mecanismo de subastas combinatorias para la asignación de slots ferroviarios.

2.4.2. El sistema de votación Borda

El método de votación Borda es uno de los métodos más antiguos del mundo y sigue siendo una referencia a la hora de su uso en elección social [65].

A partir de esta regla de votación, basada en puntuaciones otorgadas por los agentes participantes según sus preferencias, se han ido desarrollando numerosas variantes, que en parte tratan de conciliar las discrepancias entre el ganador de Borda y el ganador de Condorcet.

En [65] se presentan varios tipos de variantes:

- Borda Gradual. Donde las preferencias de los votantes en lugar de tomar valores discretos en el intervalo $[0, n-1]$, donde n es el número de elementos a votar, se toman valores graduales en el intervalo $[0,1]$.
- DesBorda (Sistema Echenique por ser su creador en 2016 para las elecciones primarias del partido político Podemos). En este caso se realiza un desplazamiento del conteo (ejemplo: 5 candidatos donde el voto al primero recibiría 8 votos y al último 4). Este desplazamiento introduce un incentivo de acuerdos y pactos entre los candidatos o alternativas.
- Borda Geométrico Truncado. En esta caso se elige una base (p.e. $1/3$), y la primer preferencia recibe un voto de valor 1 como resultado de elevar la base a 0, el segundo la base elevada a 1, y así sucesivamente. No haya obligación de votar a todas.
- Conteo de Borda Modificado. En esta variante tampoco hay necesidad de votar todas las opciones, pero en caso de votar menos las opciones disponibles no se beneficiarán de las puntuaciones más altas sino de las más bajas (ejemplo: si hay 5 candidatos y se vota a 2 solo estos no reciben los valores 5 y 4, sino los valores 2 y 1).
- Sistema de Cuotas de Borda. Variante de Borda tradicional para elecciones donde hay varios escaños a repartir y se emiten varios votos. En este sistema, creado por Michael Dummett en 1984), la cuota c_i se define:

$$c_i = \frac{S}{V} + 1$$

- Juicio mayoritario Borda. En esta variante se jerarquizan las alternativas según las preferencias de mayor a menor y se asignan puntuaciones según el orden. A continuación, se calcula la media de los puntos obtenidos por cada alternativa y el que obtenga el promedio mayor será el ganador.

2.5. Sistemas inteligentes de aparcamiento

En la UE la regulación común para el transporte por carretera es la Directive 2002/15/EC [66]. Este reglamento indica, entre otras cuestiones, el tiempo máximo de conducción sin paradas y los tiempos de descanso exigidos para los conductores:

- Conducción ininterrumpida. Tras un período de conducción de cuatro horas y media, el conductor hará una pausa ininterrumpida de al menos 45 minutos, a menos que tome un período de descanso.
Podrá sustituirse dicha pausa por una pausa de al menos 15 minutos seguida de una pausa de al menos 30 minutos, ambas intercaladas en el período de conducción de 4 horas y media.
- Conducción diaria. El tiempo máximo de conducción diario no puede exceder de 9 horas, salvo dos veces a la semana que puede llegar a las 10 horas.
- Conducción semanal El tiempo de conducción semanal no superará las 56 horas (se entenderá por semana el período de tiempo comprendido entre las 00.00 del lunes y las 24.00 del domingo).

- Conducción bisemanal. El tiempo de conducción en dos semanas consecutivas no puede exceder de 90 horas.

Así, si en una semana se conduce durante 56 horas (máximo permitido), en la siguiente sólo podrá conducirse durante 34 horas, puesto que ambas suman el máximo de 90 horas.

Por lo tanto, un elemento clave para la planificación de rutas de larga distancia es localizar áreas para aparcar. Los conductores suelen utilizar áreas de descanso para realizar estas paradas. Sin embargo, en algunos casos, si las áreas están llenas o resulta difícil su acceso, los conductores eligen para aparcar en las rampas de acceso o en los propios arcenes de la autovía. La Figura 2.1 muestra una vista aérea de un área de servicio en una carretera interurbana.

Este tipo de aparcamiento se considera ilegal y perjudica no solo la seguridad vial sino también la circulación ya que entorpece la circulación al haber vehículos en el arcén o en los accesos a las áreas de descanso.



Figura 2.1: Fotografía aérea de un área de servicio. Fuente iStock.

La importancia del aparcamiento de pesados queda patente en diferentes acciones de la UE:

- En la directiva ITS [67], una de las seis acciones prioritarias para el desarrollo y utilización de especificaciones se refiere a “la prestación de servicios de información sobre plazas de aparcamiento seguras y protegidas para los camiones y vehículos comerciales; es decir, la definición de las medidas necesarias para ofrecer sus servicios de información basados sobre plazas de aparcamiento seguras y protegidas para los camiones y vehículos comerciales, en particular en el servicio y áreas de descanso en las carreteras”.
- Posteriormente, en el plan de acción ITS [68] se identifica de nuevo como prioritario el desarrollo de sistemas y servicios ITS como soporte a la búsqueda de plazas de aparcamiento seguras para camiones y vehículos comerciales.

- En la revisión realizada en las TENT-T guidelines de 2013 [69], documento que describe las orientaciones para el desarrollo de la Red Europea de Transporte, se recomienda la instalación de áreas de descanso en autovías cada 100 km.
- En el Reglamento Delegado (UE) nº 885/2013 de la Comisión [70] que complementa la Directiva ITS en lo que respecta al suministro de servicios de información sobre áreas de estacionamiento seguras y protegidas para los camiones, se ha incluido la necesidad de facilitar el intercambio digital de información sobre la disponibilidad de aparcamiento en la red viaria.

Los nuevos sistemas y servicios de soporte al usuario para la determinación de las áreas de descanso se conocen como ITP. En el proyecto EasyWay [71], en el que han participado los organismos con competencias y gestión de tráfico tanto nacionales como regionales de la Unión Europea, se identificó a los ITP como uno de los servicios núcleo fundamentales.

En el marco de este proyecto se desarrolló una guía de despliegue con el objeto de orientar a las diferentes organizaciones en el desarrollo de sistemas y servicios ITP en las áreas de descanso. En esta guía, [71] se clasificaron los ITP en cinco niveles diferentes:

- El nivel más bajo de ITP se identifica como A. En este nivel, la información sobre las áreas de descanso es estática, el seguimiento y la gestión de las plazas se realizan manualmente, y la reserva se hace sólo por teléfono y con antelación.
- El nivel B utiliza un sistema avanzado para gestionar la información e incluye el uso de las TIC. Además, cuenta con detectores automáticos para controlar el estado del aparcamiento.
- En el nivel C, la información sobre la ocupación puede transmitirse a través de varios modos. La información en tiempo real puede darse para una sola área o para varias áreas de una sección en un corredor.
- A continuación, en el nivel D, se prevé la evolución de la ocupación del área. Esta previsión se realiza en función de la situación actual, el índice de ocupación, la densidad de tráfico, los perfiles históricos locales y los datos reales. Sin embargo, no se pueden garantizar las plazas libres.
- Por último, el nivel E prevé información sobre los corredores. Proporciona una mejor previsión a corto plazo con un mayor alcance que el nivel D y mejora la posibilidad de encontrar aparcamiento alternativo antes del viaje. En este nivel, los conductores pueden reservar una plaza de aparcamiento mediante tecnologías de a bordo y adaptar sus rutas para optimizar el uso del tiempo de conducción disponible.

Actualmente existen diferentes sistemas y servicios de ITS así como proyectos en relación con los niveles A, B y C, basados en libros y revistas editados periódicamente. En los EE.UU, se publica una guía (tanto en papel como en formato digital) que incluye todas las plazas de aparcamiento y la información se edita periódicamente [72]. En Europa, se desarrolló un portal web con la información sobre el estacionamiento, pero actualmente este portal ya no existe, siendo la desactualización de portales web de información de tráfico un problema para los usuarios.

El grupo francés VINCI, propietario de la gran mayoría de autopistas francesas ha desarrollado un sistema de información dinámica sobre las plazas de aparcamiento en su red viaria [73]. Este sistema consiste en la difusión de información específica con respecto a las plazas libres en los paneles de mensaje variable. Un proyecto similar se ha desarrollado en Hungría, ParkR [74]. Este

sistema estima y proyecta las tasas de ocupación de las áreas de estacionamiento de camiones e informa a los usuarios.

También existen aplicaciones móviles libres como TruckYa [75], donde los camioneros suben información sobre el nivel de ocupación de las áreas de servicio. Esta información se comparte con otros conductores de camiones registrados en el sistema.

Sin embargo, en relación con el nivel D y E, donde se considera que la información de las plazas debe ser dinámica y los usuarios pueden reservar plazas, existen pocos sistemas. Tradicionalmente, estos sistemas son sistemas de reserva antes del viaje, es decir, el conductor tiene que reservar la plaza con antelación.

Los sistemas actuales de ITPs presentan varias dificultades o deficiencias:

- Los conductores no conocen el comportamiento del tráfico de antemano, por lo que pueden no alcanzar el área de aparcamiento que han reservado por que han agotado su tiempo de conducción, o, porque cuando lleguen a él el área podría no tener espacios libres.
- Si un conductor tiene reservada una plaza y finalmente no la ocupa, los actuales sistemas de reserva no tienen conocimiento de esta situación hasta que es demasiado tarde y no pueden ofertarla a otro camión.
- En algunos sistemas, los conductores solo conocen la disponibilidad de las plazas libres cuando están en las inmediaciones del área de descanso lo que provoca incertidumbre durante la conducción, sobre todo cuando se está agotando el tiempo de conducción.

Actualmente, la alta penetración de Internet en todos los dominios de aplicación, junto con los avances en el desarrollo de sistemas inteligentes en general permite mejorar los sistemas ITS, dotándoles de un mayor grado de autonomía y de capacidad de interacción. Un claro ejemplo de estos sistemas son los sistemas cooperativos.

Los sistemas cooperativos se fundamentan en la comunicación Vehículo-Vehículo (V2V, Vehicle-to-Vehicle), Vehículo-Infraestructura (V2I, Vehicle-to-Infrastructure) o Infraestructura-Infraestructura (I2I, Infrastructure-to-Infrastructure). La comunicación directa entre vehículos, o bien entre los vehículos y la infraestructura permite: a) aumentar la información del estado del tráfico, b) disminuir los tiempos en los que el conductor es informado y c) aumentar la calidad de la información.

Un gran número de proyectos nacionales e internacionales han estado desarrollando protocolos y técnicas para los sistemas cooperativos en ITS. En el proyecto Europeo CVIS (Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems) [76] se desarrolló un conjunto de sistemas que permitían la comunicación entre vehículos e infraestructura. En SAFESPOT [77] se utilizó esta infraestructura de comunicación para la creación de redes inteligentes de vehículos, que intercambiaban información entre ellos, y aumentaban el conocimiento del conductor sobre su entorno.

Desarrollos de las mismas características se han realizado en el proyecto español OASIS [78], y en otros como Drive C2X [79]. Posteriormente, una vez probado la viabilidad de estos proyectos, se pasó a testear estos sistemas en entornos reales.

Un ejemplo de estos sistemas es el desarrollado en el proyecto METEOSAFETY [45]. En este proyecto se diseñó un sistema multiagente para automatizar la ejecución de planes de gestión de tráfico coordinados. El proyecto se fundamentó en la comunicación I2I e I2V y en el desarrollo de agentes inteligentes para la gestión autónoma de incidencias meteorológicas. Un prototipo de este sistema fue instalado en el CGT de Madrid.

La proliferación de estos tipos de sistemas y la relevancia de los mismos sobre la gestión del tráfico hizo que la Comisión Europea lanzara el Mandato M/453 [80] en el que se solicitaba la realización de una serie de normas que aseguraran que los sistemas cooperativos emergentes son interoperables entre sí y con el resto de sistemas ITS Europeos.

Estos avances pueden facilitar el reto de desarrollar nuevos sistemas ITPs. Sin embargo, las características del entorno del tráfico y en concreto del tráfico de mercancías hace necesario el desarrollo de sistemas con nuevas y ambiciosas funcionalidades que permitan aumentar el grado de autonomía en la ejecución y la autogestión del propio sistema ITP.

En este sentido se están realizando avances en la infraestructura para facilitar la obtención de información sobre el estado de ocupación de las plazas de aparcamiento, como el realizado por el Ministerio de Carreteras de la República Checa donde se está introduciendo un sistema de detección de ocupación conectado al centro de control dentro del concepto denominado *Construction 4.0* [81].

2.5.1. Sistema de negociación centralizado

En [82] se presenta una aproximación al problema del aparcamiento de camiones utilizando un sistema de agentes y revisado en [83]. En este sistema se presenta un enfoque centralizado en el que un agente *gestor* es el encargado de toda la gestión del sistema. En él, los agentes *camión* solicitan plazas al gestor, que siempre está informado del estado de plazas de aparcamiento de los agentes *área*.

De este modo, es el gestor el encargado de asignar las plazas de aparcamiento a los camiones si las áreas en las que solicitan aparcar tienen plazas libres, o, lanzan un proceso de negociación cuando se solicita plaza en un área en la que no queden plazas por asignar.

El gestor controla la forma en que se lleva a cabo la negociación. Cuando un camión entra en la red de carreteras supervisada, intenta hacer una reserva en su área de descanso elegida. Si el área no tiene plazas disponibles el gestor solicita a todos los camiones con reserva en ese área y les pide la lista de áreas en las que cada uno está interesado. A partir de esta información crea un listado de soluciones con todas las posibles distribuciones de los camiones entre sus áreas preferidas.

A continuación, envía las soluciones a todos los camiones implicados y recibe los votos de cada solución con los que determina la solución ganadora. Este gestor es el responsable de informar tanto a las áreas de descanso implicadas como a los camiones implicados el resultado de la negociación. Es decir, informará a cada área qué camiones tienen reserva en ella, y a los camiones el área en la que tienen reserva, o, si finalmente no consiguen reserva en ningún área.

A pesar de que el protocolo realiza una distribución de acuerdo a unos criterios definidos a lo largo de las áreas de descanso en la red de carreteras reduciendo el número de camiones que tienen que aparcar ilegalmente, se pueden identificar algunos inconvenientes que es necesario resolver:

1. Camiones involucrados en la negociación. La reasignación de camiones sólo afecta a aquellos camiones con reserva (más el nuevo solicitante) en el área de servicio afectada y los camiones con reservas en áreas vecinas no se ven afectados. La Figura 2.2 ilustra un pequeño ejemplo en el que se incluyen tres áreas de descanso con dos plazas de aparcamiento disponibles cada una. El área de descanso preferida es la más lejana que pueden alcanzar todos los camiones. De este modo, los camiones según van llegando van realizando las solicitudes que se presentan en la imagen de arriba, *Asignación Inicial de Reservas*. Los camiones C_1 y C_2 obtienen reservas en el área de descanso A_1 (área más alejada), y los camiones C_3 y C_4 en la anterior, área A_2 .

A partir de este escenario, se pasa al escenario ilustrado en la parte de abajo de la Figura 2.2, *Asignación Final de Reservas*.

Cuando entra en la red el camión C_5 , solicita una reserva en su área más lejana alcanzable. Suponiendo que puede llegar hasta el área A_1 , esta área ya tiene todas sus plazas reservadas (C_1 y C_2), por lo que el área comienza una negociación para determinar qué camión debe mantener la reserva y a cuál se le asignará una plaza libre en un área distinta. Según el ejemplo propuesto, el perdedor de la negociación entre C_1 , C_2 y C_5 (el camión C_2) tiene que ser reubicado en un área diferente según sus preferencias. Teniendo en cuenta que el área anterior no tiene plazas libres (todas sus plazas están ya reservadas, C_3 y C_4), el sistema propuesto en [82] ubica al camión C_2 en el área A_3 .

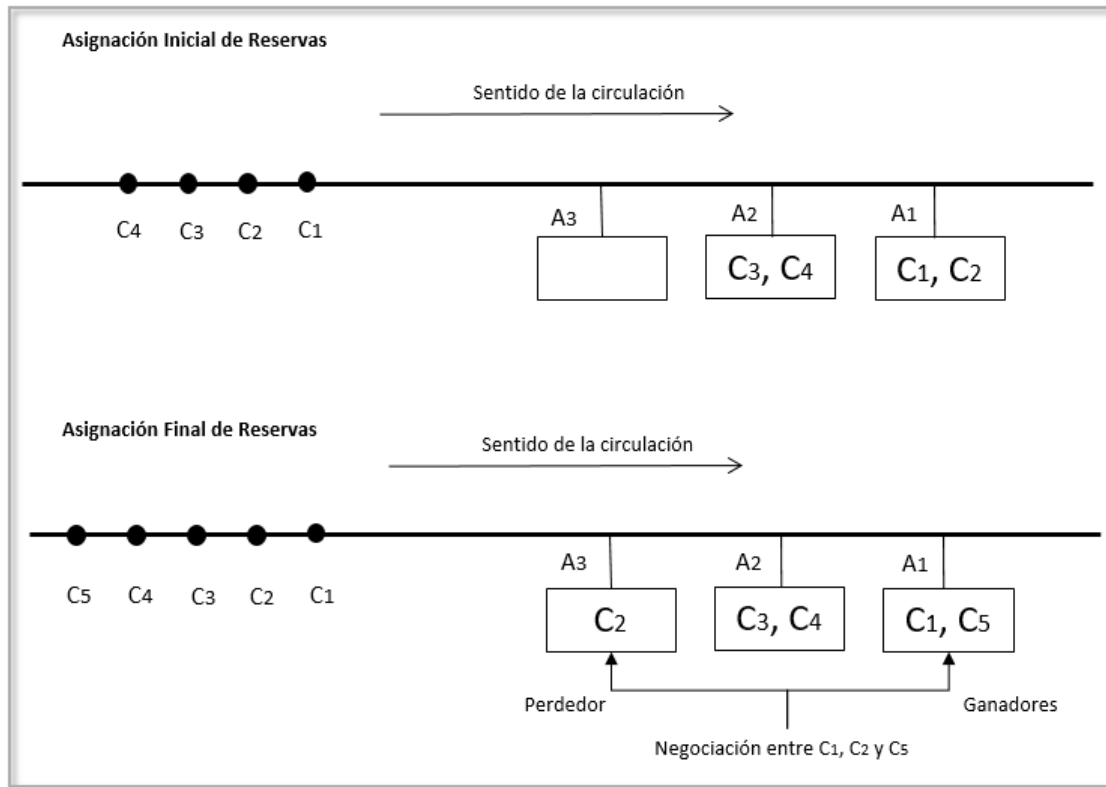


Figura 2.2: Ejemplo distribución según protocolo centralizado.

En el ejemplo expuesto, el protocolo sólo inicia una negociación cuando un nuevo camión entra en la red de carreteras solicitando una plaza de aparcamiento en un área de descanso totalmente reservada. Las demás áreas totalmente reservadas se descartan de las soluciones viables, es decir, no se ven afectados camiones con reserva en áreas adyacentes. Así, el camión C_2 no tiene posibilidad de llegar a su segunda área de descanso preferida (según la distancia al mismo) y obtiene la reserva en su tercera área preferida, A_3 , cuando podría ser posible que si se realizar una negociación entre C_2 , y los camiones con reserva en A_2 este ganara la negociación.

2. Conjunto de soluciones. El conjunto de soluciones se compone de las diferentes distribuciones combinatorias de los camiones involucrados en la negociación a lo largo de sus áreas de aparcamiento preferentes. Actualmente requiere el uso de una gran matriz. Si se aumenta

el número de camiones, las plazas disponibles en las áreas de descanso o las preferencias, el cálculo del conjunto de soluciones factibles se incrementa exponencialmente.

3. Enfoque centralizado. Todo el proceso de reserva está controlado exclusivamente por el gestor, que es el responsable de la gestión de todas las negociaciones. Este gestor debe comunicarse con los camiones y las áreas de descanso que participan en el proceso de negociación. Por tanto, puede convertirse en el cuello de botella del protocolo cuando el número de negociaciones es elevado, o cuando el gestor no está disponible por algún fallo de comunicación.

En conclusión, estos inconvenientes nos han llevado a diseñar un protocolo distribuido, más robusto y adaptable a entornos reales.

2.6. Conclusiones

En este capítulo, tras plantear la necesidad existente en la mejora de las condiciones del transporte de mercancías por carretera, y la firme creencia de las mejoras que los sistemas autonómicos pueden ofrecer a este tipo de entorno se ha realizado una revisión tanto del estado del arte de estos sistemas, como de la revisión tecnológica y científica existente en su aplicación a los mismos.

De este modo, se ha revisado tanto el estado y propiedades que los sistemas autonómicos ofrecen, como de su aplicación mediante sistemas multiagente, y, de los protocolos de negociación necesarios para que estos agentes puedan evolucionar de manera distribuida y autónoma. Una vez realizada esta revisión tecnológica se ha revisado el estado de penetración existente de los avances tecnológicos en el área de aplicación que nos ocupa, los sistemas inteligentes de aparcamiento.

La revisión tecnológica demuestra que en los sistemas multiagentes, especialmente aquellos que implementan entornos autonómicos, necesitan de un protocolo de negociación que asegure que siempre que se detecte un conflicto exista un método que lleve a seleccionar una solución para que el sistema evolucione y no se bloquee.

Así se postula la propuesta de que en el caso de conflicto en la repartición de recursos, una estrategia óptima sería la creación de un conjunto de soluciones posibles sobre las que los clientes voten y se asegure que hay una solución ganadora que determinará el reparto de la mejor manera posible (acorde a las reglas de utilidad definidas) entre los clientes.

De este modo, en este capítulo se han explorado los métodos de votación existentes, descartando las variantes derivadas de Condorcet, pues pueden llevar a una situación en la que no haya ganador. Mientras que la aproximación de Borda es un método interesante que puede servir para la propuesta de esta tesis. Explorando la literatura existente sobre las variantes posicionales derivadas de Borda se ha constatado que las variantes existentes tienen características prometedoras para la aproximación necesaria al problema que nos aborda, pero ninguna en sí se corresponde con la totalidad de las características de la votación necesaria, por lo que se propone realizar una nueva extensión adaptando el sistema original a las necesidades del problema.

También se ha revisado el estado de aplicación de las nuevas tecnologías al problema del aparcamiento inteligente de camiones, que aun siendo una línea prioritaria de la Unión Europea no ha llegado a alcanzar el nivel E en el que se intercambia información dinámicamente y se reservan plazas según las necesidades.

Cabe destacar una aproximación experimental que aborda el problema y se expone en este capítulo. Esta aproximación aunque prometedora, tenía algunas carencias, tanto en el tipo de en-

torno que utilizaba, un sistema centralizado, como en la escalabilidad a sistemas reales precisamente por este enfoque centralizado.

Por este motivo, se plantea finalmente la definición de un sistema de negociación autónomo (y entre otras propiedades distribuido) basado en una variante del sistema de votación Borda para la resolución del problema de la asignación de plazas de aparcamiento a camiones en entornos interurbanos.

Capítulo 3

Protocolo de negociación autonómico basado en votaciones para la asignación de recursos en entornos distribuidos con múltiples urnas

Contenidos

3.1. Introducción	28
3.2. El entorno de negociación	29
3.2.1. Agentes y recursos	29
3.2.2. Estados potenciales	31
3.2.3. Situación de conflicto	35
3.3. El protocolo de votaciones encadenadas	35
3.3.1. Definición de preferencias en un proceso de votación	35
3.3.2. Descripción Borda extendido	36
3.3.3. Función de utilidad	37
3.3.4. Resolución de la votación y de conflicto	37
3.3.5. Protocolo de interacciones encadenado y resolución de la negociación	38
3.3.6. Ejemplo de aplicación del protocolo	41
3.4. Evaluación del protocolo	45
3.4.1. Análisis de convergencia y eficiencia computacional	45
3.4.2. Bienestar social	46
3.4.3. Propiedades de los sistemas autonómicos	46
3.5. Conclusiones	47

En el presente capítulo se define un nuevo protocolo de negociación para la distribución de recursos que ofrecen diferentes proveedores entre clientes que quieren utilizarlos. Los clientes realizan peticiones a los proveedores que poseen los recursos requeridos según la lista de preferencias que cada cliente tiene. Si un proveedor recibe más solicitudes que la capacidad de alguno de sus recursos, lanzará una negociación entre los clientes implicados para determinar qué cliente usará cada recurso.

Esta negociación se resolverá mediante una votación de los clientes que han solicitado el recurso que vendrá determinada por las preferencias que los clientes tienen sobre los recursos disponibles de los distintos proveedores. La negociación es un proceso autónomo ya que los proveedores tienen plena capacidad para asignar sus recursos. Además, no tienen información de los recursos de que disponen el resto de proveedores y realizan la asignación de sus recursos a los clientes de forma independiente. La ejecución del protocolo puede producir una serie de negociaciones encadenadas (en cascada) ya que el resultado de una negociación puede originar una nueva negociación por recursos en otro proveedor.

Este capítulo está estructurado del siguiente modo: primero se define el entorno en el que se realiza la negociación, es decir, el contexto donde la negociación tiene lugar y las características tanto de los agentes que participan en la negociación como de los elementos a negociar. A continuación, se define el protocolo de negociación, definiendo todo el proceso para la resolución mediante una votación y presentando todas las interacciones que pueden ocurrir en el proceso. Además, en este apartado, se presenta un ejemplo práctico para facilitar la comprensión de todo el sistema. Finalmente, se realiza una evaluación del protocolo según las propiedades que toda negociación debe cumplir, y verificando que el sistema cumple las propiedades necesarias para ser considerado un sistema autonómico.

3.1. Introducción

El avance de las TIC y el uso compartido de recursos ha generado la necesidad de desarrollar nuevos modelos de cooperación y negociación automática para garantizar una utilización eficiente de dichos recursos.

Estos continuos avances en TIC y la cada vez más ubicuidad en la utilización de sistemas independientes que pueden colaborar o competir para conseguir de forma más completa sus objetivos. Para ello es necesario diseñar protocolos que permitan intercambiar información entre tales dispositivos de forma que cumplan con criterios de eficiencia y autogestión.

Tal y como se ha descrito en el capítulo 2.2, los avances de los sistemas autonómicos [17] permiten la toma de decisiones de forma independiente, sin intervención directa de interacción humana. Estos sistemas autónomos y autoadaptativos permiten ajustar su comportamiento y tomar decisiones basadas en la información y los objetivos que se les han proporcionado. Sin embargo, este tipo de sistemas requieren la definición previa de protocolos que permitan a los agentes inteligentes y autónomos interactuar entre ellos, no solo para comunicarse sino también para cooperar y alcanzar acuerdos, a pesar de tener objetivos individuales a veces conflictivos, en beneficio de los objetivos generales de todo el sistema.

Así pues, el diseño, desarrollo e implementación de protocolos y mecanismos de negociación para llevar a cabo interacciones eficientes y lograr acuerdos que satisfagan las necesidades de todos los agentes involucrados es un requisito fundamental para poder desarrollar y desplegar sistemas autonómicos.

El protocolo propuesto se desarrolla dentro de un entorno distribuido y multiagente, donde los agentes disponen de medios de comunicación para llevar a cabo negociaciones con otros agentes. Estas negociaciones tienen como objetivo principal facilitar la provisión de recursos entre los agentes.

3.2. El entorno de negociación

En los entornos de negociación de sistemas autónomos se produce una intersección entre la tecnología y la toma de decisiones estratégicas. Estos entornos se pueden modelar como campos de juego electrónicos donde algoritmos y programas negocian entre sí para alcanzar objetivos específicos. La clave aquí radica en la capacidad de estos sistemas para evaluar datos, prever tendencias y ajustar sus estrategias sin intervención humana directa. La negociación se convierte en un proceso automatizado, donde la eficiencia y la adaptabilidad son esenciales para el éxito. Este terreno digital abre nuevas fronteras para la eficacia operativa y la optimización de recursos en un mundo cada vez más impulsado por la inteligencia artificial.

3.2.1. Agentes y recursos

El entorno de negociación está formado básicamente por dos tipos de agentes, los agentes que ofrecen servicios/recursos (agentes propietario) y los agentes que solicitan dichos recursos (agentes cliente). Cada agente propietario dispone de un número finito de recursos de distintos tipos que pone a disposición de los agentes cliente. Además cada proveedor tendrá un número de recursos de cada tipo que puede ser distinto al de los que posee otro proveedor.

De este modo, los agentes cliente solicitarán el uso de recursos de algún tipo que necesitarán utilizar durante un tiempo determinado para completar sus tareas/necesidades. Además, aunque el cliente pueda solicitar un recurso de distintos proveedores tendrá distinto beneficio dependiendo del proveedor del que consiga el recurso.

Un ejemplo, podría ser la computación en la nube ofrecida por Amazon Web Services, Azure y/o Google Cloud Platform. Un cliente puede necesitar para realizar alguna tarea el uso de procesamiento en la nube en algún momento. Así podrá recurrir a alguna de las plataformas propuestas para conseguir este tiempo de procesamiento, pero cada una de ellas tiene unas características diferentes (precio, flexibilidad, facilidad de uso, escalabilidad, ...) lo que puede hacer que el cliente prefiera el uso de una a otra, e incluso que el tiempo de uso para resolver la tarea sea distinto de si lo consigue en una u otra plataforma.

Así pues, en el entorno propuesto, *un agente propietario P* gestiona un conjunto de recursos R_p que son utilizados temporalmente por *agentes cliente C* . Cada recurso está gestionado únicamente por un agente P y solo puede ser utilizado a la vez por un único agente C .

Todos los agentes propietario deben registrar los recursos disponibles en un repositorio donde estará registrado qué agentes propietario hay y qué recursos tiene disponible cada uno y de qué tipo. De este modo, los agentes cliente podrán conectarse a este repositorio y buscar recursos ofrecidos por los distintos proveedores. Este repositorio permitirá:

- Registrar agentes de distintos tipos.
- Registrar recursos ofrecidos por los agentes proveedor.
- Localizar agentes por tipo.
- Localizar recursos.

Este repositorio está controlado por un agente del sistema que se encargará de *lanzar acciones* cuando sea necesario para que el sistema reaccione y se autogestione según ocurran distintas

incidencias en el tiempo (caída de un proveedor y pérdida de sus recursos, entrada de nuevos proveedores que puedan rebalancear el reparto de recursos, ...).

Un agente C puede necesitar diferentes recursos a lo largo de su ciclo de vida/funcionamiento para poder lograr sus objetivos operacionales. Sin embargo, los recursos necesarios o preferidos por un agente C pueden no estar disponibles cuando estos agentes los necesitan y deben negociar o cooperar con agentes que posean estos recursos para poder utilizarlos.

Además, una de las hipótesis de partida del diseño del protocolo es que se parte de un entorno de ejecución benevolente, donde los agentes del sistema intercambian los datos, información y conocimiento de que disponen sin esperar ninguna contraprestación más allá de un trato recíproco entre ellos. En ningún caso, un agente modifica y/o envía contenidos erróneos conscientemente para tomar ventaja sobre el resto de los agentes.

Cuando las peticiones de utilización de los *agentes cliente* por los mismos recursos llegan a la competencia, esto es, diferentes agentes quieren utilizar el mismo recurso, se debe iniciar una negociación para determinar qué agente C utiliza cada recurso R . Si el proceso de negociación no logra conseguir un acuerdo entre los agentes, estos no podrán alcanzar sus objetivos y se verán obligados a buscar otros recursos o bloquear los que ya disponen, por lo que el entorno pasaría a volverse inestable, pudiendo afectar al resto de los agentes.

En el proceso de negociación intervienen múltiples agentes: agentes P que son propietarios de recursos que pueden compartir y agentes C , que son usuarios de estos recursos. Así pues, cuando un agente C_i necesita un recurso, busca entre todos los recursos proporcionados por los agentes P e intenta utilizar el recurso que más le interesa, durante el tiempo necesario. El entorno de negociación está compuesto por un conjunto de recursos R según la siguiente fórmula,

$$R = \{R_1^a, R_2^a, \dots, R_n^a, \dots, R_1^b, R_2^b, \dots, R_n^b, \dots, R_1^m, R_2^m, \dots, R_n^m\}$$

donde R_i^j representa el recurso i proporcionado por el agente propietario j .

Cada recurso tiene una serie de características, como el tiempo máximo de utilización, prestaciones, localización, etc. que hace que un agente C prefiera la utilización de un recurso de un proveedor a otro similar en otro proveedor. Los recursos ofrecidos por un agente P_i puede ser de características similares, incluso iguales a los de otro agente P_j .

Así, un recurso R_i^j puede estar en dos estados: *libre y ocupado*. Un recurso se encuentra *libre* cuando no está asignado a ningún agente C . El estado *ocupado* implica que un agente C lo tiene asignado para su utilización.

Los agentes P ponen a disposición de los agentes C los recursos que tienen disponibles, estén libres u ocupados. Si en un instante t , un agente P recibe más solicitudes que la capacidad de los recursos de que dispone se realizará una negociación que el agente P resolverá mediante una votación entre los agentes C involucrados.

Cada agente proveedor P tiene una urna U por tipo de recurso. Cuando se reciben más solicitudes de uso que la capacidad del proveedor, es necesario negociar para la obtención de ese recurso. Así pues, se inicia el proceso de votación: el proveedor genera el posible conjunto de soluciones y los agentes C involucrados depositan sus preferencias en forma de votos en la urna U .

Cuando se resuelve la negociación, aquellos agentes que no han obtenido el recurso pueden optar a solicitarlo en otro proveedor, generando una nueva negociación. Este proceso se repite sucesivamente pudiendo generarse nuevas negociaciones encadenadas hasta que todos los agentes obtienen el recurso que necesitan o bien uno de los clientes implicados no obtenga ningún recurso,

debido a que la demanda sea mayor que la oferta.

3.2.2. Estados potenciales

La asignación de un recurso a un cliente se realiza bien de forma directa, debido a que el recurso está libre y no hay más solicitudes, o bien como resultado de una negociación, donde además hay clientes que no obtienen el recurso y deben solicitarlo a otro proveedor. Este proceso se repite a lo largo del tiempo, conforme van llegando solicitudes de recursos.

A continuación, se definen los diferentes estados en los que puede encontrarse un proveedor para un recurso, para posteriormente definir el estado del sistema según los estados de los recursos que ofrecen los proveedores:

- Estado E_1 : No hay conflicto sobre la utilización de los recursos. Esto es, todos los agentes C que han solicitado un recurso de este tipo R_j , al proveedor P_j , lo han conseguido. La Figura 3.1 representa una situación en la que n clientes han conseguido n recursos de un mismo tipo. Como el proveedor P_j aún tiene capacidad para ofrecer el recurso R_j a un cliente más, cuando le llega una nueva solicitud la asigna directamente.

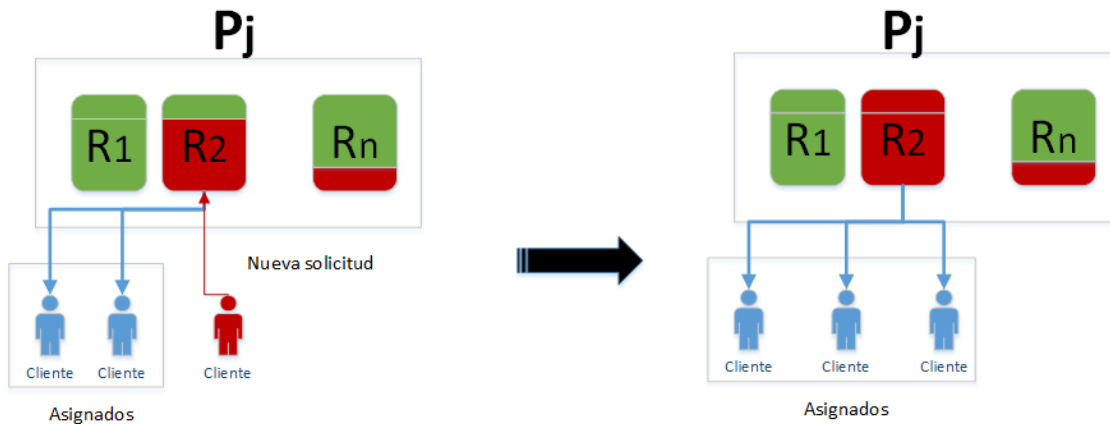


Figura 3.1: Estado E_1 para el recurso R_2 . El proveedor P_j tiene suficientes recursos R_2 para todos los clientes que los solicitan.

- Estado E_2 : En el entorno hay más recursos del tipo solicitado, entre todos los proveedores, que solicitudes de clientes. Sin embargo, alguno de los recursos de un proveedor en concreto están saturados, ya que se producen más solicitudes en ese proveedor que la capacidad del tipo de recurso que solicitan. En este caso, tras realizarse la negociación, no todos los agentes C obtienen los recursos que han solicitado y deberán solicitarlo a otros proveedores.

La Figura 3.2 muestra como partiendo de un estado E_1 sobre el tipo de recurso R_2 , el proveedor P_j recibe una solicitud por un recurso de ese tipo teniendo toda su capacidad asignada. Sin embargo, en el sistema existen otros proveedores con ese tipo de recurso disponible, por lo que tras una negociación uno de los clientes conseguirá un recurso de ese tipo en otro proveedor.

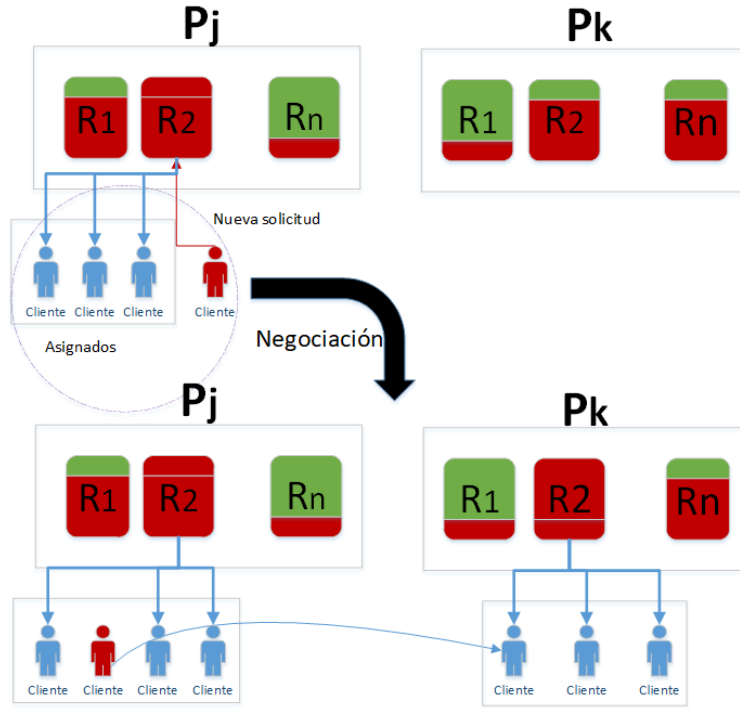


Figura 3.2: Estado E_2 para el recurso R_2 . El proveedor P_j no tiene suficiente capacidad para atender todas las solicitudes pero existen otros proveedores con capacidad suficiente para atender la demanda de R_2 . Por lo tanto, una vez resuelta la negociación, el cliente que pierda la negociación debe buscar el recurso en otro proveedor.

- Estado E_3 : No hay suficientes recursos en el entorno para satisfacer a todos los agentes C , por lo que, a pesar de resolver la negociación, hay algunos agentes que no pueden utilizar los recursos y quedan bloqueados con lo que se entra en una situación de conflicto que no se puede resolver. La Figura 3.3 muestra la situación en la que un cliente realiza una nueva solicitud cuando todos los clientes tienen el recurso saturado.

Como se ha comentado previamente, los tres estados potenciales, E_1, E_2 y E_3 , son los que se puede encontrar un proveedor por tipo de recurso. De este modo, podemos definir el estado en el que se encuentra un proveedor como el estado con índice mayor de todos los estados en los que se encuentran los distintos tipos de recurso que ofrece.

Definimos RP_j como el conjunto de recursos que ofrece un proveedor agrupados por tipo, $RP_j = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, siendo n el número máximo de recursos distintos que ofrece. Por cada tipo de recurso R_i , el proveedor se encuentra en uno de los estados definidos, $E^{R_i} \in (E_1^{R_i}, E_2^{R_i}, E_3^{R_i})$.

Así definimos el estado en el que se encuentra un proveedor P como $E^P \in (E_1^P, E_2^P, E_3^P)$, donde el E^P es igual al estado con índice mayor de todos los estados en los que se encuentran sus tipos de recurso.

$$E^P = \max(\text{index}(E^{R_i}))$$

Una vez determinados los estados de un proveedor podemos definir el estado en el que el sistema completo se encuentra. Así inferiremos que el sistema podrá encontrarse en uno de los

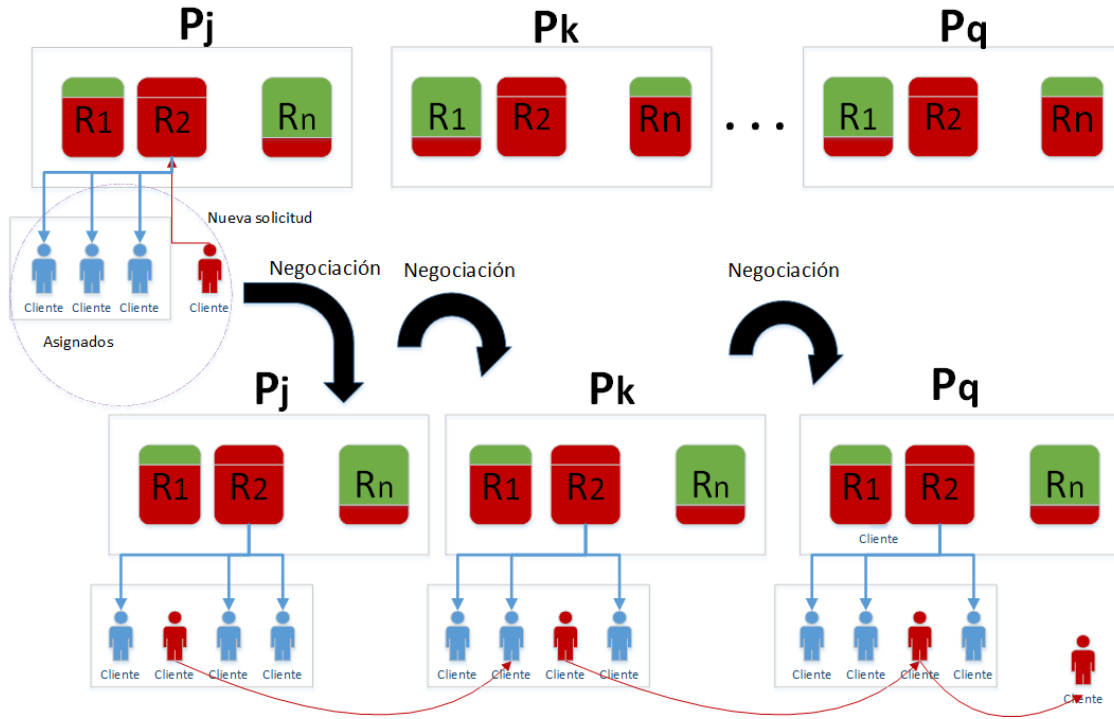


Figura 3.3: Estado E_3 . Se ha producido una nueva solicitud y ningún proveedor tiene suficiente capacidad para atender la nueva reserva, con lo que alguno de los clientes implicados no puede satisfacer sus necesidades.

estados definidos, $E \in (E_1, E_2, E_3)$, y que su estado vendrá determinado por el estado con mayor índice de todos los proveedores del sistema. Así para un sistema con m proveedores $(P_1, P_2, \dots, P_m)$, definimos su estado como

$$E = \max(\text{index}(E^{P_j})) / 1 \leq j \leq m$$

De este modo, podemos representar la evolución del estado del sistema conforme avanza el tiempo y según van ocurriendo peticiones de clientes a un recurso de los distintos proveedores del mismo. La Figura 3.4 representa 3 situaciones temporales (t_1, t_2 y t_3) y la evolución de los estados potenciales de un tipo de recurso en un proveedor:

- a) Instante T_1 . En este instante temporal, el proveedor se encuentra en un estado E_1 . En este estado se pueden producir dos situaciones:
 - a) Si el proveedor al que se le solicita el recurso tiene disponibilidad, el sistema se mantiene en E_1 .
 - b) Si no tiene disponibilidad, tras la negociación, un agente cliente debe buscar otro proveedor. Como existe otro proveedor que puede servir el recurso, el estado pasaría a ser E_2 . En este estado ya existen proveedores con recursos saturados pero aún hay disponibilidad de estos recursos en otros proveedores.
- b) Instante T_2 . En este instante temporal, el proveedor se encuentra en un estado E_2 . En este estado se pueden producir tres situaciones:

- a) Uno de los agentes cliente deja de usar uno de los recursos del proveedor, y por lo tanto, al pasar este recurso a estar disponible, el proveedor pasa a estado E_1 .
 - b) El proveedor al que se le solicita el recurso no tiene disponibilidad, se lanza la negociación y el cliente que la perdió puede conseguir el recurso que necesita en otro proveedor del sistema. En este caso, el proveedor se mantiene en E_2 .
 - c) Tras la negociación, un agente cliente debe buscar otro proveedor. Sin embargo, en este caso ya tiene todos los recursos de ese tipo saturados, con lo que tras sucesivas negociaciones se llegará a que un cliente se quede sin poder conseguir el recurso en ninguno de sus proveedores con lo que no podrá satisfacer sus necesidades. Así pues, el proveedor pasaría a encontrarse en el estado E_3 .
- c) Instante T_3 . En este instante temporal, el recurso solicitado se encuentra saturado tanto en el proveedor al que se le solicita inicialmente como en el resto que proveedores que lo ofrecen. Además, hay clientes que no han conseguido ningún recurso de ese tipo. En este estado se pueden producir tres situaciones dependiendo de si se mantiene la demanda del recurso o ésta baja:

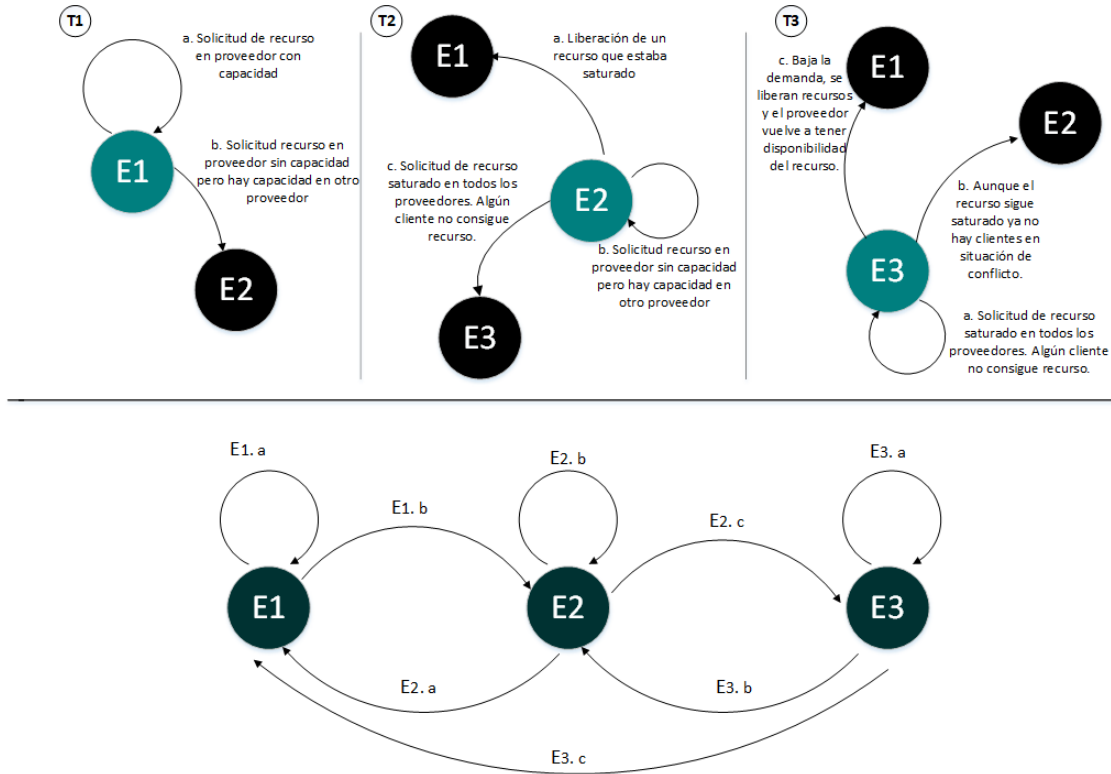


Figura 3.4: Grafos de estados en los que se encuentra el sistema según se reciben solicitudes.

- a) Sigue aumentando la demanda. Se producen nuevas solicitudes del recurso saturado que el proveedor no puede satisfacer y no hay proveedores que puedan hacerlo. Con lo que continúa habiendo en el sistema clientes sin conseguir los recursos que necesitan. De este modo, el sistema se mantiene en E_3 .
- b) Baja la demanda. O bien, los clientes que no consiguieron el recurso se han retirado, o, se han liberado recursos y se han asignado a los clientes que estaban en situación de

conflicto. El recurso sigue saturado en el cliente pero ya no hay clientes en el sistema que no lo hayan conseguido. De este modo, el estado pasaría a ser E_2 .

- c) Al igual que en la situación anterior ha bajado la demanda. Se ha liberado algún recurso del proveedor y ya no quedan clientes esperando conseguirlo con lo que pasaría directamente al estado E_1 .

3.2.3. Situación de conflicto

En el entorno, es posible que el número de recursos ofrecidos por los proveedores puedan no ser suficientes para cubrir las necesidades de todas las solicitudes de los clientes. Por consiguiente, un agente cliente al que se le deniega o cancela un recurso producirá en el sistema un *conflicto*, este conflicto podrá ser de 2 tipos: resoluble o irresoluble.

- Conflicto resoluble. Este conflicto se produce cuando se satura un tipo de recurso de un proveedor y un agente cliente solicita su uso. El cliente o clientes, que pierden la negociación, tienen más proveedores que podrían suministrarle el recurso aunque el beneficio sea algo menor.
- Conflicto irresoluble. Este conflicto se produce cuando se le ha denegado un recurso a un cliente en todos los proveedores posibles y, por lo tanto, ese cliente no podrá realizar su tarea por la falta de recursos.

El sistema, en este último caso, se puede volver inestable. Esta situación es inevitable en entornos altamente saturados en los que hay más demanda que oferta. De este modo el sistema debe asegurar que si hay recursos disponibles para las necesidades de los clientes estos se reparten del mejor modo posible, y que en caso de no haber suficientes se intenta maximizar la utilidad de los recursos puestos a disposición de los clientes.

3.3. El protocolo de votaciones encadenadas

3.3.1. Definición de preferencias en un proceso de votación

En algunos procesos de votaciones, los electores no eligen una única opción, sino que tienen un conjunto de preferencias que determinarán a quién votarán en primera opción, y en caso de no poder optar a esta primera opción, quién será su segunda opción y así sucesivamente. Formalmente podemos describir las preferencias, en nuestro caso, de un cliente i cómo:

$$preferencias_i = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n] / \alpha_1 \succeq \alpha_2 \succeq \alpha_3 \succeq \alpha_n$$

donde n es el máximo número de orden de posibles votaciones en las urnas de los proveedores en las que se verá involucrado el cliente siempre y cuando n sea menor que el número de proveedores con urnas del recurso.

Además las preferencias de un cliente deben ser transitivas entre los recursos, es decir, si el cliente i prefiere el recurso α_r al recurso α_s , y prefiere el recurso α_s al recurso α_t , entonces se debe cumplir que el cliente i debe preferir el recurso α_r al recurso α_t .

Formalmente,

$$\forall \alpha_r, \alpha_s, \alpha_t \in preferencias_i / \alpha_r \succeq \alpha_s \wedge \alpha_s \succeq \alpha_t \Rightarrow \alpha_r \succeq \alpha_t$$

3.3.2. Descripción Borda extendido

El protocolo propuesto está basado en el protocolo de votación BORDA [84]. En Borda, cada votante vota a cada candidato dependiendo de sus preferencias. Así pues, si hay un número n de candidatos, el primer candidato en orden recibe $n - 1$ puntos, el siguiente $n - 2$, y así sucesivamente hasta el último que recibe 0 puntos.

El protocolo propuesto presenta una nueva aproximación, extendiendo Borda, en los siguientes aspectos:

- En el protocolo Borda, los clientes votan por todos los recursos candidatos aunque no se tenga interés en ellos. En el protocolo de negociación propuesto los agentes clientes votarán únicamente por los recursos en los que estén interesados.
- En la mayoría de los sistemas de votación, los votantes tienen el mismo peso en sus votos. En el protocolo de negociación planteado, el voto de los clientes tendrá un peso que dependerá del cliente y de la necesidad/beneficio de obtener un recurso determinado. Se define una función W_i que especifica el peso del Cliente i para la obtención de un recurso de un tipo determinado.

$$W_i = f(d, a, q, \dots)$$

donde,

- d representa la demanda del cliente i .
- a representa la disponibilidad del recurso deseado.
- q representa la calidad del recurso necesario.
- ... representa otros factores relevantes que puedan influir en la necesidad del cliente de obtener un recurso de ese tipo.
- Valor ponderado de los votos: Borda indica que el valor mínimo del voto para un recurso que se desea obtener puede ser 0, mientras que en el nuevo protocolo, el valor para todos los recursos en los que se tenga interés será mayor de 1, dejando con puntuación 0 a todos aquellos recursos en los que no se esté interesado.

Según se ha descrito en el apartado 3.3.1, los clientes tienen un número máximo de preferencias n , por lo que ponderaremos el valor del peso de los clientes según la siguiente función que determinará los votos del agente C_i para un tipo de recurso en las distintas urnas de los proveedores es:

$$valorvotos_i = W_i * [n, n - 1, \dots, 1] / n \leq \text{número máximo de proveedores que ofrecen ese recurso.}$$

- Normalización: Además, en el protocolo Borda, el conjunto de elementos que forman la solución son el mismo para todos los votantes, mientras que en el protocolo propuesto cada cliente puede estar interesado por recursos de proveedores distintos a los que otros clientes que solicitan los mismos recursos.

Otro aspecto diferenciador es el número de recursos por los que está interesado un cliente. No todos los clientes están interesados por el mismo número de recursos. Esto puede provocar que los clientes con más proveedores candidatos obtengan una puntuación mayor que otro con un número menor de preferencias. Así pues, es necesario utilizar un parámetro de normalización ϕ , que será el máximo de todos los posibles conjuntos de preferencias de los clientes.

$$\phi = \text{Max}(|\alpha_n^i|)$$

donde,

- $i \in C$, conjunto de clientes.
- n número de preferencias del cliente i .

3.3.3. Función de utilidad

La función de utilidad del cliente C_i para el Recurso R_j , proporcionada por el proveedor P_k , permite al agente cliente identificar el beneficio que tendría si se le asigna el recurso que solicita. Este beneficio se conoce como utilidad y se representa como $U(C_{iR_{jk}})$. Esta función de utilidad está relacionada con las preferencias del cliente en función del proveedor que le suministre el recurso y determinará el orden de las mismas (mayor utilidad $\Rightarrow$ mayor prioridad).

$$U(C_{iR_{jk}}) = (Ga - Co) \times T_{uso}$$

donde el beneficio que espera recibir el agente por el recurso solicitado se expresa como $(Ga - Co) \times T_{uso}$, donde Ga es la ganancia esperada por el uso del recurso, Co es el costo asociado al recurso y T_{uso} es un factor de tiempo que indica la duración o frecuencia de uso del recurso.

En el entorno de negociación propuesto se asignan recursos ofrecidos por distintos proveedores a los clientes. Estos clientes, como se ha descrito previamente, por distintos motivos, tienen un orden de preferencia de unos recursos sobre otros. La resolución del protocolo consiste en obtener el mayor grado de satisfacción posible para todos los clientes que participan en la negociación por el reparto de recursos realizado.

Así pues, se define la función S_j como la función que, a partir de la función de preferencia de cada cliente, $\succ_j = \succ_{j0}, \succ_{j1}, \dots, \succ_{j\maxPref_j-1}$, devuelve un valor normalizado del grado de beneficio para el cliente C_j según el orden que ocupe el proveedor P_i donde obtuvo el recurso en su lista de preferencias.

De este modo, si obtiene el recurso solicitado en el proveedor de su primera preferencia la satisfacción para el cliente será del 100 %, disminuyendo ésta según vaya avanzando la posición del proveedor donde consigue la reserva en su lista de preferencias hasta llegar al 0 % si finalmente no consigue el recurso de ninguno de los proveedores de su lista.

La función que define la satisfacción de un cliente se define como:

$$S_j = \frac{(\maxPref_j - p) * 100}{\maxPref_j} / 0 \leq p < \maxPref_j$$

Así, definiremos la satisfacción total del entorno como la suma de las satisfacciones de los distintos clientes dependiendo de los recursos obtenidos de acuerdo a sus preferencias.

$$S = \sum_{i=1}^n S_i / i \in \text{Clientes}$$

3.3.4. Resolución de la votación y de conflicto

La resolución de la votación determinará todo el reparto de recursos solicitados entre los clientes. Un aspecto clave en el proceso de reasignación de recursos ocurre cuando un proveedor tiene

asignados todos los recursos que dispone de un tipo y recibe una nueva petición de otro cliente solicitando uno de esos recursos.

Cada proveedor tiene un número de recursos disponibles de cada uno de los tipos de recursos del mismo tipo que puede diferir de un proveedor a otro. Este valor se identifica por R_{max_i} . En el instante temporal t , las reservas existentes en un proveedor sobre uno de sus tipos de recurso se definen como $RE_i(t)$, donde $RE_{max_i} \geq RE_i(t)$.

La resolución de la votación se puede expresar como el resultado de una función FRV que dadas las prioridades de cada cliente involucrado en la solicitud de un recurso i , $Pref_i = (\succ_{i_1}, \succ_{i_2}, \dots, \succ_{i_s}, \succ_{i_{s+1}})$, los pesos que cada cliente tiene en ese momento t , $W_i = (w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_s}, w_{i_{s+1}})$, y las estrategias sobre las preferencias que un cliente puede modificar de acuerdo a las circunstancias del momento, $E_i = (e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_s}, e_{i_{s+1}})$, devuelva qué clientes se quedan con los recursos de tipo i del proveedor, $RE_i(t)$, y que cliente(s) C_k deben intentar conseguir un recurso de ese tipo en otro proveedor.

Formalmente,

$$FRV_i = Pref_i \times W_i \times E_i \rightarrow (RE_i(t), C_k)$$

donde, $RE_i(t)$ es el conjunto de asignaciones de recursos, y C_k es el cliente que no ha conseguido ningún recurso de tipo i en el proveedor.

3.3.5. Protocolo de interacciones encadenado y resolución de la negociación

El protocolo de negociación se compone de dos fases:

- Fase de asignación. El proveedor está en un estado $E1$ y va asignando los recursos a los clientes que los solicitan.
- Fase de reasignación. Tras una nueva solicitud, el proveedor pasa a estar en un estado $E2$ y debe determinar qué clientes, de los que han solicitado el recurso, deben usarlo. Para ello, inicia la negociación entre ellos.

Las interacciones entre los agentes proveedores y clientes son las siguientes:

- Cuando un agente cliente C_k , quiere utilizar un recurso R_i de un proveedor P_j , realiza una solicitud a este proveedor mediante la interacción $Solicita(R_i)$, donde se indica el recurso que se quiere utilizar.
- Cuando el proveedor P_j recibe la solicitud sobre el recurso R_i del cliente C_k , debe determinar si le asigna el recurso directamente, o si debe realizar una negociación para ver que cliente de los que han solicitado usar ese recurso puede utilizarlo. Así pues, la acción resultante de analizar la solicitud de un cliente i en un instante t puede ser:

$$AnalizarSolicitud(C_k, R_i) = \begin{cases} \textbf{Si} \text{ el recurso esta libre} \\ \quad \text{Asignar el recurso } R_i \text{ al cliente } C_k \\ \textbf{Sino, el recurso está saturado} \\ \quad \text{Iniciar una negociación para la reasignación} \\ \textbf{Fin Si} \end{cases}$$

En el proceso de *reasignación*, el proveedor P_j generará el conjunto de soluciones posibles y solicitará las preferencias de uso del recurso R_i a todos los clientes implicados (aquellos que tienen asignado el recurso, y al nuevo cliente que solicita el recurso). Una vez recibidas las preferencias de todos los clientes con los votos a cada una de las soluciones posibles, el proveedor resolverá la negociación según la función FRV definida en el Apartado 3.3.4, y confirmará a los clientes que pueden utilizar los recursos y cancelará su uso al cliente que pierda la negociación.

A continuación, en el algoritmo 1, se presenta el pseudo-código del procedimiento para la reasignación:

Data: Conjunto de clientes y solicitudes de recursos
Result: Confirmación o cancelación de asignación de recursos
foreach cliente k que ha solicitado el uso de recurso **do**
 Envía mensaje de solicitud de preferencias a k ;
 Recibe preferencias de k ;
 Resuelve (función FRV) para k ;
 if Recursos asignados a k **then**
 Envía confirmación a k para conservar recurso;
 else
 Envía cancelación a k ya que no consigue el recurso;
 end
end

Algoritmo 1: Descripción del proceso de reasignación de recursos

Una vez solicitado el recurso, el cliente queda a la espera de la contestación del proveedor. Si el proveedor le asigna el recurso, comenzará a utilizarlo, y si no, reaccionará a la solicitud de preferencias de un proveedor con el conjunto de soluciones posibles enviando las preferencias requeridas en ese instante temporal con sus votos, y esperará la contestación del proveedor que podrá ser de confirmación, con lo que podrá utilizar el recurso, o de cancelación, en cuyo caso determinará el nuevo proveedor al que solicitar el recurso. Así pues, la acción resultante a la solicitud de preferencias de un proveedor será:

$$\text{AnalizarSolicitudPref}(P_j, \text{soluciones}_{R_i}) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Envía preferencias al proveedor} \\ \text{Esperar respuesta} \\ \text{Si respuesta es } \textit{Confirmación} \\ \quad \text{Recurso } R_i \text{ concedido en } P_j \\ \text{Sino, respuesta es } \textit{Cancelación} \\ \quad \text{Buscar recurso } R_i \text{ en otro proveedor} \\ \quad \text{Envía solicitud al siguiente proveedor} \\ \text{Fin Si} \end{array} \right.$$

Cada vez que un cliente solicita el uso de un recurso de un proveedor en el que ya no queden recursos disponibles, es necesario lanzar una negociación entre los clientes implicados para resolver quienes dispondrán de los recursos. La resolución de la votación, proporcionada por el proveedor se compone del reparto de recursos entre los distintos clientes incluyendo el que no obtendrá recurso.

Cuando un cliente C_k tiene asignado un recurso R_i en un proveedor P_j y deja de utilizarlo, informará al proveedor P_j de la liberación de dicho recurso de modo que el proveedor podrá poner a disposición de otros clientes el recurso. Para ello, envía un mensaje $\textit{Liberar}(R_i)$ informándole

de que va a dejar de usar el recurso. El proveedor entonces analiza y actualiza su estado para el recurso R_i . Si se encontraba en estado E_2 ó E_3 y tras la liberación del recurso pasa a estado E_1 el proveedor avisará a los clientes que tenga en la lista de espera de que hay recursos de ese tipo libres para que vuelvan a realizar la solicitud si aún están interesados en él.

La Figura 3.5 muestra un ejemplo con la secuencia de interacciones entre los clientes y proveedores, teniendo en cuenta que el recurso solicitado solo tiene una capacidad para ser asignado a dos proveedores.

En la figura se observa que durante la etapa de asignación el proveedor P_1 tiene recursos disponibles y los asigna según van llegando solicitudes (en concreto las de los clientes C_i y el C_j) y estos clientes están utilizando el recurso. Cuando llega la nueva solicitud del cliente C_k , el proveedor no tiene recursos suficientes para los tres clientes e inicia la etapa de reasignación mediante la votación.

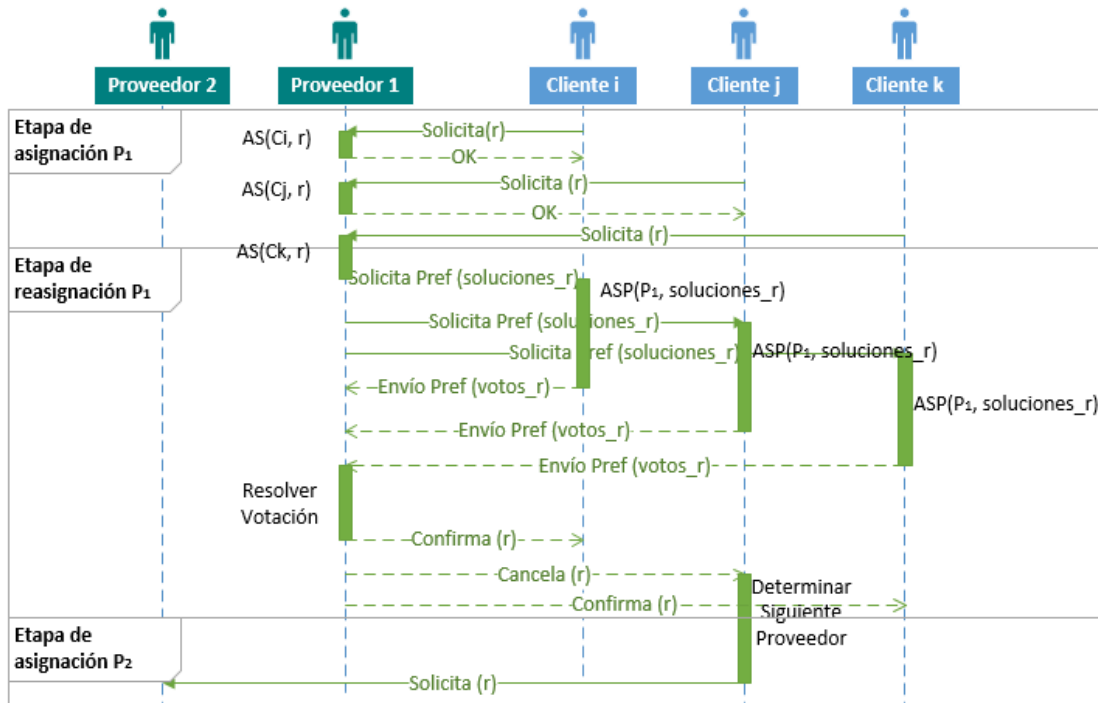


Figura 3.5: Interacciones entre los clientes y los proveedores. La función AS se corresponde con *AnalizarSolicitud* lanzada por un proveedor cuando recibe una solicitud de uno de sus recursos por un cliente, y, la función ASP con *AnalizarSolicitudPref* lanzada por un cliente cuando recibe la solicitud de preferencias de un proveedor al que le solicitó un recurso.

Una vez resuelta la negociación, el cliente C_j , que ha perdido la negociación, deberá solicitar su uso en otro de los proveedores que pueda satisfacer sus necesidades según sus preferencias. De este modo, se produce una nueva negociación, encadenada a la primera, para distribuir del mejor modo posible los recursos entre los clientes que los solicitan. Este proceso terminará cuando todos los clientes involucrados en las distintas negociaciones consigan satisfacer sus necesidades (consigan el recurso en alguno de los proveedores que les aportan beneficio), o, algún cliente pierda la negociación en todos los clientes que le aportan beneficio quedando éste sin poder cubrir sus necesidades, y el sistema en un conflicto irresoluble.

3.3.6. Ejemplo de aplicación del protocolo

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación del protocolo. Suponemos que tenemos 2 proveedores con 2 recursos cada uno del mismo tipo y 4 clientes que optan por conseguir un recurso de ese tipo cada uno de ellos.

El cliente C_1 quiere un recurso preferiblemente del proveedor P_A , y si no es posible conseguir recursos de P_A , entonces también, aunque en menor medida, le sería útil conseguir un recurso del proveedor P_B . Los clientes C_2 y C_3 quieren recursos preferiblemente del proveedor P_B y si no es posible conseguir recursos de éste, entonces también, aunque en menor medida, le sería útil conseguir un recurso del proveedor P_A . Finalmente, un cuarto cliente C_4 únicamente está interesado en conseguir un recurso del proveedor P_B , y no le resulta útil en absoluto los recursos ofrecidos por P_A .

La Tabla 3.1 muestra la lista de preferencias de los clientes descrita. Además, se han añadido los instantes temporales en los que solicitarían cada uno los recursos y una duración hipotética de uso que cada cliente podría necesitar de dicho recurso (momento en el que liberaría el recurso si lo consigue cuando lo solicita).

Cliente	Preferencia	Solicita(t)	Duración
C_1	$P_A \succ P_B$	t_0	5
C_2	$P_B \succ P_A$	t_1	5
C_3	$P_B \succ P_A$	t_2	3
C_4	P_B	t_3	4

Tabla 3.1: Preferencias de los clientes por los recursos y los instantes temporales donde se realizan las solicitudes por los recursos.

A partir de los datos de la Tabla 3.1, la Figura 3.6 presenta una simulación de la evolución del proceso de solicitud y asignación de recursos a los clientes. Inicialmente, tanto el tipo de recurso ofrecido por P_A y P_B está en estado E_1 pues en ambos existe capacidad para ofrecer solicitudes de los clientes. En el instante temporal t_0 , el cliente C_1 solicita un recurso en su primera preferencia, esto es P_A . Este recurso se le asigna ya que el proveedor P_A dispone de recursos libres. En t_1 , el cliente C_2 solicita el uso de un recurso del proveedor P_B quién también se lo asigna ya que tiene todos sus recursos disponibles.

A continuación en t_2 , el cliente C_3 solicita, según sus preferencias, un recurso en el proveedor P_B , y también se le asigna ya que P_B todavía tiene un recurso disponible. En este instante, el proveedor P_A tiene aún un recurso disponible mientras que el proveedor P_B ya tiene todos los recursos asignados. Todos los clientes han recibido el recurso solicitado en su primera preferencia, luego ambos proveedores han realizado los procesos de *asignación* definidos y mantienen el estado del recurso en E_1 .

Posteriormente, en el instante t_3 , el cliente C_4 solicita recurso en el proveedor P_B que ya tiene todo los recursos asignados. Así, en este momento, el proveedor P_B que ya tenía el recurso totalmente asignado, pasa a tener el recurso saturado, y debe realizar una negociación entre los clientes implicados para determinar qué clientes utilizarán los recursos y qué cliente debe solicitar el uso del recurso en otro proveedor, entrando en el proceso de *reasignación*.

Si el proceso de negociación fuera centralizado, donde todos los proveedores y clientes com-

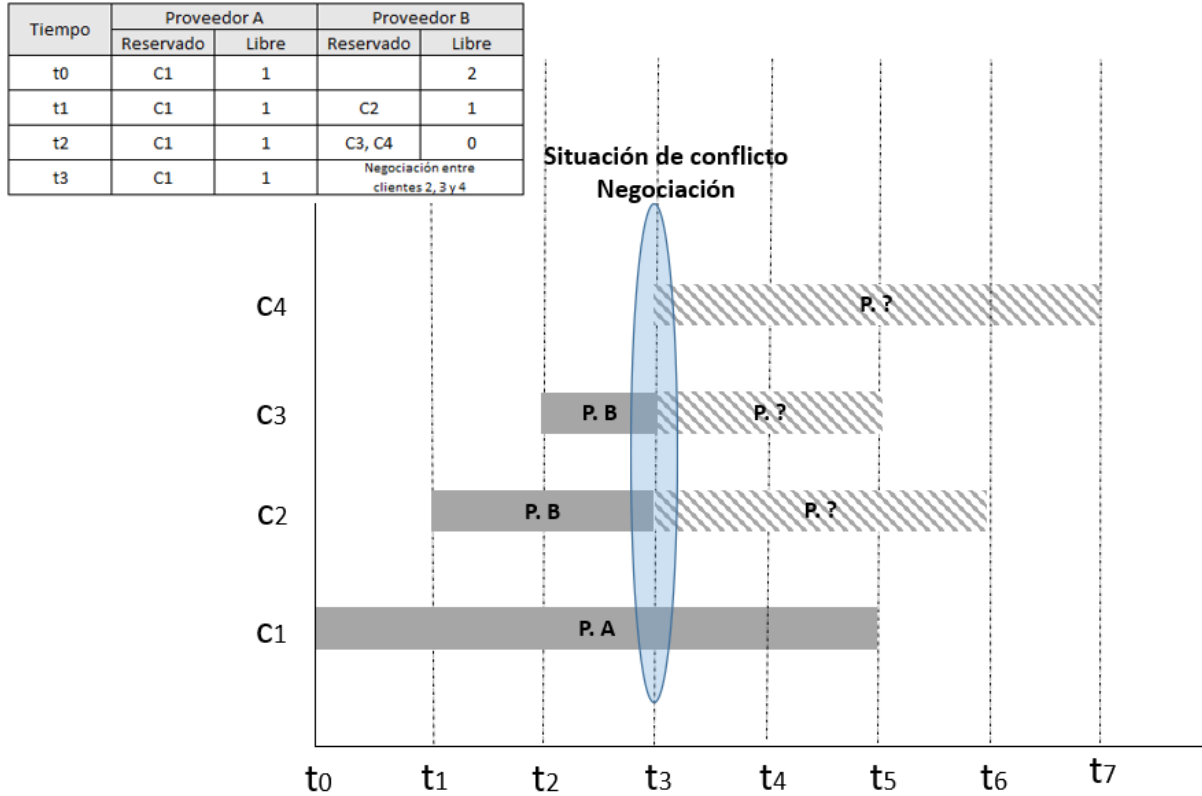


Figura 3.6: Evolución de solicitudes de recursos. En t_3 , el proveedor P_B pasa a un estado E_2 , donde todos sus recursos están ocupados y es necesario iniciar el proceso de reasignación.

partieran toda su información y participaran en el desarrollo de la solución de forma conjunta, se generarían todas las soluciones correspondiente a la asignación de los recursos del proveedor que originó la negociación y las distintas asignaciones de recursos en otros proveedores a aquellos que no consigan recursos. El conjunto de soluciones completo se muestra en la Tabla 3.2, que simboliza el conjunto de soluciones del que se partiría eliminando las soluciones que no sean factibles y calculando la solución ganadora de entre estas soluciones.

Solución	C ₂	C ₃	C ₄
S_1	P_A	P_A	P_A
S_2	P_A	P_A	P_B
S_3	P_A	P_B	P_A
S_4	P_A	P_B	P_B
S_5	P_B	P_A	P_A
S_6	P_B	P_A	P_B
S_7	P_B	P_B	P_A
S_8	P_B	P_B	P_B

Tabla 3.2: Conjunto de soluciones completo a partir de los proveedores que ofrecen recursos por los que los clientes han mostrado su interés en un proceso centralizado.

Sin embargo, tal y como se ha expuesto en el Apartado 2.5.1, el conjunto de soluciones para un entorno real es inviable y es necesario realizar una aproximación distribuida como la presentada en el protocolo propuesto.

Así pues, en el protocolo de negociaciones encadenadas, el conjunto máximo de soluciones factibles en una fase de reasignación tendrá el mismo número de filas como clientes hay implicados en la negociación. En esta fase, cada posible solución determina quiénes son los clientes que conservan el recurso y quién es el cliente al cual no se le asignará recurso en este proveedor tal como se muestra en la Tabla 3.3. El resultado de la fase de reasignación será una de estas posibles soluciones.

Solución	C_2	C_3	C_4
S_1	—	P_B	P_B
S_2	P_B	—	P_B
S_3	P_B	P_B	—

Tabla 3.3: Conjunto de soluciones indicando en cada una quiénes conservan recurso en el proveedor B y quién perdería la negociación.

Una vez el proveedor dispone del conjunto de soluciones puede proceder a resolver la votación. Para ello, el proveedor solicitará a los clientes implicados las preferencias para cada una de las soluciones. El cliente, una vez recibida la petición de preferencias debe determinar, en función de los pesos que tenga para cada recurso de ese proveedor, el valor de la preferencia.

De este modo, la Tabla 3.4 muestra los valores de ejemplo de los pesos de los clientes implicados en la negociación. Como se ha comentado anteriormente, estos valores pueden depender de varias características relacionadas con el cliente y el proveedor.

Cliente	Peso	Preferencias
C_2	5,5	P_B, P_A
C_3	16,2	P_B, P_A
C_4	9,6	P_B

Tabla 3.4: Pesos de ejemplo de los clientes implicados en la negociación en el proveedor P_B , y preferencias.

Además, siguiendo el proceso de normalización, descrito en el Apartado 3.3.2, se ha utilizado el parámetro de normalización ϕ para asegurar que no influya el número distinto de proveedores que cada cliente puede tener en su lista de preferencias. En este ejemplo, el parámetro ϕ toma el valor de 2, pues es el mayor número de preferencias que cualquier cliente implicado en la negociación tiene.

Por consiguiente, el voto de un cliente en cada solución será: su peso multiplicado por 2 si es su primera preferencia; su peso multiplicado por 1 si es su segunda preferencias; o bien 0 si esa solución le lleva con toda seguridad a no conseguir recurso.

La Tabla 3.5 muestra el valor que cada solución tiene según la votación realizada por los clientes implicados a partir de sus pesos para el proveedor P_B y la normalización realizada debido al diferente número de preferencias de los clientes que votan en la urna del recurso del proveedor P_B .

En este ejemplo, la solución ganadora es la solución S_1 , dado que es la que obtuvo un valor

Solución	C_2	C_3	C_4	Valor Solución
S_1	5,5	32,4	19,2	57,1
S_2	11	16,2	19,2	46,4
S_3	11	32,4	0	43,4

Tabla 3.5: Valor asignado a cada solución posible según la votación de los clientes implicados.

mayor en la votación. Así pues, una vez resuelta la fase de reasignación, el proveedor informará al cliente C_4 de que se le ha asignado el recurso. Además, también informará al cliente C_2 de que ya no puede continuar utilizando el recurso.

Una vez el cliente C_2 recibe esta información, volverá a solicitar el recurso a los proveedores que le queden en su lista de preferencias, en este caso al proveedor P_A quién dado que tiene recursos libres le asignará inmediatamente el recurso. Así pues, tras la negociación, la asignación final queda tal como muestra la Figura 3.7 en el instante temporal t_3 donde los clientes C_1 y C_2 están utilizando los recursos del proveedor P_A , y, los clientes C_3 y C_4 están utilizando los recursos del proveedor P_B .

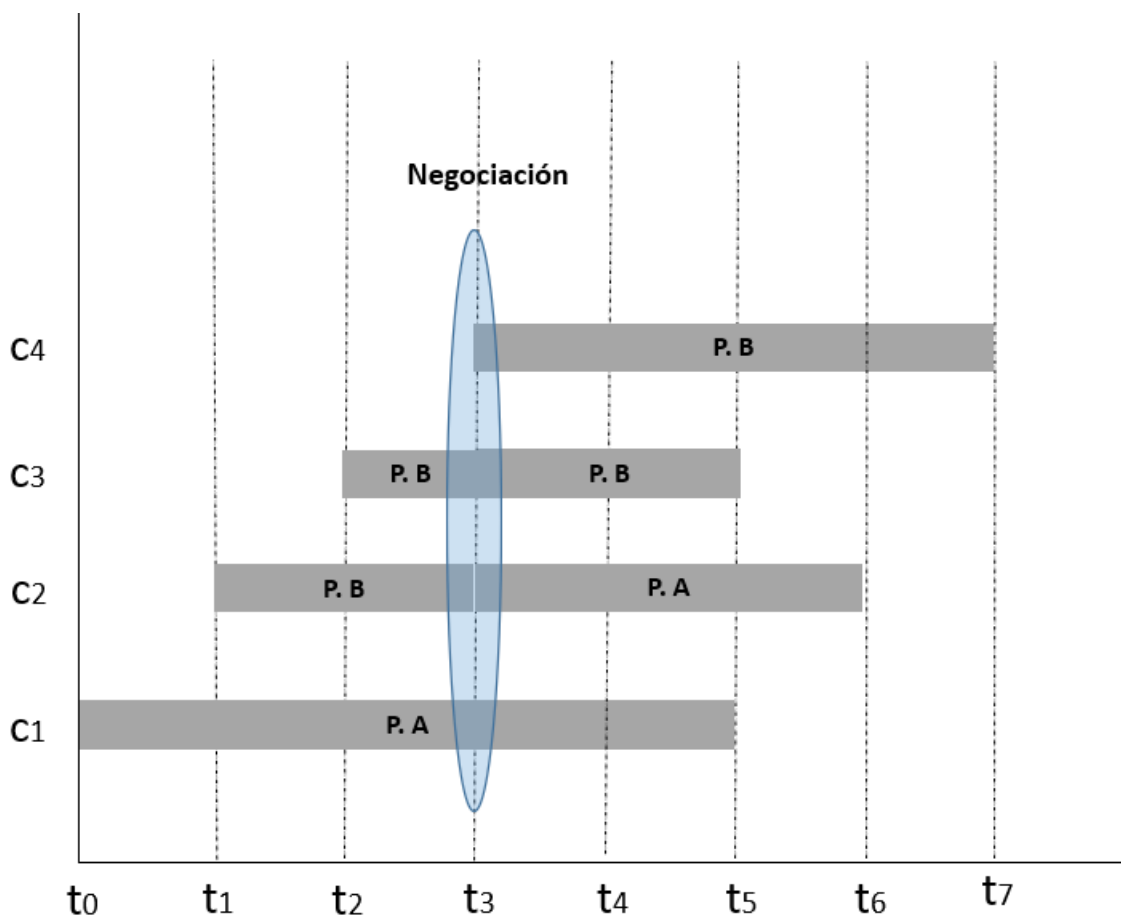


Figura 3.7: Distribución de recursos después de la negociación.

3.4. Evaluación del protocolo

Un aspecto crucial en el desarrollo de protocolos de negociación es llevar a cabo una evaluación exhaustiva para garantizar que cumple de manera efectiva con los criterios de convergencia y equilibrio establecidos.

Esta evaluación no solo asegura la validez conceptual del protocolo, sino que también pone a prueba su aplicabilidad en situaciones prácticas. Además, dado que el protocolo propuesto se basa en un sistema de negociaciones en cascada para su resolución, es necesario asegurar que no solo es teóricamente sólido, sino también computacionalmente eficiente. La eficiencia computacional no solo optimiza el tiempo de procesamiento, sino que garantiza que terminará en un número finito de pasos. Todo ello facilita la implementación práctica del protocolo en diversos entornos, contribuyendo así a su viabilidad y utilidad en el ámbito real.

3.4.1. Análisis de convergencia y eficiencia computacional

En cuanto al análisis de convergencia, cada negociación se resuelve mediante una votación, donde se presenta un conjunto finito de posibles soluciones. De este modo, el protocolo no entra en una secuencia de ofertas y contraofertas sino que se generan las posibles soluciones y dependiendo de los criterios se determina cuál es la solución ganadora. De este modo, se asegura que siguiendo el criterio de utilidad para la resolución de la votación se alcanzará una solución óptima.

La elección de un enfoque basado en votación no solo simplifica el proceso de toma de decisiones, sino que también ofrece una mayor transparencia y claridad en la determinación de la solución final. Este enfoque innovador refuerza la eficacia del protocolo al minimizar la complejidad de las negociaciones.

Como el protocolo se basa en un conjunto de negociaciones encadenadas es necesario asegurar que el número de negociaciones que se pueden producir es finito y el proceso termina. Para asegurar esto tenemos que el protocolo obliga a que las preferencias de cada cliente estén ordenadas y cumplan la propiedad transitiva. Además, si un cliente solicita un recurso en un proveedor y no lo consigue, lo solicitará en su siguiente preferencia, y no volverá a solicitarlo en los proveedores en los que se le denegó, con lo que tiene un número finito de intentos para conseguir el recurso. De esta forma no puede producirse un bucle pues no volverá a optar por un recurso en un proveedor del cual ya fue expulsado (a no ser que el proveedor vuelva a tener nuevos recursos disponibles y avise a los clientes que tiene en la lista de espera de este hecho).

Por otra parte, también se garantiza la eficiencia computacional, porque los agentes solicitan recursos en un proveedor, y solo cuando se les deniega tras una negociación, inician una nueva solicitud en su siguiente preferencia. Si por el contrario, los agentes cliente solicitarán un recurso en diferentes proveedores a la vez, para obtener al menos un recurso, podría darse el caso de que obtuvieran el uso de más de un recurso necesario a la vez, y tuvieran que rechazar una asignación, retrasando el proceso y aumentando las interacciones entre clientes y proveedores.

También sería necesaria la introducción de bloqueos, ya que el cliente deberá esperar a recibir respuesta de todos los proveedores a los que solicitó un recurso para elegir y contestarles. Y los proveedores también deben bloquear los recursos hasta que reciban confirmación de que la asignación ha sido aceptada, o, denegada en cuyo caso ya se le puede ofrecer a otros clientes.

3.4.2. Bienestar social

Uno de los objetivos principales del protocolo es maximizar el bienestar social. En este sentido, este objetivo principal se traduce en un objetivo prioritario del sistema que es minimizar el número de clientes que no consiguen los recursos que necesitan de alguno de los proveedores que tiene en su lista de preferencias. De este modo, cuantos menos clientes se queden sin conseguir los recursos que necesitan implicará que hay un mayor número que sí ha conseguido satisfacer sus necesidades.

Así, si definimos,

- m número total de recursos que los clientes necesitan, y
- $\vec{P}_j(t)$ es la asignación de recursos que un proveedor j tiene hecha para los clientes que solicitaron sus recursos en un tiempo t .

Donde el objetivo principal del sistema es,

$$\text{mín}(m - \sum | \vec{P}_j(t) |),$$

El sistema siempre intenta asignar y reasignar los recursos según las necesidades que hay en cada momento para cumplir con este objetivo prioritario. Además, este objetivo viene sujeto a maximizar la satisfacción de los clientes que se refleja en la asignación recibida por los clientes de los recursos solicitados en los mejores proveedores posibles de acuerdo a sus preferencias.

En el Apartado 3.3.3 se define la satisfacción del entorno como la suma de las satisfacciones de los distintos clientes en la asignación que el sistema les da para los distintos recursos que solicitan.

El protocolo pondera con mayor valor los recursos que ofrecen los proveedores más preferidos sobre los menos preferidos de cada cliente. De este modo, el voto de cada cliente tiene un valor mayor en la urna de su primera preferencia y decrece hasta la última. Así, dentro del objetivo principal que era minimizar el número de clientes que no consiguen recursos, el sistema asegura que cada cliente obtendrá recurso en el mejor proveedor posible dentro de sus preferencias.

3.4.3. Propiedades de los sistemas autonómicos

El protocolo propuesto cumple con las siguientes propiedades de un sistema autonómico:

- Auto-configuración. El sistema integra los cambios tanto en los proveedores como en los recursos. Existe un agente que actúa como repositorio de agentes proveedores y los recursos que ofrece cada proveedor. De este modo, cuando hay cambios en la oferta de recursos, el entorno se adapta a este cambio. Los agentes clientes acceden al repositorio para conocer qué agentes proveedores proporcionan los recursos y proceder a su solicitud.
- Auto-optimización. Es parte intrínseca del protocolo en la que se escogen los candidatos más adecuados según las preferencias y la función de resolución de la votación, durante todo el ciclo de vida del sistema. Por lo tanto, los recursos asignados a los clientes son los que proporcionan la mayor utilidad posible a los clientes y por ende, al sistema.
- Auto-recuperación. Si en algún momento cayera un proveedor o algún recurso, el sistema informaría a los clientes que lo estén utilizando y éstos deberán solicitar un nuevo recurso de su lista de preferencias, realizando una nueva solicitud siguiendo el protocolo de negociación encadenada.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un nuevo protocolo de negociación mediante votaciones para la distribución de recursos entre los clientes que los solicitan. El protocolo está basado en el método de votación Borda añadiéndole las características necesarias para poder aplicarlo en sistemas de negociación autonómicos.

El protocolo desarrollado presenta las siguientes características: protocolo distribuido para la negociación del uso de recursos de un mismo tipo en diferentes proveedores; entorno altamente cambiante donde los recursos puestos a disposición de los usuarios pueden reubicarse según las necesidades en cualquier momento; los agentes que participan en el protocolo no disponen información de otros agentes (ni clientes ni proveedores) más allá de la que estos publican.

La negociación de un recurso de uno de los tipos existentes en el sistema se realiza de forma individual entre un proveedor y los clientes que han solicitado ese tipo de recurso. Sin embargo, el resultado de esa negociación puede generar una nueva negociación por un recurso similar en otro proveedor.

Cada tipo de recurso de un proveedor puede encontrarse en varios estados, con lo que las acciones derivadas y el estado en el que estará un tipo de recurso tras una solicitud puede cambiar dependiendo de si el proveedor tiene o no saturado ese tipo de recurso y puede dar servicio a los clientes que los solicitan, o, si el recurso está saturado en cuyo caso, se entrará en un conflicto que será resoluble o irresoluble dependiendo de si hay disponibilidad de un recurso de ese tipo en otro proveedor o no.

Además los clientes tienen prioridades a la hora de solicitar un mismo tipo de recurso en un proveedor de otro. Este factor se basa en la utilidad que le ofrece el recurso dependiendo del proveedor que se lo suministre.

De este modo, se pueden producir negociaciones encadenadas cuando un recurso está saturado en varios proveedores. Así, perder una negociación en un proveedor implica solicitar ese tipo de recurso en el siguiente proveedor de la lista de preferencias y consecuentemente si este segundo proveedor también tiene saturado el recurso se repita el proceso que continuará hasta que todos los clientes tengan asignados los recursos que necesitan en algún proveedor o hayan perdido las negociaciones en todos los proveedores de su lista y no puedan satisfacer sus necesidades (conflicto irresoluble).

El protocolo está pensado para un entorno dinámico, distribuido y altamente concurrido. Donde se producen situaciones de alta demanda y es necesario repartir los recursos disponibles entre los clientes que más necesidad tengan de utilizarlos.

El protocolo converge dado que cada cliente tiene un número de preferencias ordenadas y no solicitará un recurso en un proveedor que se lo denegó, salvo que el entorno haya cambiado y el proveedor le comunique que dispone de nuevo de recursos. De este modo, la cadena de negociaciones que puede generarse siempre será finita, incluso en un entorno altamente saturado.

Además, el protocolo está orientado a mejorar el bienestar social pues siempre intenta asignar y reasignar los recursos según las necesidades de cada momento para que ningún cliente se quede sin satisfacer sus necesidades y se le asigne dentro de lo posible aquel recurso que le proporciona mayor utilidad.

Todo ello, en un sistema autonómico que cumple con las principales propiedades de auto-gestión que todo sistema de este tipo debe cumplir: a) auto-configuración, ya que el sistema se adapta a los cambios en el entorno; b) auto-optimización, dado que siempre intenta obtener la mejor distribución

de recursos posible entre los clientes; c) auto-recuperación, ya que es capaz de, en caso de caídas de proveedores, redistribuir los recursos que queden disponibles entre los clientes que los necesitan.

Capítulo 4

Modelo de negociación autonómica para la gestión de plazas de aparcamiento en entornos interurbanos.

Contenidos

4.1. Introducción	50
4.2. Dominio de aplicación	51
4.3. Definición del problema	52
4.4. Entorno de negociación	53
4.4.1. Concepto de reserva y pre-reserva de una plaza de aparcamiento	54
4.4.2. Definición de las estrategias de elección de áreas	55
4.4.3. Situación de conflicto	56
4.5. Protocolo de negociaciones encadenadas	57
4.5.1. Un sistema de negociación distribuido	57
4.5.2. Definición de preferencias en el entorno de transporte interurbano	58
4.5.3. Cálculo del peso de los votos en las negociaciones	59
4.5.4. Importancia de la ponderación de preferencias.	60
4.5.5. Función de utilidad	65
4.5.6. Resolución de la votación y de conflicto	65
4.5.7. Resolución mediante negociaciones encadenadas	67
4.6. Evaluación del protocolo	72
4.6.1. Análisis de convergencia y eficiencia computacional	72
4.6.2. Bienestar social	73
4.6.3. Propiedades de los sistema autonómicos	73
4.7. Conclusiones	74

En este capítulo se presenta una adaptación del protocolo descrito en el capítulo anterior a un dominio real: el tráfico interurbano. En concreto, el protocolo se va a aplicar al aparcamiento de vehículos pesados en redes de carreteras interurbanas de larga distancia.

La hipótesis de partida que se plantea se fundamenta en el hecho de que los vehículos que circulan por la red viaria disponen de capacidades de computación y comunicación. Esto es, los vehículos

disponen de uno o varios sistemas de computación. Además, el vehículo dispone también de dispositivos de comunicación (wifi, Bluetooth, 3G/4G/5G...) que permiten al vehículo intercambiar información con elementos externos de una forma eficiente, robusta y segura.

Así pues, la propuesta expuesta es independiente de la tecnología hardware del computador, y del sistema operativo, así como del protocolo físico de comunicación. Por otra parte, se parte de un entorno de ejecución anónimo y benevolente, donde los agentes del sistema intercambian los datos, información y conocimiento del que disponen sin esperar ninguna contraprestación más allá de un trato recíproco entre ellos. En ningún caso, un agente modifica y/o envía contenidos erróneos conscientemente para tomar ventaja sobre el resto de los agentes. Además, el contenido de los mensajes enviados por los vehículos no está asociado a un vehículo en concreto, con lo que se preserva el anonimato.

4.1. Introducción

La gestión del tráfico interurbano desempeña un papel fundamental en la articulación eficiente del transporte por carretera, conectando de manera efectiva diferentes áreas geográficas. Por consiguiente, la planificación de rutas en el transporte de mercancías por carretera es esencial, especialmente en viajes de larga distancia. Esta planificación debe incluir tiempos de descanso de los conductores, para garantizar la seguridad vial.

Como se ha descrito en el Capítulo 1, el avance de las TICs y los ITS ha permitido que los vehículos que circulan por la red viaria estén constantemente conectados, no solo con la infraestructura, sino también que intercambien información entre ellos. Estos avances también han implicado cambios significativos en la planificación de rutas de los vehículos pesados, permitiendo que los conductores de los mismos dispongan de mejor información del estado del tráfico y también del estado de ocupación de las áreas de descanso donde estacionar.

Sin embargo, existen diferentes situaciones que provocan la aparición de problemas a la hora de encontrar aparcamiento en ciertas áreas de descanso. Estas situaciones se deben a:

- Algunas áreas de descanso tienen un conjunto de servicios que hace que los conductores prefieran estacionar en ellas. Servicios no solo como comidas o duchas, sino también aspectos de seguridad.
- Horas habituales de descanso o avituallamiento. En las horas de comida o cena, las áreas tienen un elevado porcentaje de ocupación.
- Áreas en corredores europeos con un porcentaje muy elevado de camiones, o situadas en localizaciones específicas, por ejemplo, cercanas a fronteras, zonas de embarque...
- Operaciones especiales donde el tráfico es más elevado del habitual.

Cuando se producen estas situaciones y no hay plazas de aparcamiento en un área, los conductores de vehículos deben conducir hasta la próxima área de descanso. Sin embargo, es posible que esta área también esté completa y no puedan estacionar ni continuar ya que han agotado su tiempo de conducción. Por consiguiente, están infringiendo la ley, ya que o bien continúan conduciendo sin descansar, o bien aparcan en un sitio prohibido (arcenes, accesos...).

El protocolo, que se describe a continuación, se centra en la negociación de plazas de aparcamiento en diferentes áreas para determinar qué vehículos pesados aparcan en cada plaza. El protocolo

pretende automatizar, de manera óptima, el aparcamiento de vehículos pesados en función de las necesidades y preferencias de los conductores. Para ello, el modelo de negociación autónoma se basa en el protocolo de negociación basado en votaciones descrito en el capítulo anterior.

4.2. Dominio de aplicación

En Europa, existe una normativa unificada que regula el transporte por carretera de vehículos pesados. Esta normativa aborda aspectos cruciales, como el tiempo máximo de conducción continua y los periodos de descanso necesarios para los conductores. La normativa establece la importancia de contar con espacios adecuados para que los conductores realicen sus pausas de descanso.

En este apartado se describe el dominio del tráfico interurbano. En este dominio se va a aplicar el protocolo descrito en el Capítulo 3. En concreto, el modelo de está enfocado a corredores de larga duración, donde los camiones realizan recorridos de larga distancia para distribuir mercancías a lo largo y ancho de España y Europa. Estos recorridos se realizan principalmente por autopistas y/o autovías.

En este tipo de red viaria, los vehículos pueden circular a una velocidad elevada. En el caso de los vehículos pesados, la velocidad máxima del mismo es, en la gran mayoría de tramos de la red, inferior a la velocidad máxima de la vía. Por ejemplo, actualmente en España, la velocidad máxima de un vehículo pesado articulado es de 90 km/h, mientras que la velocidad máxima en autovías y/o autopistas es de 120 km/h.¹

Algunos aspectos importantes en la circulación en la red interurbana son:

- La red viaria está separada en dos calzadas, por lo que no solo se puede cambiar de sentido en las intersecciones.
- No hay enlaces a nivel. Esto implica que el tráfico, en condiciones normales, circula de forma ininterrumpida.
- Esta conducción ininterrumpida permite que la velocidad de los vehículos pesados sea constante y cercana a su velocidad máxima.
- Cuando se producen incidentes, los itinerarios alternativos para los vehículos pesados son difíciles de implementar, debido a las restricciones de tamaño y maniobrabilidad de los mismos.

A continuación, se describen los elementos básicos a considerar en nuestro sistema y que se representan en la Figura 4.1:

1. Red de carreteras. Conjunto de segmentos de alta velocidad que unen orígenes y destinos. La red de carreteras es una red interurbana donde los sentidos están situados en diferentes calzadas o separadas por algún elemento físico.
2. Segmentos. Tramos de carretera que tiene una característica físicas (nº de carriles, tamaño del arcén...) homogéneas en toda su longitud. Los segmentos tienen un mínimo de 2 carriles por sentido.

¹Se indica la velocidad máxima posible en autovías y/o autopistas. Es posible, que debido a las características del segmento o del tráfico esta velocidad sea inferior.

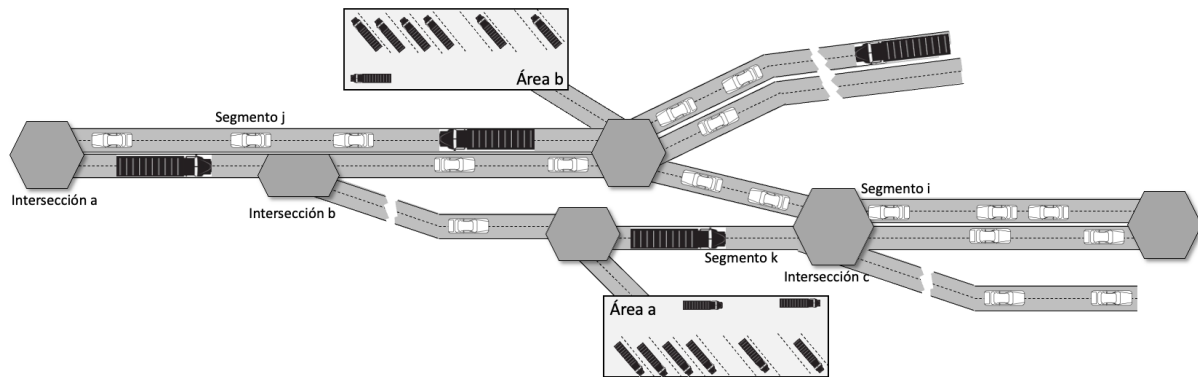


Figura 4.1: Ejemplo de un entorno de una carretera de larga distancia. En la figura se presenta una zona de la carretera compuesta por segmentos, bifurcaciones y áreas de servicio.

3. Intersecciones. Son elementos que permiten a los vehículos cambiar de carretera o unirse a una nueva. Los 4 ejemplos básicos de intersecciones son: entradas, salidas, bifurcaciones y uniones.
4. Áreas de servicio. Un área de servicio, también conocida como de descanso es una instalación diseñada para proporcionar diversos servicios a los usuarios de la carretera. Estas áreas están estratégicamente ubicadas a lo largo de la autopista para permitir a los conductores descansar. Dentro de las áreas de servicio existen zonas expresamente diseñadas para el estacionamiento de vehículos pesados.
Además, este estacionamiento podrá ser gratuito o de pago, por tiempo limitado o ilimitado, y, podrá ser reservado por los camioneros o no. Otra característica muy importante es la distancia a la que se encuentran estas áreas de servicio, punto muy importante a la hora de decidir si se realiza un descanso o se continúa hasta un área situada más hacia adelante.
5. Vehículos pesados. Este tipo de vehículos tiene unas características especiales como por ejemplo, la velocidad, aceleración y la maniobrabilidad. Además, tienen una legislación propia que determina los tiempos de conducción del mismo.

4.3. Definición del problema

Uno de los elementos clave en la planificación de rutas de larga distancia es la disponibilidad de áreas de estacionamiento. Las áreas de descanso y plazas de aparcamiento designadas suelen ser utilizadas con frecuencia. No obstante, en situaciones particulares, los conductores se ven obligados a estacionar en rampas y arcones, lo cual no solo afecta la seguridad vial y del tráfico, sino que también aumenta su riesgo a ser multados.

Esta problemática resalta la necesidad de contar con suficientes áreas de descanso y con estacionamiento seguro, para garantizar la seguridad tanto de los conductores de vehículos pesados, como del resto de usuarios de estas áreas. Así los principales motivos son:

- La falta de plazas vacías en las áreas de descanso cercanas.
- La falta de aparcamientos disponibles.

- La dificultad para conducir en zonas de aparcamiento congestionadas debido a los aparcamientos ilegales existentes en los alrededores.

Abordar estos desafíos requiere enfoques integrales que involucren a los responsables de la planificación interurbana, a las autoridades de transporte, a las empresas de servicios, y a la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la gestión y la disponibilidad de espacios de estacionamiento para camiones.

El sistema propuesto intenta encontrar una solución al problema de ubicar un conjunto de camiones en un conjunto de plazas de aparcamiento distribuidas en las áreas de descanso localizadas en la red de carreteras. En la aproximación presentada, se define un sistema autónomo que intenta conseguir una distribución “agradable” de los camiones en las áreas de servicio.

4.4. Entorno de negociación

El entorno de negociación está formado básicamente por dos tipos de agentes, los agentes *área* (áreas de descanso) que ofrecen las *plazas de aparcamiento* y los agentes *camión* (vehículos pesados) que solicitan aparcar en estas plazas. Cada agente *área* dispone de un número finito de plazas de aparcamiento que pone a disposición de los agentes *camiones*.

Como se ha comentado anteriormente, cada área dispone de un conjunto de servicios que hace que un camión prefiera aparcar en un área antes que en otra. Los agentes *camión* solicitarán la reserva de una plaza de aparcamiento durante un tiempo determinado para descansar y cumplir así con la legislación vigente.

Así pues, en el entorno propuesto, un *área* Ar_i gestiona un conjunto de plazas de aparcamiento Pl_p que son utilizadas temporalmente por agentes *camión* Ca . Cada plaza está asignada y gestionada únicamente por un agente Ar , y solo puede ser utilizado a la vez por un único agente Ca .

Al igual que en el protocolo anterior, se asume que los agentes *área* que disponen de las plazas deben registrar las mismas en un repositorio donde estará registrado qué agentes *área* hay y qué plazas tienen cada una de ellas. Cuando un agente *camión* necesite una plaza de aparcamiento se conectará al repositorio y buscará las plazas ofrecidos por las distintos áreas en la red viaria de su interés.

Cuando las peticiones de utilización de las plazas de un agente *área* superan el número de plazas disponibles, se debe iniciar la negociación para determinar qué agente *camión* Ca_k tiene asignada una plaza Pl . En el proceso de negociación intervienen múltiples agentes: agentes Ar_i que son las áreas que disponen de las plazas libres y agentes Ca_i , que son agentes que necesitan de estas plazas. Así pues, cuando un agente Ca_i necesita una plaza, busca entre todas las plazas proporcionados por los agentes Ar e intenta utilizar la plaza en el área que más le interesa, durante el tiempo necesario.

El entorno de negociación está compuesto por un conjunto de plazas de aparcamiento Pl ,

$$Pl = \{Pl_1^a, Pl_2^a, \dots, Pl_n^a, \dots, Pl_1^b, Pl_2^b, \dots, Pl_n^b, \dots, Pl_1^m, Pl_2^m, \dots, Pl_n^m\}$$

donde Pl_i^j representa la plaza i proporcionada por el agente área Ar_j .

Una plaza Pl_i^j puede estar en tres estados: *libre*, *pre-reservado* y *reservado*. Un recurso se

encuentra *libre* cuando no está asignado a ningún agente Ca , es decir, no tiene ninguna reserva ni pre-reserva.

Los agentes Ar ponen a disposición de los agentes Ca las plazas que tienen disponibles, independientemente de si están *libres* o *pre-reservadas*. Si en un instante t , un agente Ar recibe más solicitudes que la capacidad de las plazas de que dispone se realizará una negociación que el agente Ar resolverá mediante una votación entre los agentes Ca con solicitudes de plaza (solicitud de *pre-reservas*).

Tal y como se ha descrito en el Apartado 2.5, cada agente Ca tiene una serie de restricciones que debe cumplir. Sea T_{max} el tiempo máximo de conducción que un conductor puede conducir sin detenerse marcado por la ley, $T_{conduccion}$ el tiempo de conducción que le queda al conductor antes de tener que realizar una parada, y D_{maxima} la distancia en kilómetros que le queda para conducir en ese tiempo a la velocidad media esperada. Así pues, conforme transcurre el tiempo y el conductor conduce y avanza por la red viaria el tiempo de conducción va disminuyendo debiendo alcanzar un área de descanso antes de que ese $T_{conduccion}$ se agote.

4.4.1. Concepto de reserva y pre-reserva de una plaza de aparcamiento

Los conductores, para evitar agotar su $T_{conduccion}$, realizan paradas en áreas de descanso. Inicialmente, cuando un camión entra en la red de carreteras, solicita una plaza de aparcamiento en el área de aparcamiento donde prefiere estacionar. En ese momento, el área debe determinar si se puede hacer una reserva o debe hacerse un pre-reserva dependiendo del estado de ocupación y reservas de las plazas existentes, y, en caso de conflicto, de las variables propias de los camiones que han solicitado plaza en ese área.

El entorno es altamente dinámico: los vehículos están moviéndose por la red viaria, variando su posición, velocidad, deteniéndose en áreas de descanso y continuando su marcha en función de sus necesidades. Esto conlleva que el estado de ocupación de plazas de aparcamiento de las áreas también varíe. De este modo, la asignación inicial de reserva de la plaza que recibe un camión al entrar en el sistema no constituye una garantía firme de estacionar en un lugar específico, ya que las condiciones del entorno pueden variar y una plaza asignada a un vehículo, puede designársela antes de que este la alcance.

Sin embargo, la plaza específica en la que aparcará se consolidará una vez el camión esté próximo al área que se le asignó, según los criterios y estrategias definidas en el entorno. En definitiva, el sistema va redistribuyendo las plazas de aparcamiento según los criterios establecidos intentado conseguir la mejor distribución para todos los camiones y sobretodo intentando alcanzar el objetivo primordial del sistema, que es minimizar al máximo los camiones que debido a la saturación de la red no pueden aparcar de forma segura en un área de descanso.

En este sentido el sistema maneja dos tipos de asignaciones de las plazas de aparcamiento:

- **Pre-reservas.** Aquellas plazas asignadas por el área de acuerdo a las solicitudes del conductor pero cuya asignación final no está garantizada. Las pre-reservas se van asignando mientras el área donde se solicitan tenga plazas libres. Cuando un área tiene más solicitudes que plazas libres, debe realizar una negociación para determinar que pre-reservas se mantienen y que camiones deben reubicarse en otras áreas.
- **Reservas.** Aquellas plazas de aparcamiento asignada y que están garantizadas, esto es, esta plaza ya no entra en futuras negociaciones y el conductor que la tiene reservada, podrá

aparcar en ella al llegar al área. El conductor es informado por el sistema sobre garantía de esta reserva cuando se cumple la regla de reserva definida. Puede haber distintos criterios para determinar cuando un conductor consolida la pre-reserva y pasar a tener una reserva definitiva.

La reserva de plazas permite a los agentes camión saber que en algún instante dado, la plaza que tienen pre-reservada pasará a ser reservada y podrán aparcar. El criterio para determinar cuando una pre-reserva se consolida en una reserva se puede realizar teniendo en cuenta diferentes aspectos: a) un conductor puede tener cansancio acumulado y necesita realizar una parada, b) no tener más áreas de descanso en su ruta sin sobrepasar su tiempo máximo de conducción, o, c) estar a una distancia mínima establecida del área con lo que ya no se permita que se pueda reubicar en otra al conductor

4.4.2. Definición de las estrategias de elección de áreas

Un factor importante en el protocolo es la definición de la estrategia que el conductor quiere implementar para determinar el área en la que quiere aparcar. Esta estrategia definirá las preferencias que los conductores tengan y consecuentemente la importancia que tendrán sus votos en las negociaciones cuando estas se realicen.

Así, los conductores pueden tener distintas estrategias, como llegar al área de servicio más alejada sin sobrepasar el tiempo de conducción máximo, llegar a áreas de servicio concertadas en las que por algún motivo tienen descuentos en los servicios, o pertenecer a coaliciones con lo que pueden querer realizar las paradas junto a compañeros de la misma coalición.

En el sistema propuesto se ha seleccionado un criterio objetivo que dependerá de la regulación existente y de llegar al destino en el menor tiempo posible. De este modo, la estrategia elegida será la de maximizar los tiempos de conducción sin sobrepasar el límite que la ley establece, es decir, intentar alcanzar el área de servicio más alejada sin sobrepasar este límite de conducción.

La Figura 4.2 muestra un ejemplo con el punto kilométrico máximo alcanzable según un hipotético tiempo de conducción. Si este fuera el punto máximo al que puede acceder sin exceder su tiempo máximo de conducción, su primera preferencia debería ser conseguir aparcar en el área de servicio A_2 , y si no es posible, aparcar en A_1 . Aparcar en el área A_3 significaría exceder el tiempo máximo de conducción y exponerse a la correspondiente multa por no haber respetado los tiempos de descanso regulados.

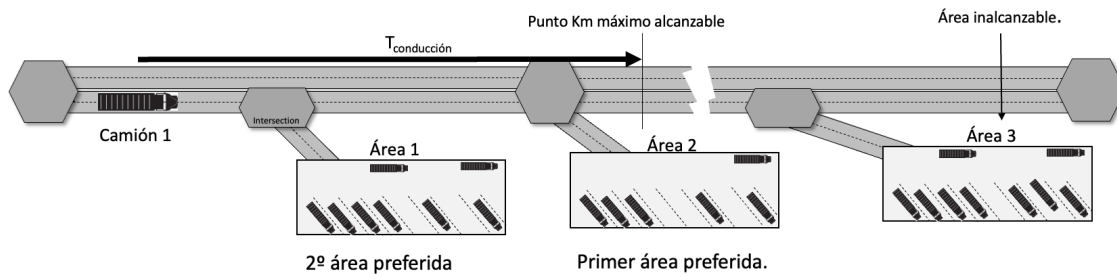


Figura 4.2: Ejemplo de preferencias de áreas alcanzables. Si el conductor para en su 2ª área preferida pierde tiempo de conducción a lo largo del itinerario.

La preferencia de aparcar en el área más lejana permite al conductor maximizar la distancia

alcanzada a lo largo de su itinerario de conducción. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran un ejemplo de red viaria con 4 áreas de descanso y en ellas se aprecia la diferencia de obtener plaza de aparcamiento en el área más lejana o no.

En la Figura 4.3 se observa que si el camión obtiene plaza en el área A_2 , la más lejana posible en su primer tiempo de conducción, en su segundo tiempo de conducción podría alcanzar el final de la red de ejemplo. Sin embargo, en la Figura 4.4, el camión no logra plaza en el área A_2 y debe aparcar para descansar en el área A_1 . Una vez reanude el viaje, en su segundo tiempo de conducción no va a poder alcanzar el área A_4 , ni el final de la carretera y deberá solicitar aparcar en el área A_3 , necesitando un nuevo tiempo de conducción, el tercero, para poder alcanzar el final de la red de ejemplo. Por lo tanto, esta situación le penaliza ya que al no obtener plaza en sus áreas más alejadas verá como aumenta su tiempo de viaje (por las paradas realizadas) para alcanzar su destino.

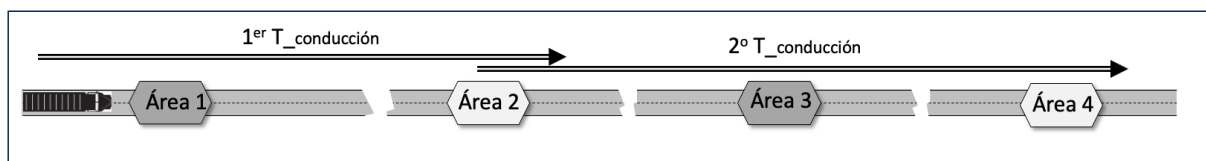


Figura 4.3: En este ejemplo el camión obtiene plaza en sus áreas más lejanas, Área 2 y Área 4, y por tanto solo necesita dos tiempos de conducción para alcanzar su destino.

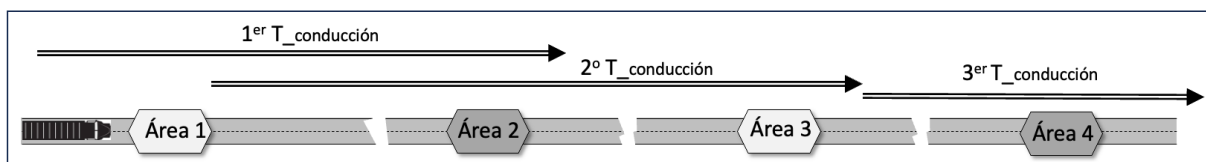


Figura 4.4: En este ejemplo el camión no obtiene plaza en el Área 2, su área más lejana en su primer tiempo de conducción y por lo tanto ya no alcanza su destino con dos tiempos de conducción.

4.4.3. Situación de conflicto

De este modo, análogamente a lo expuesto en el Apartado 3.2.3 hay que tener en cuenta que el número de plazas de aparcamiento ofrecidas en las áreas de servicio puede no ser suficientes para cubrir las necesidades de los conductores. Un conductor al que se le deniega o cancela una pre-reserva producirá en el sistema un *conflicto*, este conflicto podrá ser de 2 tipos: resoluble o irresoluble.

- Conflicto resoluble. Este conflicto se produce cuando se saturan las plazas de aparcamiento en un área de servicio. El área lanzará una negociación, reasignando sus plazas de aparcamiento según el resultado de la votación, pero el conductor que pierda la negociación tiene más áreas de servicio alcanzables donde poder realizar el descanso aunque el beneficio sea algo menor.
- Conflicto irresoluble. Se produce cuando se le ha denegado plaza de aparcamiento a un conductor en todas las áreas de servicio que el conductor tiene en su lista y no podrá realizar su parada obligatoria de forma segura en ningún área.

El sistema, en este último caso, se puede volver inestable, esta situación es inevitable en entornos altamente saturados en los que hay más demanda que oferta. En estos casos los conductores se ven obligados a aparcar en arcones o en los accesos de entrada o salidas de las áreas colapsando el área y aumentando el riesgo a que haya accidentes, o, conducirá hasta la siguiente área excediendo su tiempo máximo de conducción y poniendo en riesgo su seguridad y la del resto de usuarios de la vía.

De este modo, el sistema debe asegurar que, si hay plazas de aparcamiento disponibles para las necesidades de los conductores estas se reparten atendiendo a las preferencias de los conductores, y que en caso de no haber suficientes se intenta maximizar la utilidad de las plazas puestas a disposición de los conductores.

4.5. Protocolo de negociaciones encadenadas

4.5.1. Un sistema de negociación distribuido

El nuevo enfoque distribuido resuelve las restricciones y limitaciones mostrados en la aproximación centralizada en el Apartado 2.5.1. Este enfoque centralizado presentaba importantes problemas para su aplicación al mundo real dado que no era fácilmente escalable por la dificultad computacional que plantea el conjunto de soluciones factibles que se generan. Este conjunto de soluciones incluyen todas las posibles ubicaciones de todos los camiones involucrados en la votación en las distintas áreas, con lo que además, era necesario compartir toda la información de todos los elementos del sistema.

En el entorno propuesto, cuando un camión entra en la red de carreteras supervisada, determina su área preferida, esto es, la más lejana que puede alcanzar sin incumplir la ley, y solicita utilizarla. El área implicada, en función de su estado de ocupación, determina si puede asignar la plaza y pre-reservarla. Esta plaza no se garantizará hasta que el camión esté lo suficientemente cerca de la plaza de aparcamiento reservada.

En el entorno, las áreas de descanso actúan como islas independientes que cooperan implícitamente entre sí para lograr la asignación más adecuada de plazas de aparcamiento a los camiones en función de su posición, tiempo de conducción y preferencias. No hay un gestor central que dirija todas las negociaciones y comunicaciones, sino que cada área gestiona sus propias plazas de aparcamiento y puede iniciar las negociaciones cuando sea necesario. Así, la solución global consiste en el conjunto de resultados obtenidos en las diferentes áreas de descanso. Las características del nuevo protocolo son:

1. **Negociaciones en cascada o encadenadas.** Cada vez que un camión lanza una solicitud de reserva en un área sin plazas de aparcamiento libres, el área iniciará una negociación para la reasignación de plazas entre los camiones que tienen reservas y el nuevo camión que solicita una plaza de aparcamiento.

La solución, proporcionada eventualmente por el área, se compone de los camiones con reserva en el área y del camión que pierde la negociación. Este camión perdedor deberá solicitar una reserva en su siguiente área preferida según su lista de áreas preferidas. Si esta siguiente área no tiene plazas de aparcamiento libres disponibles, lanzará una nueva negociación y así sucesivamente.

Este proceso continuará hasta que todos los camiones sean asignados, o hasta que haya un camión que no ha encontrado plaza en la última negociación, es decir, haya perdido todas las

negociaciones en todas sus áreas preferidas. Este último caso se da cuando hay más reservas que plazas libres para negociar en todas las zonas preferentes de un camión.

El protocolo informa al conductor de la imposibilidad de hacer una reserva en ninguna de sus áreas preferidas. El conductor de este camión perdedor debe decidir qué hacer, es decir, aparcar en un lugar ilegal o cualquier otra opción que elija. La Figura 4.5 ilustra un ejemplo de las negociaciones en cascada que se pondrían en marcha para garantizar que todos los camiones tengan una asignación de aparcamiento de acuerdo con sus preferencias de estacionamiento.

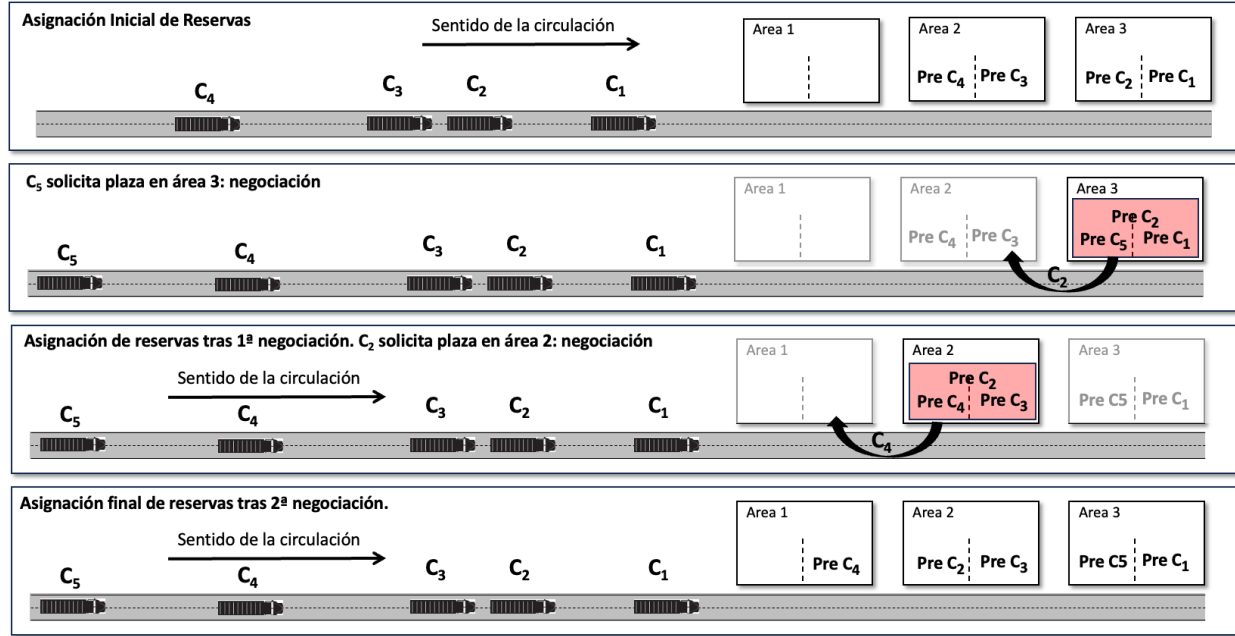


Figura 4.5: Ejemplo distribución según protocolo distribuido. Inicialmente los camiones $C_1 - C_4$ tienen pre-reservas en sus áreas preferidas. C_5 entra en el sistema y solicita plaza en el Área 3, lo que provoca que se inicie una negociación para determinar que dos camiones tienen plaza. El resultado de la negociación hace que C_2 se quede sin plaza y solicite plaza en el Área 2, lo que inicia una nueva negociación como resultado de la primera (encadenada) y así sucesivamente.

2. **Independencia entre áreas.** En el proceso de negociación en cascada, se observa que cada área es responsable de lanzar las negociaciones cuando es necesario. Las áreas no tienen conocimiento de la ocupación de otras áreas. En consecuencia, cada negociación se realiza a partir de la ocupación de cada área y de las posiciones, tiempos de viaje y preferencias de los camiones que participan en la negociación.

Así, las áreas son totalmente independientes en el proceso de negociación, pero la combinación de soluciones obtenidas de cada área de la red de carreteras expresa una solución de bienestar social para todas las zonas y camiones implicados.

4.5.2. Definición de preferencias en el entorno de transporte interurbano

En el ámbito de conductores profesionales que transportan mercancías en corredores de larga distancia podemos identificar tal como se ha descrito en el Apartado 4.4.2 diversas estrategias para organizar las paradas.

En el sistema propuesto la estrategia elegida es poder alcanzar el área de servicio más alejada sin que se sobrepase el tiempo máximo de conducción que un transportista profesional debe cumplir.

Para la determinación de las preferencias de los conductores se ha supuesto que los camiones llevan siempre un mismo sentido de circulación. De este modo, el sistema debe proporcionarle la mejor área (la más alejada posible) donde poder realizar su parada obligatoria “aguas arriba”, es decir, en el sentido de su marcha.

Con la misma filosofía, la primera preferencia de un camión será el área de servicio más alejada, siendo su segunda preferencia al área anterior a esta más alejada y así sucesivamente hasta el máximo de preferencias que cada camión tenga o áreas de descanso haya.

Formalmente podemos describir el conjunto de preferencias, en nuestro caso, de un camión i como

$$areas_preferidas_i = [a_1, a_2, \dots, a_n] / a_1 \succeq a_2 \succeq \dots \succeq a_n$$

donde n es el máximo número de orden de posibles áreas en las que desea realizar su parada y cuando n sea menor o igual que el número de áreas disponibles para aparcar.

Además, con la estrategia definida aseguramos que las preferencias de un conductor son transitivas entre las áreas, es decir, si el conductor i prefiere el área a_r al área a_s (ya que ambas son alcanzables y a_r está más alejada que a_s), y prefiere el área a_s al área a_t (ya que a_s está más alejada que a_t), entonces se cumple que el conductor i prefiere el área a_r al área a_t .

Formalmente,

$$\forall a_r, a_s, a_t \in areas_preferidas_i / a_r \succeq a_s \wedge a_s \succeq a_t \Rightarrow a_r \succeq a_t$$

4.5.3. Cálculo del peso de los votos en las negociaciones

Dado que el principal objetivo del sistema es minimizar el número de camiones que deben aparcar de forma ilegal, los conductores con más tiempo de conducción (TC) deben tener un peso mayor en sus votos. Estos conductores necesitan tener una prioridad alta dado que tienen pocas oportunidades de alcanzar otra área de servicio donde aparcar sin exceder su tiempo máximo de conducción (TM).

Al mismo tiempo, el peso de los votos debe intentar evitar la reubicación de camiones cuando estos están próximos al área de servicio. Así, el cálculo del peso será mayor cuanto más tiempo de conducción lleven, pues les queda menos tiempo para poder alcanzar un área de servicio donde descansar. De este modo, el peso del voto de un conductor j se define como:

$$w_j = \frac{TC_j * 100}{TM}$$

Además, según las preferencias que derivan de la estrategia definida, los conductores darán un voto mayor a las soluciones en las que se les asigne un área de servicio que esté más arriba en su lista de preferencias, es decir, que se encuentre más alejada de su posición actual. Este valor decrecerá en las soluciones en las que se les ubique en un área que esté más abajo en su lista de preferencias. Con lo que los votos de un conductor a cada solución, además de venir determinado por el peso que tenga a partir de su TC, también vendrá determinado por un valor β que será mayor cuanto más baja sea la posición en el orden de preferencias del conductor. De este modo, el voto de un conductor j se define como:

$$v_j = w_j * [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n] / \beta_1 \succeq \beta_2 \succeq \dots \succeq \beta_n$$

A continuación, se determina el cálculo de estos valores β . Ofreciendo una comparación entre distintos modos de realizar este cálculo.

4.5.4. Importancia de la ponderación de preferencias.

No todos los conductores tienen el mismo número de áreas de servicio en las que desean realizar su descanso. Por ello, es necesario establecer un criterio para determinar la ponderación que se realizará al peso del voto con cada preferencia ya que ésta puede influir en las soluciones ganadoras en las distintas votaciones que se realicen cuando se alcanza una situación de conflicto y se produce una negociación.

En este apartado vamos a explorar dos posibilidades. Una primera en la que se utiliza un parámetro para normalizar basado en el número máximo de preferencias de los conductores, y otra basada en un porcentaje que decrecerá proporcionalmente al número de preferencias:

- **Método 1: Parámetro.** Esta primera propuesta define un valor máximo para β igual al máximo número de preferencias que tienen los conductores, y, este valor irá decreciendo en una unidad, según vaya bajando el orden de las preferencias.

De este modo, los votos finales de un conductor para cada una de sus áreas preferidas sería el peso que tenga el conductor según su tiempo de conducción, y, la ponderación recibida en función del valor del parámetro β definido.

Sea,

- N el número máximo de conductores,
- $Pref_j$, el conjunto de preferencias que tiene el conductor j .
- n_j , el número de preferencias que tiene el conductor j en su lista, $n_j = |Pref_j|$.

$$\beta = \max(n_j) \forall j \in N$$

$$Voto_j = w_j * [\beta - 0, \beta - 1, \dots, \beta - (n_j - 1)] / n_j \leq \beta$$

- **Método 2: Porcentaje.** Esta segundo método propone el uso de un porcentaje que dependerá del número de áreas preferidas del camión involucrado en la negociación. Así, la primera preferencia tendrá una ponderación del 100% y este porcentaje se irá reduciendo gradualmente de acuerdo a su número de preferencias.

De este modo, el voto final de un conductor para cada una de sus áreas preferidas sería el peso que tenga el conductor según su tiempo de conducción por el porcentaje que le corresponda según el orden en su lista de preferencias.

Manteniendo la nomenclatura anterior en la que n_j representa el número de preferencias que un conductor j tiene en su lista,

$$Voto_j = w_j * \left[\frac{n_j - 0}{n_j}, \frac{n_j - 1}{n_j}, \dots, \frac{n_j - (n_j - 1)}{n_j} \right]$$

Es importante destacar que independientemente del método utilizado, el número de preferencias utilizadas en la negociación correspondiente, es el número de áreas de servicio en las que tiene posibilidad de conseguir una plaza de aparcamiento. En este sentido si un camión interviene en una negociación y la pierde, ese área deja de estar en su lista para la negociación en la próxima área de descanso en la que puede conseguir la pre-reserva. De este modo, se intenta maximizar la posibilidad de conseguir plaza en el área.

Caso de estudio

Para analizar la influencia del método de ponderación de pesos según las preferencias de los conductores vamos a definir el siguiente caso de estudio: varios segmentos de una red de carreteras que incluye 4 áreas de servicio $\{A_1, A_2, A_3 \text{ y } A_4\}$ con dos plazas de aparcamiento cada una y cinco camiones $\{C_1, C_2, C_3, C_4 \text{ y } C_5\}$. La Figura 4.6 representa el ejemplo.

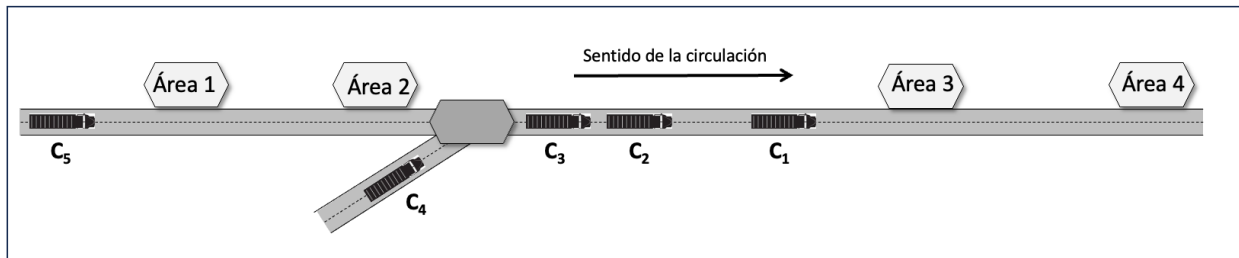


Figura 4.6: Caso de estudio simple. La figura muestra varios segmentos de una red de carreteras con 4 áreas de servicio y cinco camiones. Como se observa en la figura, debido a la localización de los camiones, solo el camión C_5 puede aparcarse en 4 plazas, mientras que el resto de camiones solo pueden alcanzar las áreas A_3 y A_4 .

Los conductores ordenan sus preferencias intentando aparcarse en el área de descanso más alejada sin sobrepasar su límite de conducción. La Tabla 4.1 muestra los tiempos de viaje para cada uno de los camiones. Únicamente se indican los tiempos de viaje y preferencias en orden, ya que son los datos necesarios para las negociaciones. Las áreas alcanzables por los camiones y que forman parte de sus preferencias vienen derivadas de la posición del camión, el tiempo de conducción, y la posición donde se encuentra el área.

Camiones	Tiempo de conducción (min)	Preferencias
C_1	228	A_3
C_2	216	A_3
C_3	96	A_4, A_3
C_4	108	A_4, A_3
C_5	120	A_4, A_3, A_2, A_1

Tabla 4.1: Parámetros de los camiones ejemplo: tiempos de conducción y preferencias alcanzables ordenadas según el criterio del área más lejana.

A continuación se describe un posible orden de llegada de los camiones a las posiciones del ejemplo y las asignaciones de aparcamiento recibidas por el sistema. Partimos de un instante temporal

t_0 en el que ya están en el sistema los camiones C_1 , C_2 , C_3 y C_4 y que han ido solicitando plazas de aparcamiento.

En t_0 , la situación de pre-reservas existente es la siguiente: los camiones C_1 y C_2 sólo pueden alcanzar el área A_3 con lo que tras solicitar plaza en este área se les concedió la pre-reserva. Los camiones C_3 y C_4 pueden alcanzar las áreas A_3 y A_4 , con lo que dada la estrategia de solicitar plaza en el área más alejada, solicitaron plaza en el área A_4 y tienen asignada la correspondiente pre-reserva en ese área. En esta situación, todos los camiones obtienen pre-reserva en su primera preferencia. La Tabla 4.2 resume esta situación de pre-reservas:

Camiones	Pre-reservas
C_1	A_3
C_2	A_3
C_3	A_4
C_4	A_4

Tabla 4.2: Pre-reservas existentes en el sistema en el momento previo a la aparición del camión C_5 en el sistema.

El camión C_5 tiene como primera preferencia al área A_4 , por lo que en t_1 , solicita una plaza en ese área. Como al área A_4 ya tiene todas sus plazas con pre-reservas comienza una negociación para la re-asignación de plazas entre los camiones C_3 , C_4 y C_5 . La Tabla 4.3 muestra el conjunto de soluciones posibles con los camiones que obtendrían la pre-reserva y el camión que debería buscar plaza en su siguiente preferencia si saliera ganadora esa solución.

Solución	C_3	C_4	C_5
S_0	A_4	A_4	-
S_1	A_4	-	A_4
S_2	-	A_4	A_4

Tabla 4.3: Conjunto de soluciones formado por las distintas combinaciones de los camiones que conseguirían pre-reserva en el área A_4 . En la solución S_0 el camión C_5 no obtendría pre-reserva en el área. En la solución S_1 sería el camión C_4 el que no obtendría la plaza, mientras que en la S_2 sería el camión C_3 .

Cuando los camiones reciben la solicitud de preferencias con el conjunto de soluciones realizan sus votos para cada solución. Este voto dependerá de sus pesos y del número de posibles áreas de descanso que el camión tenga para aparcar.

La siguiente tabla muestra, el número de preferencias de cada camión implicado y el peso que tiene en la votación a partir de su tiempo de viaje según el cálculo expuesto en el Apartado 4.5.3. Se asume que el tiempo máximo de conducción son 240 minutos.

De este modo, el sistema calcula el valor de la votación para cada una de las soluciones: S_0 , S_1 y S_2 . La Tabla 4.5 muestra la resolución de la votación utilizando el *Método 1*. En este método utilizamos el valor máximo de preferencias para ponderar el valor de todos los camiones en su primera preferencia (en el caso de estudio este número será igual a 4), e iremos decreciendo este valor para las siguientes preferencias. Así para las soluciones óptima posibles, se multiplicará por

Camión	Peso del Voto	Num. preferencias
C_3	40	2
C_4	45	2
C_5	50	4

Tabla 4.4: Para cada camión se presenta un ejemplo de pesos y numero de preferencias.

4 su peso si el camión se queda en su primera preferencia, y por 3 si va a su segunda preferencia (por 2 la tercera y por 1 la cuarta).

Solución	C_3	C_4	C_5	Total
S_0	160	180	150	490
S_1	160	135	200	495
S_2	120	180	200	500

Tabla 4.5: Resolución de la votación utilizando el *Método 1*: parámetro máximo de normalización. en este caso, la solución ganadora es la S_2 .

Por el contrario, la Tabla 4.6 muestra el resultado de la votación utilizando el *Método 2*: porcentaje del número de áreas preferidas. En ella se observa que la solución ganadora es otra. En este método, la ponderación depende del número de preferencias que cada camión tenga. Es decir, de las posibilidades que tiene de conseguir plaza de aparcamiento en otro área de servicio. Así, el camión C_3 y C_4 que tienen 2 áreas en su listado de preferencias ponderarán su primera preferencia con un 100 % y su segunda preferencia con un 50 %. Mientras que el camión C_5 que tiene cuatro áreas en su lista ponderará con un 100 % su primera preferencia y con un 75 % su segunda preferencia (50 % la tercera y 25 % la cuarta).

Solución	C_3	C_4	C_5	Total
S_0	40,00	45,00	37,50	122,50
S_1	40,00	22,50	50,00	112,50
S_2	20,00	45,00	50,00	115,00

Tabla 4.6: Resolución de la votación con *Método 2*. Porcentaje según el número de preferencias para la normalización.

Para el caso de estudio presentado, vemos que la solución ganadora depende del método de ponderación del voto elegido. La Tabla 4.7 muestra la distribución de plazas resultante tras la negociación utilizando ambos métodos para el cálculo del voto de cada camión.

Usando el *Método 1*, la solución ganadora es la S_2 en la que los camiones C_4 y C_5 conservan la pre-reserva en el área C_4 , y el camión C_3 deberá buscar plaza en su siguiente preferencia. Pero en el área A_3 los dos camiones que tienen pre-reserva ya no tienen más preferencias y al camión C_3 tampoco le quedará ningún área a la que solicitar plaza.

De este modo, uno de los tres camiones no podrá aparcar y la negociación acabará en una situación de conflicto *irresoluble*. Esto conlleva a que el camión deberá exceder su tiempo máximo de conducción para llegar a otro área fuera de la zona de estudio, o aparcar ilegalmente.

Camión	Método 1	Método 2
C_1	A_3	A_3
C_2	A_3	A_3
C_3	-	A_4
C_4	A_4	A_4
C_5	A_4	A_2

Tabla 4.7: Resultado de la distribución de plazas según el método de cálculo utilizado.

Sin embargo, utilizando el *Método 2*, la solución ganadora es la solución S_0 , donde los camiones C_3 y C_4 conservan su pre-reserva en el área de servicio A_3 . En este área, puede pasar que los camiones C_1 y C_2 ya tengan consolidada la plaza, o se lance una nueva negociación.

Esta nueva negociación también la perdería el camión C_5 debido a que aun tiene 2 áreas más en su lista y los otros camiones ya no tienen más áreas en las que poder estacionar. Además, los camiones C_1 y C_2 tienen un tiempo de conducción muy alto, por lo que, consecuentemente, su peso en la votación también es muy elevado. Por ello, el camión C_5 finalmente obtendría su pre-reserva en el área de servicio A_2 .

La Figura 4.7 muestra un ejemplo de la evolución del escenario representando la entrada en la red de un camión cada diez minutos hasta llegar a la situación de estudio en el tiempo t_4 donde se produce la situación de conflicto.

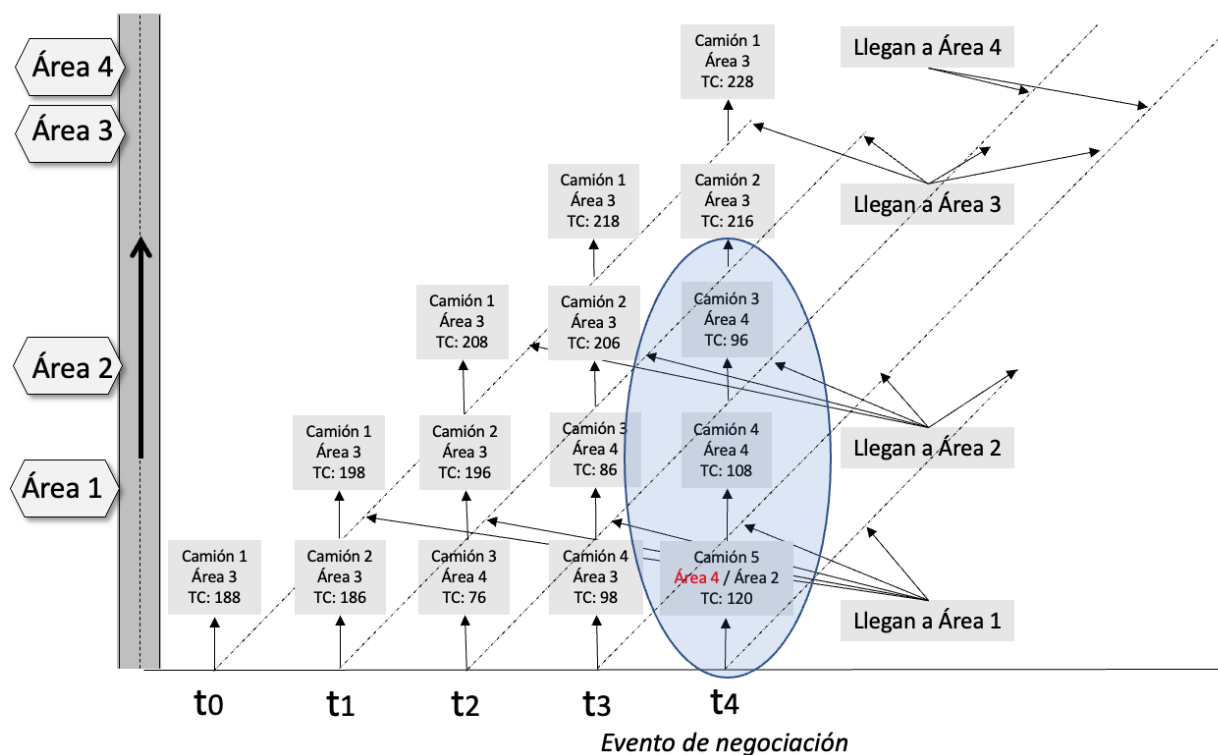


Figura 4.7: Ejemplo de evolución del escenario. El ejemplo está resuelto según el Método 2, esto es, utilizando el porcentaje en función del número de áreas preferidas.

La mejora de resultado del *Método 2* es debida a que en este método se da mayor ponderación a las siguientes preferencias, en función de cuantas más áreas tenga el camión en su listado de preferencias (debido a que tiene más opciones de poder conseguir plaza en otro área de descanso de su lista). De este modo, se reduce un poco la probabilidad de conseguir plaza en la primera preferencia pero aumenta la probabilidad de conseguir tanto el objetivo primario que es minimizar los camiones que quedan sin plaza de aparcamiento, como de maximizar la satisfacción global de todos los conductores.

4.5.5. Función de utilidad

En el entorno de negociación propuesto se asignan plazas de aparcamiento ofrecidas por las áreas de servicio a los camiones. Los camiones, como se ha descrito previamente, tienen un orden de preferencia sobre las áreas de servicio en las que descansar según su estrategia. La resolución de la negociación consiste en obtener el mayor grado de satisfacción posible para todos los camiones que participan en la negociación para la distribución de las plazas disponibles entre los camiones.

Así pues, se define la función Sat_j como la función que, a partir de la función de preferencia de cada camión, $\succ_j = \succ_{j0}, \succ_{j1}, \dots, \succ_{j\max Pref_j - 1}$, devuelve un valor normalizado del grado de beneficio (satisfacción) para el camión C_j según el orden que ocupe el área A_i donde obtuvo la plaza de aparcamiento en su lista de preferencias.

De este modo, si obtiene la plaza solicitada en el área de servicio que ocupa su primera preferencia la satisfacción para el camión será del 100%, disminuyendo ésta según vaya avanzando la posición del área de servicio que se le asigna en su lista de preferencias hasta llegar al 0% si finalmente por saturación en el sistema, no consigue plaza en ninguna de sus áreas preferidas y debe aparcar de manera ilegal o continuar trayecto en busca de la siguiente área excediendo su tiempo de conducción máximo.

Así, definimos la siguiente función Sat para cuantificar la satisfacción de un camión j según la asignación que obtuvo:

$$Sat_j = \frac{(\max Pref_j - p) * 100}{\max Pref_j} / 0 \leq p < \max Pref_j$$

De manera global, podemos definir la satisfacción total del entorno como la suma de las satisfacciones de los distintos camiones dependiendo del área que se les asignó de acuerdo a sus preferencias.

$$Sat = \sum_{i=1}^n Sat_i / i \in \text{Clientes}$$

4.5.6. Resolución de la votación y de conflicto

La resolución de la votación determinará los conductores que conservarán la plaza de aparcamiento y el que deberá buscarla en su siguiente área preferida. Un aspecto clave en el proceso de reasignación de plazas de aparcamiento ocurre cuando un área tiene asignadas todas las plazas de que dispone y recibe una nueva petición de otro conductor solicitando una plaza.

Cada área de servicio tiene un número diferente de plazas que tiene identificados como $P_{\max_i}$. En un instante t es posible que algunas de esas plazas ya tengan una reserva consolidada según los criterios establecidos, $PO_i(t)$. Así, el número máximo de plazas sobre las que pueden hacerse pre-reservas en un instante t será $PR_{\max_i}(t)$, donde

$$PR_{max_i}(t) = P_{max_i} - PO_i(t).$$

De este modo, definimos las pre-reservas existentes en un área de servicio en un instante t cómo $PR_i(t)$, donde $PR_{max_i} \geq PR_i(t)$. Y definimos finalmente el número de plazas libres que un área i tiene en un instante de tiempo t cómo $PL_i(t)$. De este modo, en cualquier instante de tiempo de cumplirse que el número de plazas total que tiene un área debe ser igual a las plazas ocupadas que tenga en ese momento, más las plazas con pre-reserva que haya en ese momento, más el número de plazas libres que queden:

$$P_{max_i} = PO_i(t) + PR_i(t) + PL_i(t)$$

Así, en un momento dado definimos $PR_i(t) = (C_l, C_2, \dots, C_n)$ como el conjunto de camiones que tienen pre-reserva en el área i y donde $n = |PR_{max_i}|$, es decir, no queda ninguna plaza libre en el área, $|PL_i(t)| = 0$.

En este momento, sea C_o un nuevo camión que solicita una de las n plazas que el área no tiene con reserva definitiva (ocupada). De este modo, se alcanza una situación de conflicto en el área, por lo que esta lanzará una negociación que involucrará a los n camiones que tenían la pre-reserva, más el nuevo que también necesita una plaza en el área.

La resolución de la negociación pasa por la realización de una votación lanzada por un área de servicio i según se define en el Apartado 3.3.4 mediante una función FRV . Esta función definirá a partir de las preferencias de los camiones, $Pref_i(t)$, su peso en el instante de la negociación, $W_i(t)$, y la estrategia que estos tengan, $E_i(t)$, los camiones que conservarán la pre-reserva y el camión que deberá buscar plaza en la siguiente preferencia de su lista.

$$FRV_i = Pref_i(t) \times W_i(t) \times E_i(t) \rightarrow (PR_i(t), C_k)$$

donde, $PR_i(t)$ es el conjunto de camiones con plazas asignadas (pre-reservas), y C_k es el camión que no ha conseguido plaza en el área.

Tal como se ha descrito en los apartados anteriores, en la aplicación al dominio seleccionado los factores definidos previamente derivan en los siguientes parámetros con los que se determinarán las distintas soluciones y se calculará la solución ganadora:

- $Pref_i(t)$, formado por el conjunto de áreas alcanzables de cada camión según su posición y tiempos de viaje.
- $W_i(t)$, formado por el porcentaje definido por la relación entre el tiempo de conducción de cada conductor y el tiempo de conducción máximo.
- $\beta_i(t)$, ponderación al peso de cada camión, $w_i(t)$, determinado por el número de preferencias activas que tenga cada uno en la negociación en curso.

De este modo se define un conjunto de soluciones que se corresponde con las distintas distribuciones de los camiones en las plazas de aparcamiento. Dado que este es un proceso distribuido y el área que realiza la negociación no conoce el estado del resto de áreas, se determina un conjunto de $n + 1$ soluciones posibles que se corresponde con los n camiones que conservan la plaza y el que debe buscar plaza en su siguiente área preferida.

Así, definimos, S_j , la solución en la que el camión C_j debe buscar plaza en otra área, donde $1 \leq j \leq n + 1$. Además, en cada solución cada camión realizará su voto, tal como se ha descrito en el Apartado 4.5.3. De este modo definimos v_j^i como el voto que hace el camión i para la solución S_j ,

$$v_j^i = w^i * \beta_j^i$$

y siendo la suma de todos los votos de los camiones en cada solución propuesta el valor que está solución tendrá para la resolución de la votación. Así, el valor de la solución S_j será,

$$S_j = \sum v_j^i / 1 \leq i \leq n + 1$$

Finalmente, la solución de la función FRV estará determinada por la solución que haya obtenido el valor máximo en las votaciones.

$$FRV = MAX(S_j), \forall j / 1 \leq j \leq n + 1$$

4.5.7. Resolución mediante negociaciones encadenadas

Análogamente a la resolución descrita en el Apartado 3.3.5, el proceso de reserva de una plaza de aparcamiento seguirá una de las dos fases expuestas:

- Fase de asignación. El área de servicio tiene plaza libres y va asignando pre-reservas a los camiones según recibe las solicitudes.
- Fase de reasignación. No le quedan plazas libres y el área recibe una nueva solicitud de una plaza de aparcamiento de un nuevo camión que entra en el sistema. En esta fase cada vez que se recibe una nueva solicitud el área debe lanzar una negociación entre los camiones que tienen pre-reservas asignadas y el nuevo camión que realiza la solicitud.
- Fase de consolidación. El camión que posee una pre-reserva está próximo al área de servicio, y cumple las condiciones para consolidar su pre-reserva tal como se describe en el Apartado 4.4.2. El área de descanso le enviará un mensaje de consolidación y el camión contestará confirmando la aceptación de la reserva definitiva. En este momento el área contabiliza la plaza como *reservada* con lo que se decrementa el número de plazas disponibles en las negociaciones hasta que el camión libere la plaza y vuelva al estado de *libre*.

Podemos identificar las siguientes interacciones que ocurren entre el área de servicio y los camiones que solicitan una plaza de aparcamiento en ella:

- Cuando un camión C_j , quiere reservar una plaza de aparcamiento en un área, realiza una solicitud de una plaza a este área mediante la interacción $Solicita(j)$.
- Cuando un área A_i recibe una solicitud de reserva de plaza de un camión C_j , debe determinar si le asigna una pre-reserva directamente (mensaje de confirmación, *OK*), o si debe realizar una negociación para ver qué camión de los que han solicitado aparcar en el área podrá hacerlo.

- En caso de que se deba realizar una negociación, el área calculará el conjunto de soluciones posibles (*Soluciones*) y las enviará a los camiones implicados para que realicen su votación.
- Cuando un camión C_j recibe el conjunto de soluciones, emite su voto para cada una de las posibles soluciones y se lo envía al área implicada, A_i .
- Una vez recibidos todos los votos de los camiones implicados, el área A_i calculará cual es la solución ganadora, e informará a los camiones el mensaje *Confirma* donde se les indica que conservan la pre-reserva en el área. Y el mensaje *Cancela* al camión que la pierde y debe buscar plaza en otro área.

Así pues, el área debe mantener el número de plazas libres de que dispone (*libres*), además del conjunto de camiones que tienen concedida una pre-reserva en la misma ($Pr_{Camiones}$):

$$AnalizarSolicitud(C_j) = \begin{cases} \text{Si } (libres > 0), \text{ hay plazas libres} \\ \quad \text{Enviar confirmación (OK) a } C_j \\ \quad Pr_{Camiones} \leftarrow Pr_{Camiones} + C_j \\ \quad libres - \\ \text{Sino, el recurso está saturado} \\ \quad \text{Iniciar una negociación para la reasignación} \\ \quad \text{a todos los camiones pertenecientes a } Pr_{Camiones} \text{ y } C_j \\ \text{Fin Si} \end{cases}$$

En el proceso de *re-asignacion*, el área A_i compondrá un conjunto de soluciones que enviará a todos los camiones implicados (aquellos que tienen asignada una pre-reserva, y al nuevo camión que solicita el recurso). Una vez recibidas las posibles soluciones los camiones, realizarán su votos (como se describe en el Apartado 4.5.6) para cada solución que enviarán al área de servicio. El área resolverá la negociación según la función FRV definida en el Apartado 4.5.6, y confirmará a los camiones que pueden utilizar las plazas de aparcamiento y cancelará su uso al camión que pierda la negociación.

A continuación, en el Algoritmo 2, se presenta el pseudo-código del procedimiento para la re-asignación:

Data: Conjunto de camiones y solicitudes de plazas
Result: Confirmación o cancelación de asignación de pre-reservas
foreach camión k que ha solicitado una plaza de aparcamiento **do**
 Realiza conjunto de soluciones con los camiones implicados Envía conjunto de Soluciones a k ;
 Recibe Votos de k ;
 Resuelve (función FRV) para k ;
 if Plazas asignadas a k **then**
 Envía confirmación a k para conservar plaza;
 else
 Envía cancelación a k ya que no consigue plaza;
 end
end

Algoritmo 2: Descripción del proceso de asignación de plazas de aparcamiento.

Una vez solicitada la plaza de aparcamiento, el camión queda a la espera de la contestación del área de servicio. Si el área de servicio le contesta afirmativamente el camión registra la pre-reserva concedida, en caso contrario, es consciente de que el área está saturada y debe negociar para intentar conseguir una plaza en el área. En este caso, el camión ha recibido un conjunto de soluciones del área de servicio, y generará su votos para las distintas soluciones según su situación en ese instante temporal, y esperará la contestación del área que podrá ser de confirmación, con lo que podrá registrar la pre-reserva, o de cancelación, en cuyo caso determinará su siguiente área de descanso preferida a la que solicitar la plaza.

La Figura 4.8 muestra un ejemplo con la secuencia de interacciones entre las áreas de descanso y los camiones.

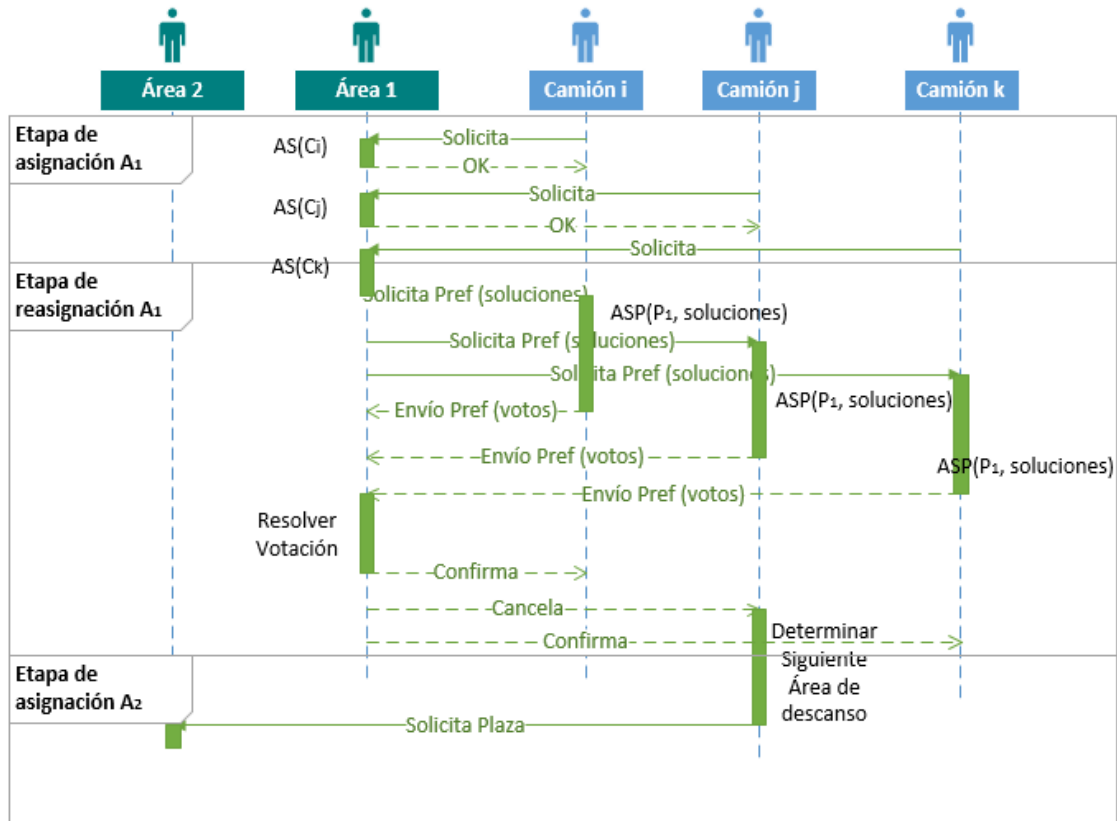


Figura 4.8: Etapas de asignación y reasignación. La función AS se corresponde con *AnalizarSolicitud* lanzada por el agente área cuando recibe una solicitud de un agente camión, y, la función ASP con *AnalizarSolicitudPref* lanzada por un agente camión cuando recibe la solicitud de preferencias de un agente área.

Se observa que durante la etapa de asignación el área A_1 tiene plazas disponibles y las asigna según van llegando solicitudes (la de los camiones C_i , C_j , ...) que reciben confirmación de la pre-reserva. Cuando llega la nueva solicitud del camión C_k , el área no tiene plazas suficientes para las solicitudes de todos los camiones recibidas e inicia la etapa de reasignación mediante la votación.

Una vez resuelta la reasignación, el camión C_j , que ha perdido la negociación, deberá solicitar

una plaza en otro área de servicio según sus preferencias. Si este área tiene plazas libres le asignará uno, si no, el área lanzará una nueva negociación, encadenada a la primera, para distribuir del mejor modo posible las plazas entre los camiones que las solicitan. Este proceso terminará cuando todos los camiones involucrados en las distintas negociaciones consigan satisfacer sus necesidades (consigan una plaza en algún área de su lista de preferencias), o, algún camión pierda la negociación en todas las áreas de su lista quedando este sin poder aparcar de forma adecuada, y el sistema en un conflicto irresoluble.

Así pues, la acción resultante a la solicitud de votaciones de un área de servicio A_i a un camión será:

$$AnalizarSolicitudPref(A_i, soluciones) = \begin{cases} \text{Calcular votos y enviarlos a } A_i \\ \text{Esperar respuesta} \\ \text{Si respuesta es } \textit{Confirmación} \\ \quad \text{Registrar Área de servicio } A_i \\ \text{Sino, respuesta es } \textit{Cancelación} \\ \quad \text{Calcular siguiente área de descanso preferida} \\ \quad \text{Enviar solicitud al siguiente área de descanso} \\ \text{Fin Si} \end{cases}$$

Cada vez que un camión solicita la reserva de una plaza de aparcamiento en un área de descanso en la que ya no queden plazas disponibles, es necesario que el área en cuestión lance una negociación entre los camiones implicados para resolver quiénes podrán aparcar en el área. Para ello, genera el conjunto de soluciones posibles que envía a los camiones para que voten. La solución final ganadora proporcionada por el área se compone del reparto de plazas entre los distintos camiones de acuerdo a las votaciones recibidas, y, del camión que no obtendrá plaza de aparcamiento.

El área será la responsable de comprobar si los camiones con pre-reserva pasan a cumplir las condiciones establecidas para consolidar la plaza y que esta quede asegurada mediante un mensaje *Consolida(i)* tal como muestra la Figura 4.9.

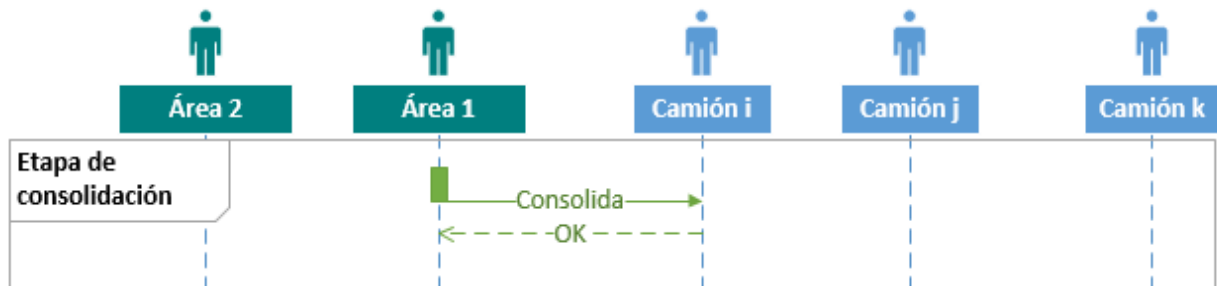


Figura 4.9: Etapa de consolidación.

El proceso de la consolidación de una plaza se muestra en el Algoritmo 3, en el que el camión que ha consolidado la plaza es eliminado del conjunto de camiones que tenían pre-reservas, $Pr_{Camiones}$. De este modo, este camión ya no entrará en futuras negociaciones que puedan realizarse si llegan nuevas peticiones de aparcamiento.

Data: Camiones con pre-reservas

Result: Confirmación de consolidación de reservas

foreach *camión k que tiene una pre-reserva en el área* **do**

 Comprueba si camión k cumple las condiciones de consolidación de las plazas.;

if *Camión k cumple condiciones* **then**

 Envía mensaje a k para consolidar la plaza;

 Disminuye el número de plazas disponibles;

else

 Mantiene el estado de la plaza;

end

end

Algoritmo 3: Descripción del proceso de asignación de plazas de aparcamiento.

La Figura 4.10 representa un ejemplo de las interacciones del protocolo, análogo al representado en la Figura 4.8. En este caso, se parte de que el área A_1 ya tiene una plaza con reserva consolidada para el camión C_i , por lo que solo le queda una plaza libre. Así, cuando llega la solicitud del camión C_j se le confirma pues aún tiene una plaza disponible. Sin embargo, cuando llega una nueva solicitud del camión C_k el área está saturada y es necesario ejecutar la etapa de reasignación en la que únicamente participan los camiones C_j y C_k , ya que el camión C_i tiene la plaza consolidada.

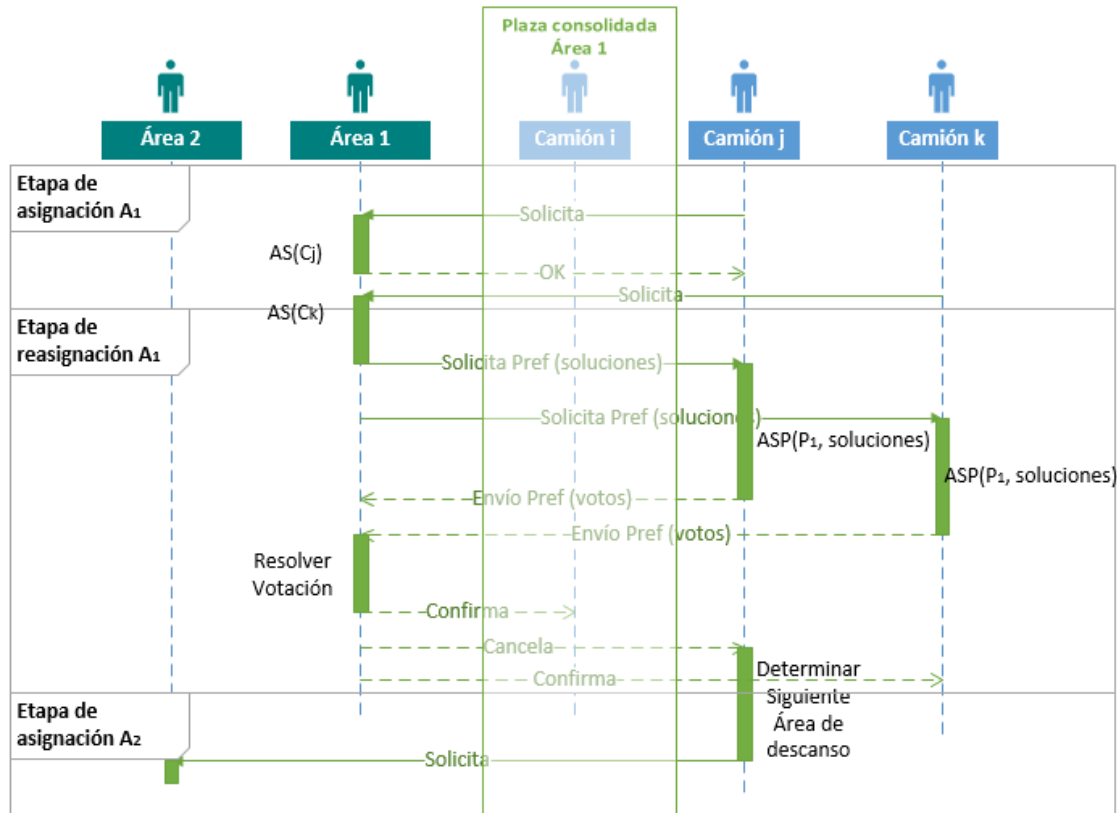


Figura 4.10: Etapas de asignación y reasignación después de la consolidación de la plaza del camión C_i . Cuando es necesario ejecutar la fase de reasignación, el camión C_i ya no participa por que tiene la plaza consolidada.

La plaza reservada por el camión C_i ya no podrá entrar en ninguna negociación hasta que este la libere. Cuando un camión termina su tiempo de descanso y va a abandonar la plaza del área, le manda un mensaje al área informándole de que va a dejar la plaza que ocupaba libre. Al recibir el mensaje, el área incrementará el número de plazas *libres* que tiene. Si había camiones a los que se les había denegado una plaza en el área, se les informará por si aun están interesados en ocuparla y quieren volver a solicitarla.

4.6. Evaluación del protocolo

En este apartado se va a evaluar el protocolo de negociación. Para ello, al igual que la evaluación realizada en el Apartado 3.4, se estudia el bienestar social, la eficiencia y el cumplimiento de las principales propiedades autónomas.

4.6.1. Análisis de convergencia y eficiencia computacional

En cuanto al análisis de convergencia, al igual que en el protocolo teórico definido, cada negociación se resuelve mediante una votación, donde se presenta un conjunto finito de posibles soluciones. De este modo, la negociación no entra en una secuencia de ofertas y contraofertas sino que se generan las posibles soluciones, que será un número finito igual al número de camiones involucrados en la negociación y dependiendo de los votos realizados por los camiones se genera la solución ganadora.

Se comprueba que la elección de un enfoque basado en votación no solo simplifica el proceso de toma de decisiones, sino que también ofrece una mayor transparencia y claridad en la determinación de la solución final. Este enfoque innovador refuerza la eficacia del protocolo de negociación al minimizar la complejidad de las negociaciones.

Como el protocolo se basa en un conjunto de negociaciones encadenadas es necesario asegurar que el número de negociaciones que se pueden producir es finito y el proceso termina. El criterio elegido para la elección de las áreas preferidas asegura este punto:

1. El número de áreas preferidas de cada camión es finito.
2. Las áreas preferidas de cada camión están ordenadas de mayor preferencia a menor según la distancia a la que se encuentran del camión. A más distancia más arriba está en su lista de preferencias.

Así el protocolo obliga a que las preferencias de cada camión estén ordenadas y cumplan la propiedad transitiva tal como se explica en el Apartado 4.5.2. Además, si un camión solicita una plaza en un área de descanso y no la consigue, la solicitará en su siguiente área preferida, y no volverá a solicitarla en las áreas en las que se le denegó, con lo que tiene un número finito de intentos para conseguir una plaza de aparcamiento. De esta forma no puede producirse un bucle pues no volverá a optar por una plaza en un área de la cual ya fue expulsado (a no ser que el área vuelva a tener nuevas plazas disponibles y avise a los camiones que la solicitaron por si aun están interesados en conseguir plaza en el área).

Por otra parte, también se garantiza la eficiencia computacional, porque los camiones solicitan plazas en una sólo área, y solo si se les deniega tras una negociación, inician una nueva solicitud en su siguiente preferencia. Si por el contrario, los camiones solicitarán una plaza en todas las áreas

de su lista a la vez, para obtener al menos una plaza, podría darse el caso de qué obtuvieran el uso de más de una plaza, y tuvieran que rechazar una asignación, retrasando el proceso y aumentando las interacciones entre camiones y áreas.

También sería necesaria la introducción de bloqueos, ya que el camión debería esperar a recibir respuesta de todas las áreas a las que solicitó recurso para elegir de entre las que lo acepten y contestarles. Y las áreas también deben bloquear las plazas hasta que reciban confirmación de que la asignación ha sido aceptada, o, denegada en cuyo caso ya se le puede ofrecer a otros camiones que la soliciten.

4.6.2. Bienestar social

Otro de los objetivos principales del protocolo es maximizar el bienestar social. En este sentido, este objetivo principal se traduce en un objetivo prioritario del sistema que es minimizar el número de camiones que no consiguen plaza de aparcamiento en alguna de las áreas de su lista de preferencias. De este modo, en un sistema saturado cuantos menos camiones se queden sin conseguir plaza implicará que hay un mayor número que sí ha conseguido aparcar satisfactoriamente. Además de asegurar que si es posible una distribución de plazas en la que todos los camiones consiguen aparcar en alguna de sus áreas preferidas, se cumple que ningún camión quedará sin plaza.

Así, si definimos,

- n número de áreas que hay en el sistema.
- m número total de plazas que los camiones necesitan, y
- $\vec{A}_j(t)$ es la asignación de recursos que un área j tiene hecha para los camiones que solicitaron sus plazas en un tiempo t .

Donde el objetivo principal del sistema es,

$$\min(m - \sum |\vec{A}_j(t)|), \forall j / 1 \leq j \leq n$$

El sistema siempre intenta asignar y reasignar las plazas según las necesidades que hay en cada momento para cumplir con este objetivo prioritario. Además, este objetivo viene sujeto a la maximización de la satisfacción de los camiones que se refleja en la asignación recibida por los camiones de las plazas solicitadas en las mejores áreas posibles de acuerdo a sus preferencias.

En el Apartado 4.5.5 se define la satisfacción del entorno como la suma de las satisfacciones de los distintos camiones en la asignación que el sistema les da para las distintas plazas que solicitan.

El protocolo de negociación pondera con mayor valor las plazas que ofrecen las áreas más preferidas (más alejadas sin sobrepasar su tiempo de conducción máximo) sobre las menos preferidas de cada camión. De este modo, el voto de cada camión tiene un valor mayor para su primera preferencia y decrece hasta la última. Así, dentro del objetivo principal que era minimizar el número de camiones que no consiguen plaza de aparcamiento, el sistema asegura que cada camión obtendrá plaza en el mejor área posible dentro de sus preferencias.

4.6.3. Propiedades de los sistema autónomicos

El protocolo de negociación propuesto cumple con las siguientes propiedades de un sistema autónomico:

- Auto-configuración. El sistema integra los cambios tanto en las áreas como en las plazas disponibles de los mismos. Existe un agente que actúa como repositorio de agentes área. De este modo, cuando hay cambios en la oferta de plazas, el entorno se adapta a este cambio. Los agentes camión acceden al repositorio para conocer qué agentes área proporcionan las plazas y proceder a su solicitud.
- Auto-optimización. Es parte intrínseca del protocolo en la que se escogen los candidatos más adecuados según las preferencias y la función de resolución de la votación, durante todo el ciclo de vida del sistema. Por lo tanto, las plazas asignadas a los camiones son las que proporcionan la mayor utilidad posible a los camiones y por ende, al sistema.
- Auto-recuperación. Si en algún momento cayera un área o se bloquearan plazas en un área, el sistema informaría a los clientes que la tienen reservada y éstos deberán solicitar una nueva plaza según su lista de preferencias, realizando una nueva solicitud siguiendo el protocolo de negociaciones encadenadas.

4.7. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado la aplicación del protocolo de negociación planteado a un modelo en el que el dominio de aplicación es el aparcamiento de vehículos pesados (camiones) en corredores de larga duración (entornos interurbanos).

El entorno de aplicación del protocolo se corresponde con el entorno objetivo para el que se desarrolla el protocolo. Un entorno altamente dinámico donde los vehículos están moviéndose por la red viaria constantemente, variando su posición, velocidad, deteniéndose en áreas de descanso y continuando su marcha en función de sus necesidades.

Un camión, cuando entra en la red de estudio, organiza sus preferencias de áreas de descanso para realizar sus paradas y el sistema le asigna una pre-reserva en una de sus áreas según las preferencias del camión, pero también de la capacidad existente en las áreas. Cada vez que un nuevo camión solicita una plaza en un área sin plazas compite con el resto de camiones para recibir una plaza en alguna de sus preferencias. El sistema distribuye las plazas según las necesidades de los camiones para asegurar que todos consigan plaza, o, en caso de saturación del sistema, quede el menor número posible de camiones sin plaza.

Debido al entorno tan dinámico, y altamente poblado, se establecen las pre-reservas, que se pueden ir modificando según evoluciona el tráfico y la ocupación de las áreas, y, reservas definitivas que se asignan cuando el camión está próximo a un área de servicio y ya no puede estacionar en otra.

Se ha adaptado el protocolo de negociación definido de forma que cada área será la responsable de la gestión de sus plazas, incluyendo el lanzamiento de la negociación cuando surge una situación de conflicto (recibe más solicitudes que plazas disponibles tiene). Las áreas no tienen conocimiento del estado del resto de áreas, así que el resultado de una negociación en un área puede lanzar negociaciones encadenadas en las áreas adyacentes.

También, aunque distintas estrategias podrían ser viables, se ha escogido la estrategia más plausible para la elección de áreas por los camiones. Esta estrategia se basa en intentar aparcar en el área de servicio más alejada sin sobrepasar el límite marcado por la legislación.

De este modo, se ha definido un sistema totalmente autónomo en el que están registrados los agentes área, y en el que se van registrando de forma automática los camiones al entrar en la red, y

en el cual se van asignando pre-reservas, lanzándose las negociaciones necesarias para resolver los conflictos, pasando a reservas definitivas, y, liberando plazas según evoluciona el entorno.

Así, en el último apartado del capítulo se ha verificado que la evaluación del protocolo expuesta en el capítulo anterior se confirma para el entorno de negociación planteado.

Capítulo 5

Un entorno autonómico para la gestión de plazas de aparcamiento en tráfico interurbano

Contenidos

5.1. Introducción	78
5.2. Modelo de conocimiento del sistema	78
5.2.1. Dominio de la topología de la red de carreteras interurbana	79
5.2.2. Dominio del comportamiento del tráfico	79
5.2.3. Dominio de los sistemas de información de tráfico	80
5.2.4. Dominio de la gestión del tráfico de vehículos pesados	81
5.3. Diseño del sistema	82
5.3.1. Modelo de organización	83
5.3.2. Modelo de agentes	84
5.3.3. Modelo de interacciones	85
5.4. Plataforma para la ejecución y prueba del modelo de negociación	86
5.4.1. Implementación	88
5.4.2. Creación de escenarios	88
5.4.3. Funcionalidad del agente interfaz	90
5.4.4. Funcionalidad del agente camión. Aplicación móvil	91
5.4.5. Ejemplo de utilización	92
5.5. Evaluación de las propiedades de los sistemas autonómicos	95
5.6. Conclusiones	97

En este capítulo se presenta un sistema multiagente para la gestión de aparcamiento de vehículos pesados en carreteras interurbanas. El objetivo del sistema es conseguir que los camiones y las áreas de descanso, de forma autonómica, interactúen para que los camiones consigan aparcar en ellas minimizando el aparcamiento ilegal en condiciones de saturación de las áreas.

Para ello se ha realizado en primer lugar el modelo de conocimiento del sistema. Posteriormente, se ha realizado el diseño del sistema con el desarrollo de los modelos de organización, agentes e interacciones. Y finalmente se ha realizado la implementación del sistema junto con una plataforma para simular el funcionamiento del sistema completo en entornos de tráfico reales [85].

5.1. Introducción

Los sistemas de simulación de tráfico tienen muchas variables, que hacen que el entorno se modifique constantemente, obligando al desarrollo de complicados y costosos algoritmos si un sistema centralizado quiere controlar todas las variables del sistema y su funcionamiento.

En esta tesis doctoral se propone un protocolo de negociaciones encadenadas como base para la resolución de conflictos. De este modo se simplifica el problema global que se traduce en muchos subproblemas que los agentes que intervienen en ellos deben resolver para conseguir un beneficio común.

Por ello, se ha definido un sistema multiagente que implementa un agente por cada área que se encuentra en la red de estudio y otro por cada agente camión que entra en la red y desea conseguir plaza de aparcamiento para realizar su obligado descanso. De este modo, se ha definido e implementado una plataforma que pueda crear y simular escenarios aleatorios, en los que los camiones compiten por aparcar en las áreas. Además, la plataforma debe permitir monitorizar el sistema y poder ponerlo en situaciones que pueden ocurrir en la vida real, como un cierre temporal de un área, o la entrada y salida de camiones en la red.

La plataforma tiene un funcionamiento autonómico, porque el sistema es completamente distribuido y reacciona a los cambios del entorno que se producen. Esto consigue maximizar siempre el objetivo para se ha creado el sistema, la reducción del aparcamiento ilegal al máximo posible según las condiciones de saturación del mismo.

Con el objeto de poder estudiar, analizar y comprobar todas las propiedades autonómicas del sistema y simular un comportamiento real, se ha creado, además de los agentes que modelan los camiones y áreas, un agente interfaz que permitirá la simulación de situaciones reales con la caída y recuperación de un área, y un agente camión, que simula la entrada y visualiza las áreas que le preasigna el sistema hasta que consigue tener una reserva definitiva donde aparcará.

5.2. Modelo de conocimiento del sistema

La interacción entre los diferentes agentes que componen un sistema autonómico es un elemento fundamental para el adecuado funcionamiento del mismo. La coordinación, cooperación y negociación de los agentes no puede entenderse sin definir un modelo de conocimiento común que permita a los agentes comprender el contenido de los mensajes que se intercambian.

Así pues, para que la interacción entre agentes, del mismo o de distinto tipo, sea correcta, la información no solo debe llegar de forma correcta, si no que la semántica de esta debe ser comprendida por ambos. Esto es crucial para la toma de decisiones automatizada y la coordinación efectiva entre diferentes agentes del sistema.

El dominio del tráfico es un entorno distribuido con un comportamiento altamente dinámico. Además, la aparición de las comunicaciones V2X y el desarrollo del vehículo conectado implica la necesidad de compartir información entre fuentes heterogéneas, lo que conlleva también una necesidad de integración de la misma.

Actualmente, existen algunos modelos de conocimiento que permiten intercambiar información de tráfico o modelar la red viaria. Sin embargo, ha sido necesario crear modelos específicos para el desarrollo del sistema siguiendo los propuestos por [86]:

- Provisión de información sobre la capacidad del aparcamiento y el número de plazas libres.

- Reserva anticipada de plazas de aparcamiento.

A continuación, se describen los modelos de conocimiento utilizados y/o desarrolladas como soporte del modelo de conocimiento del sistema autónomo.

5.2.1. Dominio de la topología de la red de carreteras interurbana

Dentro de este subdominio podemos identificar distintos conceptos topológicos que nos permiten modelar las redes viarias. Este subdominio se basa en el descrito en [87] e incluye la descripción de los siguientes conceptos: carretera, itinerario, segmentos, intersecciones y su clasificación (entradas, salidas, uniones..) a la que se le ha añadido el concepto del área de descanso ya que está localizada en un segmento de la carretera.

La Figura 5.1 muestra los conceptos del subdominio. Se observa que con este subdominio de conocimiento se puede modelar características de la red viaria que se representa en la Figura 4.1.

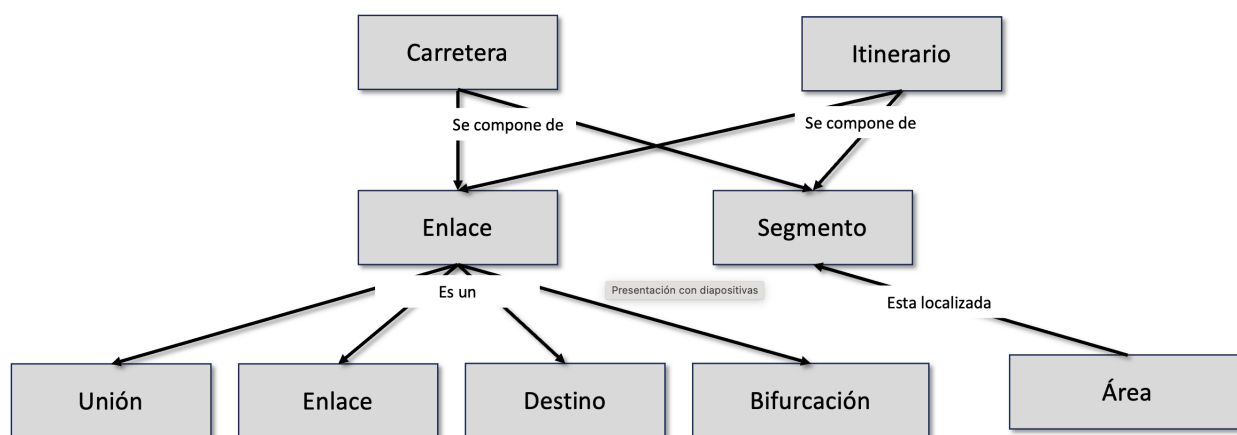


Figura 5.1: Modelo de conocimiento de la red viaria interurbana [87].

5.2.2. Dominio del comportamiento del tráfico

En este segundo subdominio se definen los parámetros del comportamiento del tráfico que transita por la vía y nos permiten definir cual es el estado de la misma. Estos parámetros son:

- Intensidad del tráfico. Número de vehículos que transitan por un segmento en concreto durante un periodo de tiempo. Normalmente, la unidad de medida es veh/hora o la Intensidad Media diaria (IMD) que indica el número total de vehículos que han pasado en un día. Además, se distingue entre vehículos ligeros y vehículos pesados.
- Velocidad. Velocidad, en km/h, de los vehículos que circulan en la vía. Podemos distinguir entre velocidad instantánea (la que lleva en un momento dado), y velocidad media (velocidad promedia que ha llevado durante un trayecto).
- Tiempo de viaje. Duración esperada, en minutos, para alcanzar un punto desde el lugar donde se encuentra el vehículo.

- Nivel de circulación. Referido a la calidad y eficiencia con la que se proporciona el transporte a los usuarios de una vía. Se evalúa teniendo en cuenta diversos factores, como la velocidad del tráfico, la capacidad de la carretera, la comodidad de los usuarios y la seguridad. En España la DGT (Dirección General de Tráfico) ha definido 5 niveles de servicio para las vías interurbanas que publica en su página web *etraffic* [88].

Estos niveles, van desde el nivel *Blanco*, donde hay un tráfico fluido y sin congestión a nivel negro donde existe una congestión intensa que obliga a realizar paradas constantes o a llevar una velocidad extremadamente bajas. Los niveles intermedios a éstos, de menor a mayor nivel de congestión, son: verde, amarillo y rojo.

5.2.3. Dominio de los sistemas de información de tráfico

Actualmente, el intercambio de información de tráfico debe entenderse no como un intercambio propio del sistema, si no también con la difusión de información a agentes externos al mismo. El estándar europeo existente para el intercambio de información de tráfico, DATEX II [89]. Este estándar es el que se ha utilizado para el intercambio de la información de tráfico en el sistema.

En concreto se ha utilizado una versión reducida de la parte 6, *Parking Publication* que describe los distintos tipos de aparcamiento así como su ocupación dinámica. La Figura 5.2 muestra el modelo de datos de la versión reducida del modelo Datex II de aparcamiento.

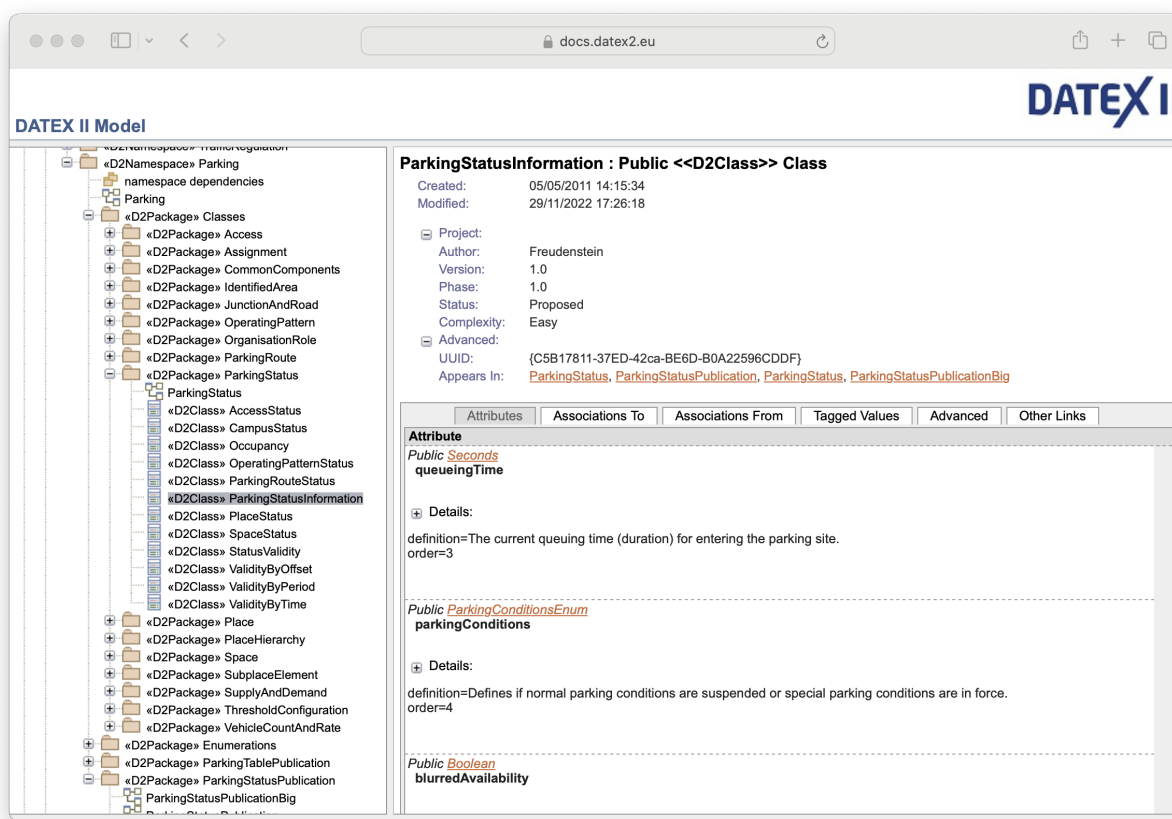


Figura 5.2: Modelo *DATEX II*. Publicaciones sobre aparcamiento [89].

5.2.4. Dominio de la gestión del tráfico de vehículos pesados

En cuanto a la gestión del tráfico específico de vehículos pesados se pueden distinguir varios apartados:

■ **Relacionados con los vehículos pesados:**

- Tipo de vehículo. Identifica el tipo de vehículo pesado y sus características. Por ejemplo, *vehículo articulado de x m. de longitud*.
- Tipo de mercancía. Identifica la categoría de la mercancía. En función de la mercancía de los vehículos, existen ciertas plazas de aparcamiento que no pueden ser utilizadas por aquellos vehículos que las transportan.
- Tiempo de conducción ininterrumpida. Describe el tiempo de conducción máximo de un conductor de forma ininterrumpida. Tras un período de conducción de cuatro horas y media, el conductor hará una pausa ininterrumpida de al menos 45 minutos, a menos que tome un período de descanso. Podrá sustituirse dicha pausa por una pausa de al menos 15 minutos seguida de una pausa de al menos 30 minutos, ambas intercaladas en el período de conducción de 4 horas y media.
- Tiempo de conducción diaria. El tiempo máximo de conducción diario de un conductor. No puede exceder de 9 horas, salvo dos veces a la semana que puede llegar a las 10 horas.
- Tiempo de conducción semanal. El tiempo máximo que un conductor puede acumular a la semana. La conducción semanal no superará las 56 horas (se entiende por semana el período de tiempo comprendido entre las 00.00 del lunes y las 24.00 del domingo).
- Tiempo de conducción bisemanal. El tiempo máximo de conducción en dos semanas consecutivas. Este tiempo no puede exceder de 90 horas.

■ **Relacionados con los áreas de aparcamiento:** Se distinguen tres tipos de plazas para el aparcamiento en un área:

- Larga duración. Aquellas plazas que van a estar ocupadas por el mismo camión más de 24 horas. Esta situación puede deberse a diferentes motivos como por ejemplo el estacionamiento cercano a puertos de embarque para la carga y descarga de buques.
- Regular. Plazas donde se estacionará un mínimo de 8 horas. Estas plazas suelen ser utilizadas para pasar la noche en el área.
- Tránsito. Plazas donde se realiza el descanso necesario y/o obligatorio según la regulación. Normalmente tienen una duración inferior a las 5 h.

Además, las plazas pueden tener restricciones de aparcamiento para ciertos vehículos pesados o para la mercancía que transporta.

- Restricción espacio. Restricción que limita el volumen del vehículo pesado que puede aparcar en una determinada plaza. Esta restricción también puede utilizarse para limitar la capacidad de maniobra de los vehículos debido a un acceso complicado.
- Restricción mercancía. Restricción que limita el aparcamiento de un vehículo en función de la mercancía que esté cargando. Por ejemplo, un camión con mercancía inflamable no puede aparcar en ciertas plazas.

- **Relacionados con las restricciones de tráfico:** En ciertas situaciones, como accidentes, operaciones especiales... las autoridades competentes en materia de tráfico y seguridad vial pueden activar medidas especiales de regulación que restringen temporalmente la circulación de determinados vehículos en fechas y recorridos.
 - Restricciones de tráfico. Una restricción de tráfico se aplica a un conjunto de vehículos con determinadas características, que no pueden circular por un conjunto de segmentos de una o varias carreteras durante un periodo de tiempo normalmente determinado. En situaciones especiales, como por ejemplo problemas de vialidad invernal, es posible que no se conozca de antemano la duración de la restricción.

Relaciones entre los diferentes dominios

Aunque los dominios de conocimiento especifican diferentes partes del sistema, existen múltiples relaciones entre ellos. A continuación, la Figura 5.3 presenta un ejemplo de relación entre los distintos dominios de los modelos de conocimiento propuesto. En un instante dado, camión C_i está localizado en un segmento, que forma parte de una red de carreteras, que no tiene restricciones de tráfico. Además, en el itinerario del camión y antes de que su $t_{conduccion}$ finalice se encuentra un área de servicio que tiene plazas libres, por lo que el camión puede solicitar al agente área correspondiente una pre-reserva de plaza.

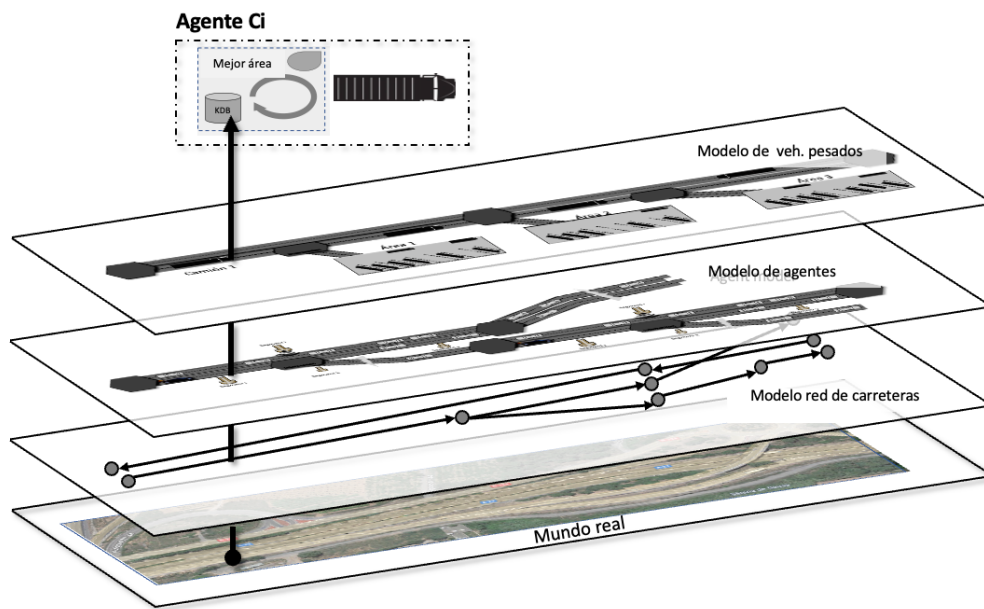


Figura 5.3: Ejemplo de relación entre los diferentes modelo de conocimiento para un agente camión.

5.3. Diseño del sistema

El diseño de un sistema multiagente debe identificar un conjunto de modelos que definen el sistema, sus elementos y la manera de comunicarse entre ellos y debe incluir los siguientes conceptos:

- Identificar el modelo de organización de los agentes.

- Describir cada uno de los agentes del sistema y el proceso de desarrollo y ejecución de los mismos tanto individual como colectiva.
- Identificar y describir los procesos de comunicación e interacción.

5.3.1. Modelo de organización

El objetivo es crear un sistema distribuido y autónomo que haga posible la simulación de la solicitud y gestión de solicitudes de aparcamientos de camiones en las áreas de servicio. El sistema está compuesto por la red de carreteras que se modela en el que conviven varios tiempo de agentes: Área, Camión, SIT (Servicio de Información de Tráfico), Interfaz, DF y AMS. En el sistema habrá una agente área por cada área del sistema, un agente camión por cada camión que transite en la red, varios agentes SIT para mostrar la información del estado de aparcamiento en los paneles, un agente interfaz para gestión y monitorización del sistema, y los agentes DF y AMS específicos de la plataforma JADE.

La Figura 5.4 presenta una aproximación a la arquitectura del sistema con los principales agentes que lo componen.

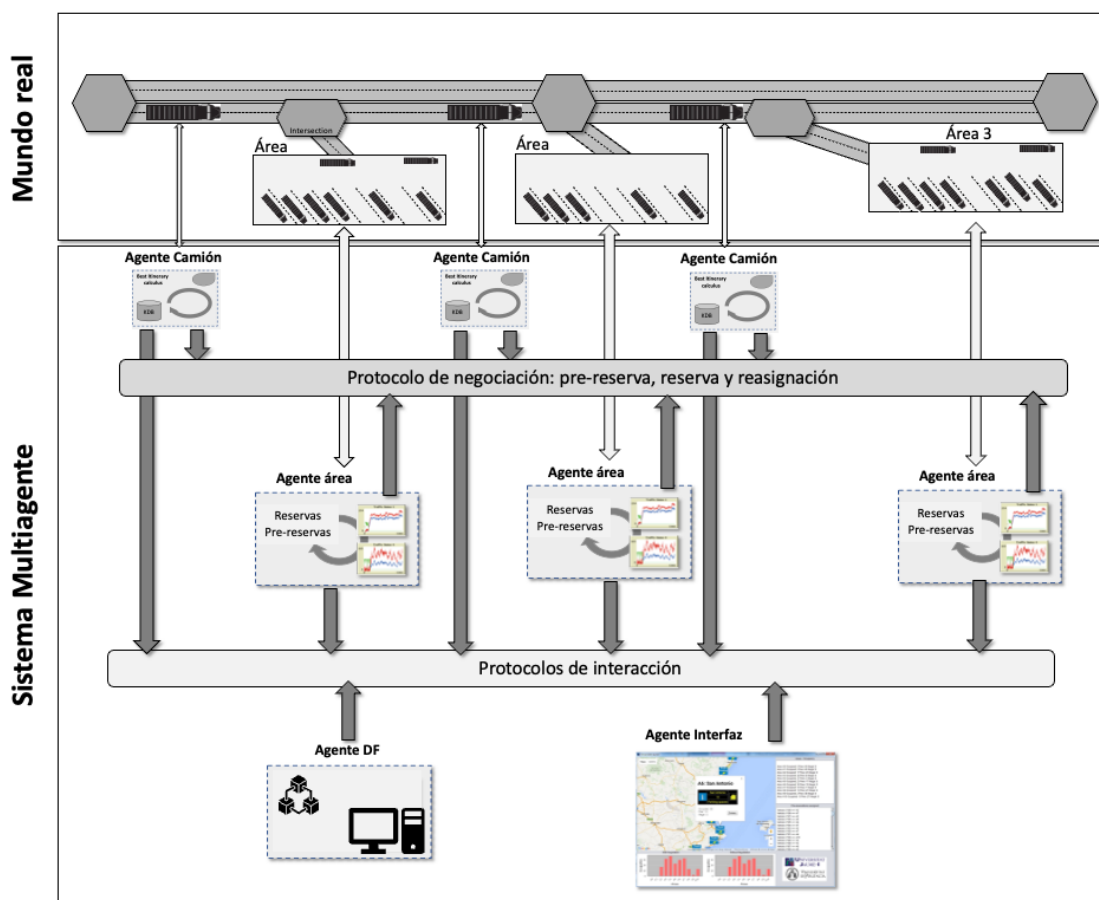


Figura 5.4: Arquitectura del sistema. La figura muestra los principales agentes del sistema.

5.3.2. Modelo de agentes

En este modelo se describen los agentes del sistema y sus características particulares. En el modelo se estudia las responsabilidades de cada uno de los agentes, identificando sus objetivos y definiendo las tareas y las acciones que deben ejecutar para alcanzarlos. Estas tareas y acciones definen el comportamiento del agente.

Los principales agentes son:

- Agentes área. Cada área de descanso es modelada por un agente de área. Representan zonas en las que se permite aparcar a los camiones. Cada área tendrá un punto kilométrico que indica la posición exacta en la que se encuentra.

El área tiene un número limitado de plazas de aparcamiento que pueden estar libres, reservadas o ocupadas. Este tipo de información es privada para cada área. Un área de descanso no tiene información sobre la disponibilidad de plazas de aparcamiento en otras áreas de descanso. Cada área de descanso es responsable de gestionar el proceso de negociación de sus plazas de aparcamiento con sus camiones implicados.

- Agentes camión. Cada camión es modelado por un agente de camión. Representan a los camiones que circulan por la red de carreteras y que esperan aparcar en un área de descanso.

Los camiones tienen las siguientes propiedades principales: localización en la red de carreteras, el tiempo que el camión ha estado circulando por la carretera sin hacer una parada ($T_{conduccion}$), y el tiempo máximo de conducción continua establecido por la ley (T_{maximo}).

También disponen de una lista de las áreas de descanso de la red viaria. Los conductores de camiones ordenan sus áreas de descanso preferidas para maximizar el tiempo de conducción y llegar al área más lejana para descansar.

La información de los camiones no se intercambiará entre los conductores, sino que se actualizará y comunicará a las áreas implicadas en cada proceso de negociación.

- Agentes SIT. Los agentes SIT se encargan de difundir la información del sistema. Reciben información de las áreas de servicio y gestionan un conjunto de paneles de mensajes variables donde difunden la información sobre las disponibilidad de plazas de aparcamiento de las áreas de descanso. Este agente es una extensión del agente VMS descrito en [90].
- Agente Interfaz. El objetivo de este agente es mostrar cómo evoluciona el estado del sistema dinámicamente. Este agente se basa en una aplicación web y muestra la red de carreteras y el estado de reservas via Google Maps. El mapa tiene los controles normales de un mapa de Google. El interfaz incluye un menú específico que muestra todas las áreas y camiones de la carretera, incluyendo su información pública.

Además de estos agentes, en el sistema están los agentes específicos de la plataforma JADE denominados DF y AMS:

- Agente DF. El agente DF (Directory Facilitator) proporciona el directorio de agentes y servicios de la plataforma. Este agente ofrece un servicio de páginas amarillas mediante la posibilidad de que los agentes de la plataforma puedan registrarse, borrarse del registro y/o buscar servicios disponibles tanto en su misma plataforma como en otras.

- Agente AMS. El agente AMS (Agent Management System) es el encargado de controlar la plataforma. Es el responsable de crear y destruir a los agentes, destruir contenedores y parar la plataforma.

5.3.3. Modelo de interacciones

A continuación se definen las principales interacciones que definen los mecanismos de coordinación entre los agentes. El modelo de interacciones determina la forma en que los agentes se relacionan entre sí en la plataforma para intercambiar información o registrar otros servicios de agentes. El modelo de comunicación propuesto sigue los protocolos de interacción definidos por FIPA [91]. A continuación, se describen las principales interacciones del sistema. Los protocolos básicos como el registro a DF y similares no están definidos.

- Solicitar Plaza (protocolo de petición). El agente camión envía a un área un mensaje para obtener una reserva. Si el área tiene plazas disponibles el área responde con una pre-reserva. En caso contrario, se inicia un protocolo de negociación entre el área y los camiones con pre-reserva en la misma.
- Solicitar Lista de Preferencias (protocolo de consulta). El agente área pide a los agentes camión involucrados en la negociación sus preferencias. Para ello envía en la solicitud el conjunto de soluciones posibles.
- Confirmar pre-reservas (protocolo de información). Confirmación enviada a los agentes camión involucrados en la solución ganadora.
- Cancelar pre-reserva (protocolo de información). El agente área informa al agente camión sobre la cancelación de una pre-reserva en el área.
- Finalizar aparcamiento (protocolo de información). El agente camión informa de la finalización de su periodo de descanso. El agente área contabilizar la plaza como liberada. En caso de que el área estuviera completa y tuviera camiones en su lista de camiones a los que no les pudo asignar pre-reserva les enviará un mensaje de nueva plaza libre para que la vuelvan a solicitar si aún están interesados.
- Cancelar pre-reserva (protocolo de información). Análoga a la finalización de aparcamiento. Ya que se libera una pre-reserva y el área debe informar a los camiones que no consiguieron la pre-reserva de esta nueva plaza disponible.
- Informar sobre nueva plaza libre (protocolo de información). Esta interacción se produce como respuesta a las 2 anteriores por el agente área: finalización de aparcamiento de un camión y cancelación de una pre-reserva.
- Registrar estado de aparcamiento (protocolo de petición). El agente SIT envía un mensaje para ser registrado en el área, y recibir el estado ocupación de las plazas cada vez que este cambie.
- Informar sobre estado de áreas (protocolo de información). El agente área envía un mensaje a los agentes SIT que tiene registrados cada vez que se produce una actualización en el estado de sus plazas. Cada vez se produce una reserva o se libera una plaza.

La Figura 5.5 muestra un ejemplo en el que inicialmente el agente camión C_i está aparcado en el área A_1 , y también se parte de que los agentes C_j y C_k anteriormente solicitaron plaza en el área A_1 y se les denegó. De este modo, cuando el agente C_i comunica la finalización de su descanso y liberación de la plaza el agente A_1 informa a los agentes que tiene en su lista de la nueva situación. De este modo, los agentes C_j y C_k si continúan interesados contestarán con una nueva solicitud y comenzará la etapa de asignación y reasignación. Este proceso puede provocar de nuevo negociaciones encadenadas.

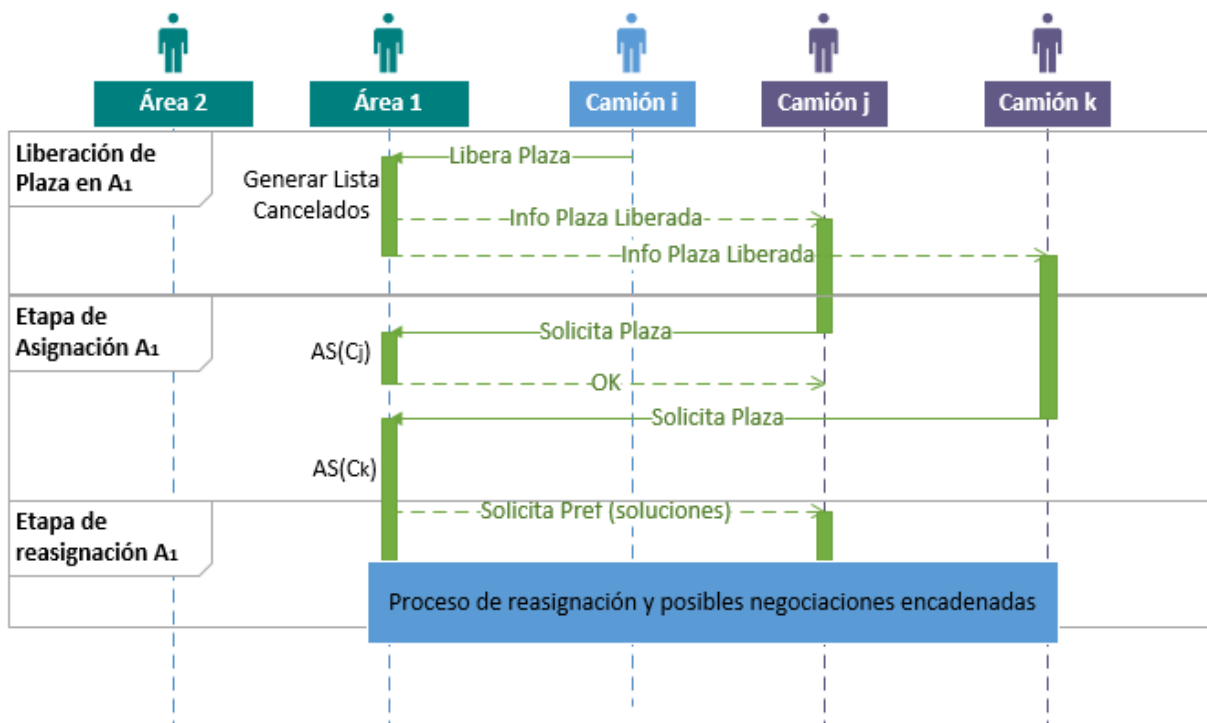


Figura 5.5: Protocolo de interacción para la liberación de una plaza de aparcamiento. El agente C_i libera su plaza, y el agente A_1 informa a los camiones de su lista de rechazados C_j y C_k de este hecho. Esta liberación produce un nuevo proceso de negociación y posiblemente de negociaciones encadenadas.

5.4. Plataforma para la ejecución y prueba del modelo de negociación

Para la realización de pruebas del protocolo es necesario definir e implementar el entorno de trabajo. El marco de trabajo analizado modela un entorno real de carreteras, en concreto la red de carreteras europea E-15 a lo largo de la Comunidad Valenciana.

Esta red se adecua a las necesidades para la evaluación del protocolo ya que la norma legal obliga a todos los vehículos pesados a realizar paradas cada 4 horas y 30 minutos de conducción continua durante su viaje por carretera. En consecuencia, se ha seleccionado un tramo de aproximadamente 400 km. de longitud del corredor mediterráneo para garantizar que los conductores de camiones tengan que parar en, al menos, una de las áreas modeladas en la red.

Los conductores de camiones pueden encontrar plazas en las once áreas de descanso a lo largo de esta carretera: desde la primera área en Benicarló en el punto kilométrico 358 hasta el área

El Realengo en el punto kilométrico 727. Suponiendo una velocidad constante de 100 km/h, las posiciones iniciales aleatorias y los tiempos de conducción, los conductores se ven obligados a aparcar en, al menos, un área intermedia de la red de carreteras modelada.

La Figura 5.6 presenta la red modelada incluyendo los segmentos y las áreas. Para cada área, además del nombre se indica el punto kilométrico y el número de plazas.

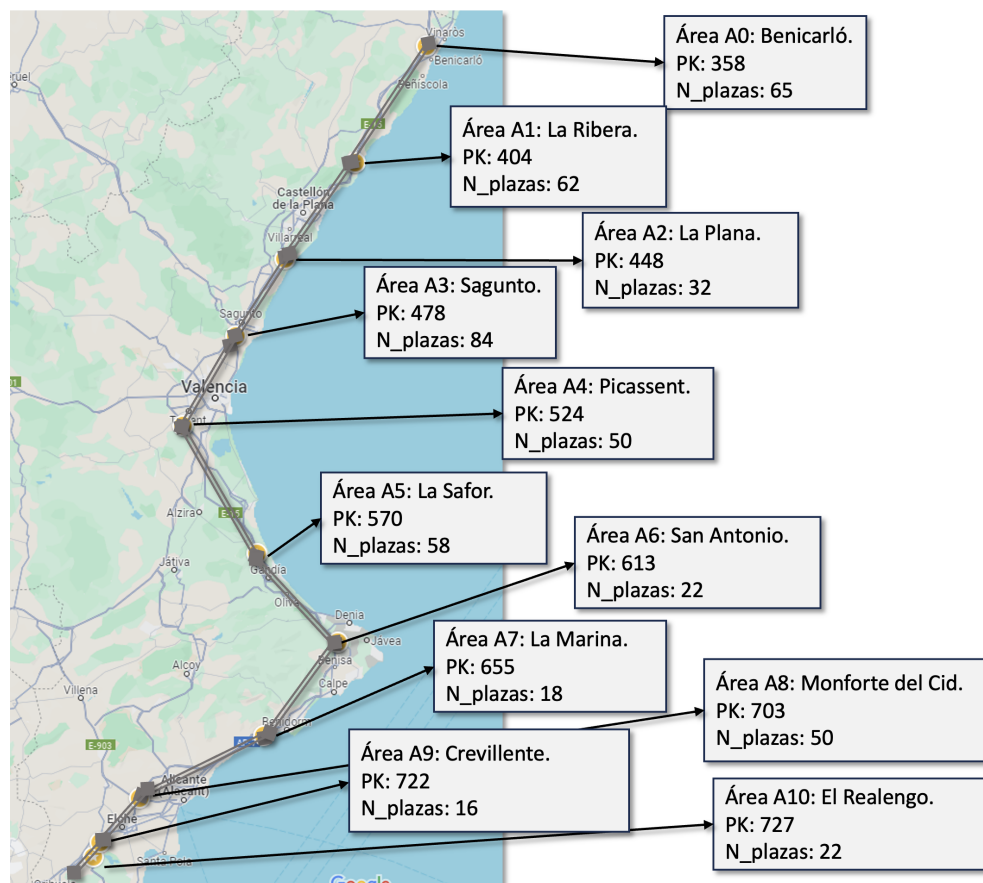


Figura 5.6: Red de carreteras modelada. Se incluyen las principales características de las áreas de descanso de la E-15 en la Comunidad Valenciana.

De acuerdo con la Intensidad de Tráfico Media Diaria Española [92] para vehículos pesados, la intensidad del tráfico varía desde las carreteras de circunvalación alrededor de las grandes ciudades hasta los segmentos interurbanos de la carretera. Las carreteras de circunvalación tienen una alta densidad debido a los conductores de camiones locales que transportan mercancías cerca de la ciudad y no realizan viajes de larga distancia.

Por consiguiente, sólo se ha utilizado la intensidad en los segmentos interurbanos para realizar las simulaciones. En la E-15, la intensidad media diaria de tráfico de camiones es superior a 1.000 camiones pesados. En cuanto a la distribución del flujo de tráfico durante el día, se ha utilizado una carga de 400 camiones para las simulaciones. Las simulaciones realizadas suponen que al principio todas las áreas de descanso tienen todas sus plazas de aparcamiento disponibles. Cada camión tiene tres áreas preferidas. Para simular las preferencias de los conductores, cada simulación parte de la base de que los conductores prefieren aparcar lo más lejos posible, por lo que el banco de pruebas determinará como zonas preferentes aquellas que estén más cerca, sin sobrepasar, el tiempo máximo

de conducción de cada conductor.

5.4.1. Implementación

Se ha implementado una plataforma software multi-agente para simular el comportamiento del protocolo de negociación en el entorno real presentado. El sistema multiagente ha sido implementado en un marco de desarrollo de agentes en Java. En concreto, se ha utilizado en JADE ya que proporciona un conjunto de herramientas, bibliotecas y protocolos para facilitar la creación de aplicaciones basadas en agentes. El entorno gráfico de la plataforma muestra un mapa de Google con el que se interactúa, para lo que se han utilizados objetos de la librería para Java de jxbrowser 5.4.3¹[93].

Además, se ha desarrollado e implementado una aplicación móvil que implementa un agente camión. Este camión permite simular la interacciones que realiza un camión al entrar en el sistema, y comprobar el comportamiento autónomo del sistema. Se ha programado en Android Studio y se ha utilizado *JadeAndroid* [94]. JadeAndroid es una versión específica de JADE para entornos de programación Android. Esta versión es necesaria debido a que aunque las aplicaciones que se ejecutan en entornos móviles Android usen Java, la arquitectura y su modelo de aplicación es diferente por lo que necesitan esta versión ad-hoc de JADE.

JADE implementa el lenguaje de comunicación estándar FIPA-ACL [53] y además, implementa por defecto, algunos agentes ligados a la plataforma, que implementan los servicios definidos por FIPA:

- Sistema de administración de agentes (AMS). Existe un agente AMS para cada instancia de la plataforma Jade en ejecución. Es el responsable de supervisar el acceso y uso de la plataforma.
- Facilitador de directorios (DF). Es el agente encargado de suministrar el servicio de páginas amarillas y puede conectarse a otros agentes facilitadores para crear una estructura federada de sistemas multiagente.
- El agente *sniffer*. Este agente puede interceptar los mensajes entre distintos agentes y mostrarlos gráficamente para facilitar la depuración del sistema.
- Introspector. Este agente permite controlar el ciclo de vida de los agentes y analizar los mensajes que un agente intercambia, tanto los que envía como los que recibe.

5.4.2. Creación de escenarios

La plataforma permite simular distintos escenarios en la red de carreteras. Un escenario es una representación detallada de situaciones o entornos específicos con los que se realiza un simulación, y puede reproducirse con parámetros distintos para comprobar el comportamiento del sistema cuando cambian las variables de simulación.

De este modo, se define un fichero de configuración desde el que se pueda cargar y lanzar un conjunto de áreas y camiones según el escenario de simulación deseado. La Figura 5.7 muestra la ventana del interfaz gráfico que permite la creación de los escenarios.

¹Este software ha sido utilizado con licencia de educación cedida sin coste por la empresa TeamDev para el desarrollo de la investigación

The screenshot shows a software configuration window with the following sections and controls:

- Configuration:** A text field containing 'config.cfg' and a 'File' button.
- General:** 'Number of Trucks' (spin box, 200) and 'Number of Areas' (spin box, 11).
- Trucks:** 'Initial Position (km.)' (spin box, 350), 'Final Position (km.)' (spin box, 350), 'Max. Num Pref' (spin box, 3), 'Speed (km/h)' (spin box, 100), 'Max. Driving Time (min)' (spin box, 240), 'Initial Driving Time (min)' (spin box, 0), and 'Final Driving Time (min)' (spin box, 180).
- Areas:** 'Initial Position (km)' (spin box, 350), 'Final Position (km)' (spin box, 750), and 'Parking spaces' (spin box, 40).
- Execution:** 'Preference calculation' (spin box, 1) with a legend '1.Parameter 2.Percentage 3.VCG'. Below are checkboxes for 'Save Config' and 'Activate Log', and three buttons: 'Random', 'Areas from File & Random Trucks', and 'Areas & Trucks from File'.

Figura 5.7: Menú de configuración inicial de la plataforma.

La aplicación carga inicialmente un fichero de configuración, que tiene la información necesaria para la definición de la simulación que se quiera realizar. La configuración permite cargar desde el fichero las áreas y camiones que se lanzarán en la plataforma. También permite que se generen de forma aleatoria un número determinado de camiones, y si se desea guardar esta información generada aleatoriamente en un fichero de configuración nuevo para poder reproducir el escenario y lanzarlo con un método distinto de cálculo si se desea poder comparar resultados.

Los parámetros de configuración de los escenarios son los siguientes:

- Posición inicial y posiciones finales en las que se pueden ubicar los camiones a lo largo de la carretera. El sistema ubicará aleatoriamente cada camión entre estas dos posiciones.
- Número máximo de preferencias. Número de preferencias de los camioneros para aparcar.
- Velocidad (km/h). Velocidad media de los conductores a lo largo de la red de carreteras.
- Tiempo máximo de conducción. Tiempo máximo de conducción permitido por la ley.
- Tiempo de conducción inicial y final. El sistema asignará aleatoriamente un tiempo de conducción tiempo de conducción a cada camión entre el intervalo definido.

- La posición inicial y final donde se pueden ubicar las áreas a lo largo de la carretera.
- El número de plazas de aparcamiento disponibles en las distintas zonas.

Una vez configurada la simulación, la plataforma lanza el agente interfaz, los agentes área y, los agentes camión. La interfaz del agente muestra la evolución de las asignaciones de plazas de aparcamiento en las distintas áreas a los diferentes agentes de camión (ver Figura 5.8). También muestra la evolución de la ocupación sin el proceso de negociación y la ocupación con el proceso de negociación seleccionado en la configuración.

5.4.3. Funcionalidad del agente interfaz

Además de la carga y creación de escenarios, el agente interfaz ofrece un conjunto de funciones que permiten analizar y evaluar el protocolo. En la Figura 5.8 podemos ver una imagen del interfaz con los siguientes elementos:

- Mapa GoogleMaps donde se representa la red de carreteras y las áreas cargadas para la simulación. El mapa es sensible permitiendo ejecutar las siguientes funciones:
 - Mostrar la información de una de las áreas. Al hacer clic sobre un área se muestra la información de la misma, incluyendo la información panel de menaje asociada. Esta información llevará un icono informativo azul en caso de que hayan plazas y un icono con una X roja en caso de que esté completamente ocupada. Además, para monitorizar el estado de la simulación, se ofrece el número de plazas ocupadas, libres, y número de vehículos aparcados ilegalmente.
 - Cierre temporal de las áreas. Se puede simular el cierre temporal de un área y ver como los camiones que tienen plaza en ella, deben de solicitar nuevas plazas en otras áreas.
 - Apertura de un área. esta función es análoga a la anterior y permite activar un área que estaba cerrada. Al abrirse, los camiones interesados en ella solicitarán de nuevo aparcar en ella.
- Ocupación general de las áreas del sistema. En la parte superior derecha se ofrece en tiempo real la información sobre la ocupación en todas las áreas.
- Estado de las pre-reservas/reservas de los camiones. Debajo de la información de las áreas, van apareciendo según interactúen con el sistema los vehículos (agentes camión) el estado de asignación de las áreas.
- Gráficos de barras. Se muestra además en tiempo real los gráficos de barras que representan la ocupación instantánea que hay en las áreas. La que habría si no hubiera negociación (todos aparcan en su primera preferencia haya hueco o no) y la que hay utilizando el protocolo de negociación según el método de ponderación de pesos elegido en la configuración inicial.

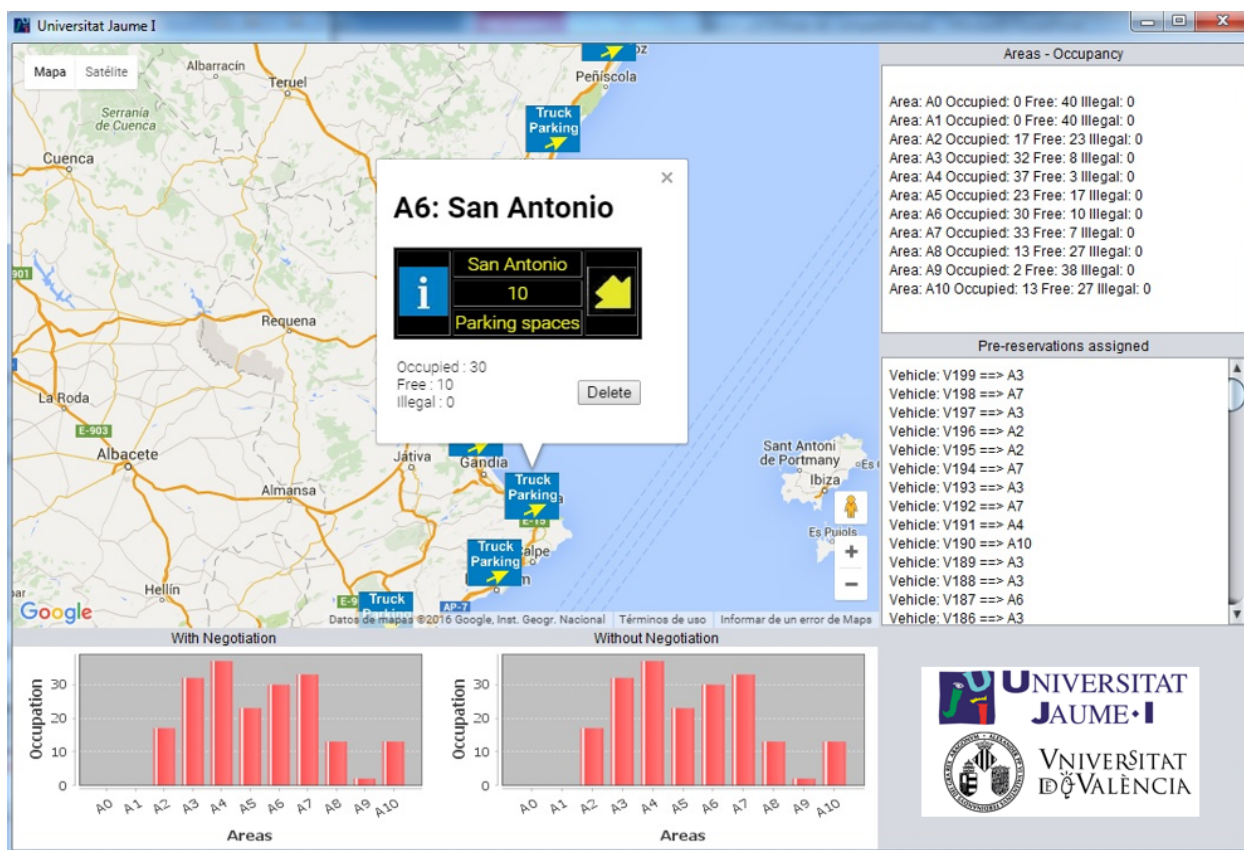
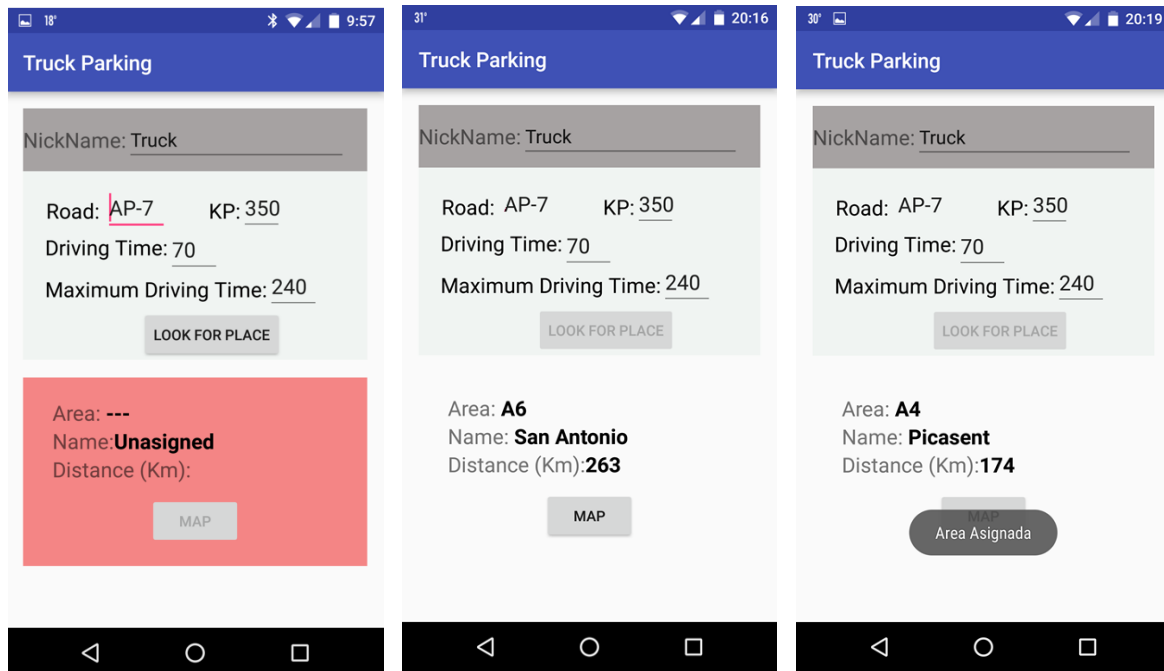


Figura 5.8: Interfaz de la plataforma para la simulación de escenarios. En ella se aprecia el detalle de ocupación área y también tiene activada la opción de ver la carga del escenario en la parte derecha y de la evolución de la negociación mediante gráficas en la parte inferior.

5.4.4. Funcionalidad del agente camión. Aplicación móvil

La funcionalidad de la aplicación permite crear nuevos agentes camión, que se incorporan al sistema. Estos agentes son nuevos y no se han creado a través del archivo de la configuración. Este camión se puede insertar en cualquier instante temporal y se puede configurar con los parámetros que se deseen: carretera, punto kilométrico, tiempos de conducción. También se puede cancelar una solicitud, una pre-reserva o una reserva.

A través de la aplicación se pueden modificar los escenarios de simulador y evaluar el comportamiento del sistema frente a nuevas solicitudes específicas de camiones, dotando al sistema de una mayor flexibilidad. La Figura 5.9 muestra tres capturas de pantallas de la aplicación móvil en diferentes situaciones, que se refieren al ejemplo de utilización descrito en el siguiente apartado.



((a)) Configuración inicial.

((b)) Pre-reserva recibida.

((c)) Nueva reasignación de área.

Figura 5.9: Múltiples imágenes de la aplicación móvil del camión. En la captura de la izquierda se muestra la configuración inicial de solicitud de plaza por agente camión, Una vez solicitada, el sistema le asigna la pre-reserva en el área A_6 . La imagen de la derecha muestra la nueva área asignada al camión tras una reasignación.

5.4.5. Ejemplo de utilización

A continuación, se muestra un ejemplo de utilización de la plataforma de simulación. En el siguiente ejemplo se parte de la configuración mostrada en la Figura 5.7 donde se lanzan 200 agentes camión en la red donde hay 11 áreas de servicio.

Los agentes camión se lanzan con la siguiente configuración:

- Posición: lanzados en el punto kilométrico 350.
- Velocidad: velocidad normalizada a 100 km/h.
- Tiempo máx de conducción: 240 minutos.
- Tiempos de conducción: aleatorio entre 0 minutos y 180 minutos.
- Número de preferencias por camión: normalizado a 3 preferencias.

En esta simulación también se han normalizado el número de plazas de aparcamiento de cada área de servicio a 40. Además, para este ejemplo se utiliza método 1 para la ponderación de preferencias.

A partir de este estado comienza el ejemplo en el que dinámica se introducen camiones y se interactúa con el interfaz para recrear posibles como por ejemplo, el cierre de un área y de todas sus plazas debido a una emergencia.

Solicitud por nuevo agente camión

A partir del estado inicial expuesto lanzamos un nuevo agente camión en la plataforma desde la aplicación móvil. La configuración de los parámetros con los que se lanzará el agente en la plataforma se han presentado en la Figura 5.9(a).

El nuevo agente camión entra en el sistema y se le asigna un área según sus preferencias. Dado que tiene aún un $T_{conduccion}$ de 170 minutos antes de exceder su tiempo máximo (240 m. de tiempo máximo menos los 70 m. que ya ha estado circulando), podrá recorrer 283 km. a una velocidad media de 100 km/h.

Así pues, su primera preferencia será el área más próxima al punto kilométrico 633 sin excederlo. El área A6 se encuentra en el punto kilométrico 613, y el área A7 en el 655. Por lo tanto, lanza una solicitud al área A6 que dado que tiene plazas disponibles le confirma la pre-reserva (ver Figura 5.9(b)).

Una vez que la aplicación Android ha recibido la confirmación del área asignada, la aplicación móvil conducirá el camión hasta dicha área a través de una ruta de Google Maps.

Esta asignación también se visualiza en la plataforma, donde aparece el nuevo agente camión, identificado como *Truck*, en la sección de pre-reservas asignadas, y se contabiliza el número de plazas libres que quedan en el área en el panel correspondiente al área de servicio: La Figura 5.10 muestra de nuevo el interfaz gráfico. En el apartado de pre-reservas, ya aparece la pre-reserva asignada al camión *Truck*.

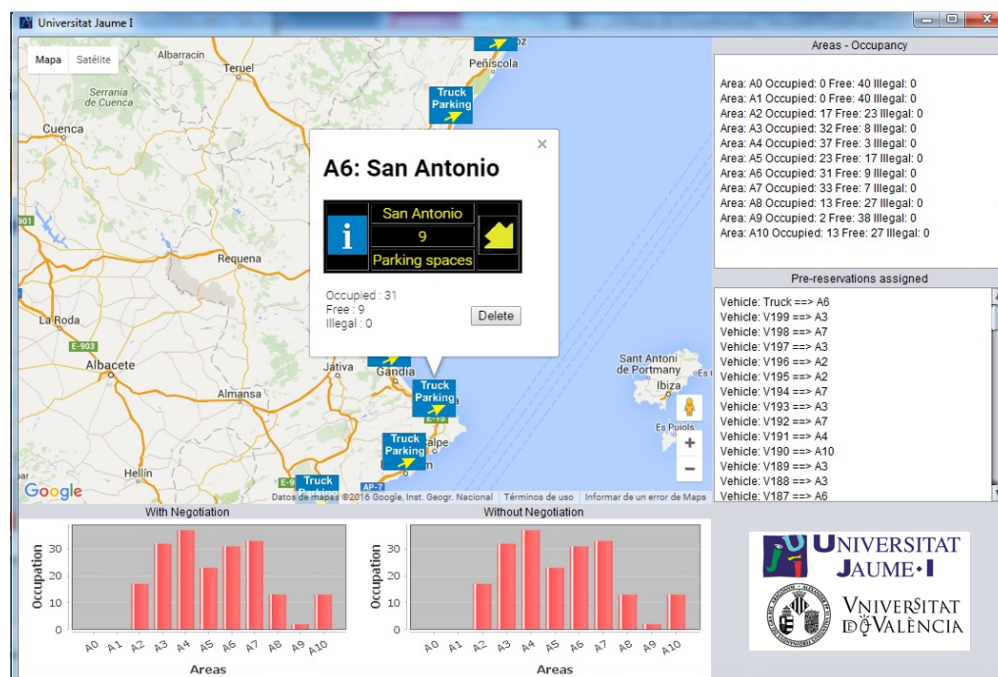


Figura 5.10: Interfaz gráfico del sistema. En esta captura se muestra el registro de la pre-reserva en la plataforma del camión *Truck*.

Cierre temporal de un área

A continuación, se muestra qué ocurre si, por cualquier razón, se produce un cierre temporal de un área. Se inicia un proceso de cancelaciones a los camiones que tienen pre-reserva o reserva en ese área y estos deben de solicitar una nueva plaza en otro área. Así pues, comienzan, si fuera necesario nuevas negociaciones con posibles re-asignaciones.

Este proceso de cierre temporal de un área puede realizarse a través del interfaz. Para iniciar esta acción pulsaremos la opción *Delete* del panel correspondiente al área, en este caso realizaremos un cierre sobre el área.

En la Figura 5.11 podemos ver en la ventana de pre-reservas asignadas, como se lanzan las cancelaciones a los agentes camión y cómo estos solicitan plaza en su siguiente preferencia, que será la siguiente área, aguas abajo. De este modo, vemos como las áreas anteriores han cubierto todas las plazas disponibles. También podemos apreciar en la figura la distribución que se realizaría.

Podemos apreciar como el agente *Truck* solicita una primera pre-reserva en el área A5 que al estar saturada lanza una negociación en la que el agente no consigue plaza. De este modo finalmente, el agente *Truck* solicita plaza en el área A4, donde finalmente se le concede. De este modo, una vez realizada la negociación la pre-reserva confirmada se muestra también en la aplicación móvil del agente camión, *Truck* (ver Figura 5.9(c)).

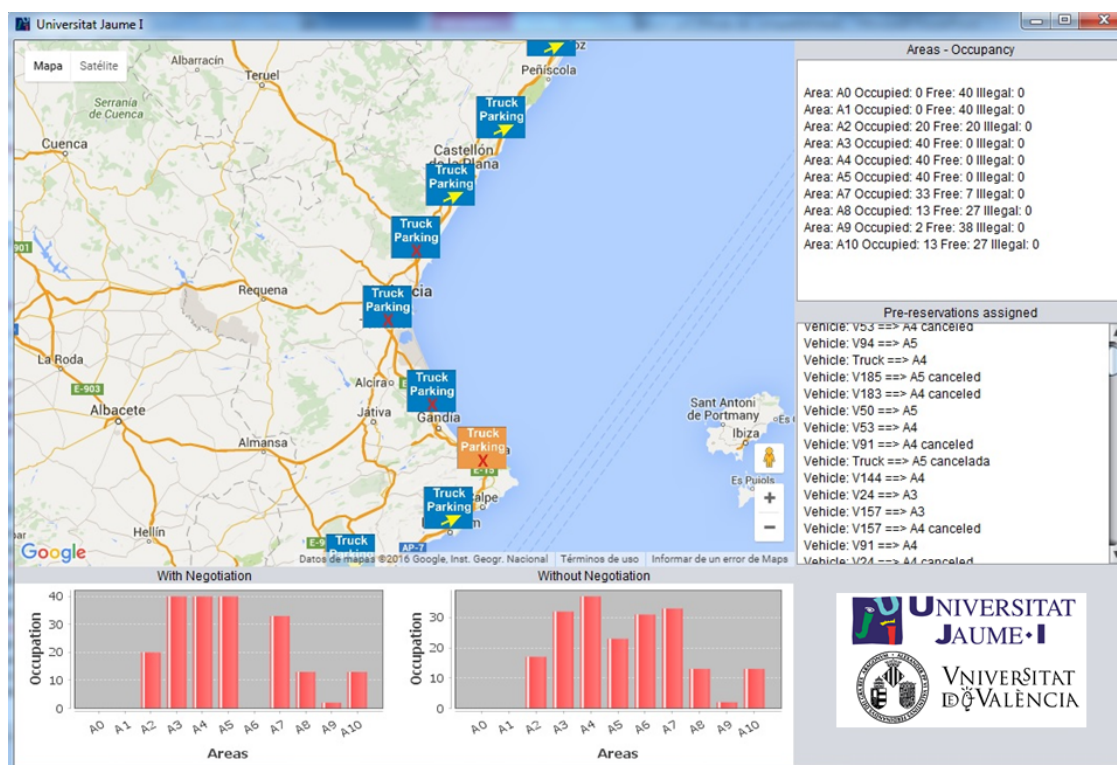


Figura 5.11: Cierre de área desde la plataforma.

Re-apertura de área

El agente área que ha sido cerrada mantiene un listado de todos los agentes camión que solicitaron una reserva y se les denegó, incluyendo aquellos que aunque inicialmente la tuvieran se les

denegó cuando se produjo el cierre temporal del área. De este modo, cuando desde la plataforma se lanza la re-apertura de un área esta lanza un mensaje a todos los agentes para que si aún están interesados en conseguir plaza en la misma vuelvan a realizar la solicitud.

Estas nuevas asignaciones producirán que en las áreas adyacentes (aguas abajo) se produzcan liberaciones/cancelaciones de plazas con lo que el proceso también se extiende en cascada en todas las áreas involucradas consiguiendo mantener siempre los objetivos del sistema:

- Que el menor número de camiones queden sin plaza en alguna de sus áreas preferidas.
- Que los camiones consigan plaza en la mejor área posible dentro de sus preferencias.

5.5. Evaluación de las propiedades de los sistemas autónomos

En este apartado se realiza una revisión de las propiedades autónomas que cumple el sistema tal como se ha demostrado con el ejemplo de simulación realizado. La Figura 5.11 representa las acciones realizadas en la simulación del sistema donde una de las áreas queda fuera de servicio con lo que deben reubicarse los camiones en las áreas adyacentes, todo ello manteniendo la mejor distribución según el objetivo principal del sistema que es reducir el aparcamiento ilegal.

A continuación se revisa y justifican estas propiedades:

- Auto-configuración. El sistema integra los cambios tanto en los agentes área y en sus plazas disponibles, como en los agentes camión. Las áreas auto-configuran el número de plazas y las reservas en función de su estado o necesidades. Si en un instante dado, se produce alguna modificación, el agente área lo comunica al agente repositorio. Los agentes camión, para descubrir las áreas y generar sus preferencias, se conectan al repositorio para conocer el estado de la plazas de las áreas. La Figura 5.12 muestra un ejemplo con 3 posibles auto-configuración de un área.

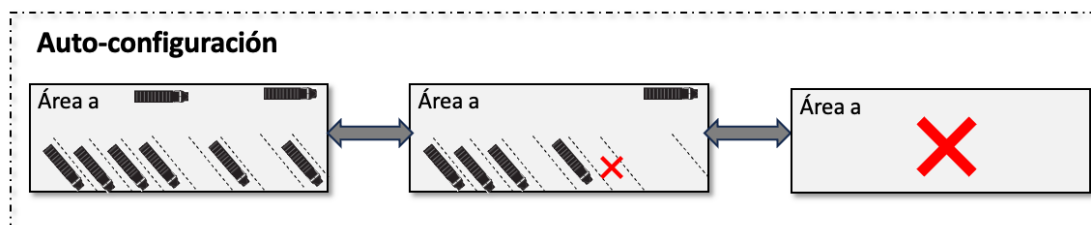


Figura 5.12: Ejemplo de auto-configuración de un área. El área puede decidir el número y/o tamaño de las plazas, o incluso un cierre de la misma.

- Auto-optimización. Los agentes camión compiten entre sí para conseguir los objetivos del sistema minimizando el aparcamiento ilegal e intentando conseguir la mejor plaza de aparcamiento disponible para sus intereses. La Figura 5.12 muestra un ejemplo de un agente camión, que al perder la negociación en su primer área preferida, elige en la siguiente negociación en cadena su siguiente área.

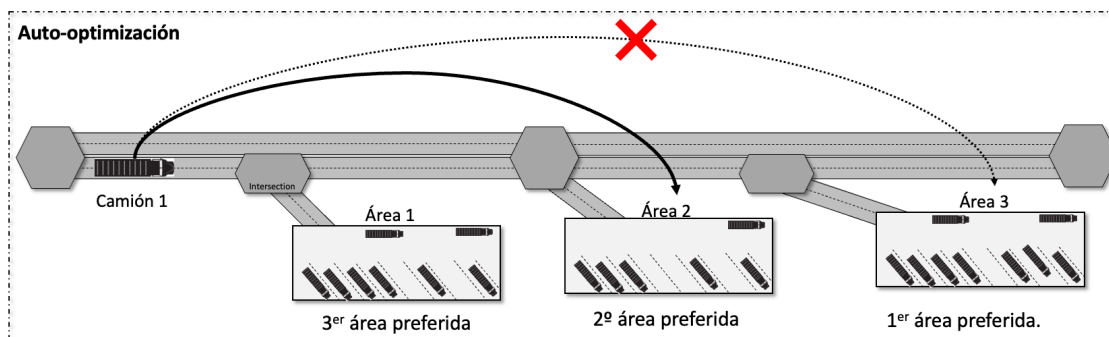


Figura 5.13: Ejemplo de auto-optimización de un camión. El camión siempre elige, de su lista de área preferida, la mejor área en función de los resultados de las negociaciones encadenadas.

- Auto-recuperación. Cuando un área se cierra (por cualquier razón), se envía una cancelación a los agentes camión implicados y estos realizan sus solicitudes en el siguiente área según sus preferencias siguiendo el protocolo de negociación encadenada, y consiguiendo que el sistema se mantenga en sus objetivos. En la Figura 5.14 se presenta un ejemplo de auto-recuperación.

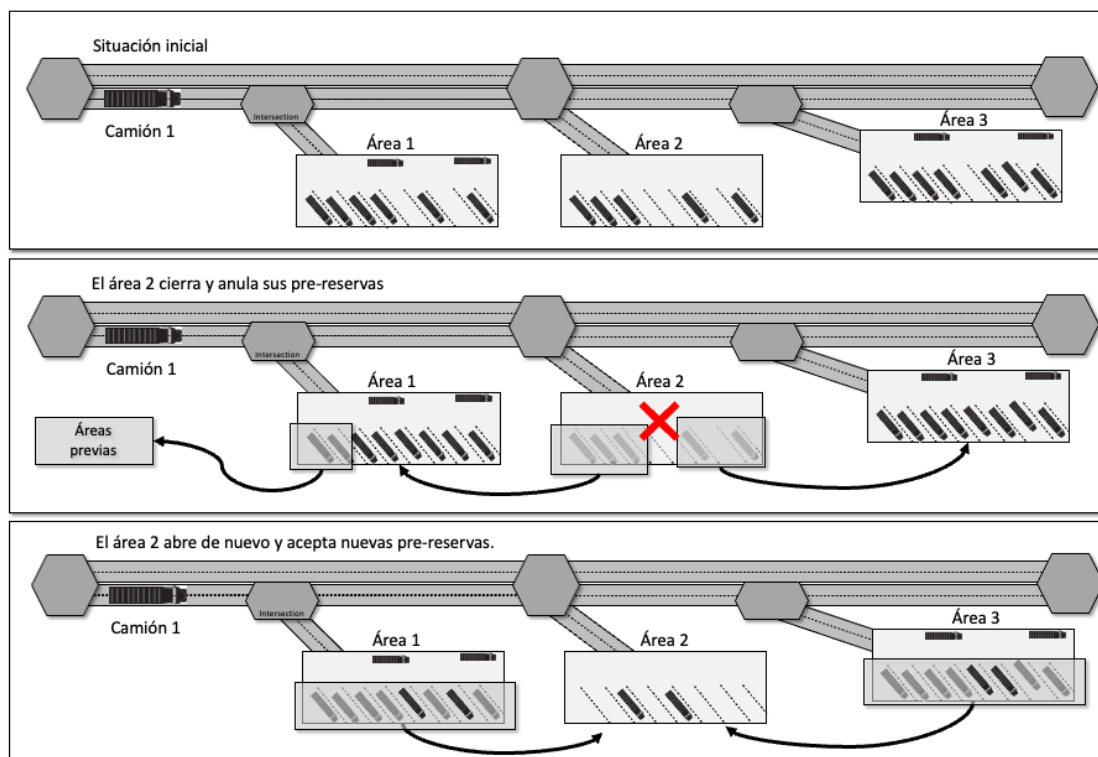


Figura 5.14: Ejemplo de auto-recuperación de un área. El Área 2 debe cerrar temporalmente y cancela su oferta de plazas. Por lo tanto, los camiones con pre-reservas deben buscar aparcamiento en otras áreas, generando nuevas negociaciones encadenadas. Una vez el área reabre y vuelve a ofrecer plazas, los camiones interesados negocian de nuevo por ellas.

5.6. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado la implementación del entorno de negociación aplicado a tráfico interurbano mediante un sistema multiagentes y una plataforma para la ejecución y prueba del modelo de negociación en un entorno real.

El desarrollo se ha estructurado en tres fases:

1. Análisis y modelado del conocimiento del sistema. La coordinación, cooperación y negociación de los agentes no puede entenderse sin definir un modelo de conocimiento común que permita a los agentes comprender el contenido de los mensajes que se intercambian. Para realizar el modelo se ha subclasificado el conocimiento del sistema en cuatro dominios:
 - a) El dominio de la topología de la red de carreteras interurbana identificando los elementos que componen este tipo de redes viarias (carretera, itinerario, segmentos, intersecciones, ...) a los que se ha añadido el concepto de área de descanso por su ubicación dentro de un segmento de la carretera.
 - b) El dominio del comportamiento del tráfico donde se definen los parámetros del comportamiento del tráfico que transita por la vía y nos permiten definir cuál es el estado de la misma.
 - c) El dominio de los sistemas de información de tráfico para el que se introduce al estándar europeo para el intercambio y difusión de sistemas de información DATEX-II del que se ha utilizado un subconjunto para la difusión de la información de aparcamientos.
 - d) El dominio de la gestión de los vehículos pesados en relación con las características específicas de este tipo de vehículos como son: tipo de vehículo, tipo de mercancía y tiempos de conducción (ininterrumpida, diaria, semanal y bisemanal); relacionados con las áreas de aparcamientos: de larga duración, regular y de tránsito; y relacionados con las restricciones de tráfico que poseen.
2. El diseño del sistema. El diseño del sistema multiagente desarrollado identifica el conjunto de modelos que definen el sistema, sus elementos y la manera de comunicarse entre ellos. Así, en este apartado se ha definiendo la arquitectura del sistema identificado en ella los agentes que intervienen. Se han descrito estos agentes, tanto los propios del protocolo (agentes área y agentes camión) como los necesarios para interactuar con el mundo real (agentes SIT), como el agente interfaz para la gestión y monitorización del sistema, y, los específicos de la plataforma JADE con la que se ha implementado el sistema: agente DF (páginas amarillas) y agente AMS (control de la plataforma multiagente). Además, se ha definido las interacciones que ocurren entre ellos para su comunicación.
3. La implementación del sistema. Se ha implementado una plataforma para la simulación de entornos reales y la evaluación del protocolo de negociación en estos entornos. Para las pruebas se ha escogido el segmento de la carretera transeuropea E-15 en su paso de norte a sur por la Comunidad Valenciana. La implementación, como ya se ha comentado, se ha implementado en un marco de desarrollo de agentes en Java, JADE. Además, para el interfaz de la plataforma se ha utilizado la librería de JAVA jxbrowser 5.4.3 para la interacción con el mapa de Google. También se ha desarrollado una aplicación para móviles Android en JadeAndroid.

De este modo la plataforma posibilita crear escenarios de ejecución que se pueden reproducir con otros parámetros, o, repetir simulaciones para calcular la media de los resultados de las simulaciones repetidas, ...

A partir de la ejecución de diferentes escenarios, se ha comprobado el correcto funcionamiento de la plataforma, prestando especial atención a la ejecución del protocolo de negociación. Además también se ha testeado la app móvil que permite simular la entrada de un camión nuevo en el sistema.

Por otra parte, la plataforma de negociación ha permitido comprobar el cumplimiento de las propiedades autonómicas del sistema.

Capítulo 6

Pruebas y Resultados

Contenidos

6.1. Introducción	99
6.2. Pruebas de validación del protocolo	100
6.2.1. Análisis de la eficiencia en función del número de plazas	101
6.2.2. Análisis de la eficiencia en función de la distribución de camiones	102
6.2.3. Determinación de la importancia de la ponderación de las preferencias.	104
6.2.4. Estimación del grado de satisfacción de la solución para los conductores.	105
6.3. Pruebas de robustez del protocolo	107
6.3.1. Análisis de escalabilidad.	107
6.3.2. Resiliencia del protocolo.	110
6.3.3. Evaluación del precio de la anarquía.	110
6.4. Conclusiones	112

6.1. Introducción

En este capítulo se muestran las principales pruebas y resultados realizadas en la investigación. Estos resultados han sido presentados en distintos congresos y revistas indexadas tal como se expone en el Anexo A. El protocolo de negociación ha sido evaluado modelando una carretera real perteneciente a la red Europea de Carreteras.

Así, las simulaciones se han realizado modelando el segmento de la carretera E-15, en el tramo que abarca la Comunidad Valenciana expuesto en el Apartado 5.4. Esto es: red de carreteras de 400 km., donde la primera área de servicio está en la población Benicarló en el punto kilométrico 358 al área de El Realengo en el punto kilométrico 727. Asumiendo una velocidad constante de los camiones de 100 km/h y las posiciones y tiempos de viaje aleatorios asignados en las simulaciones, los conductores se ven obligados a aparcar al menos una vez para cumplir con la normativa vigente.

Como base para las simulaciones realizadas se ha tenido en cuenta el estado real de tráfico en los corredores objeto de estudio. De acuerdo con la Intensidad de Tráfico Media Diaria Española [95] para vehículos pesados, la intensidad del tráfico varía desde las carreteras de circunvalación alrededor de las grandes ciudades hasta los segmentos interurbanos de la carretera. Las carreteras de circunvalación tienen una alta densidad debido a los conductores de camiones locales que transportan mercancías cerca de la ciudad y no realizan viajes de larga distancia.

Por consiguiente, se ha utilizado la intensidad en los segmentos interurbanos como base para realizar las simulaciones. En la E-15, la intensidad media diaria de tráfico de camiones es superior a 1.000 camiones pesados. En cuanto a la distribución del flujo de tráfico durante el día, se ha utilizado una carga de 400 camiones para las simulaciones en el escenario base.

Las simulaciones realizadas suponen que al principio todas las áreas de descanso tienen todas sus plazas de aparcamiento disponibles. Cada camión tiene tres áreas preferidas. Para simular las preferencias de los conductores, cada simulación parte de la base de que los conductores prefieren aparcar lo más lejos posible, por lo que el banco de pruebas determinará como zonas preferentes aquellas que estén más cerca, sin sobrepasar, el tiempo máximo de conducción de cada conductor.

Las pruebas realizadas tienen como objetivo demostrar que el protocolo propuesto mejora el aparcamiento de camiones en una red viaria cuando esta se encuentra saturada. Esta mejora se establece en dos aspectos principales:

- Reducción del aparcamiento ilegal hasta el máximo que las condiciones de la red permitan.
- Mejora de la satisfacción de los conductores, en cuanto que pueden aparcar en el mejor sitio posible dentro de sus preferencias.

Para ello se ha probado y evaluado tanto la eficiencia del protocolo en varios aspectos (número de plazas, distribuciones de camiones, peso de los votos y grado de satisfacción de los conductores) como la robustez del mismo según distintos aspectos (escalabilidad, resiliencia y *precio de la anarquía*).

6.2. Pruebas de validación del protocolo

Para la validación del protocolo de negociación propuesto se han realizado una serie de pruebas. Estas pruebas abarcan desde el análisis de la eficiencia del protocolo en lo que respecta al objetivo primario de la tesis, reducción del aparcamiento ilegal, hasta la medición de la satisfacción de los conductores en lo referente al objetivo secundario, esto es, que cada camión consiga plaza en la mejor área posible dentro de sus preferencias).

Para analizar la eficiencia del protocolo de negociación vamos inicialmente a estudiar la ubicación final de los camiones en las áreas según:

- Número de plazas de las áreas. Donde se repetirán los experimentos, primero con un número homogéneo de número de plazas en las áreas, y, a continuación con el número real de plazas que cada área, de las once que hay en el segmento a modelar, tiene.
- Distribuciones de los camiones. En esta simulación se repiten los experimentos, pero en este caso con distribuciones de camiones distintas a lo largo de la red, modificando las zonas donde la densidad de camiones es más alta.

A continuación, se evaluará en el entorno real propuesto la eficiencia de los métodos de ponderación propuestos para determinar el voto que los camiones otorgan a cada una de las soluciones que se les propone. Y finalmente, se evaluará la satisfacción de los conductores en el entorno de simulación.

6.2.1. Análisis de la eficiencia en función del número de plazas

En esta primera prueba se han desarrollado dos escenarios diferentes para demostrar la eficacia del protocolo:

- En el primer escenario base se ha analizado la capacidad de las áreas de descanso armonizadas a 40 plazas. El objeto de esta prueba es observar mejor la eficiencia del protocolo en cuanto a la asignación de aparcamiento.
- En el segundo escenario se ha modificado las características de las áreas, incluyendo las plazas reales en el banco de pruebas. Una vez actualizado se han relanzado las simulaciones con los mismos parámetros de carga. El objeto de esta prueba es observar la eficiencia del protocolo en cuanto a la asignación de aparcamiento cuando la cantidad de plazas de cada área es diferente.

Se ha realizado un conjunto de 100 simulaciones para comparar la asignación de camiones con y sin aplicar el protocolo de negociación en ambos escenarios. La Figura 6.1 muestra los resultados de ocupación en estos escenarios de 10 simulaciones seleccionadas al azar de las 100 realizadas.

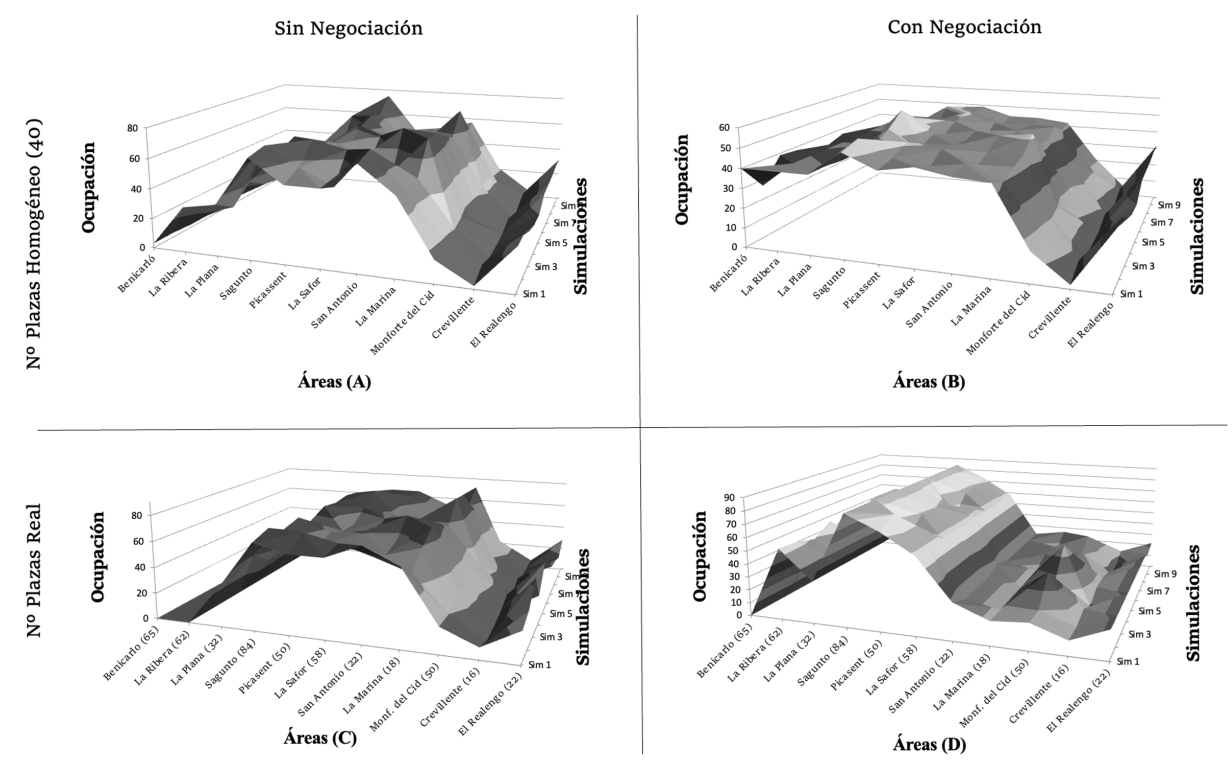


Figura 6.1: Conjunto de simulaciones seleccionadas aleatoriamente para comparar la asignación de camiones con y sin aplicar el protocolo de negociación (columnas), y, utilizando un valor homogéneo para las áreas de aparcamiento y utilizando el número de plazas reales de las áreas (filas).

En ambos escenarios se han comparado los resultados obtenidos utilizando el protocolo de negociación con los resultados obtenidos sin negociación. En este último caso se trata de camiones

que aparcen en el área de descanso deseada independientemente de la disponibilidad real de plazas de aparcamiento (que es el estado actual en una red de carreteras real).

Los resultados obtenidos de las áreas de descanso en ambos extremos no son relevantes. Este se debe a que la distribución de los camiones en la simulación y al corte del tráfico en ambos extremos en el escenario modelado. Por ejemplo, la última área, la de Benicarló, es la de mayor preferencia de los camiones, ya que es la que se encuentra el punto kilométrico más lejano posible después del segmento estudiado.

En las imágenes superiores (A y B), las simulaciones se han realizado utilizando un número armonizado de zonas de aparcamiento para apreciar mejor la asignación de camiones legales e ilegales en las zonas, y las inferiores (C y D) muestran los resultados utilizando el número real de plazas de aparcamiento de estas áreas. Las imágenes de la izquierda (A y C) muestran las simulaciones sin aplicar el protocolo de negociación, mientras que las de la derecha (B y D) muestran los resultados aplicando el protocolo de negociación.

Los resultados sin aplicar la negociación, gráficas de la izquierda (A y C), presenta picos muy marcados que muestran un elevado número de camiones estacionados ilegalmente (sobre 40 plazas el homogeneizado superior, y sobre las plazas reales el inferior). Sin embargo, las imágenes de la derecha (B y D) muestran una forma suave en la función que muestra la ocupación en las áreas de descanso cuando se aplica el protocolo de negociación. Esta suavidad en la función indica una distribución más unitaria de los camiones entre las áreas, por lo que el número de camiones que aparcen ilegalmente se reduce considerablemente.

En las imágenes inferiores (C y D), que muestran los resultados del experimento utilizando los aparcamientos reales de las áreas, se aprecia también cómo la aplicación del protocolo hace que se distribuyan más eficientemente los vehículos en las áreas según su capacidad. Así pues sin aplicar el protocolo de negociación, vemos como el mayor pico de aparcamiento está en el área de San Antonio que solo tiene 22 plazas, mientras que aplicando el protocolo vemos como la curva de la gráfica se corresponde con el número de plazas de que disponen las áreas, siendo el pico más alto del área de Sagunto que dispone de 84 plazas.

En conclusión, el protocolo mejora la asignación del aparcamiento de camiones disminuyendo el número de aparcamientos ilegales independientemente del número de plazas de aparcamiento del área de descanso.

6.2.2. Análisis de la eficiencia en función de la distribución de camiones

Esta prueba parte del escenario base y considera las condiciones de carga según tres distribuciones diferentes del punto kilométrico máximo alcanzable de los camiones:

1. Distribución (A). Donde las ubicaciones de los camiones se inician en el punto kilométrico 350, y el tiempo de conducción inicial de cada camión se ha dado aleatoriamente entre 1 y 250 minutos. Esto implica que el punto kilométrico máximo alcanzable de cada camión (sin exceder el tiempo máximo total 4 horas y media) se distribuirá homogéneamente a lo largo de la red de estudio.
2. Distribución (B). Donde el punto kilométrico máximo alcanzable se encuentra en la partes primera y última de la red simulada, y sólo el 10 % en el centro.
3. Distribución (C). Donde el punto kilométrico máximo alcanzable de la mayoría de los camiones (80 %) se encuentra cerca de la posición media de la red de estudio.

Las distribuciones se muestran en los gráficos de dispersión de la Figura 6.2. En ellas se representa cuál sería el punto kilométrico máximo que cada camión podría alcanzar según la posición inicial y tiempo de conducción que se le asignen al comienzo de la simulación:

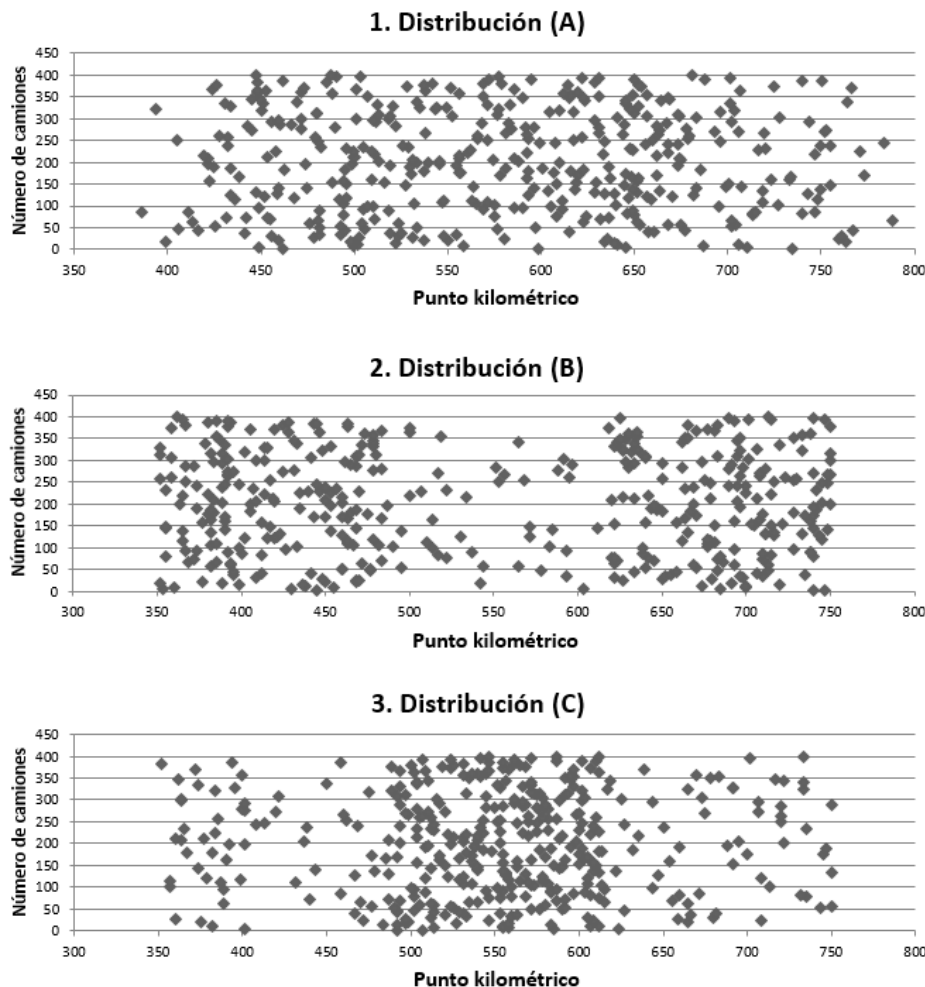


Figura 6.2: Punto kilométrico máximo alcanzable de camiones lanzados en las simulaciones.

La Figura 6.3 presenta los resultados de la prueba según las tres distribuciones y los aparcamientos reales de las áreas de descanso. Se representa la media de los resultados de las diferentes simulaciones realizadas para comparar la asignación de camiones aplicando el protocolo de negociación (Figura 6.3 (A)) y sin aplicarlo (Figura 6.3 (B)) con las tres funciones de distribución.

Se puede apreciar claramente como al aplicar la negociación el número de camiones que aparcen en cada área se ajusta mucho más al número de plazas reales representado por la función con línea continua.

En la Figura 6.3 (A) se observa como hay áreas con un gran número de aparcamiento ilegal ya que vemos como las líneas de las funciones que representan esas distribuciones quedan bastante por encima de la línea continua que representa el número de plazas reales de las áreas. Sin embargo, en otras áreas quedan muchas plazas libres representado por funciones por debajo de la línea continua.

En la Figura 6.3 (B) se aprecia como en la mayoría de las áreas las líneas que representan las

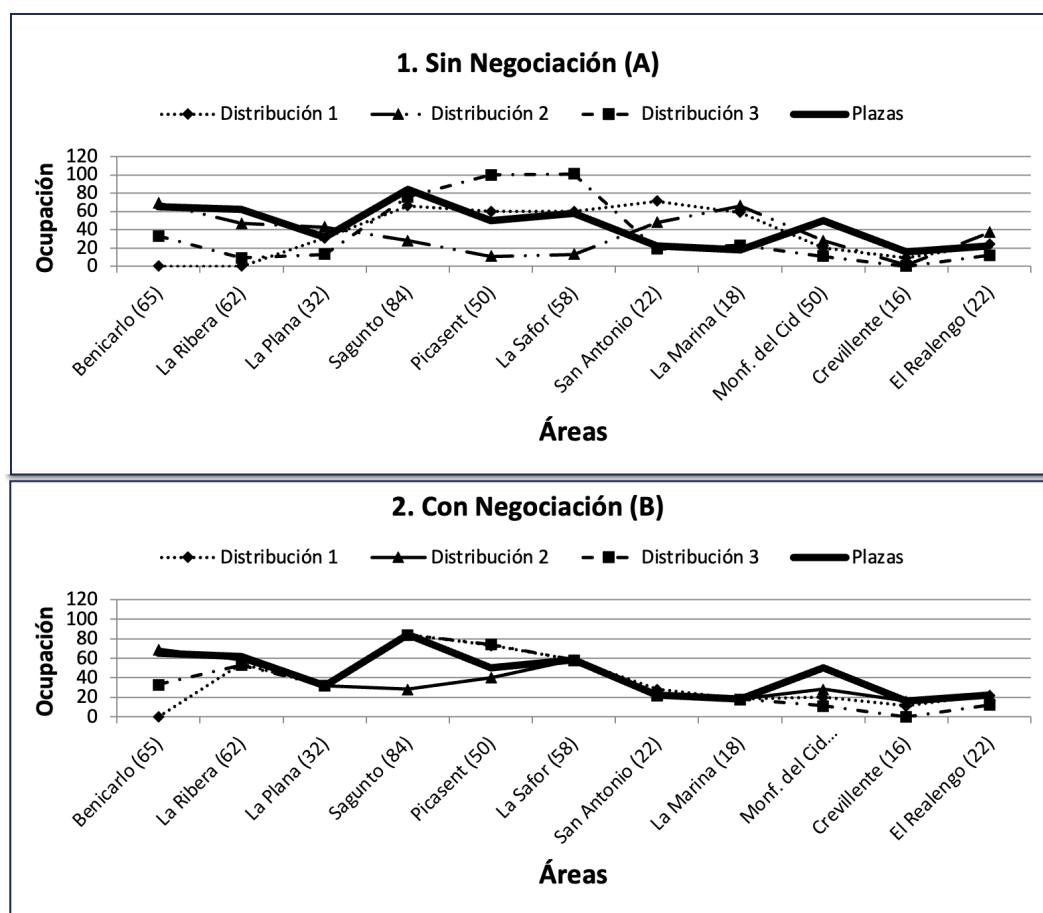


Figura 6.3: Valores medios de las simulaciones realizadas para comparar la asignación de camiones con y sin aplicar el protocolo de negociación con las tres funciones de distribución.

distintas distribuciones coinciden con la línea continua que representa las plazas reales. Lo que se traduce en que el protocolo de negociación minimiza al máximo el aparcamiento ilegal en las áreas, como resultado de una mejor alineación entre la oferta y la demanda, proporcionando una solución más eficiente.

6.2.3. Determinación de la importancia de la ponderación de las preferencias.

A continuación, se realiza la evaluación de los distintos métodos de ponderación de las preferencias presentado en el Apartado 4.5.4. En esta batería de pruebas compararemos los distintos métodos en un entorno de carga real (escenario base) para comparar los resultados. Vamos a reproducir los experimentos según los siguientes modos de ponderación:

- Sin proceso de negociación.
- Método 1. Método de normalización que usa el parámetro según valor máximo de las preferencias de todos los camiones.
- Método 2. Método de normalización con el porcentaje de acuerdo al número de preferencias de cada camión.

Los resultados de los tres escenarios se presentan en la Figura 6.4, que muestra la cantidad de camiones que aparcen ilegalmente al no haber podido obtener una plaza de aparcamiento reservada. Al igual que en las otras pruebas, se han realizado 100 simulaciones de las que se muestran los resultados de 10 de ellas recogidas de forma aleatoria.

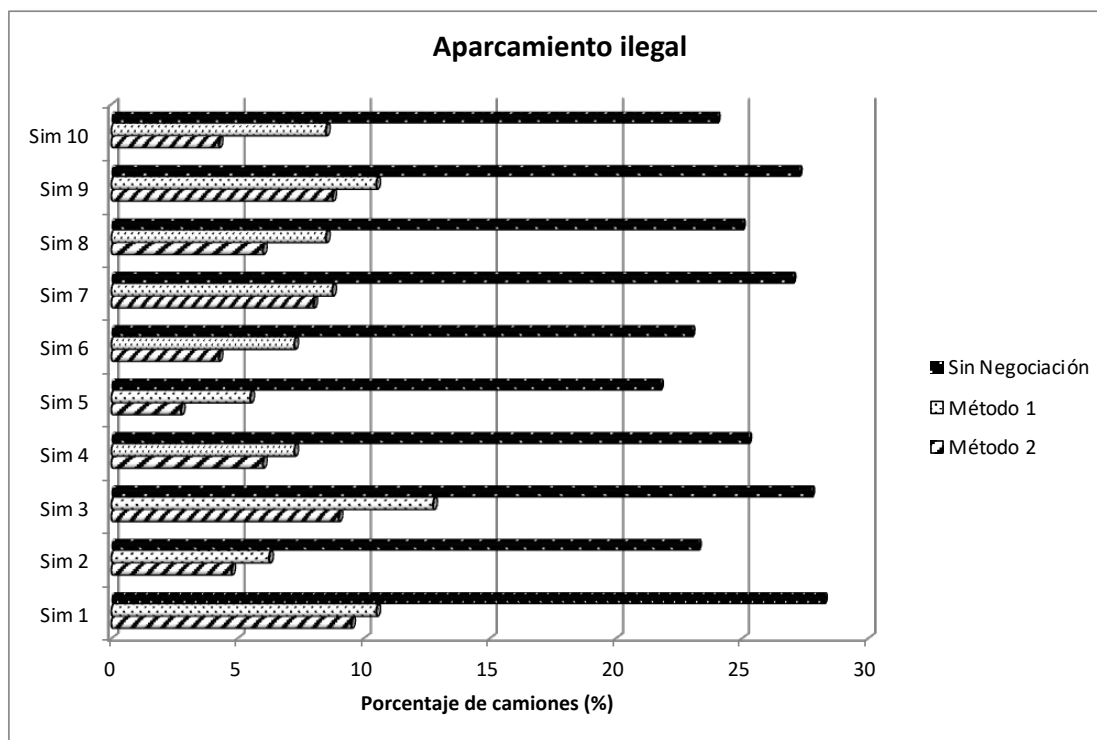


Figura 6.4: Porcentaje de camiones que aparcen ilegalmente según el método de ponderación del peso del voto utilizado (parámetro máximo y porcentaje según número de preferencias), y comparados con el porcentaje sin realizar negociación.

Sin la negociación, entre el 22 % y el 28 % de los camiones deben aparcarse en un área de descanso superando su capacidad de aparcamiento o aparcarse de manera ilegal. Sin embargo, aplicando cualquiera de los dos métodos en el proceso de negociación el porcentaje se reduce más de la mitad.

De los dos métodos aplicados, se observa que el Método 2 reduce aun más la cantidad de camiones que no consiguen una plaza de aparcamiento que el Método 1. Únicamente no reciben plaza de aparcamiento con el Método 1 entre el 6 % y el 12 % dependiendo de la simulación, y, entre el 3 % y el 9 % utilizando el Método 2. Tal como se propone en el Apartado 4.5.4 se demuestra que ofrecer más posibilidades a los camiones que les queden menos áreas en las que poder aparcarse, da más posibilidades de ganar las negociaciones y por ende de conseguir que un mayor número de camiones consigan sus objetivos.

6.2.4. Estimación del grado de satisfacción de la solución para los conductores.

La reducción del estacionamiento ilegal es el principal objetivo del sistema desarrollado, pero es importante obtener una estimación aproximada del grado de satisfacción de los conductores. Se ha demostrado en los apartados anteriores (6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3) que la utilización del protocolo consigue

claramente el objetivo principal del protocolo de negociación, la reducción del aparcamiento ilegal.

Pero el protocolo se basa en la benevolencia de los conductores, es decir, que aparquen donde el sistema les indica. Por ello, es importante evaluar el nivel de satisfacción de los conductores en relación con las plazas asignadas. Si este nivel es alto, querrá decir que los conductores confían en el protocolo y en consecuencia aparcarán siguiendo las reservas previstas.

Tal como se describe en el Apartado 3.3.3 del protocolo, los conductores alcanzan su máxima satisfacción cuando consiguen una plaza en su primera preferencia. Por el contrario, un conductor estará completamente insatisfecho cuando no consiga una plaza de aparcamiento y se vea obligado a aparcar ilegalmente o a superar su tiempo máximo de conducción exponiéndose a ser multado.

Por lo tanto, el grado de satisfacción de un conductor de camión se define como una función que determina un porcentaje positivo según la posición de su reserva final en su lista de preferencias. Además, con el objeto de realzar la importancia de aparcar en áreas preferidas y el malestar de no recibir plaza de aparcamiento, se otorga un porcentaje negativo cuando no consigue ninguna reserva final.

Así pues, se define la satisfacción como:

$$satisfaccion(j) = \begin{cases} -100, \text{ donde } j \text{ debe aparcar ilegalmente,} \\ \text{ó} \\ (n - i + 1) / n * 100 \text{ donde } 1 \leq i \leq n \text{ representa la posición final de la} \\ \text{reserva dentro de las } n \text{ preferencias del camión } j. \end{cases}$$

De este modo, en esta prueba se han realizado varias simulaciones utilizando el escenario base para calcular la media de la satisfacción en escenarios con y sin capacidad de negociación utilizando la capacidad real de las áreas.

La Figura 6.9 muestra los resultados de las simulaciones. En ella se observa que la satisfacción de los conductores aumenta al utilizar el protocolo de negociación con respecto a un marco sin capacidades de negociación. Esto se debe a que cuando se utiliza el protocolo de negociación hay menos aparcamientos ilegales, ya que los camiones se distribuyen mejor según sus preferencias. Por consiguiente, la satisfacción total aumenta. Sin embargo, cuando no se produce negociación hay un número significativo de camiones que no obtienen plaza en sus preferencias por lo que se incrementa la satisfacción negativa.

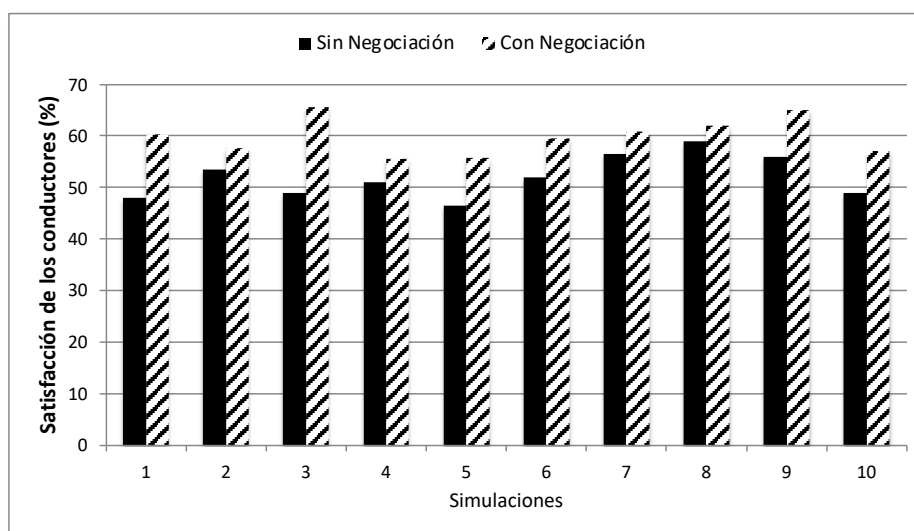


Figura 6.5: Comparación del grado de satisfacción de los conductores. Las barras blancas muestran el incremento de la satisfacción de los conductores utilizando el proceso de negociación frente a las barras negras punteadas que representan el grado de satisfacción sin negociación.

6.3. Pruebas de robustez del protocolo

Una vez se ha evaluado y ha quedado demostrada la eficiencia del protocolo es importante valorar su funcionamiento a nivel computacional. Esto implica estudiar como reacciona el sistema y el protocolo de negociación ante situaciones complejas o inesperadas para establecer su validez e idoneidad en entornos dinámicos como el propuesto. Estas situaciones pueden ser, por ejemplo, que la capacidades de plazas de aparcamiento de la red no sean suficientes para abordar la carga de camiones existentes o que aumente significativamente el número de camiones y el sistema no sea capaz de procesar y ejecutar adecuadamente el protocolo de negociación.

Así, a continuación se presentan tanto las pruebas de escalabilidad realizadas en cuanto al número de negociaciones que se producen en el entorno distribuido (con negociaciones encadenadas) como una aproximación a los tiempos de computación necesarios para resolver esta cascada de negociaciones. Además se presenta como reacciona el sistema ante comportamientos indeseados (resiliencia), y, si existe deterioro por su naturaleza distribuida con respecto a un entorno de ejecución centralizado donde existe un agente gestor que conoce la información de todos los agentes y se responsabiliza de asignar las plazas a los camiones del mejor modo posible.

6.3.1. Análisis de escalabilidad.

En las pruebas de escalabilidad, se comprueba el funcionamiento del sistema cuando se incrementa considerablemente la carga del mismo. Para analizar la escalabilidad del protocolo se han desarrollado dos escenarios. En ambos escenarios, las simulaciones se han ejecutado incrementando las condiciones de carga de 200 a 2.000 camiones:

- Escenario 1, el número de plazas de aparcamiento reales en las áreas también se ha incrementado siguiendo una relación lineal, de 20 a 200 plazas (por área), para mantener el porcentaje de plazas de aparcamiento en función del incremento de camiones.

- Escenario 2, el número de plazas de aparcamiento se ha mantenido fijo en el conjunto de simulaciones ya que son la capacidad real de las áreas y se evalúa el comportamiento del protocolo en condiciones de alta carga para estudiar los límites del protocolo.

La Figura 6.6 representa el número de negociaciones realizadas para asignar el número de camiones implicados en las diferentes simulaciones en ambos escenarios. Las zonas tienen que comunicarse en el primer paso con todos los camiones implicados en cada negociación para obtener las preferencias con el fin de producir el conjunto de soluciones, y en el segundo paso, para recibir los votos para las diferentes soluciones planteadas.

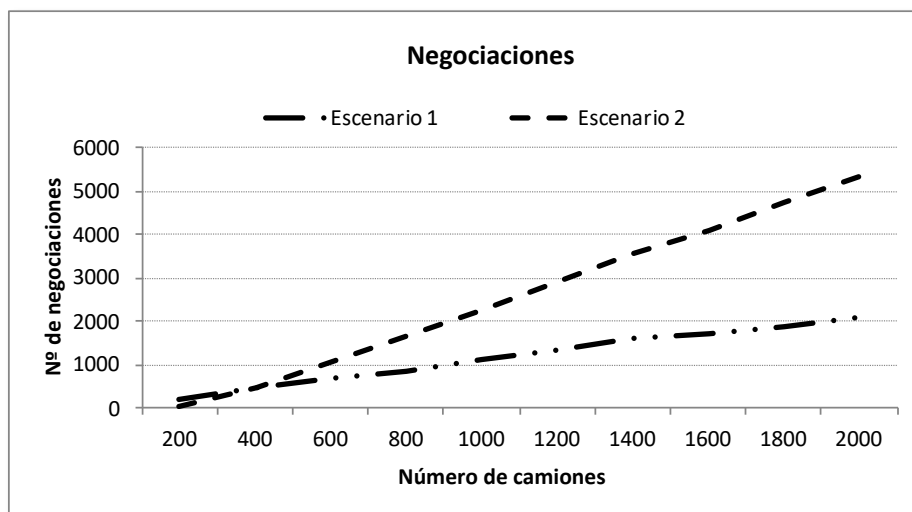


Figura 6.6: Evolución del número de negociaciones en relación con el número de camiones (en grupos de 200 camiones) en el Escenario 1 (incremento de plazas de aparcamiento de forma proporcional) y en el Escenario 2 (número fijo de plazas de aparcamiento).

El número de mensajes que un área tiene que intercambiar depende del número de negociaciones realizadas y del número de plazas de aparcamiento que el área ofrece a los camioneros en cada una de estas negociaciones.

Los resultados muestran que el número de negociaciones crece linealmente en función del aumento de camiones y plazas de aparcamiento ofrecidas. Sin embargo, debido al número constante de plazas de aparcamiento en el Escenario 2, el número de negociaciones aumenta en mayor medida que en el Escenario 1, donde el incremento de plazas de aparcamiento es proporcional al incremento de camiones.

Es importante destacar que el experimento representa una imagen puntual en la que se asigna el número total de camiones, mientras que en el mundo real las negociaciones tendrían lugar distribuidas en el tiempo según la aparición de camiones en el segmento de carretera. Por lo tanto, el comportamiento del protocolo es adecuado teniendo en cuenta que la intensidad media anual del tráfico de camiones es de más de 1.000 camiones pesados [95] y la carga máxima utilizada ha sido de 2.000.

La Figura 6.7 muestra el tiempo de ejecución necesario para asignar todos los camiones en las áreas a lo largo de la red viaria en ambos escenarios. En el Escenario 1, el tiempo de ejecución necesario para comunicarse con los camiones sigue una función cuadrática. Sin embargo, en el

Escenario 2, el tiempo de cálculo aumenta linealmente en lugar de la función cuadrática del primer escenario.

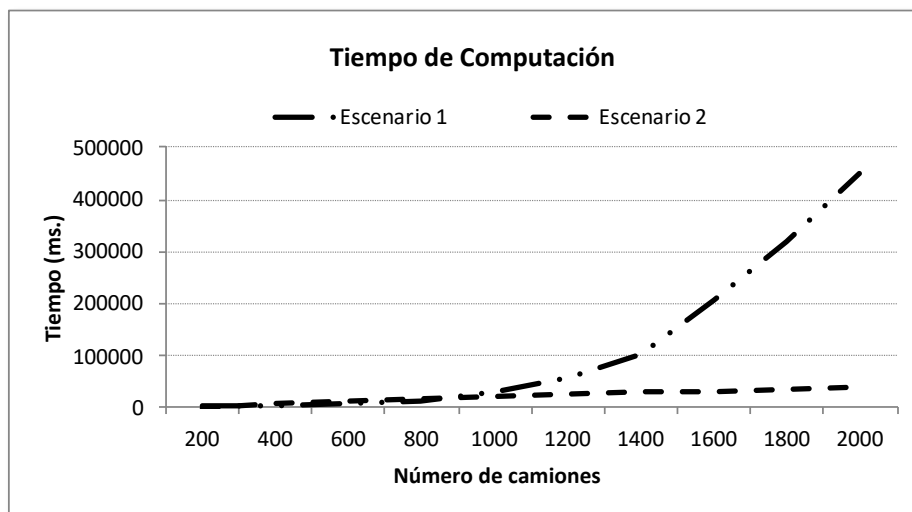


Figura 6.7: Evolución del tiempo de ejecución en relación con el número de camiones (en grupos de 200 camiones) en el Escenario 1 (incremento de plazas de aparcamiento de forma proporcional) y en el Escenario 2 (número fijo de plazas de aparcamiento).

Esto refleja que el tiempo de cálculo para resolver una negociación está directamente relacionado con el número de camiones que participan en ella. En el Escenario 1, al aumentar las plazas de aparcamiento proporcionalmente, cuando se produce una negociación hay un número mayor de camiones involucrados en ella.

El tiempo necesario para resolver una negociación es igual a la suma de: a) el tiempo en generar el conjunto de soluciones, b) el tiempo en enviárselas a todos los camiones involucrados y recibir las votos cada camión a las distintas soluciones posibles enviadas, c) el tiempo de calcular la solución ganadora y d) el tiempo en comunicar a los camiones los resultados.

El envío de las soluciones a los camiones y la recepción de las mismas no depende del número de camiones implicados, ya que se producen en paralelo (aunque está supeditada al tiempo que tarde cada camión en emitir sus votos), pero tanto la generación del conjunto de soluciones, como la resolución de la votación estará fuertemente influenciado por el número de camiones implicados.

Como referencia, la mayor área de aparcamiento del mundo es Iowa80, en Estados Unidos. Esta área cuenta con 900 plazas de aparcamiento disponibles para camiones. En consecuencia, se ha puesto en marcha un conjunto de simulaciones para calcular la eficacia del protocolo en áreas tan amplias. Los resultados reflejan que el tiempo necesario para resolver una negociación con 900 camiones está entre 1,6 y 1,9 segundos. Estos valores podrían ser muy altos para otros dominios, pero son muy aceptables en el dominio del aparcamiento de camiones, donde un camión con una velocidad de 100 km/h recorre menos de 30 metros en 2 segundos. Las áreas de aparcamiento adyacentes más cercanas en la red estudiada están a 5 km de distancia, por lo que este tiempo es insignificante.

6.3.2. Resiliencia del protocolo.

Otro aspecto importante para estudiar el comportamiento del protocolo se basa en realizar pruebas que demuestren la resiliencia del mismo. En el protocolo se considera que los conductores de los camiones tienen un comportamiento benevolente, es decir, que siempre aparcan en el área indicada por el protocolo. Sin embargo, esta situación dista mucho del mundo real donde los conductores pueden decidir en contra del bienestar social el suyo propio.

De esta forma, esta prueba se realiza para evaluar la resiliencia del protocolo, es decir, cómo evoluciona el protocolo cuando algunos conductores no aparcan en el área de servicio asignada sino en la que prefieren (la más alejada siempre), reduciendo las plazas de aparcamiento disponibles en el área y posiblemente creando situaciones que empeoran los accesos y consecuentemente la seguridad cerca del área.

En esta prueba, se han realizado un conjunto de simulaciones que van desde el comportamiento benevolente del 100 % de los conductores hasta el 0 % (equivalente a que ninguno aplica el protocolo). Se ha repetido la carga y propiedades de los camiones para cada una de las 6 simulaciones (0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 %) y los resultados se han contrastado con las plazas de aparcamiento reales de cada área de servicio.

La Figura 6.8 muestra la asignación de camiones siguiendo las diferentes simulaciones y las plazas de aparcamiento reales de las áreas de descanso. Se observa que el protocolo siempre reduce el número de aparcamientos ilegales, siendo esta reducción mayor cuantos más conductores aparcan en el área asignada por el protocolo.

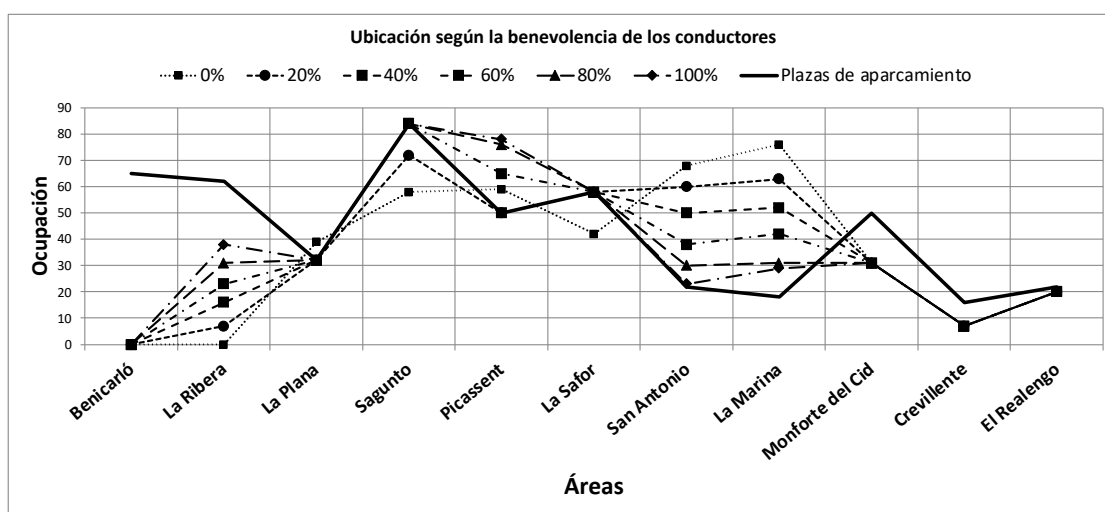


Figura 6.8: Asignación de camiones en función del porcentaje de benevolencia de los conductores y de las plazas de aparcamiento reales de las zonas. Las simulaciones representan desde el 100 % de benevolencia hasta el 0 % en intervalos del 20 %.

6.3.3. Evaluación del precio de la anarquía.

Una vez analizada la eficiencia del protocolo, se ha examinado y evaluado su comportamiento con respecto al *precio de la anarquía*. El precio de la anarquía es un concepto para medir cómo se degrada la eficiencia de un sistema debido al comportamiento egoísta de sus agentes.

En el protocolo propuesto, el precio de la anarquía determina si el uso de una gestión distribuida de las negociaciones mantiene la eficiencia del protocolo, o si esto causa una degradación del bienestar global cuando se compara con un enfoque centralizado.

Por tanto, para evaluar el precio de la anarquía se han comparado los resultados obtenidos para el Escenario 1, basados en datos de tráfico reales, con los mismos resultados pero utilizando una aproximación al gestor de plazas de aparcamiento centralizado presentado en [82]. La Figura 6.9 ilustra las ubicaciones medias de los camiones de 100 simulaciones utilizando ambos protocolos.

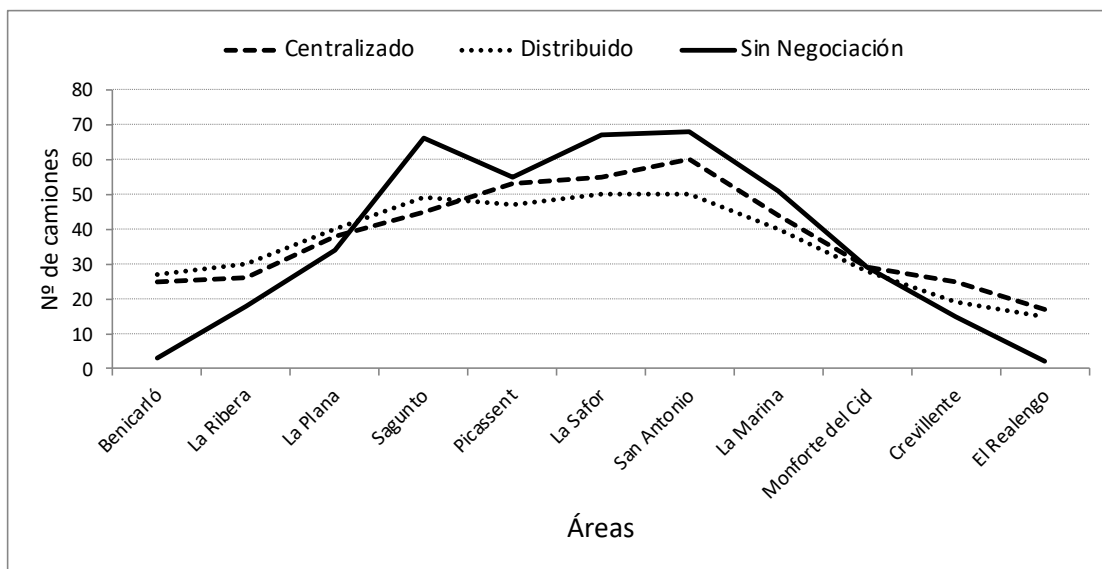


Figura 6.9: Resultados de ocupación obtenidos con diferentes modelos de asignación de aparcamiento: Sin proceso de negociación, sistema centralizado anterior, y, el protocolo distribuido propuesto con negociaciones encadenadas.

Tanto la utilización del protocolo centralizado como la del protocolo distribuido propuesto mejoran claramente el número de camiones que aparcen de manera ilegal con respecto a la situación real de referencia sin negociación. Es importante tener en cuenta que no se consideran las áreas ubicadas al principio y al final de la red de estudio, dado que por la distribución de la localización de los camiones lanzada (teniendo en cuenta su distancia máxima alcanzable) en estas áreas el número de camiones que desean aparcar en ellas como primera preferencia no excede la capacidad de las áreas.

Además, se observa que el protocolo distribuido propuesto mejora levemente la distribución realizada por el centralizado. La razón es que el protocolo con un gestor central no utiliza el concepto de negociaciones encadenadas y reasigna solo a los camiones involucrados en una negociación por sus áreas preferidas. Sin embargo, en el entorno distribuido propuesto las negociaciones encadenadas involucran a los camiones que sin estar en la negociación primaria, si lo están en cualquiera de las áreas adyacentes en las que se produce una negociación.

6.4. Conclusiones

En este capítulo se muestra el funcionamiento del protocolo de negociación propuesto contrastándolo con los resultados que se obtendrían si no se aplicara el protocolo. Se ha realizado un conjunto de pruebas para evaluar el protocolo en dos aspectos principales: la validación de la eficiencia y validez del protocolo propuesto, y, las pruebas de robustez necesarias para validar el sistema desarrollado con entornos reales de tráfico de transporte interurbano.

Para ello, se ha utilizado un escenario base obtenido de los parámetros reales de la red de estudio. Esta red se centra en el segmento de la E-15 que transcurre de Norte a Sur en la Comunidad Valenciana, sus parámetros de circulación y las áreas de descanso que se encuentran en ella.

Los conductores pueden utilizar diversas estrategias para alcanzar sus objetivos. En las pruebas se ha utilizado para evaluar el método computacional propuesta la estrategia más probable: “Los conductores ordenan sus preferencias intentando aparcar en el área más alejada sin sobrepasar su tiempo de conducción”.

Inicialmente se ha comprobado y validado el protocolo midiendo la eficiencia del mismo mediante dos tipos de pruebas:

- Pruebas en función del número de plazas. Primero usando un conjunto de 100 simulaciones que se repiten para un número homogéneo de plazas y para el número de plazas reales existentes en las áreas de servicio de la red de estudio. Los resultados de este test muestran una reducción de alrededor del 40 % de aparcamiento ilegal con la carga lanzada en los experimentos, además de demostrar que esta mejora es independiente del número de plazas existentes.
- Pruebas en función de la distribución de los camiones. En el segundo tipo de test se lanza la misma carga de camiones pero con tres distribuciones distancias en cuando al punto kilométrico máximo que los camiones pueden alcanzar. El protocolo ha demostrado mejorar siempre los resultados con respecto al aparcamiento sin utilizar el protocolo. De hecho, ha reducido el aparcamiento ilegal casi al completo en aquellas distribuciones en las que la capacidad de plazas del sistema permitía que este fuera mínimo.

Para la evaluación de la eficiencia también se ha probado la idoneidad de los métodos de ponderación de preferencias, expuestos en modelo de negociación, aplicados al entorno real utilizado. En estas pruebas también se han realizado 100 simulaciones, de las que se han elegido diez aleatorias. Cada simulación se ha replicado sin utilizar el protocolo, y utilizándolo con el Método 1, en el que se utiliza el máximo número de preferencias para ponderar el peso de los votos, y el Método 2, donde se utiliza un porcentaje que depende de las preferencias de cada camión.

Las pruebas demuestran cómo con la carga propuesta reduce un 25 % de los camiones deben aparcar de forma ilegal si no se utiliza el protocolo, mientras que este porcentaje baja al 10 % utilizando el Método 1, y, a un 7 % utilizando el Método 2. Así se demuestra que es más eficiente el Método 2 en el que los camiones con menos preferencias tienen mayor probabilidad de ganar en la negociación que los que tienen mayor posibilidad de conseguir plaza en otra área de descanso.

Finalmente, en las pruebas de eficiencia del protocolo se ha medido el grado de cumplimiento del objetivo secundario del protocolo de negociación propuesto, conseguir que los camioneros estén satisfechos con las plazas que les asigna el sistema. El cumplimiento de este subobjetivo tiene repercusión en su comportamiento benevolente que es una de las bases del protocolo. De este modo, se ha medido la satisfacción ponderando favorablemente el orden de preferencia del área en el que consigue plaza, y, negativamente si no consigue plaza de aparcamiento. Los resultados

demuestran que el nivel de satisfacción de los conductores también se incrementa claramente con la aplicación del protocolo.

En una segunda parte de las pruebas se ha medido el comportamiento del sistema cuando éste se somete a pruebas que pueden poner en cuestión su robustez. En este sentido, en una primera prueba se ha evaluado cómo reacciona el sistema cuando se escala la carga de agentes. Para ello, se han creado dos nuevos escenarios:

1. Aumentando el número de camiones en la red y proporcionalmente el número de plazas de las áreas de descanso.
2. Aumentando únicamente el número de camiones de la red para evaluar los límites computacionales del protocolo.

Los resultados muestran que el protocolo sigue reduciendo el número de camiones que aparcen de forma ilegal cuando el número de camiones y plazas de aparcamiento crece. En este caso, el tiempo de ejecución del sistema multi-agente crece cuadráticamente cuando aumenta el número de camiones, mientras que en el segundo caso, cuando únicamente crece el número de camiones aumenta de forma lineal.

Los resultados indican que el funcionamiento del protocolo no se degrada debido al hecho de que cada área sea independiente de las demás. Cada área es responsable únicamente de las negociaciones relacionadas con camiones que intentan reservar plaza en ella. Sin embargo, el número de camiones implicados en la negociación podría ser un cuello de botella. Los resultados obtenidos con el número de plazas superior al mayor existente en el mundo, y en el peor de los casos (todas las plazas entran en la negociación) dan un tiempo de ejecución inferior a dos segundos. Resultado que en otros ámbitos podría ser muy alto pero que en el ámbito del tráfico interurbano y del aparcamiento de camiones es perfectamente aceptable.

En este apartado también se ha evaluado la resiliencia del protocolo. La base del protocolo se fundamenta en el comportamiento benevolente de los camiones, esto es, aparcen en el área que el sistema les asigna. Así se ha realizado un test para probar esta resiliencia aumentando progresivamente el número de camiones que no hacen caso a las asignaciones del sistema y aparcen en el área que sería su primera preferencia. Los resultados demuestran que el protocolo siempre reduce el número de aparcamientos ilegales, siendo esta reducción mayor cuanto mayor es el número de camiones que aparcen en el área asignada por el sistema.

Finalmente, en este apartado es importante analizar en un sistema multiagente cuál es el *precio de la anarquía*, es decir, si el hecho de que los agentes sean independientes y no tengan información de los otros afecta negativamente en el funcionamiento del sistema. De este modo, se han comparado los resultados con el funcionamiento esperado de un sistema centralizado en el que un agente gestor tiene toda la información del resto de agentes y con este conocimiento asigna las plazas. Se observa que el sistema con el protocolo distribuido no se degrada, e incluso, por el hecho de realizar negociaciones encadenadas en lugar de una única negociación mejora el resultado.

Capítulo 7

Conclusiones

Contenidos

7.1. Consecución de los objetivos	115
7.2. Aportaciones	116
7.2.1. Protocolo de negociación autonómico basado en votaciones en entornos distribuidos	116
7.2.2. Modelo de negociación autonómica para la gestión de plazas de aparcamiento en entornos interurbanos.	118
7.2.3. Un entorno autonómico para la gestión de plazas de aparcamiento en tráfico interurbano	119
7.3. Líneas de investigación y trabajos abiertos.	120

Este capítulo presenta las conclusiones del trabajo que se ha expuesto. Para ello, se van a analizar las aportaciones realizadas en el marco de los protocolos de negociación y su aplicación a los sistemas inteligentes de aparcamiento. En el último apartado se plantean las nuevas líneas de investigación a partir de los resultados obtenidos.

7.1. Consecución de los objetivos

El trabajo realizado en el marco de los protocolos de negociación ha permitido definir un nuevo protocolo de negociación distribuido basado en votaciones. El sistema de votaciones utilizado es una extensión y mejora de la propuesta de Borda.

La consecución de los objetivos de la tesis se ha logrado a través de la siguiente línea de trabajo: en primer lugar se ha modelado, diseñado y evaluado un protocolo teórico con las características necesarias para poder aplicarlo en sistemas de negociación autonómicos. Este protocolo se ha presentado en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4 se presenta la adaptación del protocolo a un entorno real: la gestión de aparcamiento en redes interurbanas. A partir del protocolo teórico se ha modificado sus características para poder aplicarse en un entorno altamente dinámico como es la gestión del tráfico. La adaptación ha incorporado todas las propiedades y restricciones del entorno.

Con el objeto de analizar la aplicación del protocolo en el entorno, se ha diseñado e implementado un sistema multiagente autonómico. Este sistema, presentado en el Capítulo 5, ha permitido

definir un conjunto de escenarios y pruebas para evaluar la validez y viabilidad de la utilización del protocolo en un entorno real. Para ello, se ha modelado un tramo de 400 km. de longitud del corredor Mediterráneo. Los resultados de las pruebas desarrolladas, presentados en el Capítulo 6, son muy positivos y muestran que la aplicación del protocolo mejora la distribución de los camiones en las plazas de aparcamiento de la red viaria modelada.

Se puede concluir, por tanto, que los objetivos planteados en esta tesis se han cubierto completamente, si bien, aún existen algunos elementos que han quedado por resolver, tal y como se expone más adelante en el Apartado 7.3.

7.2. Aportaciones

En esta sección se van a enumerar los diferentes logros científicos y aportaciones más relevantes que se han conseguido con el desarrollo de esta tesis. Esas aportaciones se pueden clasificar en dos áreas:

- El desarrollo de protocolos de negociación, y en concreto en la negociación mediante votaciones en entornos distribuidos y autónomos.
- Los sistemas ITS y su aplicación en la gestión de las plazas de aparcamiento en rutas interurbanas de larga distancia.

7.2.1. Protocolo de negociación autónomo basado en votaciones en entornos distribuidos

La investigación en el marco de los protocolos de negociación basado en votaciones ha permitido desarrollar un nuevo protocolo de negociación mediante votaciones para la distribución de recursos entre los clientes que los solicitan.

El protocolo está basado en el método de votación Borda [84]. Sin embargo, Borda presenta una serie de inconvenientes y desventajas que hacen difícil, si no imposible, su aplicación en entornos distribuidos con un elevado número de participantes y altamente dinámicos. Así pues se ha extendido el modelo de Borda añadiéndole las características necesarias para poder aplicarlo en este tipo de entornos. Estas nuevas características se centran en:

- El número de recursos por el que cada agente puede estar interesado es particular de cada agente. Esto es, los agentes clientes pueden tener un número de recursos diferentes en los que están interesados.
- Cada cliente puede estar interesado por recursos de proveedores distintos a los de otros clientes que solicitan los mismos recursos.
- Los agentes clientes votan únicamente por los recursos en los que estén interesados, no por todos los recursos. De esta forma se evita que un agente, pueda obtener un recurso que no necesita.
- Un cliente puede votar por diferentes soluciones. Sin embargo, el protocolo da soporte a que cada voto tenga un peso diferente en función del interés del cliente por una solución u otra.

- Como cada cliente puede estar interesado por un número diferente de recursos es necesario utilizar un parámetro de normalización para que los clientes con menos recursos, sean igual de competitivos en la negociación.

El protocolo permite la negociación distribuida para la utilización de recursos de un mismo tipo que ofrecen diferentes proveedores a clientes que quieren utilizarlos. Los agentes que participan en la negociación no disponen información de otros agentes (ni clientes ni proveedores) mas allá de la que estos publican.

La negociación se estructura en dos fases: 1) proceso de asignación, donde el proveedor tiene recursos disponibles y los va asignando a los clientes conforme van llegando las solicitudes y 2) fase de re-asignación, donde el proveedor no tiene recursos disponible y debe iniciar la votación entre los clientes para determinar la solución. El resultado de la segunda fase de la negociación implica que algún agente no podrá utilizar el recurso de ese proveedor y deba solicitarlo a otro proveedor. De este modo, se pueden producir negociaciones encadenadas cuando un recurso está saturado en varios proveedores.

La resolución del protocolo encadenado permite de forma dinámica asignar en situaciones de alta demanda la utilización de los recursos que ofrecen los proveedores del sistema, intentando no llegar a una situación de conflicto. Como se ha visto en la revisión científica, esta situación presenta problemas en un entorno centralizado. También presenta problemas en un entorno distribuido con una única negociación para todos los recursos.

Por tanto, la alternativa es emplear la aproximación distribuida con negociaciones encadenadas que permita reducir el proceso de negociación a un único proveedor y los clientes interesados en sus recursos, y que genere una nueva negociación en otro proveedor, cuando sea necesario.

El protocolo ha sido evaluado desde dos puntos de vista bien diferenciados:

- Determinar su convergencia y su eficiencia computacional. Los resultados de esta evaluación son satisfactorios:
 - El protocolo converge. A pesar de que los clientes pueden tener preferencias de múltiples recursos y pueden producirse negociaciones encadenadas, dado que los recursos a solicitar son finitos y que un cliente no puede solicitar recurso en un proveedor que se lo denegó, las negociaciones serán finitas, incluso en entornos con elevado número de clientes y proveedores.
 - El protocolo es eficiente computacionalmente. La negociación encadenada permite que la computación de las soluciones sea solo entre un proveedor y los clientes interesados en sus recursos, no entre todos los agentes del sistema y solo se computará una nueva solución cuando sea necesario. Por otra parte, solo se intercambian mensajes entre el proveedor y los clientes, minimizando también las interacciones de los elementos del sistema.
- Determinar el grado de cumplimiento de las propiedades autonómicas. El sistema propuesto cumple con las principales propiedades de autonómicas:
 - Auto-configuración, ya que los proveedores y los clientes configuran sus objetivos en función de sus necesidades y se adaptan a los cambios en el entorno.
 - Auto-optimización, dado que los agentes clientes siempre intentan acceder al mejor recurso en su lista de preferencias, obteniendo así una mejor distribución de recursos posible entre los clientes.

- Auto-recuperación, ya que es capaz de, en caso de caídas de proveedores, redistribuir los recursos que queden disponibles entre los clientes que los necesitan.

7.2.2. Modelo de negociación autonómica para la gestión de plazas de aparcamiento en entornos interurbanos.

El análisis y profundización en el conocimiento de las características que definen un entorno de este tipo (corredores de larga duración) ha permitido adaptar y enriquecer el protocolo definido, mejorando así su idoneidad para la gestión de las plazas de aparcamiento en estos entornos interurbanos.

Estos entornos tan poblados y altamente dinámicos necesitan protocolos que se adapten a los cambios de los agentes del entorno mientras el sistema evoluciona. Además de los parámetros contemplados en el protocolo en el sistema, se ha modificado la asignación de recursos. En esta adaptación, los recursos, en este caso plazas de aparcamiento, tienen dos posibles estados asignados:

- Pre-reserva. Plazas de aparcamiento que se asignan a los camiones pero que no les garantiza su consolidación pues entrarán en negociaciones si el área entra en conflicto.
- Reserva. Son las reservas definitivas que se consolidan cuando el camión está próximo al área de estacionamiento asignada, o bien cuando ya está estacionado.

Así pues, el número de plazas que entrará en una negociación dependerá de las plazas disponibles, es decir, plaza válidas para aparcar pero que no tengan ya una reserva definitiva sobre ellas. Además, el área puede por distintos motivos dejar de ofrecer un número determinado de plazas, o incluso puede estar inaccesible temporalmente.

Además, se ha definido la aproximación autonómica del sistema donde cada área es responsable de la gestión de sus áreas, tanto de la asignación de reservas y pre-reservas como de lanzar negociaciones cuando las plazas se saturen y se entre en un conflicto (más solicitudes que plazas disponibles).

En el protocolo de negociación, las fases de asignación y re-asignación se mantienen. Sin embargo, para adaptarse al nuevo dominio de aplicación, ha sido necesario añadir una fase de consolidación que representa las interacciones entre el área y el camión para pasar una pre-reserva a reserva definitiva.

Las estrategias que pueden emplear los camioneros para determinar cuál es el orden de preferencias de sus posibles áreas es muy variada. Por ello se ha utilizado una estrategia común para la selección de áreas preferidas por los camiones. Esta estrategia está basada en alcanzar el área más alejada sin sobrepasar su tiempo máximo de conducción.

Partiendo de esta estrategia y de las restricciones de los camioneros en cuanto a tiempo de conducción, se ha establecido un peso para la votación de un camión en una negociación que vendrá determinado por las características del camión en el momento que se produzca, y que se ponderará según sus preferencias en las distintas soluciones que le ofrezca el área. También se han definido dos métodos para realizar esta ponderación y se han analizado con un ejemplo práctico. Estos métodos han permitido demostrar la importancia de las preferencias de los camiones en la solución final del sistema.

Finalmente, tras la evaluación realizada en el protocolo y en el modelo, se ha demostrado que el modelo presentado converge independientemente del número de áreas, plazas y camiones. El

modelo también es eficiente computacionalmente y cumple con la propiedad del bienestar social. Otro aspecto importante a destacar es que también cumple con las propiedades autonómicas.

7.2.3. Un entorno autonómico para la gestión de plazas de aparcamiento en tráfico interurbano

La última aportación de esta tesis es una plataforma autonómica que permite simular escenarios reales de tráfico para la gestión de plazas de aparcamiento.

Un elemento clave en los sistemas distribuidos es definir el modelo de conocimiento que comparten los agentes del sistema. Así pues, se ha definido un modelo de conocimiento específico para el sistema que integra la coordinación, cooperación y negociación de los agentes con dominios existentes y modelos ya definidos en el ámbito de aplicación.

De este modo, se ha definido el dominio de la topología de la carretera integrando y ampliando el modelo presentado en [87], también el dominio del comportamiento del tráfico, el dominio de los sistemas de información, integrándolo con el estándar DATEX II, y el dominio de la gestión del tráfico. Los modelos definidos son totalmente compatibles entre sí, y pueden ser utilizados conjuntamente para modelar completamente el dominio del tráfico interurbano.

El diseño definido integra los elementos propios del protocolo (agentes área y camión), con los agentes necesarios para la interacción con el mundo real (agentes SIT, para difundir información en paneles y otros medios) y el agente interfaz para la monitorización del sistema, además, de los propios de la plataforma de implementación utilizada.

La implementación primero del sistema y después de la plataforma para la evaluación de escenarios autonómicos ha sido desarrollada en JADE, basado en el estándar FIPA. JADE proporciona todos los servicios básicos de agentes: comunicación, movilidad, gestión de los agentes y localización de los mismos.

Para facilitar la evaluación de escenarios se ha dotado a la plataforma de un mapa interactivo para la visualización del estado de ocupación de las áreas de servicio y poder interactuar con él. De esta forma, se pueden analizar las propiedades autonómicas mediante la modificación del escenario inicial, como por ejemplo, la simulación de un cierre temporal de un área y ver la evolución del sistema.

Además, se ha implementado una aplicación móvil para Android que permite ejecutar camiones independientes del escenario inicial, que entren en el sistema e interactúen con él, solicitando pre-reservas según sus prioridades y recibiendo actualizaciones de las mismas según evolucione el entorno de simulación.

Gracias a la plataforma y aplicación móvil desarrolladas se ha podido realizar simulaciones del sistema con distintas configuraciones, pudiendo reproducirlas introduciendo modificaciones en los parámetros de la simulación, como el método de ponderación de preferencias utilizado, para comparar resultados con los esperados a partir del ejemplo base definido y comparándolo con las distintas simulaciones.

Así, la plataforma ha permitido evaluar el comportamiento del protocolo de negociación en un entorno real correspondiente al tráfico interurbano que soporta la carretera europea E-15, a lo largo de los casi 400 kilómetros que tiene el tramo correspondiente a su paso por la Comunidad Valenciana, y las 11 áreas de servicio que hay en ese tramo.

En cuanto a la validación del protocolo, las pruebas han demostrado el correcto comportamiento no solo de la plataforma y su robustez en cuanto a escalabilidad y resiliencia, sino también de la

integración en la misma del protocolo.

7.3. Líneas de investigación y trabajos abiertos.

La investigación desarrollada en esta tesis y el trabajo realizado para su aplicación en el ámbito del aparcamiento de vehículos en vías interurbanas ha dejado algunos aspectos sobre los cuales sería interesante realizar una investigación más profunda:

- Explorar la incorporación del protocolo de negociación en los sistemas de cálculo de rutas. Los actuales sistemas de determinación de itinerarios permiten la elección de algunos criterios para su cálculo: evitar peajes, ruta más corta, ruta más rápida, tener en cuenta el estado del tráfico, ... Sería interesante poder incorporar el criterio de disponibilidad de aparcamiento. Rutas que a priori, tienen un tiempo de viaje más corto, pueden convertirse en rutas más largas si los conductores tienen que hacer más paradas de las esperadas, por no tener plaza en su área más lejana. Un ejemplo de este problema se ha presentado en la Figura 4.4.
- Análisis profundo de la ponderación de los pesos en las votaciones. En el estado del arte se presentan distintas variantes del método de votación Borda. En la presente tesis se ha definido una nueva variante para su aplicación a la negociación que se realiza en el ámbito de aplicación. También se ha propuesto y evaluado dos modos de ponderación de los pesos que generarán los votos y que influyen claramente en los resultados de las negociaciones. De este modo, sería interesante analizar nuevos métodos de ponderación bien con la variante propuesta o basada en alguna otra existente para analizar si es posible conseguir un método óptimo de ponderación que maximice el beneficio social.
- Incorporar coaliciones. Una rama interesante en el ámbito de aplicación presentado es la existencia de coaliciones. Varios camiones que pertenecen a una misma empresa pueden querer o necesitar realizar paradas en áreas en las que coincidan. De este modo, sería interesante la aplicación de la teoría de coaliciones en los sistemas de negociación y su aplicación al ámbito de estudio propuesto.
- Aplicación del protocolo en otros ámbitos. Se ha probado la idoneidad de la aplicación del protocolo de negociación al ámbito propuesto. Pero existen otros ámbitos en los que se puede producir las condiciones en las que sería conveniente la aplicación del protocolo desarrollado. Un posible ámbito podría ser el hospitalario, donde se podría aplicar por ejemplo, en la asignación de camas en salas de observación o incluso priorizar el uso de quirófanos. En este caso, cuando haya disponibilidad se asigne directamente, pero si no la hay sea necesario definir un conjunto de criterios para poder realizar una negociación y re-asignar las camas disponibles a los pacientes que más lo necesitan.

Bibliografía

- [1] Naciones Unidas. Objetivos y metas de desarrollo sostenible. 1.1
- [2] Ana Bazzan, Ivana Dusparic, Marin Lujak, and Giuseppe Vizzari. Agents in traffic and transportation (att 2022): Revised and extended papers. *AI Communications*, pages 1–3, 11 2023. 1.1, 2.1
- [3] Factsheet on Greening Freight. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda_23_3770, 2023. 1.1
- [4] Pere Anton Casamitjana Toral. Futura ley de inteligencia artificial, el sector transporte por carretera e implicaciones en la seguridad. *Logos Guardia Civil, Revista Científica del Centro Universitario de la Guardia Civil*, (1):309–326, 2023. 1.1
- [5] Khac-Hoai Nam Bui and Jason J Jung. Internet of agents framework for connected vehicles: A case study on distributed traffic control system. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 116:89–95, 2018. 1.1
- [6] Juan Antonio Guerrero-Ibanez, Sherali Zeadally, and Juan Contreras-Castillo. Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies. *IEEE Wireless Communications*, 22(6):122–128, 2015. 1.1
- [7] Volodymyr Miz and Vladimir Hahanov. Smart traffic light in terms of the cognitive road traffic management system (ctms) based on the internet of things. In *Proceedings of IEEE east-west design & test symposium (EWDTS 2014)*, pages 1–5. IEEE, 2014. 1.1
- [8] Pampa Sadhukhan and Firoj Gazi. An iot based intelligent traffic congestion control system for road crossings. In *2018 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT)*, pages 371–375. IEEE, 2018. 1.1
- [9] Dinithi Nallaperuma, Rashmika Nawaratne, Tharindu Bandaragoda, Achini Adikari, Su Nguyen, Thimal Kempitiya, Daswin De Silva, Daminda Alahakoon, and Dakshan Pothuhera. Online incremental machine learning platform for big data-driven smart traffic management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(12):4679–4690, 2019. 1.1
- [10] P Ajay, B Nagaraj, Branesh Madhavan Pillai, Jackrit Suthakorn, and M Bradha. Intelligent ecofriendly transport management system based on iot in urban areas. *Environment, Development and Sustainability*, pages 1–8, 2022. 1.1
- [11] Luis A. Garcia and Vicente R. Tomas. A smart peri-urban i2v architecture for dynamic rerouting. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 10(2):69–79, 2018. 1.1

- [12] Sarit Kraus. *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*. The MIT Press, 09 2001. [1.2](#), [2.4](#)
- [13] Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible. Análisis específico de la actividad económica del transporte por carretera, 2022. [2.1](#)
- [14] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible, y. Proyectos para la digitalización de los servicios de transporte de viajeros y mercancías en el ámbito nacional, 2022. [2.1](#)
- [15] Movilidad y Agenda Urbana Ministerio de Transporte. Resolución por la que se modifican los procedimientos y requisitos necesarios para la inclusión de zonas de aparcamiento seguras y protegidas en el punto nacional de acceso a la información sobre aparcamientos seguros y protegidos del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y se establece un periodo transitorio para la adaptación de las instalaciones certificadas con arreglo al proyecto europeo LABEL, 2022. [2.1](#)
- [16] Joanna Kosińska and Krzysztof Zieliński. Enhancement of cloud-native applications with autonomic features. *Journal of Grid Computing*, 21(3):44, Jul 2023. [2.1](#), [2.2](#), [2.2.1](#)
- [17] Jeffrey Kephart and D.M. Chess. The vision of autonomic computing. *Computer*, 36:41 – 50, 02 2003. [2.1](#), [2.2](#), [2.2.1](#), [2.2.1](#), [2.1](#), [3.1](#)
- [18] Dhaminda Abeywickrama and Eila Ovaska. A survey of autonomic computing methods in digital service ecosystems. *Service Oriented Computing and Applications*, 11, 03 2017. [2.2](#), [2.2.1](#), [2.2.1](#)
- [19] Imen Abdennadher, Ismael Bouassida Rodriguez, and Mohamed Jmaiel. An overview of a decision approach for autonomic applications architectural adaptation. In *2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications*, pages 1095–1101. IEEE, 2016. [2.2](#), [2.2.1](#)
- [20] Claire Naiga Serugunda, Sisay Tadesse Arzo, Fabrizio Granelli, Riccardo Bassoli, Michael Devetsikiotis, and Frank HP Fitzek. Autonomous network traffic classifier agent for autonomic network management system. In *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE, 2021. [2.2](#), [2.2.1](#)
- [21] Krasimira Stoilova, Todor Stoilov, and Konstantin Nikolov. Autonomic properties in traffic control. *Cybernetics and Information Technologies*, 13, 12 2013. [2.2](#), [2.2.1](#), [2.2.1](#), [2.2.1](#)
- [22] Ivana Dusparic and Vinny Cahill. Multi-policy optimization in decentralized autonomic systems. In *Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems- Volume 2*, pages 1203–1204, 2009. [2.2](#), [2.3](#)
- [23] Sukhpal Singh Gill, Minxian Xu, Carlo Ottaviani, Panos Patros, Rami Bahsoon, Arash Shaghaghi, Muhammed Golec, Vlado Stankovski, Huaming Wu, Ajith Abraham, Manmeet Singh, Harshit Mehta, Soumya Ghosh, Thar Baker, Ajith Kumar Parlikad, Hanan Lutfiyya, Salil Kanhere, Rizos Sakellariou, Schahram Dustdar, and Steve Uhlig. Ai for next generation computing: Emerging trends and future directions. *Internet of Things*, 19:100514, 08 2022. [2.2](#), [2.2.1](#), [2.2.1](#)
- [24] Fabio Galatioto, Margaret Bell, and R.G. Hoogendoorn. Autonomic decision support system for traffic and environment management. volume 2014, 11 2014. [2.2.1](#), [2.2.1](#)

- [25] Apostolos Kotsialos and Adam Poole. Autonomic systems design for ITS applications. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 178–183, 10 2013. [2.2.1](#), [2.2.1](#)
- [26] Xinjian Long, Xiangyang Gong, Xirong Que, Wendong Wang, Bing Liu, Jiang Sheng, and Ning Kong. Autonomic networking: Architecture design and standardization. *IEEE Internet Computing*, 21:48–53, 01 2017. [2.2.1](#)
- [27] Ranganai Chaparadza, Muslim Elkotob, Benoit Radier, Tayeb Meriem, Eman Hammad, and Taesang Choi. Autonomic/autonomous networking (an): Federations governance of ans, progress open challenges in standards: Analysis report. pages 176–183, 10 2022. [2.2.1](#)
- [28] Core Network and Interoperability Testing (INT/ WG AFI) Generic Autonomic Network Architecture; Part 1: Business drivers for autonomic networking. European Telecommunications Standards Institute - ETSI, 2023. [2.2.1](#)
- [29] Christian Krupitzer, Felix Maximilian Roth, Christian Becker, Markus Weckesser, Malte Lochau, and Andy Schürr. Fesas ide: An integrated development environment for autonomic computing. In *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*, pages 15–24, 2016. [2.2.1](#)
- [30] Thomas Leo McCluskey, Apostolos Kotsialos, Jörg P Müller, Franziska Klügl, Omer F Rana, and René Schumann. Autonomic road transport support systems: An introduction. *Autonomic Road Transport Support Systems*, pages 1–11, 2016. [2.2.1](#)
- [31] James Mulcahy, Shihong Huang, and Imadeldin Mahgoub. Autonomic computing and vanet. *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*, 2015, 06 2015. [2.2.1](#)
- [32] Saqib Rasool Chaudhry, Hadi Tabatabaee Malazi, Sangita Dhara, Aqeel Haider Kazmi, and Siobhán Clarke. Toward context-aware information dissemination in autonomous networks of vehicles. *IEEE Communications Standards Magazine*, 7(2):8–15, 2023. [2.2.1](#)
- [33] Dmitry Elkin and Valeriy Vyatkin. Iot in traffic management: review of existing methods of road traffic regulation. In *Applied Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems: Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference 2020, Volume 3 9*, pages 536–551. Springer, 2020. [2.2.1](#)
- [34] Jeffrey L Adler and Victor J Blue. A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(5-6):433–454, 2002. [2.2.1](#)
- [35] Ivo JPM Timóteo, Miguel R Araújo, Rosaldo JF Rossetti, and Eugénio C Oliveira. Using trasmapi for the assessment of multi-agent traffic management solutions. *Progress in Artificial Intelligence*, 1:157–164, 2012. [2.2.1](#)
- [36] Hodjat Hamidi and Ali Kamankesh. An approach to intelligent traffic management system using a multi-agent system. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 16:112–124, 2018. [2.2.1](#)
- [37] Michiel de Bok, Lóránt Tavasszy, and Sebastiaan Thoen. Application of an empirical multi-agent model for urban goods transport to analyze impacts of zero emission zones in the netherlands. *Transport Policy*, 124:119–127, 2022. [2.2.1](#)

- [38] Martin Goller, Ingo Thomsen, Ghassan Al-Falouji, and Sven Tomforde. Abnormal behaviour detection of self-adaptive agents in traffic environments. In *2023 IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems Companion (ACSOS-C)*, pages 41–46. IEEE, 2023. 2.2.1
- [39] Javier García, José E. Florez, Álvaro Torralba, Daniel Borrajo, Carlos Linares López, Ángel García-Olaya, and Juan Sáenz. Combining linear programming and automated planning to solve intermodal transportation problems. *European Journal of Operational Research*, 227(1):216–226, 2013. 2.2.1
- [40] Falilat Jimoh, T. L. McCluskey, Luká Chrpá, and Peter Gregory. Enabling autonomic properties in road transport system. 2012. 2.2.1
- [41] Ivana Dusparic and Vinny Cahill. Using reinforcement learning for multi-policy optimization in decentralized autonomic systems – an experimental evaluation. volume 5586, pages 105–119, 06 2009. 2.2.1
- [42] Ana Bazzan and Franziska Klügl. A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*, 29(3):375–403, 2014. 2.2.1
- [43] Ana Bazzan and Franziska Klügl. Introduction to intelligent systems in traffic and transportation. *Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*, 7:1–137, 12 2013. 2.2.1
- [44] A.I. Diveev, A.D. Kochkin, K.A. Pupkov, and E.A. Sofronova. Traffic flow modelling approach based on the controlled networks. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(24):309–314, 2012. 2.2.1
- [45] Meteosafety. Meteosafety. study for the reduction of accidents in adverse weather conditions. http://www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=38933, 2008-2010. [Online; accessed January 8, 2015]. 2.2.1, 2.5
- [46] Miguel Angel López Carmona. *Estrategias de negociación automática basadas en restricciones difusas sobre sistemas multiagente*. PhD thesis, Universidad de Alcalá, 2006. 2.3, 2.4
- [47] Rafael Cardoso and Angelo Ferrando. A review of agent-based programming for multi-agent systems. *Computers*, 10:16, 01 2021. 2.3, 2.3
- [48] Tobias Ahlbrecht, Jürgen Dix, Niklas Fiekas, and Tabajara Krausburg. *The Multi-Agent Programming Contest 2022: Coordinating Agents in a Dynamic World: Agents Follow the Rules, or Not*, volume 13997. Springer Nature, 2023. 2.3
- [49] Dario Paccagnan, Rahul Chandan, and Jason R Marden. Utility and mechanism design in multi-agent systems: An overview. *Annual Reviews in Control*, 53:315–328, 2022. 2.3
- [50] Jason R. Marden and Jeff S. Shamma. Game theory and control. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1(1):105–134, 2018. 2.3
- [51] Juan C Burguillo. Multi-agent systems. *Self-organizing Coalitions for Managing Complexity: Agent-based Simulation of Evolutionary Game Theory Models using Dynamic Social Networks for Interdisciplinary Applications*, pages 69–87, 2018. 2.3
- [52] Manuel Herrera, Marco Pérez-Hernández, Ajith Kumar Parlikad, and Joaquín Izquierdo. Multi-agent systems and complex networks: Review and applications in systems engineering. *Processes*, 2020. 2.3

- [53] Telecom Italia. FIPA ACL Message Structure Specification, 2002. [2.3](#), [5.4.1](#)
- [54] Angie Yulie Guisao Garcés. Análisis de los estilos de negociación: una comparación de casos empresariales en medellín. Technical report, Tecnológico de Antioquia, 2023. [2.4](#)
- [55] VI Encuentro de Responsables de Protocolo and Universidades Españolas. Técnicas de negociación. [2.4](#)
- [56] Martin J. Osborne and Ariel Rubinstein. *Bargaining and markets*. Economic theory, econometrics, and mathematical economics. Academic Press, 1990. [2.4](#)
- [57] Nicholas R. Jennings. An agent-based approach for building complex software systems. *Commun. ACM*, 44(4):35–41, apr 2001. [2.4](#)
- [58] Marcelo Luis Errecalde, Guillermo Aguirre, and Fernando González. Agentes y mecanismos de votación. In *X Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2004. [2.4.1](#)
- [59] Kenneth J Arrow. *Social choice and individual values*, volume 12. Yale university press, 2012. [2.4.1](#)
- [60] Philip D Straffin Jr. *Topics in the Theory of Voting*. ERIC, 1980. [2.4.1](#)
- [61] Estefanía García Vázquez et al. La abstención y otros problemas en los métodos de votación. 2009. [2.4.1](#)
- [62] Miguel Martínez Panero. Métodos de votación híbridos bajo preferencias ordinarias y difusas. In *Anales de estudios económicos y empresariales*, number 16, pages 187–219. Servicio de Publicaciones, 2006. [2.4.1](#)
- [63] Pier Giuseppe Sessa, Neil Walton, and Maryam Kamgarpour. Exploring the vickrey-clarke-groves mechanism for electricity markets. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):189–194, 2017. [2.4.1](#)
- [64] Eduardo Navas Merlo et al. Diseño de un mecanismo de subastas combinatorias para la asignación de slots ferroviarios. 2019. [2.4.1](#)
- [65] Mutlu Suhat Dolapchiev et al. Modernas variantes de la regla de votación de borda. 2018. [2.4.2](#)
- [66] Directive 2002/15/EC of the European Parliament and of the Council of 11 March 2002 on the organisation of the working time of persons performing mobile road transport activities, 2015. [2.5](#)
- [67] Directive 2010/40/EU of the European Parliament on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport, 2010. [2.5](#)
- [68] *ITS in action: action plan and legal framework for the deployment of ITS in Europe*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011. [2.5](#)
- [69] Regulation (EU) No 1315/2013 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2013 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network and repealing Decision No 661/2010/EU., 2013. [2.5](#)

- [70] Regulation (EU) No 885/2013 of 15 May 2013 supplementing ITS Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the provision of information services for safe and secure parking places for trucks and commercial vehicles., 2013. 2.5
- [71] DG-FLS-DG01.-Intelligent Truck Parking and Secure Truck Parking. Deployment guideline. EW-DG., 2013. 2.5
- [72] ParkMyRig. The Ultimate Truck Parking Guide., 2023. 2.5
- [73] VINCI Group. Dynamic signs for customs controls of heavy transport. 2012. 2.5
- [74] B. Vennekens. Parkr system. *DATEX User Forum*, 2014. 2.5
- [75] VDO. TruckYa! – Truck Parking, 2015. 2.5
- [76] CVIS - Cooperative vehicle infrastructure systems. IST-2004-027293 2006-2010. Co-funded by EC. Sixth Framework program, 2010. 2.5
- [77] SAFESPOT - Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety. <http://www.safespot-eu.org/>. Co-funded by the European Commission Information Society and Media and supported by EUCAR., 2010. 2.5
- [78] OASIS - Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles. Convocatoria CENIT 2008-2011., 2011. 2.5
- [79] DRIVE C2X - Accelerate cooperative mobility. Co-funded by the European Commission DG CONNECT in the FP7., 2014. 2.5
- [80] Mandate M/453. Standardization mandate addressed to CEN, CENELEC and ETSI in the field of information and communication technologies to support the interoperability of co-operative systems for Intelligent Transport in the European Community., 2009. 2.5
- [81] Pavel Krupík. Systems for intelligent parking of trucks at motorway rest areas as part of construction 4.0. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203(3):032052, nov 2021. 2.5
- [82] M. Capdevila, Vicente R. Tomás, Luis A. García, and M. Prades Farron. Dynamic Management of Parking Spaces in Road Rest Areas with Automatic Negotiation. pages 3609–3614. IEEE, October 2013. 2.5.1, 1, 6.3.3
- [83] Jose García, Vicente Tomás, Luís García, and J.J. Martínez. A negotiation protocol to improve long distance truck parking. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 24:157–170, 2017. 2.5.1
- [84] Manzoor Ahmad Zahid and Harrie de Swart. The Borda Majority Count. *Information Sciences*, 295:429–440, February 2015. 3.3.2, 7.2.1
- [85] José F. García, Vicente R. Tomás, Luis A. García, and Juan J. Martínez. A framework to evaluate autonomic behaviours for intelligent truck parking. In Yves Demazeau, Takayuki Ito, Javier Bajo, and Maria José Escalona, editors, *Advances in Practical Applications of Scalable Multi-agent Systems. The PAAMS Collection*, pages 260–264, Cham, 2016. Springer International Publishing. 5
- [86] Zsolt Sándor and Csaba Csiszar. Development stages of intelligent parking information systems for trucks. *Acta Polytechnica Hungarica*, 10:161–174, 11 2013. 5.2

-
- [87] Tomás López, Vicente R. *Tácticas mixtas para la negociación automática de múltiples servicios con información incompleta en entornos multiagente. Aplicación a problemas de gestión de tráfico*. PhD thesis, Universitat de València, Sep 2006. [5.2.1](#), [5.1](#), [7.2.3](#)
- [88] Dirección General de Tráfico. Estado de las carreteras en tiempo real. [5.2.2](#)
- [89] DATEX II organization. Modelo Datex II. [5.2.3](#), [5.2](#)
- [90] V.R. Tomás. Agent-based test-bed for road information systems. *IET Intelligent Transport Systems*, 6:404–412(8), December 2012. [5.3.2](#)
- [91] Telecom Italia. Foundation for Intelligent Physical Agents, 2002. [5.3.3](#)
- [92] Spanish Ministry of Transport. Aadt traffic Map., 2020. [5.4](#)
- [93] TeamDev. A cross-platform library for integration of Chromium browser into Java applications, 2024. [5.4.1](#)
- [94] Telecom Italia. Jade android. [5.4.1](#)
- [95] Fomento. Mapa de tráfico 2021, 2021. [6.1](#), [6.3.1](#)

Apéndice A

Publicaciones

A continuación se presentan las publicaciones derivadas de la tesis. Entre ellas, destaca un artículo en la revista *Integrated Computer-Aided Engineering* indexada en el Journal Citation Records (JCR) como Q1.

A.1. Derivadas de la Tesis

- J. F. García, V. R. Tomás, L. A. García and J. J. Martínez, An autonomic system for intelligent truck parking, 2014, 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Vienna, Austria, 2014, pp. 810-816, doi: 10.5220/0005149008100816.

La conferencia está indexada como CORE B.

En este artículo se presenta el sistema multiagente distribuido desarrollado para asignación de plazas de aparcamiento a vehículos pesados. En él se presenta tanto la aproximación distribuida del sistema, como la arquitectura propuesta, y las propiedades autonómicas del mismo.

- Jose F. García, Vicente R. Tomás, Luis A. García, and Juan J. Martínez. The relevance of preferences in a voting system for dynamic parking management. In Industrial Simulation Conference'2015, pages 95–99. EUROSIS-ETI, 2015.

La conferencia está indexada como CORE C.

En este artículo se presentan distintos métodos de ponderación del sistema de votación y su influencia en el resultado de la negociación y el sistema de aparcamiento.

- J. F. García, V. R. Tomás, L. A. García and J. J. Martínez (2016). A Framework to Evaluate Autonomic Behaviours for Intelligent Truck Parking. In: Demazeau, Y., Ito, T., Bajo, J., Escalona, M. (eds) Advances in Practical Applications of Scalable Multi-agent Systems. The PAAMS Collection. PAAMS 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9662. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-39324-7_26

La conferencia está indexada como CORE B.

En este artículo se presenta una plataforma para facilitar la evaluación de los comportamientos autonómicos del sistema. En ella, no solo se presenta la plataforma web, sino que también

se presenta una aplicación móvil para la simulación de la entrada en el sistema de nuevos camiones y comprobar las asignaciones de plazas recibidas según evoluciona el sistema (entrada de nuevos camiones, cierre de áreas, ...)

- J. F. García, V. R. Tomás, L. A. García and J. J. Martínez (2016), A negotiation protocol to improve long distance truck parking. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 24. 1-14. 10.3233/ICA-160537.

La revista *Integrated Computer-Aided Engineering* esta indexada en el Journal Citation Records (JCR) como Q1 de 2017 (el año de la publicación) en el ranking Q1 ocupando la posición 21 de 132 en el ámbito de Computer Science, Artificial Intelligence, también Q1 ocupando la posición 17 de 105 en Computer Science, Interdisciplinary applications y Q1 en la posición 7 de 86 del ámbito de Engineering, multidisciplinary. Su factor de impacto (JIF) es, consecuentemente, muy elevado 3.667.

Este artículo presenta el protocolo de negociación extendido donde se profundiza en todos los aspectos del mismo, tanto en su arquitectura, como en la descripción del protocolo de negociación, como en el sistema multiagente distribuido. En él se evalúan todos los aspectos relevantes del sistema multiagente y de la eficiencia del protocolo de negociación propuesto.

A.2. Relacionadas con la Tesis

- Vicente Ramón Tomás López, Luis Amable García Fernández, José F. García Calderaro, Pablo Jiménez Mateo. Diseño y desarrollo de un sistema auto-organizado para la gestión de emergencias de tráfico en los accesos a Castellón de la Plana. 2016. ISBN 9788460889878. Castellón (España). Ed. Fundación Dávalos-Fletcher.

En este libro se presentan los resultados del proyecto de investigación financiado por la Fundación Dávalos-Fletcher, en el que participé como investigador. Como principal resultado se diseñó, desarrolló e implementó un protocolo de negociación mediante subastas para la auto-organización de la gestión de emergencias de tráfico en los accesos a Castellón de la Plana.