

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA

TÁCTICAS MIXTAS PARA LA NEGOCIACIÓN
AUTOMÁTICA DE MÚLTIPLES SERVICIOS CON
INFORMACIÓN INCOMPLETA EN ENTORNOS
MULTIAGENTE. APLICACIÓN A PROBLEMAS DE
GESTIÓN DE TRÁFICO

VICENTE RAMÓN TOMÁS LÓPEZ

UNIVERSITAT DE VALENCIA
Servei de Publicacions
2007

Aquesta Tesi Doctoral va ser presentada a València el dia 19 de Setembre de 2006 davant un tribunal format per:

- D. Francisco Toledo Lobo
- D. Juan Carlos Burguillo Rial
- D. Oscar Belmonte Fernández
- D. Jesús Albert Blanco
- D. Jose Javier Samper Zapater

Va ser dirigida per:

D. Juan José Martínez Durá

D. Luís Amable García Fernández

©Copyright: Servei de Publicacions
Vicente Ramón Tomás López

Depòsit legal:

I.S.B.N.:978-84-370-6674-5

Edita: Universitat de València

Servei de Publicacions

C/ Artes Gráficas, 13 bajo

46010 València

Spain

Telèfon: 963864115

UNIVERSITAT DE VALENCIA
DEPARTAMENT D'INFORMATICA



Tácticas mixtas para la negociación automática de múltiples
servicios con información incompleta en entornos
multiagente. Aplicación a problemas de gestión de tráfico

Tesis Doctoral

Vicente Ramón Tomás López

Directores

Juan José Martínez Durá

Luis Amable García Fernández

Junio 2006

Tácticas mixtas para la negociación automática de múltiples servicios con información incompleta en entornos multiagente. Aplicación a problemas de gestión de tráfico

Memoria para optar al grado de Doctor en Ingeniería Informática
Departamento de Informática
Escola Tècnica i Superior D'Enginyeria
Universitat de Valencia

Directores
Juan José Martínez Durá
Luis Amable García Fernández

Vicente Ramón Tomás López
Junio 2006

D. Juan José Martínez Durá, profesor titular del área de Ciencias de la Computación e Inteligencia artificial de la Universitat de València y,

D. Luis Amable García Fernández, profesor titular del área de Ciencias de la Computación e Inteligencia artificial de la Universitat Jaume I

CERTIFICAN:

Que la presente memoria *Tácticas mixtas para la negociación automática de múltiples servicios con información incompleta en entornos multiagente. Aplicación a problemas de gestión de tráfico* ha sido realizada bajo su dirección, en el Departamento de Informática de la Universitat de València, por **Vicente Ramón Tomás López**, y que consideramos que está apta para su lectura con el fin de optar al grado de Doctor en Ingeniería Informática.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, presentamos ante la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la Universitat de Valencia, a 10 de Junio de 2006.

Los directores

Juan José Martínez Durá

Luis Amable García Fernández

A mi familia y amigos.

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 José Martínez y Luis Amable García, su tiempo y confianza. Gracias por orientarme y dirigirme a lo largo de todo el proceso. Su apoyo ha hecho posible la realización de esta tesis.

Quisiera agradecer también a los componentes del grupo AiA y en especial a su responsable, Luis Amable, 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. En especial, destacar a Maria Herrero, Arturo Sáez y Rafael Lucia por su colaboración y su disposición para prestarme ayuda. Quisiera también agradecer al doctor J. Javier Samper por todos sus comentarios acerca de las tecnologías relacionadas con la aplicación de los sistemas multiagente a la gestión del tráfico.

Agradecer también a Leo Van Der Berg y a Miroslav Svitek su ayuda para hacer posible mi estancia en el Laboratory of Telematics del Department of Control Engineering de la Czech Technical University of Prague.

A mis compañeros de la UJI, en especial a Merche, Alfredo, Nacho, Juan,... por todo el apoyo que me han prestado a lo largo de la tesis.

Gracias a la Dirección General de Tráfico y en especial a Federico Fernández, Enrique Belda y Ana Luz Jiménez, por compartir su conocimiento y por las facilidades prestadas.

Por último, 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.

A todos, gracias.

Índice general

Agradecimientos	IX
Prólogo	XXIII
I Revisión Tecnológica y Científica	1
1. Sistemas Inteligentes de Transporte	3
1.1. Introducción	4
1.2. Definición y Objetivos	4
1.3. Categorización de ITS	5
1.3.1. Usuarios ITS	6
1.3.2. Categorías de Sistemas ITS	6
1.3.3. Servicios ITS	7
1.4. Gestión del Tráfico	10
1.4.1. Centros de Gestión de Tráfico	10
1.4.2. Estrategias de Gestión y Control de Tráfico	11
1.4.3. Planes de Gestión de Tráfico	13
1.5. Conclusiones	20

2. Sistemas Multiagente	23
2.1. Agentes y Sistemas Multiagente	23
2.2. Tecnología de Agentes	26
2.2.1. Contexto Tecnológico	26
2.2.2. Tendencias Emergentes	28
2.3. Arquitecturas de Agente	29
2.3.1. Arquitecturas Deliberativas	30
2.3.2. Arquitecturas Reactivas	31
2.3.3. Arquitecturas Híbridas	32
2.3.4. La arquitectura FIPA	33
2.4. Interacciones entre Agentes	34
2.4.1. Comunicación	35
2.4.2. Coordinación	36
2.4.3. Cooperación y Negociación	36
2.5. Métodos y Herramientas para el Desarrollo de Agentes	37
2.5.1. Modelado de Agentes	37
2.5.2. Plataformas de Agentes	42
2.6. Ontologías y Gestión del Conocimiento	46
2.6.1. El Modelo de Referencia de Contenido de JADE	47
2.7. Evolución de la Tecnología de Agentes	49
2.8. Aplicaciones de los SMA al Tráfico Rodado	51
2.9. Conclusiones	56
3. Negociación Estratégica	59
3.1. Introducción	59

<i>Índice general</i>	XIII
3.2. Conceptos sobre Negociación y Teoría de Juegos	60
3.2.1. Estrategias de Negociación	62
3.2.2. Información del Entorno de Negociación	63
3.3. Juegos Extensivos	64
3.3.1. Juegos Extensivos con Información Completa	64
3.3.2. Juegos Extensivos con Información Incompleta	66
3.4. El Protocolo de Negociación	68
3.4.1. Componentes de un Protocolo de Negociación	68
3.4.2. Entorno de Negociación	69
3.4.3. Reglas de Encuentro	70
3.4.4. Estrategias e Información sobre la Negociación	75
3.5. Análisis de Resultados	75
3.6. Protocolos de Negociación	76
3.7. Conclusiones	80
II Propuestas y Contribuciones	81
4. Búsqueda de la Solución al Problema	83
4.1. Origen del Problema	83
4.2. Cuestiones Planteadas	84
4.3. Hoja de Ruta	85
5. Protocolo de Negociación Multiservicio	89
5.1. Introducción	90
5.2. El Entorno de Negociación	92

5.3.	El Protocolo de Negociación	95
5.3.1.	Situación de Conflicto	97
5.3.2.	Función de Utilidad	98
5.3.3.	Generación de Ofertas y Contraofertas	98
5.3.4.	Estado de Información/Conocimiento de los Agentes	104
5.4.	Escenarios de Negociación	107
5.4.1.	Agenda Completa con Servicio Óptimo	110
5.4.2.	Agenda Completa Sin Servicio Óptimo	112
5.4.3.	Agenda Incompleta	114
5.4.4.	Tácticas Temporales Óptimas por Servicio	115
5.4.5.	Tres Ejemplos del Comportamiento del Protocolo Propuesto	124
5.5.	Estrategias de Negociación	130
5.5.1.	Estrategias Óptimas con Información Incompleta	131
5.6.	Evaluación del Protocolo de Negociación	135
5.6.1.	Análisis de la Convergencia	136
5.6.2.	Equilibrio de la Negociación	137
5.7.	Conclusiones	139
6.	Negociación para el Desarrollo de Itinerarios Alternativos	141
6.1.	Introducción	142
6.2.	Definición del Problema	143
6.3.	Entorno de Aplicación	144
6.4.	Protocolo de Negociación	148
6.4.1.	Negociación sobre un Itinerario Combinado	150
6.4.2.	Negociación sobre Múltiples Itinerarios Combinados	156

6.4.3. Generación de Ofertas y Contraofertas	161
6.5. Escenarios de Negociación	164
6.5.1. Tácticas Temporales Óptimas	165
6.5.2. Ejemplo del Comportamiento del Protocolo	167
6.6. Estrategias de Negociación	170
6.6.1. Estrategias Óptimas de Negociación con Información Incompleta	171
6.7. Evaluación del Protocolo de Negociación	174
6.7.1. Análisis de la Convergencia	174
6.7.2. Equilibrio de la Negociación	175
6.8. Conclusiones	176
7. Un Entorno Multiagente para la Gestión del Tráfico	179
7.1. Introducción	179
7.2. Modelo de Conocimiento	181
7.2.1. Dominio del Tráfico Interurbano	182
7.3. Diseño del Sistema	187
7.3.1. Modelo de Organización	188
7.3.2. Modelo de Conocimiento del Sistema Multiagente	189
7.3.3. Modelo de Agentes	194
7.3.4. Modelo de Interacciones	197
7.3.5. Modelo de Entorno	202
7.4. Estrategias de Gestión de Tráfico	203
7.4.1. Determinación de Itinerarios Alternativos	204
7.4.2. Difusión via PMV	206
7.5. Implementación del Sistema	209

7.6. Conclusiones	212
III Conclusiones	215
8. Conclusiones	217
8.1. Aportaciones	217
8.2. Líneas de Investigación y Trabajos Abiertos	225
Bibliografía	231
IV Anexos	241
Glosario	243
Notación Matemática Capítulo 5	245
Notación Matemática Capítulo 6	247
Proyectos Internacionales	249
DATEX	255
Publicaciones	261

Índice de figuras

1.1. Relación entre los servicios ITS.	9
1.2. Proceso de gestión de tráfico.	11
1.3. Ejemplo de una tabla de operación de un PGT	16
1.4. Fases de actuación de un PGT.	17
1.5. Ejemplo de un plan en formato XML.	19
2.1. Modelo de referencia FIPA	35
2.2. Aspectos de un SMA según la metodología Ingenias	41
2.3. Entorno de agentes Grasshopper	43
2.4. Plataforma de agentes JADE distribuida sobre varios contenedores . .	46
2.5. Evolución de la tecnología de agentes	51
2.6. Sistema TRYS y TRYSA	53
3.1. Ejemplo de subjuegos	65
3.2. Árbol de un juego extendido con información incompleta.	67
3.3. Representación de la función $\phi_r^a(t)$	73
4.1. Proceso seguido en la búsqueda de soluciones.	88
5.1. Ejemplo de la evolución de la negociación sobre un recurso	94

5.2.	Ejemplo de evolución de las ofertas realizadas por el agente a sobre el recurso r que gestiona	104
5.3.	Ejemplo de evolución de las ofertas realizadas por el agente a sobre el recurso r que no gestiona	105
5.4.	Relaciones entre los tiempos de negociación y el tiempo de frontera .	108
5.5.	Árbol de negociación de un protocolo con agenda completa y un servicio óptimo	112
5.6.	Árbol de negociación de un protocolo con agenda completa sin servicio óptimo	113
5.7.	Árbol de negociación de un protocolo con agenda incompleta	115
5.8.	Tácticas de negociación iniciales del ejemplo 1.	126
5.9.	Evolución de las tácticas de negociación del ejemplo 1.	127
5.10.	Evolución de las tácticas de negociación iniciales del ejemplo 2	128
5.11.	Evolución de las tácticas de negociación del ejemplo 3.	130
5.12.	Conjunto de posibles estrategias sobre un recurso.	133
6.1.	Entorno de tráfico interurbano.	145
6.2.	Secuencia de negociación de un itinerario	151
6.3.	Relación entre los tiempos de negociación.	160
6.4.	Ejemplo de tácticas de negociación iniciales.	169
6.5.	Ejemplo de las tácticas de negociación al considerar los eventos de negociación	171
7.1.	Ejemplo de una sección de carretera con los objetos que la componen.	183
7.2.	Conceptos del subdominio de equipamiento.	186
7.3.	Arquitectura del sistema.	188
7.4.	Modelo de organización.	190

7.5. Relaciones entre los conceptos del modelo de conocimiento.	193
7.6. Modelo de tareas de los agentes Meteo y Manager.	195
7.7. Protocolos de interacción para el registro del agente Manager y de un agente meteo.	199
7.8. Ejemplo de protocolos de interacción	201
7.9. Modelo de entorno del sistema.	203
7.10. Ejemplo de interacciones.	206
7.11. Ejemplo gráfico del diccionario de datos	208
7.12. Vista del interfaz gráfico del CGT de Valencia.	211
8.1. Conjunto de posibles estrategias sobre un recurso	220
8.2. Conjunto de posibles estrategias sobre un recurso	221
8.3. Negociación de tres agentes sobre el recurso r^1	226
8.4. Negociación de tres agentes sobre el recurso r^3	227
8.5. Negociación de tres agentes sobre el recurso r^2	228

Índice de tablas

5.1. Ejemplo de Servicios y su clasificación	102
5.2. Escenarios de negociación.	108
5.3. Combinación de escenarios.	109
5.4. Tácticas temporales óptimas por Servicio para el escenario 1	119
5.5. Tácticas temporales óptimas por Servicio para el escenario 2	121
5.6. Tácticas temporales óptimas por Servicio para el escenario 3	123
5.7. Tácticas temporales óptimas por Servicio para el escenario 4	124
6.1. Intervalos de negociación para cada itinerario.	147
6.2. Tácticas temporales óptimas por itinerario para el escenario 1	166
6.3. Tácticas temporales óptimas por itinerario para el escenario 2	167
6.4. Tácticas temporales óptimas por itinerario para el agente cooperador en el escenario 3 y 4	168

Prólogo

Introducción

La creciente importancia del fenómeno de la interacción entre sistemas informáticos ha modificado la forma tradicional de analizarlos y programarlos, puesto que éstos han pasado de ser considerados como sistemas aislados a ser fundamentalmente concebidos como sistemas distribuidos. La necesidad de interactuar entre los componentes del sistema es cada vez más importante para poder realizar o resolver tareas conjuntas que de forma individual serían muy costosas o incluso imposibles de desarrollar (por ejemplo, porque los recursos necesarios para resolver una tarea estén distribuidos entre distintos componentes del sistema).

No obstante, los sistemas informáticos, que deben alcanzar sus propios objetivos operacionales, no siempre se encuentran dispuestos a compartir o ceder los recursos necesarios para desarrollar las acciones que otros sistemas informáticos solicitan, puesto que pueden surgir conflictos de interés. El análisis y los principios de resolución de los conflictos de intereses ha sido tradicionalmente el ámbito de estudio de la teoría de juegos de von Neumann y Morgenstern [vNM44]. La teoría de juegos ha sido aplicada, desde su fundación, al ámbito de la Microeconomía [DBS03] en el que se han desarrollado distintos protocolos de interacción aplicables a los conflictos de intereses (subastas, votaciones, regateos, equilibrios de mercado, etc.) junto con los parámetros que permiten evaluar los resultados de su aplicación [OR94] (por ejemplo, los criterios de bienestar social, equilibrio de Nash, simetría, óptimo de Pareto, etc.).

La adaptación de los resultados obtenidos en Microeconomía a los sistemas informáticos ha beneficiado a ambos ámbitos. Las interacciones y conflictos de intereses estudiados en Microeconomía han sido tradicionalmente realizadas por humanos, mientras que en los sistemas informáticos estas interacciones y conflictos son producidos y resueltos por sistemas automáticos programables.

En el ámbito informático se han desarrollado nuevos paradigmas de diseño de sistemas que incorporan mecanismos de interacción, adaptados de la Microeconomía, para resolver conflictos de intereses.

Entre estos paradigmas destacan la teoría de agentes y sistemas multiagente. Un agente software se define atendiendo a tres principios fundamentales [Woo02]: Proactividad, Reactividad y Sociabilidad. Por proactividad se entiende la ejecución dirigida a alcanzar sus objetivos operacionales sin la intervención continua del usuario, es decir, los agentes software exhiben un comportamiento autónomo. La reactividad expresa la capacidad del agente para responder a los cambios que se producen en el entorno en tiempo y forma adecuada, es decir, el agente interactúa con el entorno y como consecuencia puede modificar sus acciones para poder alcanzar sus objetivos operacionales. Por último, las competencias y recursos necesarios para poder seguir alcanzando estos objetivos operacionales pueden estar distribuidos entre distintos agentes, por lo que es necesario considerar mecanismos que permitan a los agentes coordinarse mediante el intercambio de mensajes, es decir, considerar sociedades de agentes.

El ámbito de investigación en agentes y sistemas multiagentes es muy activo. Un ejemplo de esta gran actividad queda reflejado en las sucesivas redes de excelencia de la Unión Europea dedicadas a la tecnología de agentes: *AgentCities.NET: Testbed for a Worldwide Agent Network*(2001-2003) [AGE05a] y *AgentLink: Europe's ESPRIT-funded Network of Excellence for agent-based computing* (iniciada en el año 1999 con AgentLink I, que posteriormente se amplió a AgentLink II, en el periodo 2001-2003 y la actual AgentLink III) [AGE05b]. AgentLink esta compuesta por 131 organizaciones de 20 países diferentes, 37 de las cuales pertenecen al sector industrial. Otro ejemplo de la repercusión de esta tecnología se puede apreciar con la revista *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* que fue creada en el año 2002 y ya se encuentra entre las 25 revistas con mejor índice de impacto en el área de la Inteligencia Artificial [ISI06]. Si nos centramos en el marco de las interacciones podemos también detectar la relevancia que estos mecanismos tienen en la tecnología multiagente. Por ejemplo, analizando los artículos presentados en la conferencia *AAMAS'06 - Autonomous Agents & MultiAgent Systems*¹ se observa que un 45,6 % de los aceptados están relacionados con temas de coordinación y negociación. También es de destacar que que los *Computers and Thought Award - IJCAI* de los años 1999 y 2003 han sido otorgados respectivamente a Nicholas R. Jennings y Tuomas Sandholm, dos de los investigadores más influyentes en la negociación multiagente.

¹La serie de conferencias AAMAS fue iniciada en el año 2002 como la unión de tres conferencias de prestigio: AGENTS (International Conference on Autonomous Agents), ICMAS (International Conference on Multi-Agent Systems) y ATAL (International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages) y sirve de referencia para analizar la evolución de la tecnología de agentes en los próximos años.

Además, es importante destacar que la tecnología de agentes está siendo aplicada a un gran número de dominios [Lea05] (aunque quizás faltan más desarrollos con problemas reales para que esta tecnología alcance un estatus competitivo de aplicabilidad de otras tecnologías de uso común). Entre estos dominios se encuentra los sistemas de tráfico y transporte por carretera, donde la tecnología de agentes puede proporcionar un nuevo enfoque para proporcionar nuevas propuestas de solución.

El dominio de los transportes y el tráfico por carretera, distribuido tanto geográficamente como funcionalmente, está compuesto por extensas redes viarias, gestionadas por diferentes organizaciones que disponen de una gran diversidad de equipamiento en estas carreteras. La gestión y control del tráfico consiste en la utilización adecuada del equipamiento para capturar la información de la carretera, procesarla para poder determinar el estado de la circulación y desarrollar las estrategias de gestión apropiadas para cada estado.

Un punto importante a tener en cuenta en el dominio del tráfico, es el elevado número de organizaciones involucradas en su gestión y control. Cada una tiene una estructura organizativa propia, con objetivos de gestión autónomos y enfocados a la correcta gestión de las carreteras bajo sus competencias. Para ello, disponen de un conjunto de sistemas propios (sensores, sistemas de planificación y modelado, sistemas de difusión de información, etc.) que permiten alcanzar estos objetivos.

Sin embargo, la red de carreteras de cada organización no se encuentra aislada, sino que tiene otro conjunto de carreteras adyacente, gestionada por otra organización, con sus propios objetivos de gestión. Ahora bien, el tráfico es un entorno muy dinámico y las incidencias que ocurren en una red viaria pueden evolucionar rápidamente y afectar a redes adyacentes.

Así pues, la necesidad de desarrollar estrategias coordinadas de gestión de tráfico en redes viarias es un reto importante. Sin embargo, para poder aplicar las estrategias adecuadas a cada situación es necesario disponer del máximo de información posible, para no crear nuevos problemas o trasladar los existentes a otras áreas cercanas. Por consiguiente, es necesario el desarrollo de mecanismos que permitan, en tiempo real, no sólo la integración y el intercambio de información sino también la coordinación de actividades para mejorar los flujos de tráfico y la seguridad vial.

La aplicación de nuevas tecnologías para solucionar estos y otros problemas, está proporcionando el desarrollo de un conjunto de sistemas conocidos como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) [McQ99]. Estos sistemas permiten mejorar la gestión del tráfico y aumentar la seguridad vial haciendo un mejor uso de las infraestructuras viarias existentes y optimizar su utilización, debido a la imposibilidad de que estas crezcan de la misma forma que lo hacen los volúmenes del tráfico.

Motivación

El grupo *AiA - Applying intelligent Agents* de la Universitat Jaume I de Castellón centra su investigación en la tecnología de agentes. Las líneas básicas de investigación son el desarrollo teórico de entornos multiagentes y su posterior aplicación a dominios reales. *AiA* participó en la red de excelencia europea AGENTLINK II, y actualmente forma parte de la red temática española AGENTCITIES.ES², cuyo objetivo principal es la creación de un entorno innovador para la comunicación de agentes inteligentes.

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 servicios compuestos por múltiples recursos, donde los participantes negocian en un entorno de información incompleta sobre todos los servicios, y por lo tanto, sobre todos los recursos a la vez.

Por otra parte, el trabajo en el grupo de investigación *LISITT - Laboratorio Integrado de Sistemas Inteligentes y Tecnologías de 3a información en tráfico* (integrado en el Instituto de Robótica de la Universitat de València) relacionado con los Sistemas Inteligentes de Transporte me ha permitido tener un conocimiento detallado del dominio del tráfico interurbano y de los sistemas existentes para su gestión y control. En este ámbito las interacciones son imprescindibles para el desarrollo de estrategias coordinadas.

En concreto, la participación en los proyectos ARTS y SERTI, me ha permitido trabajar en las siguientes actividades relacionadas con los planes de gestión de tráfico: el diseño de una metodología europea para su creación, la implementación de un prototipo basado en HTML como soporte al usuario para su activación, la mejora del prototipo mediante el desarrollo de un modelo de información basado en XML para mejorarlos y por último, el desarrollo de estrategias de coordinación para la activación de medidas de gestión en entornos fronterizos.

Ha sido en esta última parte del trabajo, el desarrollo de estrategias de tráfico coordinadas y la participación en diversos grupos de expertos europeos, donde se detectó la necesidad de crear mecanismos de coordinación entre centros de gestión de tráfico para la activación de estrategias de gestión de tráfico compartidas.

²AGENTCITIES.ES esta formada por 18 grupos de investigación pertenecientes a diferentes centros públicos españoles [AGE06].

Aproximación al Problema

El incremento del tráfico por carretera, unido a su comportamiento dinámico y a otros factores externos (problemas meteorológicos, eventos públicos, etc.) genera incidentes que afectan a la vialidad de la carretera.

Para solucionar o paliar los problemas producidos por estos incidentes, los organismos encargados de la gestión del tráfico deben desarrollar estrategias de gestión que garanticen la circulación. Una de estas estrategias es la activación de itinerarios alternativos, que permite a los usuarios de la red viaria alcanzar sus destinos evitando los problemas producidos por el incidente.

Sin embargo, la activación de un itinerario debe realizarse de manera controlada para no trasladar los problemas a otras áreas. Por consiguiente, las organizaciones responsables de la gestión de las carreteras que componen estos itinerarios, tanto el principal donde ocurre el incidente como los alternativos, deben negociar una solución factible que proporcione un redireccionamiento del tráfico adecuado, evitando crear nuevos incidentes en otros puntos de la red.

Las características distribuidas de este entorno, el volumen de información a analizar y la necesidad de alcanzar acuerdos lo más rápido posible, requieren la utilización de entornos donde se puedan aplicar técnicas de negociación automática, como los sistemas multiagente.

Ahora bien, el diseñar e implementar correctamente protocolos de negociación automática en sistemas informáticos autointeresados³ presenta un conjunto de problemas asociados:

- El conocimiento parcial que los agentes tienen del resto de agentes y del entorno del protocolo de negociación.
- La valoración que los agentes tienen de los elementos a negociar y sobre la posible situación de conflicto. Es decir, si un agente no valora lo suficientemente un elemento de la negociación o sabe que no va a perder nada por no alcanzar un acuerdo, no estará lo suficientemente motivado para intentar alcanzarlo.
- A pesar de que las características de la negociación, que deben definirse, son conocidas, su especificación y posterior implementación en un protocolo de negociación depende en gran manera de las características intrínsecas de como se va a realizar la negociación y de su dominio de aplicación.

³Como es el caso de los sistemas multiagentes.

- Las estrategias que los agentes deben desarrollar para alcanzar los acuerdos deben estar directamente relacionadas con las posibles situaciones que pueden producirse a lo largo de la negociación. Es por tanto necesario realizar un análisis detallado de los posibles escenarios en los que los participantes se pueden encontrar.
- La determinación del orden y de la forma en la que los agentes actúan, puede condicionar el resultado de la negociación, y debe tenerse en cuenta para evitar fracasos o desequilibrios en la negociación.

Además de estos problemas, aparecen otros problemas cuando la negociación no implica únicamente a un elemento a negociar, sino que los participantes deben intentar alcanzar acuerdos sobre varios elementos en una única negociación. En este ámbito, se han desarrollado diferentes protocolos [FWJ04a], [BH99] basados en la utilización iterativa de protocolos con un único elemento. Sin embargo, esta adaptación sólo es válida en entornos concretos, donde los elementos a negociar son independientes, es decir, no están relacionados entre si, por lo que el acuerdo o desacuerdo sobre un elemento no afecta a la negociación del resto de elementos.

Sin embargo, existen situaciones, como la negociación sobre itinerarios alternativos en el tráfico por carretera, en la que es necesario negociar sobre múltiples elementos a la vez. En estas situaciones el protocolo de negociación debe abordar los siguientes aspectos:

- El resultado de la negociación puede estar formado por una combinación de acuerdos sobre elementos que aporten una solución conjunta.
- La relación existente entre los elementos que forman parte de la negociación.
- Cómo afectaría a la negociación la implementación secuencial, es decir, el acuerdo sobre un elemento implicaría que éste pasara a desarrollarse, lo que afectaría al escenario de negociación y consecuentemente a las estrategias de negociación sobre el resto de elementos a negociar. Por ejemplo, un acuerdo que en un instante t podría ser considerado como óptimo, podría no serlo cuando se alcance un acuerdo sobre otro elemento en un instante t' posterior.

Objetivos

El objetivo general de esta tesis es presentar un *nuevo protocolo de negociación que permita a los participantes alcanzar los mejores acuerdos posibles para la presta-*

ción de servicios coordinados mediante la combinación de diferentes tácticas en un entorno dinámico. Así pues, esta tesis se centra en proponer el protocolo y adaptarlo a un dominio real de aplicación, en concreto el dominio del tráfico interurbano. Para conseguir este objetivo general deben resolverse los siguientes subobjetivos:

1. *Proponer un modelo de negociación de múltiples servicios, en el que cada servicio puede estar compuesto de múltiples recursos.*

Este modelo desarrolla un marco de negociación capaz de tratar con múltiples servicios donde los servicios pueden combinarse para formar una solución posible y en el que los acuerdos o desacuerdos sobre alguno de los servicios condiciona la evolución de la negociación sobre el resto y, por lo tanto, sobre la solución final. Un servicio sólo se considerará acordado cuando existan acuerdos sobre todos los recursos que lo componen.

2. *Proponer cuáles serán las mejores tácticas posibles a utilizar en el protocolo para poder alcanzar los mejores acuerdos en un entorno dinámico y con implementación secuencial.*

Hay que analizar cuáles son las tácticas propuestas en este tipo de negociaciones para identificar sus ventajas e inconvenientes. Como consecuencia de este análisis hay que proponer nuevas tácticas o adaptar las existentes a este nuevo protocolo de negociación para tratar de reducir los inconvenientes previamente identificados.

3. *Analizar y evaluar las diferentes situaciones que se pueden producir a lo largo de la ejecución del protocolo de negociación.*

La identificación de los posibles escenarios que se pueden producir en la negociación es fundamental para que los agentes puedan modificar su comportamiento ajustando sus tácticas y estrategias según evolucione tanto el entorno como el proceso de negociación.

4. *Estudiar un posible dominio de aplicación del protocolo: los sistemas avanzados de gestión de incidentes de tráfico.*

Este estudio debe proporcionar un análisis del entorno de la gestión del tráfico interurbano que identifique sus componentes así como la problemática existente. Este estudio determinará la viabilidad de aplicar el protocolo de negociación multiservicio a este dominio.

5. *Adaptar el protocolo de negociación a un entorno real, en el dominio del tráfico interurbano.*

La adaptación del protocolo desarrollado al entorno de la gestión de tráfico requerirá modificar algunas de sus características genéricas. Por consiguiente, es necesario el estudio de las variables, en el dominio del tráfico, que componen

las ofertas y contraofertas, las situaciones de conflicto y la valoración que los agentes realizan de cada una de ellas.

6. *Diseñar e implementar un sistema multiagente alternativo a los actuales sistemas de gestión de incidencias que implemente el protocolo de negociación propuesto.*

El diseño e implementación del sistema considerará los siguientes aspectos: 1) utilización de un paradigma orientado a agentes, 2) definición de un modelo de representación de conocimiento genérico para el dominio del tráfico, 3) desarrollo de un modelo de comunicaciones que permita la interacción entre los agentes y 4) implementación en una plataforma multiagente. Además, las necesidades de interacción del sistema con otros agentes, externos a esta plataforma, conlleva que el desarrollo de los protocolos de interacción sean realizados cumpliendo los estándares de FIPA.

Organización de la Tesis

La presente memoria de la tesis se estructura en tres partes:

En la primera parte, formada por los tres primeros capítulos, se presenta una revisión tecnológica y científica. En el capítulo primero, se presentan los Sistemas Inteligentes de Transporte. En él, se revisan brevemente las características específicas del dominio del tráfico y de las estrategias de gestión y control del tráfico. Además, también se describen los planes de gestión de tráfico frente a incidentes y cuál es la problemática existente en la actualidad para su desarrollo.

En el segundo capítulo se describe la tecnología de agente y su aportación en el marco de la inteligencia artificial. Se describe el contexto tecnológico que ha permitido el desarrollo de estos sistemas y cuales son las tecnologías emergentes en las que los sistemas multiagente están involucrados. A continuación se repasan brevemente las arquitecturas, plataformas y herramientas para el desarrollo de agentes. El capítulo se completa con la evolución prevista de la tecnología y con una revisión de los sistemas multiagentes aplicados al tráfico.

En el capítulo tercero se presenta el estado del arte de la negociación estratégica que describe los conceptos básicos de la teoría de juegos y las diferentes clasificaciones existentes, para posteriormente centrarse en los juegos extensivos y en los protocolos de negociación. Estos protocolos presentan un importante avance a la hora de implementar mecanismos de cooperación ya que definen las reglas de cómo debe realizarse la negociación. En la última parte del capítulo se presentan los pro-

protocolos desarrollados hasta la fecha en distintos dominios de aplicación.

Una vez identificadas y analizadas las tecnologías necesarias, para poder comprender y resolver el problema, se exponen en la segunda parte de la tesis las aportaciones realizadas a la comunidad científica, y se describen las soluciones propuestas para resolver los problemas detectados. En el cuarto capítulo se presenta el origen del problema, las cuestiones planteadas y la hoja de ruta seguida para la obtención de soluciones.

En el capítulo quinto se expone un nuevo protocolo de negociación con múltiples elementos relacionados entre sí. Esta propuesta de protocolo permite las negociaciones para la provisión de servicios, donde existe un conjunto de posibles soluciones no únicas y, además, los acuerdos o desacuerdos sobre algún servicio afectan a la evolución de la negociación.

En el sexto capítulo se analiza el dominio del tráfico interurbano y se adapta la negociación multielemento a este dominio, en concreto, a la negociación de itinerarios alternativos. Para ello se define: el entorno de negociación, las características propias del entorno del tráfico y su influencia en la negociación.

En el séptimo capítulo se presenta el sistema multiagente resultante de la integración de los resultados expuestos anteriormente. En primer lugar se describe el modelo de conocimiento realizado, que abarca tanto el dominio del tráfico interurbano, en general, como el dominio de conocimiento propio del sistema multiagente. A continuación se expone el diseño del sistema, para en último lugar, describir la implementación realizada.

En la tercera y última parte de la tesis se presentan las conclusiones generales de la tesis, los logros obtenidos y las líneas de trabajo futuras para la ampliación y mejora de cuestiones de interés que quedan fuera del alcance de la presente tesis.

Parte I

Revisión Tecnológica y Científica

Capítulo 1

Sistemas Inteligentes de Transporte

La evolución de la tecnología y su aplicación a la ingeniería del transporte ha hecho posible la creación de nuevos sistemas y servicios que permiten gestionar de manera más eficiente las infraestructuras de transporte. Estos sistemas se conocen como los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS¹).

Los sistemas ITS permiten a las organizaciones encargadas de la gestión y control de la red viaria, realizar una gestión más eficiente de los flujos de tráfico y aumentar la seguridad vial de los conductores. Estas mejoras son posibles gracias al desarrollo de diferentes servicios que permiten, tanto a los operadores como a los usuarios, conocer el estado del tráfico y estar informados de la existencia de posibles incidencias con antelación para poder actuar en consecuencia.

En este capítulo se presenta el concepto de ITS y su influencia en la ingeniería del tráfico, describiendo los sistemas y servicios más importantes desarrollados hasta la actualidad. Una vez descritos los servicios, se expone el dominio de gestión del tráfico. En este dominio se introduce el concepto de centro de gestión de tráfico, sus objetivos y cuál es su estructura genérica, para posteriormente describir como se utilizan los sistemas ITS en el desarrollo de estrategias de gestión. Se exponen los planes de gestión de tráfico y su relevancia en la gestión y control de la red viaria. La importancia de estos planes ha llevado a la creación de una metodología internacional y a la construcción de diversos prototipos informatizados para dar soporte al operador.

¹De sus siglas en inglés, Intelligent Transport Systems.

1.1. Introducción

El incremento en el uso de los transportes va unido al desarrollo económico y la competitividad. En este sentido, el transporte aumenta la movilidad en Europa, fomenta la circulación de personas y el intercambio de mercancías, que permite crear nuevos puestos de trabajo y fortalecer el mercado interno. Sin embargo, el crecimiento exponencial del tráfico en la Unión Europea, entre 1970 y 2000, unido a la imposibilidad de mantener un aumento equitativo de infraestructuras, está afectando negativamente a algunas de las ventajas que produce [CON05].

El incremento de los transportes previsto hasta el año 2020 constituye un verdadero desafío para gestores políticos, industriales e investigadores, que deben encontrar fórmulas que permitan conseguir un transporte más eficaz y atractivo para los usuarios, así como reducir el impacto negativo sobre la salud y el medio ambiente. Así pues, es necesario la aplicación de las nuevas tecnologías a la ingeniería del transporte para poder solventar estos problemas.

La telemática y su aplicación es uno de los campos de investigación considerados clave en el desarrollo de nuevas medidas para la ingeniería de transporte y la gestión del tráfico. Los sistemas desarrollados, conocidos como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), permiten la utilización más eficiente de las infraestructuras de transporte, aumentando la seguridad vial, reduciendo las congestiones y los tiempos de recorrido, minimizando el impacto medioambiental y aumentando la comodidad del usuario.

1.2. Definición y Objetivos

El concepto actual de ITS aparece con los trabajos desarrollados en EE.UU en los años 70 y en Japón en los 80. En ambos países se realizaron diferentes proyectos que aplicaban las nuevas tecnologías a la ingeniería del transporte y el tráfico. En aquellos días el concepto de ITS no existía como tal, sino que las actividades y sistemas que se desarrollaban se consideraban como una parte más de la gestión del tráfico. En Europa, inicialmente, se acuña el término de *Road Transport Informatics* (RTI), que posteriormente se definiría como *Advanced Transport Telematics* (ATT). El rango, cada vez mayor, de aplicaciones que se enmarcaban dentro de estos términos propició la aparición del término de ITS, adoptado por Europa, America y Japón, que incluye los sistemas de transporte, tráfico y vehículos [McQ99].

Un sistema ITS se define como un sistema que utiliza métodos y técnicas avan-

zadas, en el marco de las tecnologías de la información y de la comunicación, para la planificación y el desarrollo de los sistemas de transporte [UNI05], [McQ99].

Los ITS están orientados a mejorar la movilidad de personas y mercancías en las infraestructuras viarias existentes, a la vez que representan un ahorro importante a la hora de concebir y/o construir nuevas infraestructuras. Al mismo tiempo, en su aplicación se consiguen importantes beneficios para el conjunto de la sociedad. Por ejemplo, el desarrollo y aplicación de sistemas ITS en otros países, concretamente en EE.UU. y Japón, ha permitido: reducir la accidentalidad entre un 20 y un 50 %, disminuir los tiempos de viaje en los desplazamientos urbanos entre un 8 y un 48 % y aumentar la capacidad vial de la red viaria entre un 8 y un 32 % [ITS05].

Por consiguiente, el objetivo del desarrollo de sistemas ITS pretende conseguir mejoras en cinco áreas fundamentales que representan una problemática común en todos los sistemas de transporte [ITS05]:

1. Incrementar la eficiencia y la capacidad del sistema de transporte.
2. Mejorar la movilidad personal, así como la conveniencia y comodidad del sistema de transporte.
3. Mejorar la seguridad de todo el sistema de transporte.
4. Reducir el consumo de combustible y los costes ambientales.
5. Mejorar las condiciones de productividad económica presentes y futuras de todos los ciudadanos, las organizaciones y el sistema económico en general.

1.3. Categorización de ITS

Con el objeto de normalizar y estandarizar los ITS, la organización ISO² y más concretamente su grupo de trabajo *ISO TC204 WG1* (Architecture, Taxonomy & Terminology) trabaja en el desarrollo de la norma *Transport Information and Control Systems (TICS) Reference Model. Architecture(s) for the TICS Sector. Part 1 TICS Fundamental Services*. En el marco de esta norma, ISO ha definido diferentes conceptos como *usuarios, categorías y servicios* [ISO00].

²La ISO, (Organización Internacional de Estandarización), es una red compuesta por los organismos nacionales de estandarización de 156 países.

1.3.1. Usuarios ITS

Un usuario ITS es *aquél que interactúa con proveedores de servicios ITS para obtener los beneficios de un servicio ITS*.

Los usuarios se clasifican en dos grupos bien diferenciados:

- Usuarios ITS *externos*: Aquéllos que interactúan con el sistema ITS a través de interfaces externos. Los interfaces y usuarios externos definen el límite de aplicación del sector ITS.
- Usuarios ITS *internos*: Aquéllos que interactúan con el sistema ITS a través de los interfaces propios del sistema ITS. Es un usuario que recibe, directa o indirectamente información, y que puede proveer esa información a otro servicio ITS.

Ejemplos de usuarios de ITS externos son: viajeros, conductores particulares, conductores de autobús, turistas, peatones, ciclistas, motoristas, transportistas, agencias de policía, operadores comerciales. Por el contrario, ejemplos de usuarios de ITS internos son: operadores de transporte público, inspectores de vehículos de mercancías, servicios de emergencia, operadores de flota, operadores de control de peaje, operadores de centro de gestión de tráfico, etc.

1.3.2. Categorías de Sistemas ITS

Los ITS se agrupan en tres grandes categorías [BT05]: los sistemas encargados de la *monitorización* del estado del tráfico, los sistemas encargados de la *gestión* del tráfico y por último, los sistemas de *información* al usuario. Otro sistema importante, no incluido dentro de los ITS, es el sistema de comunicaciones.

- Sistemas encargados de la monitorización y captación de información del estado del tráfico. En este grupo se enmarcan:
 - Captura de parámetros de tráfico mediante la cual se obtienen los flujos de tráfico, la velocidad de los vehículos, etc. Existen diferentes tipos de sensores para la obtención de esta información: espiras electromagnéticas, radares, microondas, infrarrojos, sistemas de visión artificial, etc.

- Captura de parámetros meteorológicos que permiten conocer las condiciones atmosféricas que afectan a la circulación. Las estaciones meteorológicas, utilizadas en estos sistemas, permiten conocer la visibilidad de la calzada, la precipitación actual, la presencia de hielo o nieve, la fuerza del viento, etc.
 - *Circuito Cerrado de TeleVisión (CCTV)* que permite a los operadores de los Centros de Gestión de Tráfico tener una imagen en tiempo real de lo que está ocurriendo en los distintos segmentos de la red viaria que gestionan.
- Los sistemas encargados de la gestión y modelado del tráfico en función de la información. Estos sistemas definen el estado del tráfico para cada uno de los segmentos de la red viaria y su posible evolución.

Estos sistemas describen la situación del estado del tráfico, detectan la presencia de incidencias o sucesos que pueden afectar al comportamiento normal del tráfico y alertan a los operadores. Dentro de este conjunto también se incluyen los sistemas de ayuda a la toma de decisiones, que en función de la situación existente, proponen un conjunto de medidas correctoras. Para ello, necesitan de un modelo de la red viaria, esto es, las características específicas (número de carriles, capacidad, ancho del segmento, etc) de cada uno de los elementos que compone la red (entradas, salidas, bifurcaciones, uniones, acuerdos, etc). Dentro de este grupo se encuentran sistemas de planificación y gestión integral de tráfico, prevención y detección de incidentes, etc.

- Los sistemas de información al usuario son los sistemas encargados de difundir la información relativa al tráfico, tanto estática como dinámica, a los usuarios. En este grupo se enmarcan sistemas como la información mediante paneles de mensaje variable, teletexto, RDS-TMC, WEB, WAP, SMS, etc.

1.3.3. Servicios ITS

Un servicio ITS consiste en un producto o una actividad informativa proporcionada a un tipo específico de usuario. Los servicios ITS no representan una tecnología o funcionalidad interna por sí misma, sino que integran tecnologías diferentes pertenecientes a los tres grupos presentados en la sección anterior.

Los diferentes servicios ITS se clasifican en [ISO00]:

- *Información al viajero*: que engloban todos los servicios de difusión de infor-

mación al conductor, destacando la información On-trip, Pre-trip ³ y el guiado mediante navegadores.

- *Gestión y control de tráfico*, donde se enmarcan los servicios enfocados a los organismos encargados de la gestión del tráfico. Este dominio engloba los servicios de control y gestión de tráfico, gestión de la demanda, gestión de incidentes, refuerzo de la seguridad vial, detección y prevención de incidentes, mantenimiento de carreteras, etc.
- *Vehículos*, donde se encuentran los servicios relacionados con las mejoras de los *sistemas de a bordo* en los vehículos. Seguridad activa y pasiva, detección de alcances, conducción automática, etc.
- *Gestión de flotas*, principalmente dirigido a las empresas transportistas y que engloban servicios de gestión de flotas y mercancías, intermodalidad y mercancías peligrosas.
- *Transporte público*, enfocado a la mejora de la gestión de los transportes públicos incluyendo servicios como la gestión del transporte y la difusión de información operacional.
- *Emergencia*, que engloba todos los servicios dedicados a la gestión del tráfico frente a emergencias como la coordinación de itinerarios alternativos y la gestión de accesos a vehículos de emergencia.
- *Pago electrónico*, que enmarca todos los servicios destinados a la gestión electrónica de tarifas de transporte como, por ejemplo, el cobro de peaje electrónicamente sin necesidad de parar el vehículo.
- *Seguridad de los peatones*, que define todos aquellos servicios que desarrollan actividades enfocadas a la protección de los peatones mediante la mejora de los sistemas de transporte. En este grupo se enmarcan servicios como la seguridad en el transporte público, los refuerzos de seguridad para usuarios vulnerables (como por ejemplo, niños o personas discapacitadas, etc).
- *Monitorización* de las condiciones meteorológicas que se encargan de la detección de problemas meteorológicos que afectan a la circulación. En este dominio se incluyen servicios como la gestión de emergencias frente a climatología adversa, la gestión de la información meteorológica y la coordinación con otras agencias de emergencias.

³On-Trip es la información suministrada al usuario mientras está realizando el viaje y Pre-trip es la información disponible por el conductor antes de iniciar el viaje.

- *Gestión de catástrofes*, que enmarca el conjunto de servicios encargados de gestionar recursos multijurisdiccionales para ofrecer respuesta a desastres naturales, problemas de orden público o incluso terrorismo.
- *Seguridad nacional*, que engloba los servicios y actividades directamente relacionados para proteger y mitigar los daños físicos y perjuicios operacionales como respuesta a desastres naturales, problemas de orden público o incluso terrorismo.

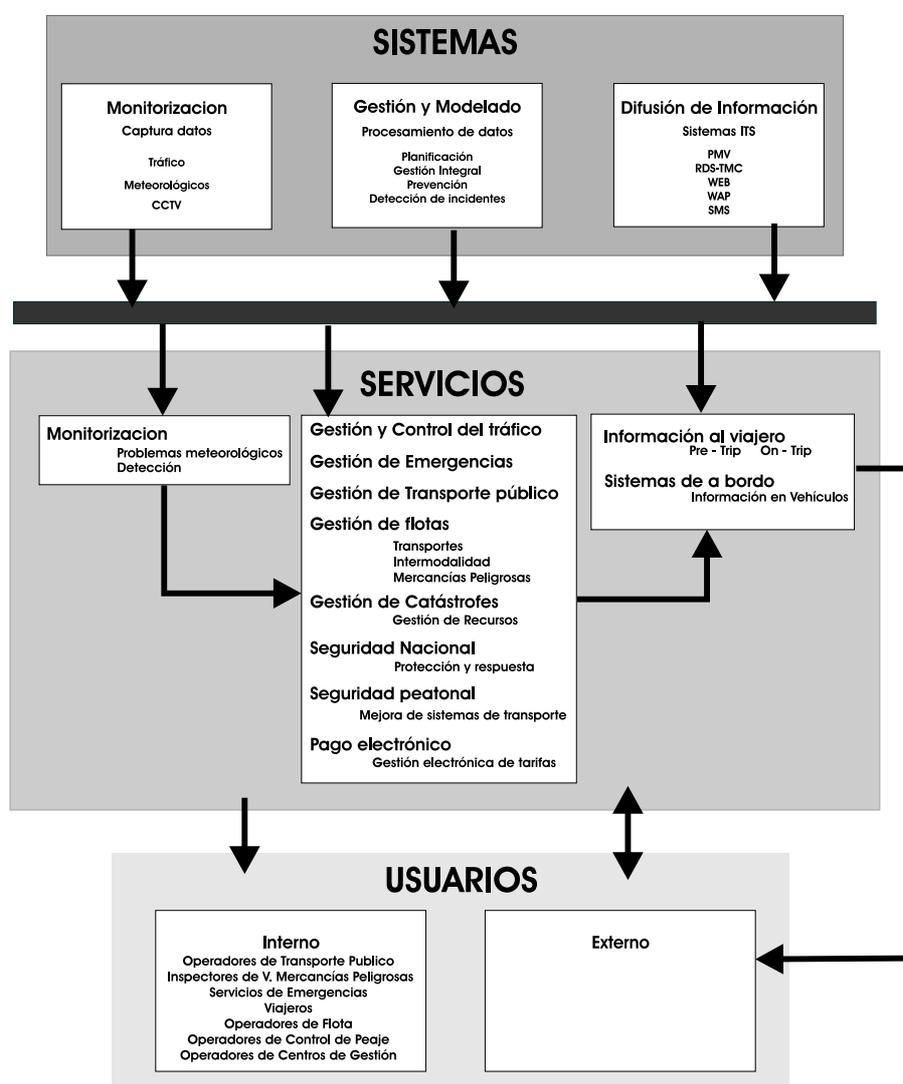


Figura 1.1: Relación entre los servicios ITS.

1.4. Gestión del Tráfico

Del conjunto de servicios ITS, se van a destacar los servicios de Gestión de Tráfico, ya que en este entorno donde se ubica la investigación detallada en esta memoria.

Los objetivos de la gestión del tráfico son: gestionar adecuadamente los flujos del tráfico y mejorar la seguridad vial de las carreteras. Para ello, las organizaciones con competencias en tráfico deben:

- Garantizar la movilidad y la seguridad de la circulación en la red de viaria.
- Mantener y mejorar la capacidad de las infraestructuras administrando los flujos de tráfico por medio del control de la oferta y la gestión de la demanda.
- Difundir información a los usuarios acerca del estado del tráfico. Esta información permite a los usuarios conocer los problemas existentes en la red viaria, estar prevenidos y evitarlos si es posible.

Desde el punto de vista operacional, la gestión del tráfico se desarrolla en base a un ciclo de actividades realizadas de forma constante y retroalimentada. Para poder realizar estas actividades, las organizaciones encargadas de la gestión y el control de tráfico necesitan centros especializados: los *Centros de Gestión de Tráfico (CGT)*. En la figura 1.2 se puede apreciar el proceso de la gestión de tráfico. A partir de los datos puntuales proporcionados por los sensores instalados en la red viaria, el sistema de monitorización proporciona la información del estado del tráfico. Si se produce alguna incidencia, el centro la analiza y prepara las estrategias de gestión adecuadas para resolverla. Estas estrategias modifican el comportamiento del tráfico, que continúa siendo observado por los sensores y se reinicia el proceso.

1.4.1. Centros de Gestión de Tráfico

Los centros de gestión de tráfico son los responsables del desarrollo de las estrategias de gestión y control del tráfico. Para ello, los CGTs recogen, integran y procesan la información proporcionada por los sistemas ITS instalados en las carreteras bajo su competencia.

A partir del objetivo principal, la gestión eficiente del tráfico y el aumento de la seguridad vial, los CGTs se estructuran en diferentes niveles que permiten la clasificación de los procedimientos operacionales.

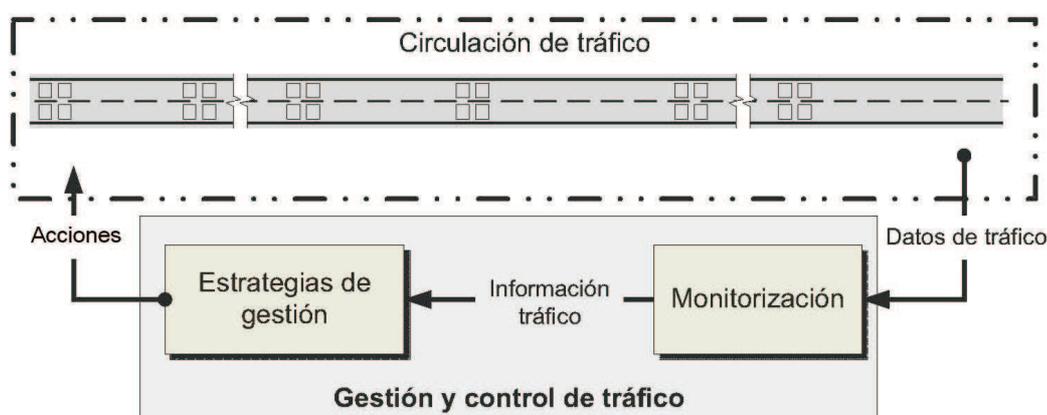


Figura 1.2: Proceso de gestión de tráfico.

Los procedimientos operacionales de un CGT se estructuran en tres capas [BT05]:

- *Gestión Manual*, que representa la capa operacional más baja donde no existe integración con los sistemas ITS. Las actuaciones del CGT las realiza el operador de tráfico, una vez se haya producido un evento que requiera una respuesta (incidente, congestión, etc). El operador debe determinar el problema y aplicar las estrategias de tráfico que considere oportunas.
- *1ª Fase de automatización*. En esta fase, los equipos ITS están parcialmente integrados y son capaces de desarrollar automáticamente estrategias de control de tráfico como la detección y previsión de incidentes y la difusión de información.
- *2ª Fase de automatización*. Esta fase supone la completa integración de los sistemas ITS que existen en un CGT. Esta integración incluye tanto los sistemas de monitorización (datos de tráfico, meteorológicos, etc) y difusión de información como los sistemas de gestión y previsión del estado del tráfico. En esta fase, los CGT son capaces de predecir la evolución del estado del tráfico, lo que permite detectar, por anticipado, las posibles incidencias y determinar las estrategias de gestión óptimas.

1.4.2. Estrategias de Gestión y Control de Tráfico

Las estrategias de gestión de tráfico definen el conjunto de actuaciones que los CGTs desarrollan para la gestión y control del tráfico de una situación concreta. Las estrategias, al ser aplicadas, deben estar en concordancia no solo con el estado

del tráfico del área donde se aplican, sino también con las áreas adyacentes. De otra forma se pueden crear nuevos problemas o transferir los existentes a otras áreas de la red viaria.

Las estrategias se clasifican en función del objetivo que persigan [BT05]:

- *Gestión de puntos singulares.* Los puntos singulares, como túneles o puertos de montaña, necesitan un tratamiento específico y diferenciado debido a sus características. Las estrategias a aplicar precisan de sistemas de monitorización y sistemas de información al usuario.
 - *Túneles.* Los túneles se caracterizan por ser entornos cerrados con número limitado de salidas, luminosidad artificial, ventilación asistida y desde el punto de vista de su gestión necesitan de sistemas de monitorización enfocados tanto al análisis del tráfico como a diferentes parámetros externos que garanticen la salubridad y la seguridad vial en el interior del túnel. La monitorización en los túneles debe detectar la presencia de CO_2 , presencia de humos, grado de visibilidad, luminosidad, etc. Si alguno de estos parámetros dispara una alarma, (es decir, sus valores se salen del rango permitido) el CGT debe actuar en consecuencia. Por ejemplo, si un vehículo se avería, se debe avisar al resto de usuarios mediante la señalización disponible, de su existencia. En cambio, si el vehículo averiado se incendia, el túnel debe ser cerrado de inmediato evacuando lo antes posible a los usuarios que queden atrapados en su interior. También se deben activar los extractores, la iluminación especial de emergencia, etc.
 - *Puertos de montaña.* Los problemas de vialidad en puertos de montaña requieren de un equipamiento y una coordinación específica. La presencia de hielo y nieve en la calzada puede hacer intransitable la misma. Es por ello que el sistema de monitorización debe incluir estaciones meteorológicas equipadas con detectores del estado de la calzada. El sistema de información está compuesto por paneles al inicio del puerto para informar al usuario de su estado y de su vialidad (limpio, necesario el uso de cadenas, cerrado). La coordinación con otros organismos, en especial con los responsables del mantenimiento de la red viaria, es fundamental.
- *Gestión frente a incidentes.* Los incidentes son uno de los principales problemas de la gestión y control del tráfico debido no solo a los problemas circulatorios que provocan sino también a las pérdidas humanas y materiales. Por lo tanto, estas estrategias integran sistemas de monitorización, de gestión y de información al usuario. Las estrategias para la gestión del tráfico frente a incidentes se clasifican en:

- *Preventivas*, que enmarcan aquellos sistemas dedicados a anticipar y gestionar escenarios que conlleven situaciones de peligro.
 - *Detección*, encargadas de la detección de los incidentes una vez se han producido y de gestionar las consecuencias que este provoca sobre la red viaria.
- *Gestión de la demanda*. Las estrategias de control de la demanda se centran en mantener la vialidad y aumentar la capacidad de la red viaria. Para ello, debe restringir el acceso de los usuarios o bien aumentar la capacidad de la red viaria (por ejemplo, mediante carriles adicionales).
 - *Mejora de la seguridad vial*. La seguridad vial es uno de los objetivos principales de la gestión del tráfico. Todas las estrategias anteriores tienen también como objetivo la mejora de la seguridad vial. Ahora bien, existen estrategias centradas en la seguridad vial del usuario.
 - *Informativas*, que permiten conocer al conductor la existencia de incidentes en la red viaria.
 - *Atención de emergencia*, que permiten la comunicación directa del usuario con el operador del CGT.
 - *Refuerzo de legislación*, estrategias que intentan evitar que los usuarios incumplan las normativas de circulación.

Todas las estrategias presentadas se desarrollan mediante la utilización de sistemas ITS. Cuanto mayor es el número de sistemas instalados, mayor es la posibilidad de desarrollar estrategias de gestión y control de tráfico.

1.4.3. Planes de Gestión de Tráfico

Un Plan de Gestión de Tráfico (PGT) es un procedimiento de actuación que define cómo se deben gestionar los incidentes producidos en la red viaria. Un PGT consiste en una serie de medidas documentadas y organizadas que indican las actuaciones que cada una de las organizaciones involucradas en la resolución del incidente debe realizar cuando se produce un incidente en la red viaria. Los PGTs se estructuran en tres niveles de información: *Escenarios*, *Medidas* y *Acciones*.

Fases de desarrollo de un Plan de Gestión de Tráfico

La metodología para el desarrollo de PGTs se divide en cuatro fases [JSTF02] y se ha desarrollado en el marco de los proyectos ARTS [ART05] y SERTI [SER05], que se describen en el anexo IV.

La *primera fase* para desarrollar un PGT es recoger los datos de partida referentes al área de estudio de acuerdo con el alcance y los objetivos del PGT. Se deben establecer de igual modo las definiciones de los parámetros básicos que se emplearán en la gestión del tráfico, como son: los niveles de circulación, las diferentes fases de actuación, la identificación de las autoridades y medios necesarios para llevar a cabo el PGT.

En esta fase también se define el sistema de información. Este se utilizará cuando ocurra el incidente y permitirá la adecuada coordinación de todos los organismos implicados en la ejecución del plan y al mismo tiempo informará de la situación existente y de su posible evolución a los conductores y usuarios. Por último, se debe realizar una previsión, de acuerdo con los medios disponibles, de un sistema de atención y auxilio a los usuarios. Así pues, es necesario prever qué medidas de gestión de tráfico son necesarias para facilitar el acceso de los vehículos de emergencia (ambulancias, bomberos, grúas, etc) a estas zonas.

Una vez se ha recopilado toda la información, se pasa a la *segunda fase*: se tramifica la red viaria a gestionar en segmentos homogéneos y se determinan las tablas de decisión para cada uno de los segmentos, donde se recoge el procedimiento de actuación para cada área afectada. Las tablas de decisión se componen de: *escenarios*, *medidas* y *operación*.

- La tabla de *escenarios* permite describir cuál es la situación actual. Esta situación puede incluir, además de las características propias del incidente (severidad, duración, tiempo estimado para su resolución), otras como los niveles de servicio en el entorno del incidente, las previsiones de tráfico o las climatológicas. Para cada escenario concreto se define un conjunto de medidas que deben ponerse en funcionamiento.
- Tablas de *medidas*, donde se describen todas las medidas de regulación, control y gestión de tráfico que se aplicarán para cada escenario específico, con el objetivo de solucionar el problema o minimizar sus efectos en lo posible. Cada escenario queda definido por el conjunto de medidas de actuación que se aplican en el mismo. No hay dos escenarios diferentes que comprendan el mismo conjunto de medidas. Cada una de las medidas tiene una tabla de operación

donde se describe en detalle el procedimiento operacional para su puesta en marcha.

- Las tablas de *operación* contienen toda la información relevante necesaria para poder activar una medida (Ver figura 1.3).

Las tablas de operación se componen de dos tipos de elementos: *comunes* y *concretos*. Los elementos *comunes* se encuentran en todas las tablas de actuación y son: código de la medida, nombre de la medida, organización responsable de realizarla y criterios de activación o suspensión, tanto temporal como definitivamente. Los elementos *concretos* están relacionados con las características específicas de cada medida. Así pues, una medida para el desarrollo de itinerarios alternativos contendrá el listado de los segmentos que componen el itinerario, los CGTs responsables, los tiempos medios de recorrido, las distancias kilométricas, etc. En cambio, una medida para el almacenamiento de vehículos contendrá información acerca de las áreas de servicio y descanso, las características de cada área: número de plazas (tanto de vehículos ligeros como pesados), servicios de restaurante y hotel, gasolinera, etc.

En la *tercera fase*, una vez el Plan de Gestión de Tráfico ha sido elaborado y se han obtenido las tablas de decisión, es validado por todas las organizaciones implicadas en su puesta en marcha.

En la *cuarta fase*, con el Plan elaborado y validado, se pasará a la evaluación del mismo mediante su aplicación, (bien mediante casos reales si se produjeran o bien mediante simulaciones) con el objetivo de recoger todas aquellas mejoras o cambios en el mismo que puedan hacerlo más operativo, para incluirlas en ulteriores actualizaciones.

En la figura 1.4 se observa el procedimiento de actuación de un plan de gestión de tráfico cuando se produce un incidente en la red viaria. El escenario de situación es determinado a partir de la información del incidente (localización y severidad) y de la influencia en el comportamiento de tráfico que provoca. A partir del escenario, y de su tabla de medidas asociada, se obtienen las medidas específicas que deben aplicarse. Para poder activar las medidas, es necesario desarrollar un conjunto de acciones, definidas en su correspondiente tabla de operación.

Los beneficios de la aplicación son los siguientes:

- Ahorro en los tiempos de viaje, en base a pequeñas mejoras en la densidad del tráfico merced a la posibilidad de elección de itinerarios alternativos.

N-I Puerto de Somosierra y el Portachuelo		PUNTOS DE CONTROL	
CRITERIOS DE ACTIVACIÓN	CRITERIOS DE SUSPENSIÓN TEMPORAL	CRITERIOS DE DESACTIVACIÓN	
Fase de alerta (S0)		Fin de operación (S7)	
REALIZACIÓN DE LA MEDIDA			
ACTIVACIÓN Comunicación a la ATGC, mediante TIRCE, de las actuaciones que deben llevarse a cabo en los puntos de control (restricciones de circulación, itinerarios alternativos, almacenamiento de pesados, etc.			
PUNTOS DE CONTROL DE PASO			
N-I ∩ M-141 – Horcajo de la Sierra N-I, pk 99.6 – Santo Tomé del Puerto.			
PUNTOS DE CONTROL PREVIOS			
<u>N-I sentido Salida</u> pk 24 – salida de Algete pk 29 – RACE pk 31 – Urb. Valdelagua pk 35 – San Agustín de Guadalix pk 37 – San Agustín de Guadalix pk 40 – El Molar pk 48 – cruce Torrelaguna pk 57 – La Cabrera pk 64 – proximidades de Buitrago pk 74 – Buitrago		<u>N-I sentido Entrada</u> pk 130 – Carabias pk 117 – Bocequillas pk 101 – Cerezo de Abajo pk 97 – Santo Tomé del Puerto	

Figura 1.3: Ejemplo de una tabla de operación de un PGT. En concreto, es una medida de activación de puntos de control de tráfico.

- Reducción del coste de explotación del vehículo debido a que los viajes resultan más rápidos y estables.
- Reducción del número de accidentes o, en su caso, de las consecuencias de los mismos.
- Disminución de las emisiones contaminantes debido al establecimiento de trayectos menos congestionados.
- Incremento de la comodidad en el recorrido al hacerlo menos estresante y la posibilidad de iniciarlo con mayor información y, por tanto, con mayor seguridad.

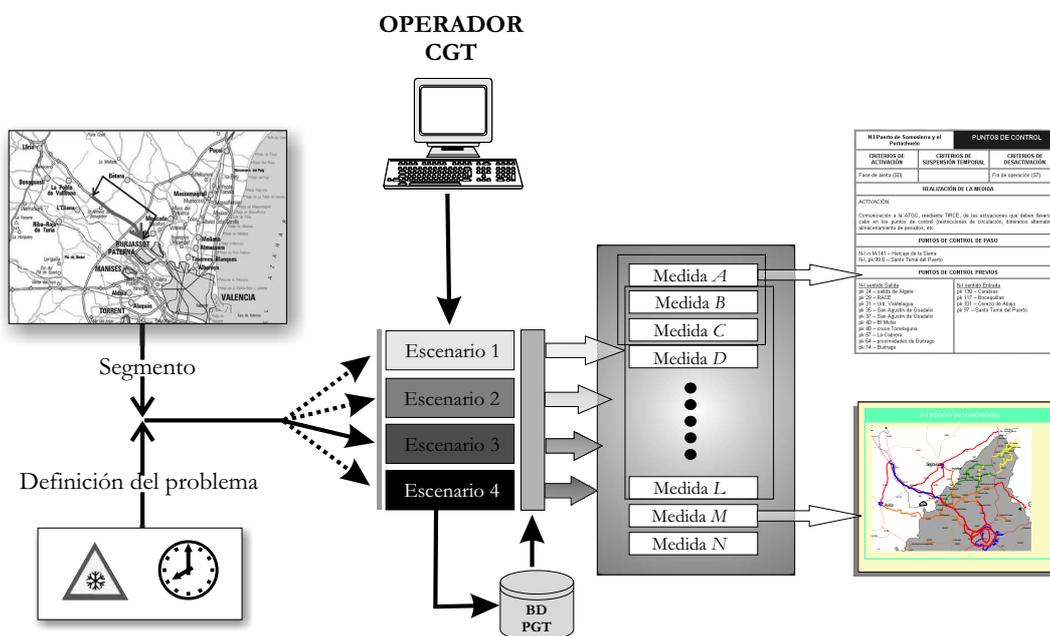


Figura 1.4: Fases de actuación de un PGT.

Clasificación por tipo de incidencia

Los PGT están enfocados a solucionar incidentes en la red viaria. Ahora bien, estos incidentes pueden ser producidos por diversas causas. A pesar de ocurrir en la misma red viaria, la tramitación de la red e incluso las estrategias de gestión y control del tráfico pueden ser totalmente distintas. Esta clasificación es la siguiente:

- PGTs para problemas de circulación. Generalmente se entran en los problemas recurrentes de circulación que se producen en los accesos y circunvalaciones de las grandes ciudades de forma diaria o semanal y que afectan tanto a los conductores habituales como a los conductores ocasionales, que generan retenciones y retrasos considerables, provocando molestias a los conductores y efectos contraproducentes en el medio ambiente.
- PGTs para cortes de carreteras. Este tipo de planes se desarrollan para establecer actuaciones cuando se produce un incidente que no tiene una localización estática y fija en la red viaria. Dentro de este tipo se incluyen los sucesos como: accidentes, obras, eventos públicos, etc.
- PGTs para grandes desplazamientos (operaciones especiales). Estos planes están asociados a periodos estacionales donde se produce un incremento considerable de vehículos que circulan principalmente por vías pertenecientes a

corredores internacionales. Otro factor importante, es que la mayor parte de este tráfico adicional, está compuesto por conductores no habituales.

- PGTs para situaciones climatológicas adversas. El objetivo de estos planes es establecer las diferentes actuaciones para garantizar la vialidad invernal, en el máximo número de tramos de carretera y garantizar la atención a los usuarios de la red viaria. Un resultado práctico de estos planes es la localización de las zonas con graves problemas meteorológicos, y en consecuencia, la dotación de estaciones meteorológicas y de sistemas de señalización específica (marcas viales, señalización vertical estática, paneles de mensajes variables, etc.) para informar de la situación existente al usuario y evitar o paliar los problemas que en ellos se producen.
- PGTs para emergencias. El objetivo de estos planes es establecer las actuaciones en materia de gestión de tráfico frente a emergencias como catástrofes naturales, accidentes de mercancías peligrosas o incluso accidentes en centrales nucleares. Este tipo de planes se caracterizan porque el área afectada es muy extensa y por la duración del mismo. En este tipo de situaciones los CGTs deben crear itinerarios específicos a los servicios de emergencia, tanto de acceso al foco del problema como de evacuación.

Informatización de planes de gestión de tráfico

El volumen de información que compone un PGT hace que los documentos generados en papel sean muy grandes y sea necesario el desarrollo de aplicaciones informáticas específicas que sirvan como soporte a los operadores de los centros de gestión de tráfico a la hora de activar un plan.

Una primera aproximación consiste en el desarrollo de una aplicación informática basada en HTML⁴ [JTCS03], [TGSC02]. El sistema utiliza un servidor web con una serie de páginas HTML. Cada una de las páginas contiene las distintas tablas de las que consta un plan y los enlaces entre las páginas permiten seguir el orden lógico de la estructura de actuación de un plan. En primer lugar, el operador elige el tipo de plan, en función del incidente (accidente, nieve, etc). Una vez determinado el tipo de incidente, el operador debe seleccionar, en una nueva página, el segmento donde se ha producido el problema, y que enlaza con la página de escenarios. Una vez determinado el escenario del incidente se presenta el listado de medidas que hay que desarrollar para resolver los problemas producidos. Cada una de las medidas tiene una página específica donde se detalla el conjunto de acciones que se deben realizar.

⁴Hyper Text Transfer Protocol.

Sin embargo, a pesar de que el funcionamiento de la aplicación HTML es el esperado, la utilización del HTML como gestor de documentos no es acertada ya que integra en el mismo documento el contenido del plan y su representación gráfica en el navegador WEB lo que hace inviable su utilización, no se tiene un documento único que contenga el PGT y además la creación, actualización y mejora del contenido de los planes es muy complicada.

Para solucionar estos problemas se desarrolló una nueva aplicación en la cuál los PGTs estaban definidos en lenguaje en XML⁵ [TGSC02] (ver figura 1.5). En XML existe una clara diferencia entre el contenido del documento y su representación gráfica. La información en un documento XML está representada por un conjunto de etiquetas, definidas por el propio usuario del documento, que formatean únicamente su contenido. XML presenta varias ventajas como el uso de plantillas (Document Type Definition DTD) que facilitan las tareas de creación y actualización de documentos y la visualización del plan desde cualquier navegador WEB (como PDAs, teléfonos móviles, etc).

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
- <PGT NOMBRE="PLAN DE ACCESOS AL CIRCUITO DE CHESTE" TIPO="MICROPLAN" CARRETERA="A-
  3/E-901, A-7/E-15(By-pass), CV-50, CV-378 (VV-6112), CV-383 (VV-6113), CV-374 (VV-
  6115) y CV-370 (VP-6116)" INICIO="" FIN="" MAPA_PGT="PLANOBASE.jpg">
- <INFOGENERAL>
- <LISTASEGMENTOS MAPA_LISTASEGMENTOS="Planogeneral.jpg">
  <SGMT ID="1" NOMBRE="TRÁFICO PROCEDENTE DEL INTERIOR POR A-3"
    CARRETERA="A-3 DESDE EL INTERIOR" DESDE="" DESDE_PK="" HASTA="" HASTA_PK=""
    LONGITUD="" CARACTERISTICAS="" ALTURAMEDIA="" MAPA_SGMT="Trafico1.jpg" />
  <SGMT ID="2" NOMBRE="TRAFICO PROCEDENTE DE VALENCIA CAPITAL POR A-3"
    CARRETERA="A-3 DESDE VALENCIA" DESDE="" DESDE_PK="" HASTA="" HASTA_PK=""
    LONGITUD="" CARACTERISTICAS="" ALTURAMEDIA="" MAPA_SGMT="Trafico2.jpg" />
  <SGMT ID="3" NOMBRE="TRAFICO PROCEDENTE DEL NORTE POR A-7 (BY-PASS)"
    CARRETERA="BY-PASS DESDE EL NORTE" DESDE="" DESDE_PK="" HASTA=""
    HASTA_PK="" LONGITUD="" CARACTERISTICAS="" ALTURAMEDIA=""
    MAPA_SGMT="Trafico3.jpg" />
  <SGMT ID="4" NOMBRE="TRAFICO PROCEDENTE DEL SUR POR A-7 (BY-PASS) Y N-340"
    CARRETERA="A-7 (BY-PASS) Y N-340 DESDE EL SUR" DESDE="" DESDE_PK=""
    HASTA="" HASTA_PK="" LONGITUD="" CARACTERISTICAS="" ALTURAMEDIA=""
    MAPA_SGMT="Trafico4.jpg" />
```

Figura 1.5: Ejemplo de un plan en formato XML.

El funcionamiento del sistema sigue el esquema anterior, es decir, la aplicación está basada en un sistema WEB que presenta las páginas con las distintas tablas y los enlaces entre ellas, pero integrado con los nuevos planes en XML. Además, para añadir más funcionalidad al sistema, se dispone de una base de datos que contiene la información relativa a las activaciones realizadas de ese plan, es decir: escenarios, usuarios, medidas, CGTs, etc. La base de datos permite el control de accesos y de desarrollo de los planes para su posterior evaluación.

⁵eXtensible Markup Language.

A pesar de que este sistema resuelve el problema de la independencia de documentos, sigue presentando algunos inconvenientes. La activación de un PGT sigue siendo completamente estática, esto significa que el operador tiene una guía de las medidas y acciones que tiene que desarrollar, pero éstas no están relacionadas con la situación del estado del tráfico en tiempo real. Así pues, el operador debe determinar el escenario manualmente, es decir, debe analizar la información que le proporcionan los diferentes equipos de monitorización. Además, existen medidas dinámicas que el PGT le indica que debe activar, pero no cómo debe hacerlo. Por ejemplo, un PGT le muestra los paneles de mensaje variable que debe señalar, y el posible mensaje que debe poner en ellos, pero no le indica si ese panel ya tiene otro mensaje ni tampoco si puede cambiarlo o no.

1.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado los Sistemas Inteligentes de Transporte y su aportación a la ingeniería del transporte. A lo largo del capítulo se ha podido constatar la importancia de la aplicación de las nuevas tecnologías, más en concreto de la telemática, en todas las actividades relacionadas con el transporte y como pueden aportar soluciones a los problemas existentes en el dominio.

Ahora bien, aunque la tendencia de instalar y desarrollar sistemas y servicios ITS está cambiando en los últimos años, la incorporación de un nuevo sistema todavía se continúa realizando de manera individual, por lo que su integración en el sistema global es complicada y no se realiza de forma estandarizada. La utilización del equipamiento existente, perteneciente a un sistema o servicio, por otro sistema nuevo, es un problema complicado debido a la distribución del equipamiento y a las necesidades propias de cada sistema.

Otro aspecto importante a destacar es la utilización de los sistemas ITS para el desarrollo de estrategias de gestión y control de tráfico donde ofrecen el soporte básico para su desarrollo. Sin embargo, este funcionamiento sólo es el adecuado cuando el ámbito de aplicación de estas estrategias es local, es decir, solo hay un CGT implicado en la resolución del incidente. Si los problemas que produce el incidente, o sus consecuencias, afectan a carreteras bajo competencias de dos o más CGTs, las estrategias de gestión deben realizarse de forma coordinada. Para ello, los CGTs deben llegar a un acuerdo no sólo sobre qué estrategias deben aplicarse sino también sobre cómo y cuándo.

Los Planes de Gestión de Tráfico permiten el desarrollo de estrategias coordinadas. Los CGTs se reúnen y definen, de antemano, cuales son las estrategias y

protocolos de actuación frente a un conjunto de incidentes que se pueden producir en cualquier punto de una red viaria. Los PGTs recopilan toda la información necesaria que sirve de base para la actuación una vez se han producido los incidentes.

No obstante, los PGTs presentan dos problemas importantes:

1. El resultado de un PGT, en formato papel, es un documento grande sobre el que no es práctico trabajar. Este problema se ha solucionado, parcialmente, con la introducción del lenguaje XML como lenguaje de marcado para su definición. El problema que queda por resolver, en el marco del formato, es la definición de un modelo base para los PGTs coordinados (es decir, para aquellos que son desarrollados por más de un CGT). Cuando varios centros comparten información, no sólo del PGT (escenario, medidas y acciones) sino también de otros parámetros relacionados, por ejemplo, niveles de servicio cualitativos, debe quedar especificado cuales son las equivalencias entre estos parámetros y sus valores para cada uno de los centros.
2. El PGT define el conjunto de medidas que se deben desarrollar para solucionar los problemas ocasionados por un incidente, pero no indica ni cuándo ni cómo debe realizarse. Esto es, el PGT no tiene en cuenta ni está relacionado con la información del estado en tiempo real de la red viaria, cuando se produce el incidente. Situación que complica el desarrollo de las medidas especialmente en los PGTs coordinados.

Capítulo 2

Sistemas Multiagente

El presente capítulo estudia la tecnología de agentes y sistemas multiagente (SMA). En primer lugar, se realiza una revisión de las definiciones más comunes de agente y de las propiedades o atributos que estos poseen. A continuación se presenta el contexto tecnológico y las tendencias actuales, en las que la tecnología de agentes está ejerciendo una influencia notable. Posteriormente, se presenta una clasificación de las diferentes arquitecturas de agentes existentes y dentro de éstas, se describe la arquitectura desarrollada por FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents), como organización de estandarización perteneciente al *IEEE Computer Society*. En el marco de los métodos y herramientas para el diseño e implementación de los sistemas multiagentes, se describen las principales metodologías para el modelado de agentes y las principales plataformas para su desarrollo. Una vez descrita las bases de la tecnología de agentes, se presentan un conjunto de sistemas multiagentes desarrollados especialmente en el marco de la ingeniería del tráfico. Por último, se describen la evolución prevista de la tecnología y las conclusiones.

2.1. Agentes y Sistemas Multiagente

Los sistemas basados en agentes son una de las áreas más importantes de investigación y desarrollo que han emergido en las tecnologías de la información, desde los años 90 [Lea05]. Sin embargo, todavía no existe una definición aceptada por todos los investigadores acerca del concepto de agente y su características. El concepto de agente es un termino *confuso* del cual existen multiples definiciones:

- Según el *Object Management Group*, un agente es un programa de ordenador

que actúa autónomamente en nombre de una persona u organización [Gro98].

- Russell define un agente como aquello que percibe su entorno a través de sensores y que actúa sobre él mediante actuadores [RSN95].
- FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) define un agente como un proceso computacional que implementa una funcionalidad comunicativa autónoma en una aplicación [FIP02].
- Garijo define un agente como una entidad software con una arquitectura robusta y adaptable que puede funcionar en distintos entornos o plataformas computacionales y es capaz de realizar de forma autónoma distintos objetivos intercambiando información con el entorno [Gar02].
- Una de las definiciones mas citadas es la realizada por Wooldridge, que define un agente como un sistema informático situado en un entorno y capaz de realizar acciones de forma autónoma para conseguir sus objetivos de diseño [Woo97].

A pesar de que no existe un consenso con la definición de agente, utilizando estas definiciones podemos determinar las propiedades o atributos que caracterizan los agentes [Wei99],[Fer99],[Woo02],[Mas04]:

- *Autonomía*: los agentes son capaces de operar sin intervención externa, (humanos o de otros agentes) para alcanzar sus objetivos. Además, tienen el control sobre sus acciones y estados internos.
- *Reactividad*: perciben estímulos de su entorno y reaccionan de acuerdo a los cambios producidos en el entorno para satisfacer sus objetivos.
- *Proactividad*: los agentes son emprendedores, esto es, toman la iniciativa para realizar tareas guiados por sus objetivos.
- *Habilidad social*: los agentes tienen la capacidad de interactuar con otros agentes. Esta habilidad permite la cooperación o negociación para desarrollar actividades coordinadas.
- *Benevolencia*: los agentes prestan ayuda a otros agentes de su entorno, siempre y cuando, no entre en conflicto con sus propios objetivos.
- *Racionalidad*: Los agentes actúan de forma racional con el único fin de cumplir sus objetivos.

- *Adaptativo*: los agentes modifican su comportamiento utilizando las experiencias previas.
- *Movilidad*: los agentes pueden moverse a través de la red, esto es, los agentes pueden trasladar datos junto con instrucciones que se ejecutan de forma remota.
- *Veracidad*: un agente no comunica deliberadamente información falsa.

Como se puede apreciar, tanto en las distintas definiciones de agentes como en las características que los definen, no tiene sentido la existencia de agentes individuales, sino que los agentes se encuentran en entornos donde hay más agentes. Por lo tanto, un sistema multiagente es un sistema donde existen un conjunto de agentes individuales que interactúan entre sí.

Un sistema multiagente (SMA) debe reunir los siguientes elementos [Fer99]:

- Un entorno que representa el marco en el que los agentes existen.
- Un conjunto de objetos. Estos objetos se encuentran integrados con el entorno, es decir, es posible en un momento dado, asociar uno de estos objetos con un lugar en el entorno. Estos objetos son pasivos y pueden ser percibidos, creados, destruidos y modificados por agentes.
- Un conjunto de agentes que se consideran como objetos especiales que representan las entidades activas del sistema.
- Un conjunto de relaciones que unen objetos, y, por lo tanto, agentes.
- Un conjunto de operaciones, que hacen posible que los agentes perciban, produzcan, consuman, transformen y manipulen objetos.
- Operadores que representan la aplicación de operaciones sobre el mundo y la reacción de éste al ser alterado. Estos operadores se pueden entender como las leyes del universo.

Así pues, la influencia que unos agentes ejercen sobre otros se produce no solo por las interacciones directas entre ellos, sino también por la modificación que un agente puede realizar sobre el entorno y que otros agentes son capaces de percibir. Esta situación aumenta la complejidad del diseño de SMA enormemente, ya que obliga a estudiar el entorno con detalle para detectar qué acciones realizadas por un agente pueden afectar a otro agente [Góm02].

2.2. Tecnología de Agentes

El concepto de agente está siendo aplicado en un amplio abanico de disciplinas, enmarcadas en la tecnología de la información: redes de computadores, ingeniería del software, inteligencia artificial, interacción hombre-máquina, sistemas distribuidos y concurrentes, sistemas móviles, telemática, sistemas de control, comercio electrónico, etc.

Las tecnologías basadas en agentes pueden ser observadas desde tres perspectivas [Lea05]:

- Agentes como diseño metamórfico, donde proveen a los diseñadores del software y desarrolladores una forma de estructurar las aplicaciones alrededor de componentes autónomos y comunicativos. También sirven de guía para la construcción de herramientas de desarrollo del software e infraestructura que puedan soportar el diseño metamórfico. Esto es, ofrecen un nuevo camino para el desarrollo de sistemas complejos, especialmente en entornos abiertos y dinámicos.
- Agentes como una fuente de tecnología. Las tecnologías del agente se extienden a lo largo de un amplio rango de técnicas específicas y algoritmos que permiten desarrollar las interacciones en entornos dinámicos y abiertos. Al mismo tiempo, la utilización de aproximaciones basadas en agentes está aumentando su influencia en otros dominios, por ejemplo, los nuevos métodos de resolución de problemas de asignación de recursos en sistemas complejos.
- Agentes como simuladores. Los sistemas multiagente son modelos robustos que permiten la representación de entornos reales dinámicos y complejos. La utilización de agentes como simuladores del mundo real puede proporcionar respuestas a problemas que de otra manera serían inalcanzables debido a su complejidad.

2.2.1. Contexto Tecnológico

El crecimiento de la *World Wide Web* y la rápida introducción en el mercado de negocio del comercio electrónico ha conducido al desarrollo de estándares de modelos de software y tecnologías para dar soporte a los sistemas distribuidos [Lea05]. Estos esfuerzos están creando un rico y sofisticado contexto para el desarrollo de tecnologías multiagente.

El desarrollo de estas tecnologías ha tenido un importante impacto, por un lado, han permitido el desarrollo de métodos de implementación, y *middlewares*¹ que facilitan la creación de infraestructuras para los sistemas basados en agentes y por otro las aplicaciones desarrolladas, que gracias a estas tecnologías, son capaces de implementar aproximaciones orientadas a agentes y han permitido mejorar los retos técnicos propios de la tecnología multiagente como la confianza, reputación, obligaciones y gestión de contratos.

Las principales infraestructuras y tecnologías empleadas para el desarrollo de sistemas de agentes han sido [Lea05]:

1. Tecnologías base

- *eXtensible Markup Language* (XML) como lenguaje de marcado para la definición de estructuras sintácticas válidas. XML permite la definición de modelos profundos de conocimiento.
- *Resource Description Format* (RDF) como representación formal para la descripción y el intercambio de metadatos.

2. Negocio electrónico (eBusiness)

- *ebXML*, cuyo objetivo es la estandarización de las especificaciones de comercio para proporcionar una infraestructura abierta, basada en XML, que permita el uso general de información electrónica para negocios, de forma que su intercambio sea interoperable, seguro y consistente.
- *Rosettanet* es un consorcio, formado por las compañías más importantes del sector, que trabajan conjuntamente, para crear e implementar estándares para el proceso de negocio electrónico.

3. *Plug & play*

- *Tecnología de red Jini* que sirve como proveedor de mecanismos simples que permiten a los dispositivos conectarse para formar una comunidad emergente en la cual cada dispositivo provee servicios que otros dispositivos en la comunidad pueden usar.
- *UPnP* ofrece conectividad *peer-to-peer* en aplicaciones inteligentes y dispositivos inalámbricos a través de una arquitectura abierta y distribuida, que permite no solo integrar y controlar la red, sino que además permite transferir información entre los dispositivos.

¹Un middleware es una herramienta software que permite la conexión de dos aplicaciones separadas.

4. Servicios Web

- UDDI es una iniciativa de la industria, formada por proveedores de servicio, operadores de negocio y líderes del negocio electrónico, con el objetivo de crear un marco abierto e independiente de la plataforma para describir servicios y descubrir modelos de negocio utilizando internet.
- SOAP provee un mecanismo sencillo para el intercambio estructurado entre iguales, usando XML (*XML-based envelope*), en un entorno descentralizado y distribuido. SOAP es un protocolo estandarizado de empaquetamiento para los mensajes compartidos por las aplicaciones, que hace posible su utilización en una gran variedad de mensajes de aplicación.
- WSDL provee una gramática, en XML, para la descripción de los interfaces de los servicios de red. Se centra en la especificación de los métodos y protocolos para invocar los servicios Web, y sólo especifica el tipo de datos de las entradas y salidas del servicio, sin aportar valor semántico en sus descripciones.

2.2.2. Tendencias Emergentes

El desarrollo de las tecnologías de agentes está siendo utilizado en las tecnologías emergentes de la información:

- *Web Semántica*. Definida como una extensión de la web actual en la que se proporciona información con un significado bien definido, y se mejora la forma en la que las máquinas y las personas trabajan en cooperación [BLHL01]. La potencia real de la Web Semántica se aprecia cuando existen agentes capaces de manejar contenido semántico que son usados para recoger y procesar información Web e intercambiar los resultados con otros agentes. Así pues, el desarrollo de la Web semántica está íntimamente ligado a la evolución de la tecnología de agentes [BLHL01].
- *Servicios Web*. Los Servicios Web permiten a las compañías publicar componentes y servicios en un directorio o registro de servicios en el que otras aplicaciones Web pueden buscar e implementar nuevos servicios a través de una llamada [Sam05]. Por lo tanto, los servicios Web proporcionan una infraestructura ideal para el desarrollo de las interacciones de los sistemas multiagente. La aproximación orientada a agentes de los servicios web esta ganando crédito, ya que cada vez más los entornos de servicios web son vistos como sistemas basados en agentes [Bea04].

- *Computación peer-to-peer*. Este tipo de tecnología cubre un amplio rango de infraestructuras, tecnologías y aplicaciones que tienen una característica en común: están diseñados para la creación de aplicaciones en red, en la que todos los elementos del sistema (nodos) son *iguales*. Así pues, en estos sistemas no es necesario la existencia de un servidor centralizado, por lo que se presentan como entornos tolerantes a fallos, escalables y fácilmente implementables y mantenibles [Mea02].
- *Grid computer*. El grid es una infraestructura de computación de alto rendimiento que permite desarrollar tareas con elevados costes computacionales [FK04]. Así pues, el grid alude a la infraestructura que facilita la colaboración de computadores de altas prestaciones, las redes, bases de datos, y en general los instrumentos científicos, que pertenecen y son gestionados por múltiples organizaciones [Lea05].
- *Inteligencia ambiental*. El concepto de inteligencia ambiental ha surgido a partir de los esfuerzos de la Comisión Europea en identificar los nuevos retos para la investigación y desarrollo Europeo en las Tecnologías de Sociedad de Información [Gro02]. El objetivo de esta tecnología se centra en la integración de servicios y aplicaciones, para lo que se apoya en áreas como la computación ubicua y los interfaces de usuario inteligentes. El enfoque de estos sistemas se centra en extensos entornos compuestos, potencialmente, por miles de elementos interactuando entre sí para facilitar el logro de metas y actividades. Las características necesarias para poder integrar estos servicios, (autonomía, distribución, adaptabilidad, y capacidad de reacción) son también factores clave en los sistemas multiagente.
- *Sistemas autónomos*. Estos sistemas se centran en aquellos entornos computacionales que son capaces de gestionarse a sí mismos. Esta emergente tecnología se basa en aspectos como autoorganización, autoconfiguración, autogestión, autodiagnóstico y autocorrección. La investigación actual para el desarrollo de estos sistemas se centra en biología, ecología, y ciencias sociales que intentan identificar algoritmos y procedimientos que pueden permitir lograr modelar alguno de los aspectos característicos [Lea05].

2.3. Arquitecturas de Agente

La arquitectura de un sistema multiagente define tanto la estructura interna de un agente, como la organización del sistema y determina los mecanismos que utilizan los agentes para reaccionar a estímulos, actuar y comunicarse [Mas04].

Existen diferentes tipos de arquitecturas para poder construir un agente que cubren el espectro de posibilidades que abarca la tecnología de agentes:

- **Arquitecturas Deliberativas.** Poseen una representación interna del mundo, siguen una aproximación simbólica del conocimiento y su funcionamiento se basa en el razonamiento.
- **Arquitecturas Reactivas.** Los agentes poseen sensores y actuadores conectados al entorno. La conducta del agente se basa en los estímulos recibidos por los sensores que proporcionan una respuesta por medio de los actuadores.
- **Arquitecturas híbridas.** Se componen de diferentes capas de decisión para combinar las dos aproximaciones. La idea fundamental de esta arquitectura es obtener las ventajas de las arquitecturas anteriores y evitar los inconvenientes que presentan.

2.3.1. Arquitecturas Deliberativas

En esta arquitectura, el agente posee un modelo del entorno y actúa según ese conocimiento. Se basa en una visión simbólica de la Inteligencia Artificial, y su toma de decisiones se basa en el razonamiento.

Existen dos aproximaciones basadas en esta arquitectura: la *lógica clásica* y el *razonamiento práctico*.

- **Lógica clásica.** Se fundamenta en las técnicas usadas por los sistemas basados en el conocimiento. Suponen que el agente tiene un conjunto de formulas, (F), que describen como debe de comportarse. Además, el agente dispondrá de mecanismos para conocer su estado interno, (EI), qué indicará que sucede en el entorno. Esta forma de proceder conlleva una elevada carga computacional, y en muchas ocasiones no puede responder en un tiempo razonable.
- **Razonamiento práctico.** Esta rama de la filosofía se implementa mediante los agentes BDI (*Belief, Desire, Intention*)². Tiene como objetivo buscar un modelo para el proceso que realizamos al decidir qué acción llevar a cabo en cada momento para lograr unos fines. Este proceso se basa en los objetivos que el agente quiere conseguir (Deliberación) y cómo lo va a lograr (Razonamiento de medios fines).

²Creencias, Deseos e Intenciones.

La arquitectura BDI está caracterizada por que los agentes que la implementan tienen los siguientes estados mentales: *Creencias*, *Deseos* e *Intenciones*.

Los deseos (objetivos) son un componente esencial en esta arquitectura, que representan un estado final deseado. Para poder alcanzar los objetivos, a partir de las creencias, los agentes deben tener unos mecanismos de planificación que les permita identificar las intenciones.

Así pues, un agente BDI se compondrá de:

- Conjunto de creencias.
- Función de revisión de creencias: capacidad de percibir el mundo para reconsiderar las creencias.
- Conjunto de opciones: que define los posibles grupos de acciones a realizar para conseguir los objetivos.
- Función de generación de opciones: para determinar las opciones en función del estado actual.
- Conjunto de intenciones: foco de acción actual del agente.
- Función de filtro: que es el proceso deliberativo que determinará las nuevas intenciones en función de sus creencias, deseos e intenciones.
- Función de selección de acciones: que es la función que determine que acción realizar en función de las intenciones elegidas.

2.3.2. Arquitecturas Reactivas

Los problemas asociados a la utilización de las representaciones simbólicas han conducido al estudio de nuevos modelos [Mas04] como las arquitecturas reactivas.

La arquitectura reactiva más conocida es la denominada arquitectura de *subsumción* [Bro91]. La toma de decisiones del agente se realiza a través de un conjunto jerarquizado de tareas, que se denominan comportamientos. Los comportamientos reciben continuamente percepciones y las transforman en acciones específicas que llevan a un objetivo concreto.

Las ventajas que presenta son:

- Conceptualmente son muy simples.

- Necesitan pocos recursos.
- Poco coste computacional.
- Bastante robustas frente a fallos.

Aunque también presenta los siguientes inconvenientes:

- Si no existe una concepción global, la información local ha de ser suficiente para tomar decisiones, y es complicado introducir información no local para mejorarla.
- Es difícil deducir como este tipo de arquitecturas pueden aprender de la experiencia.
- La relación entre comportamientos individuales, entorno, y comportamiento global no es comprensible.
- Es muy difícil construir sistemas que resuelvan tareas concretas y establecer una metodología que ayude a diseñarlos.
- Es fácil construir agentes compuestos por pocas capas de comportamiento, en cambio la complejidad aumenta de sobremanera cuando son muchas las capas.

2.3.3. Arquitecturas Híbridas

Tanto las arquitecturas reactivas como las deliberativas presentan limitaciones. Por ello se han propuesto sistemas híbridos (también conocidos como sistemas de capas) que permiten combinar ambos modelos. Una propuesta consiste en construir un agente compuesto por dos subsistemas: uno deliberativo, que utilice un modelo simbólico y otro reactivo, centrado en reaccionar ante los eventos que se produzcan.

Se proponen dos formas de organización:

- Horizontal. Cada capa está conectada al sistema sensor y al sistema actuador directamente de manera que cada capa actuará como si fuera un agente individual.
- Vertical. Todas las capas están interconectadas entre si, y sólo una estará conectada a los sensores y actuadores.

Al igual que en las arquitecturas de subsumción, las capas se organizan jerárquicamente con información sobre el entorno a diferentes niveles de abstracción. La mayoría de las arquitecturas tienen tres niveles:

- *Reactivo*. Es la capa de más bajo nivel, donde se toman las decisiones acerca de lo que se debe hacer en función de los estímulos recibidos.
- *Conocimiento*. Define el nivel intermedio y se centra en el conocimiento que el agente tiene del medio.
- *Social*. Se encuentra en la capa de más alto nivel y se encarga de manejar los aspectos sociales del entorno.

La organización horizontal presenta el problema de que las capas competirán entre sí para generar una acción, por lo que es necesario un mediador para coordinar el conjunto, por tanto existe un control centralizado. Por otro lado, la organización vertical es menos flexible y no es tolerante a fallos.

2.3.4. La arquitectura FIPA

El desarrollo de aplicaciones complejas, compuestas por agentes que interactúan entre sí, necesitan del desarrollo de estándares que faciliten estas tareas. En este sentido, organizaciones como ARPA, y su proyecto KSE (Knowledge Sharing Effort), OMG (Object Management Group) con su proyecto MASIF (Mobile Agent System Interoperabilities Facility) y Agent Society han definido estándares para la construcción de agentes (arquitecturas, protocolos de comunicación, aplicaciones etc.).

Otra organización que desarrolla estándares es FIPA. Desde su creación, en 1996, ha jugado un papel destacado en la definición de estándares para agentes y también en la organización de iniciativas y eventos que han contribuido al desarrollo de los sistemas Multiagente. Este trabajo ha hecho posible que FIPA sea desde Junio del 2005 una organización de estandarización perteneciente al *IEEE Computer Society*.

FIPA, en su modelo de referencia [FIP04], establece los elementos básicos que forman parte de un sistema multiagente. Según este modelo los agentes son procesos software, que se encuentran en la plataforma y que se interactúan mediante un lenguaje de comunicación de agentes (ACL).

La Plataforma de Agentes FIPA proporciona la infraestructura necesaria para poder desarrollar y utilizar de agentes. Esta plataforma contiene todos los recursos

hardware y software necesarios. Además, FIPA define los servicios que debe proporcionar la plataforma de agentes: un sistema encargado del transporte de mensajes (STM), un sistema de gestión de agentes (AMS), un servicio de directorio (DF) y un canal de comunicaciones. Cada uno de estos servicios, excepto el de transporte de mensajes, es suministrado por agentes especializados, lo cual supone que la comunicación con ellos se realiza mediante mensajes ACL y la ontología definida para ese servicio.

El conjunto de componentes que intervienen en una plataforma de agentes FIPA se puede apreciar en la figura 2.1:

- Sistema de gestión de agentes (AMS Agent Management System). El AMS es el elemento de gestión principal, que conoce en todo momento el estado de su plataforma y de los agentes que se están ejecutando en ella. Proporciona no solo los servicios básicos de creación, destrucción y control de agentes sino que también tiene un servicio de nombres (Agent Name Service-ANS), que asocia el nombre, es decir, el identificador del agente, a su dirección de transporte real. Otra de las tareas del AMS es el control del ciclo de vida, y los estados de los agentes (Iniciado, Activo, Suspendido y Esperando).
- Servicio de directorio (DF Directory Facilitator). Como complemento al Servicio de Nombres, la plataforma de agentes incluye un servicio de páginas amarillas. Este servicio permite buscar un agente por sus capacidades. Para poder desempeñar esta tarea, los agentes se registran en el DF indicando cuáles son los servicios que ofrecen.
- Canal de comunicaciones (ACC Agent Communication Channel). Todos los agentes FIPA deben tener accesos a un canal de comunicaciones encargado de gestionar el envío de mensajes. La gestión consiste en el encaminamiento de los mensajes ACL desde su agente origen a su agente destino.
- Sistema de transporte de mensajes (STM). El STM representa toda la infraestructura de comunicaciones que permite la comunicación entre agentes que pertenecen a la misma plataforma ó a plataformas distintas.

2.4. Interacciones entre Agentes

El desarrollo de las actividades en un SMA necesita desarrollar tareas de comunicación, coordinación y negociación. Para que los agentes, que pueden pertenecer

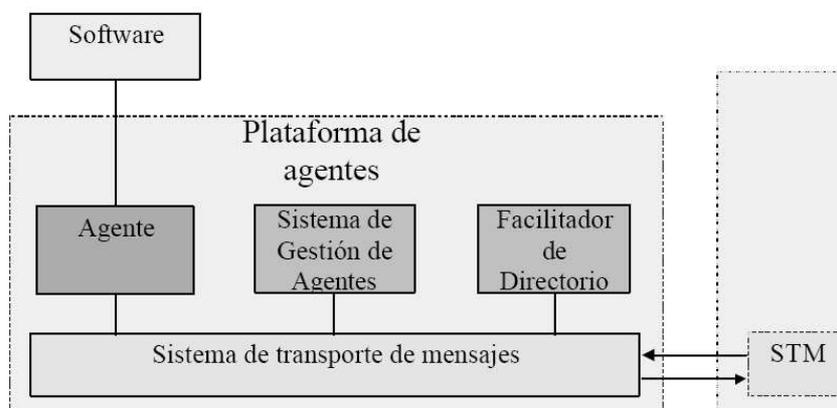


Figura 2.1: Modelo de referencia FIPA [Mas04].

a uno o varios SMA, puedan interactuar coherentemente, deben compartir información sobre sus objetivos y tareas. gracias al intercambio de esta información, los agentes coordinan el desarrollo de actividades, siendo capaces de negociar en caso de que aparezcan conflictos.

2.4.1. Comunicación

La habilidad de los agentes para comunicarse entre sí, esto es, intercambiar información y conocimiento de forma comprensible, permite a los agentes obtener el conocimiento necesario para decidir la secuencia de acciones que debe ejecutar en función de sus objetivos.

La comunicación posibilita la interacción entre agentes, para ello los mensajes intercambiados deben utilizar no sólo un lenguaje común, sino también de tener la capacidad de entender e interpretar el conocimiento que se intercambia y ser capaces de intercambiarlo.

Estos lenguajes, denominados ACL (lenguajes de comunicación de agentes) , están inspirados en la *teoría de actos del habla*³, han servido para fundamentar el repertorio de actos comunicativos básicos definidos por los estándares actuales.

Los agentes pueden intercambiar mensajes entre sí mediante un lenguaje ACL normalizado. La utilización de este tipo de lenguaje es esencial si se pretende con-

³La teoría de actos del habla [Sea69], fue desarrollada por lingüistas con el fin de comprender como los humanos utilizan el lenguaje en situaciones cotidianas.

seguir comunicar agentes pertenecientes a SMA diferentes.

La organización FIPA ha desarrollado un estándar actual llamado FIPA ACL, basado en KQML (Knowledge Query and Manipulation Language). Este lenguaje permite desarrollar un conjunto de 22 acciones comunicativas, que agrupa en 4 clases, (*información, realización de acciones, negociación e intermediación*) y que para cada una de ellas proporciona la siguiente información:

- Una descripción detallada en lenguaje natural de la acción y sus consecuencias.
- Un modelo formal, escrito en un lenguaje semántico, que defina la semántica de la acción, sus precondiciones formales y sus efectos.
- Ejemplos de uso.

2.4.2. Coordinación

La coordinación es una característica clave en el desarrollo de SMA. [Mal88] describe la coordinación de acciones como un conjunto de acciones suplementarias que pueden realizarse en un entorno multiagente para alcanzar un objetivo y que un agente, con los mismos objetivos, no podría alcanzar por sí solo.

[Fer99] define 4 razones fundamentales para realizar acciones coordinadas:

1. Los agentes necesitan información y resultados que sólo pueden ser suministrados por otros agentes.
2. Los recursos son limitados. Los agentes pueden compartir recursos para poder desarrollar las acciones.
3. La coordinación permite optimizar costes, ya que elimina el desarrollo de acciones injustificadas o redundantes.
4. Los agentes tienen objetivos distintos pero interdependientes, así pues, los agentes pueden alcanzar sus objetivos beneficiándose de esta interdependencia.

2.4.3. Cooperación y Negociación

La cooperación es el mecanismo por el cuál los agentes, que trabajan juntos para lograr un objetivo común, definen una estrategia para alcanzar este objetivo.

En particular, los agentes definen qué tareas concretas deberá realizar cada agente, qué ocurre si hay algún fallo, cuándo han de estar terminadas y cuál es el flujo de información que debe establecerse.

Estos mecanismos se enmarcan dentro de la Resolución Distribuida de Problemas (RDP) [Dur01], [DR94]. La suposición clave de los métodos RDP es que los agentes son benevolentes, es decir, no buscan su propio *interés* sino el de la *sociedad*.

Por el contrario, la negociación modela la coordinación entre agentes autointeresados capaces de llegar a acuerdos vinculantes. La negociación permite alcanzar decisiones de coordinación conjuntas mediante la comunicación explícita [Mul96].

Estos mecanismos están inspirados en modelos tomados de las ciencias sociales y especialmente de la economía, donde prestan especial atención en la negociación estratégica y la teoría de juegos, que se expone en el capítulo 3.

2.5. Métodos y Herramientas para el Desarrollo de Agentes

El desarrollo de sistemas multiagentes integra tecnologías de áreas de conocimiento bien diferenciadas (inteligencia artificial, programación concurrente y distribuida, etc), sin embargo, a pesar de que estas tecnologías han permitido un marco de trabajo en el que generar sistemas de agentes es factible, es necesario el desarrollo de nuevas herramientas y técnicas que permitan el diseño e implementación de sistemas multiagente.

2.5.1. Modelado de Agentes

Existen diferentes metodologías que permiten modelar los sistemas multiagentes. Cada una de ellas analiza y modela el sistema desde un punto de vista particular. Casi todas las propuestas existentes se basan en modelos orientados a objetos [JBR00], definiendo actividades específicas para los sistemas de agentes.

Ingeniería de las vocales

La ingeniería de las vocales analiza el sistema desde 5 aspectos, cada uno asociado a una vocal: A) Agentes, E) Entorno, I) Interacciones, O) Organización y U) Usuario.

Para cada uno de los modelos, la metodología propone aplicar las técnicas más adecuadas. Por ejemplo, los agentes pueden modelarse como autómatas o como sistemas más complejos de gestión de conocimiento y las interacciones como modelos físicos o actos del habla.

El propósito de esta metodología es conseguir librerías de componentes que proporcionen soluciones al diseño de cada uno de estos aspectos, para que posteriormente, el diseñador instancie el modelo que desee.

La ingeniería de las vocales ha sido una de las primeras metodologías en modelar sistemas utilizando diferentes aspectos de los agentes. Aunque la metodología presenta un modelo prometedor, el trabajo que se presenta es incompleto ya que no termina de implantarse debido a la ausencia de herramientas de soporte [Góm02]. La implementación de esta metodología puede realizarse mediante la plataforma *Volcano*⁴.

MAS-commonKADS

La metodología MAS-commonKADS extiende la metodología CommonKADS [TH93] aplicando ideas de metodologías orientadas a objetos y de diseño de protocolos para su aplicación a la producción de los SMA.

CommonKADS también considera diferentes aspectos que clasifica en 6 modelos: 1) La organización en la que trabaja el sistema de conocimiento, 2) Tareas, 3) Agentes, 4) Comunicaciones, 5) Experiencia, que incluye el conocimiento del dominio y conocimiento de resolución del sistema y 6) Diseño, es decir, la arquitectura del sistema. Para adaptar CommonKADS a los entornos SMA se le añade un nuevo modelo, el de Coordinación, que se encarga de los aspectos de la interacción entre los agentes.

El modelo parte de una descripción gráfica que luego se complementa con explicaciones en lenguaje natural de cada elemento. Existe para cada uno de los modelos una descripción de las dependencias respecto a los otros modelos así como las actividades involucradas.

⁴Volcano es una plataforma basada en el ensamblaje de componentes, que pueden ser desarrollados a medida o proceder de una librería.

BDI (*Belief, Desires, Intentions*)

Los agentes utilizan un modelo del mundo, una representación de cómo se les muestra el entorno. El agente recibe *estímulos* a través de sensores ubicados en el mundo. Estos estímulos modifican el modelo del mundo que tiene el agente (representado por un conjunto de *creencias*). Para guiar sus acciones, el agente tiene *deseos*. Un deseo es un estado que el agente quiere alcanzar a través de *intenciones*. Éstas son acciones especiales que pueden abortarse debido a cambios en el modelo del mundo.

Para especificar el sistema de agentes, se emplean un conjunto de modelos que operan a dos niveles de abstracción: *externo* e *interno*.

- Desde un punto de vista externo, el sistema identifica los agentes (propósito, responsabilidades, servicios que ejecutan, información que necesitan acerca del mundo) y sus interacciones.
- Desde un punto de vista interno, el sistema define el comportamiento de cada uno de los agentes, para lo que se emplean un conjunto de modelos que permiten imponer una estructura sobre el estado de información y motivación de los agentes y las estructuras de control que determinan su comportamiento (creencias, objetivos y planes).

MaSE (Multi-agent systems Software Engineering)

La metodología MaSE adopta el paradigma orientado a objetos, en la que los agentes son especializaciones de objetos que se coordinan entre sí vía conversaciones y actúan proactivamente para alcanzar metas individuales y del sistema [DeL01].

El análisis en MaSE consta de tres pasos: el primero consiste en capturar los objetivos del sistema a partir de los requisitos de usuario. Una vez definidos los objetivos se analizan los casos de uso y se definen los diagramas de secuencia. A partir de estos diagramas se realiza el último paso, la identificación y refinado de roles.

El diseño produce un diagrama de clases de agentes y su especificación. Dicho diseño consta de cuatro pasos: crear clases de agentes, construir conversaciones, ensamblar clases de agentes y diseñar el sistema. La mayoría de estos pasos se ejecutan dentro de la herramienta que soporta MaSE: AgentTool [DeL01].

Uno de los aspectos en los que más incide MaSe es en las conversaciones entre

agentes. Una conversación es un protocolo de coordinación entre dos agentes. Esto, unido a que apenas trata el modelado de aspectos intencionales, hace que la mayoría de las implementaciones que utilizan MaSE se limiten a la definición de agentes reactivos [Mas04].

Gaia

La metodología Gaia considera un sistema basado en agentes como una sociedad u organización. La organización se compone de un conjunto de roles, con ciertas relaciones entre ellos y que toman patrones de otros roles [ZWJ00], [WJK00].

El modelo de roles se compone del conjunto de roles que se definen a partir de los siguientes atributos: responsabilidades, permisos, actividades y protocolos.

El análisis de un sistema en Gaia consiste en cuatro pasos: Primero, se identifican los roles, después se identifican y documentan los roles que definen el modelo de interacciones. A partir de esta información se elabora el modelo de roles. Por último se iteran todos estos pasos hasta obtener el análisis final.

El diseño produce tres modelos:

- Modelo de *agente*, que identifica los tipos de agentes y sus instancias en el sistema.
- Modelo de *servicios*, que define las funciones de cada agente.
- Modelo de *conocidos*, definido por un grafo dirigido que describe los enlaces de comunicación entre agentes.

La utilización de Gaia acaba en un nivel de abstracción demasiado alto, con ello consigue desacoplarse de las distintas soluciones y metodologías de implementación de agentes, pero por contra, el desarrollador tendrá todavía mucho trabajo por delante para poder implementar el SMA. Sin embargo, la relevancia de esta metodología radica en la influencia que ha ejercido en otras, principalmente en lo que respecta al análisis de roles [Mas04].

Message e Ingenias

Message integra los resultados de las metodologías presentadas anteriormente [Cea01]. Propone el análisis y diseño del SMA desde cinco modelos que permiten

capturar los aspectos del SMA: 1) el modelo de *Organización*, que captura la estructura global del sistema, 2) el modelo de *Tareas y Objetivos*, que determina qué hace el SMA y sus agentes en función de los objetivos que persiguen y de las tareas que pueden ejecutar para ello, 3) el modelo de *Agente*, que contiene una descripción detallada de los agentes de sistema y del rol o roles que desempeña dentro del SMA, 4) el modelo de *Dominio* que actúa como repositorio de información concerniente al dominio del problema, y 5) el modelo de *Interacción*, que trata las interacciones a distintos niveles de abstracción.

La novedad aportada por Message reside en la descripción de los diferentes aspectos que permiten modelar un SMA utilizando metamodelos [GPG02].

La metodología Ingenias [PS03] es una extensión de la metodología MESSAGE que ha evolucionado mediante la experimentación y el desarrollo de varios casos de estudio. Ingenias aborda con mayor profundidad distintos aspectos de la metodología como la especificación y notación de los elementos que constituyen un SMA, los agentes y la organización. Al igual que Message, Ingenias considera cinco puntos de vista para realizar el modelado de un SMA: Agente, Organización, Entorno, Tareas y Objetivos e Interacciones (figura 2.2).

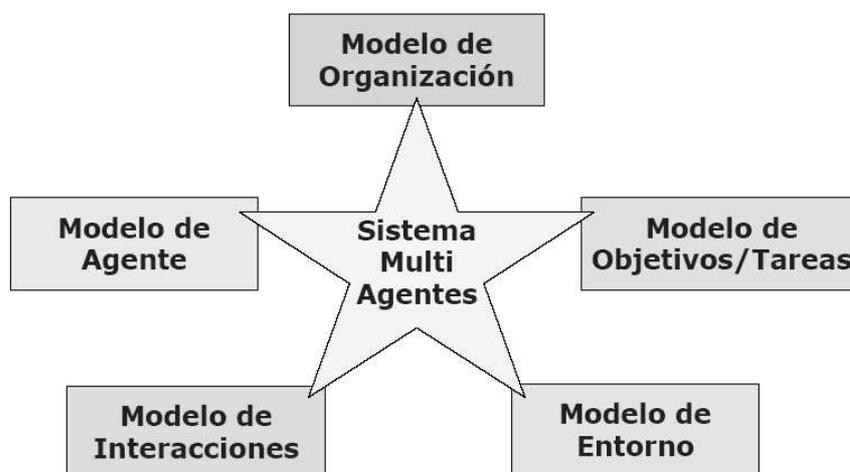


Figura 2.2: Aspectos de un SMA según la metodología Ingenias [Mas04].

El método de desarrollo de SMA propuesto en Ingenias concibe el SMA como la representación computacional del conjunto de modelos. Cada uno de estos modelos muestra una visión parcial del SMA: los agentes que lo componen, las interacciones que existen entre ellos, cómo se organizan para proporcionar la funcionalidad del sistema, qué información es relevante en el dominio y cómo es el entorno en el que se ubica el sistema a desarrollar.

La metodología Ingenias presenta un conjunto de herramientas, el Ingenias Development KIT (IDK) [IDK04], que se distribuye bajo licencia GPL, y que presta soporte para desarrollar SMA. El IDK permite no sólo modelar el sistema sino también generar documentación, generar código y validar y verificar el SMA.

2.5.2. Plataformas de Agentes

La mayoría de SMA están programados con el lenguaje JAVA [Mas04]. Las características específicas de JAVA: adecuación a Internet, existencia de bibliotecas de clases para interfaces de usuario, comunicaciones, etc, hacen de él un lenguaje apropiado para el desarrollo de sistemas distribuidos. Además JAVA facilita la integración de otros paradigmas de programación como la programación lógica (CIAO-Prolog, prolog-café, etc) o los sistemas basados en reglas de producción (JESS o ILOG rules). Esta integración de paradigmas permite la construcción de agentes, cada uno con un paradigma distinto, y después integrarlos en la misma plataforma.

Sin embargo, la implantación de SMA hoy en día está más enfocada a la utilización de plataformas de desarrollo que a la aplicación de lenguajes de programación de agentes [Góm02]. Una plataforma ofrece tanto el soporte para la programación del sistema como un entorno donde los agentes pueden ejecutarse.

Las plataformas de desarrollo más extendidas son JADE [BPR01], Grasshopper [BM98] y ABLE [IBM02]. En todas ellas existe una arquitectura básica de agentes que permite acceder a diferentes servicios. El diseño de agentes con estas plataformas únicamente requiere atenerse a los estándares de comunicación y de gestión de agentes. El resto, como la especificación del agente, las interacciones y las relaciones entre los agentes, se dejan al criterio del desarrollador.

Grasshopper

Grasshopper es la implementación del estándar MASIF [BBCM00], que soporta la movilidad de agentes en un entorno distribuido utilizando comunicación y servicios CORBA [OMG01].

Grasshopper permite desarrollar y ejecutar agentes móviles escritos en lenguaje Java. La arquitectura de esta plataforma, basada en un entorno de agentes distribuido, consta de los siguientes elementos, que se pueden apreciar en la figura 2.3: a) *agencia* que describe el entorno mínimo de ejecución para agentes móviles y estáticos, b) el *núcleo* de la agencia, que contiene las funciones básicas de la agencia

(comunicación, gestión, seguridad, registro, seguridad y persistencia), c) *lugar* que describe la agrupación funcional y lógica dentro de una agencia y d) *región*, que mantiene un registro de todos los componentes pertenecientes a una determinada organización.

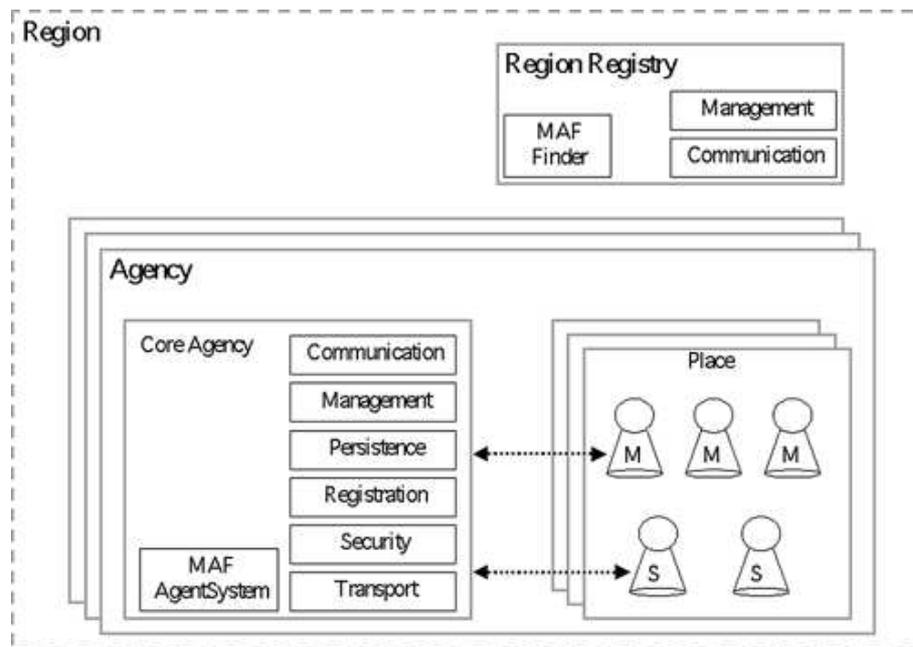


Figura 2.3: Entorno de agentes Grasshopper [BBCM00].

Las características principales de Grasshopper son:

- Soporta interacción mediante CORBA, RMI o sockets.
- Permite transparencia respecto a la localización de los objetos.
- La comunicación entre agentes puede ser asíncrona o síncrona (dinámica o multipunto).
- Los agentes, agentes externos (situados en otros entornos) y aplicaciones pueden acceder a la funcionalidad de agencias remotas y del registro de la región.
- Cada agencia se encarga de mantener servicios de seguridad interna y externa.
- Soporta las siguientes operaciones para la gestión de agentes: creación, borrado, suspensión, reanudación, clonación, copia, migración, almacenamiento e invocación de acciones.

ABLE (Agent Building and Learning Environment)

ABLE es la plataforma de desarrollo y ejecución de agentes de IBM. En esta plataforma los agentes se implementan como JavaBeans.⁵

El entorno ABLE proporciona un conjunto de interfaces y clases JAVA que permiten construir *AbleBeans*. Un *AbleBean* se compone de:

- *BeanInfo*, que proporciona una descripción del componente.
- *Customizer*, que permite personalizar las características parametrizables del *AbleBean*.
- *Observer*, que permite observar las entradas y salidas del *AbleBean*.

Los *AbleAgents*, (agentes en ABLE), se constituyen, normalmente, por varios *AbleBeans* que se pueden comunicar entre si. Las comunicaciones se pueden realizar por: a) flujo de datos, utilizado en aplicaciones del tipo de redes neuronales con paradigmas de proceso de datos b) eventos, que siguen el modelo de suscripción/publicación donde los objetos deben registrarse y c) mediante propiedades, que permite sincronizar las propiedades de dos *AbleBeans*.

La plataforma ABLE cumple la especificación de FIPA, y se está adaptando a las especificaciones de *Java Agent Services* (JAS) [Mas04].

JADE (Java Agent Development Framework)

JADE es la implementación más extendida del estándar FIPA [Mas04].

Desde una perspectiva general, JADE es un entorno de trabajo para el desarrollo de software, orientado al despliegue de sistemas multiagentes y aplicaciones relacionadas con los estándares FIPA para agentes inteligentes [Jad04]. De acuerdo con Rimaza [Rim03], desde su concepción los objetivos de JADE fueron implementar las propiedades señaladas por Wooldridge [Woo02] y cumplir con las especificaciones FIPA.

Siguiendo la propuesta de FIPA, para el diseño de una arquitectura de SMA, los agentes residen en un entorno predefinido que se llama plataforma. Cada plataforma

⁵Un *JavaBean* es un componente software diseñado para poder ser ejecutado en una gran variedad de entornos [Sch01].

está dividida en contenedores y cada uno contiene un conjunto de agentes. Los contenedores pueden entenderse como dominios de agentes.

JADE no sólo proporciona el entorno donde los agentes *viven* sino que también proporciona un conjunto de librerías para el desarrollo de agentes (utilizando como soporte el lenguaje JAVA), que puedan comunicarse entre sí haciendo uso del lenguaje de comunicación FIPA ACL. Además, JADE implementa 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.

JADE también implementa protocolos de comunicaciones estándar identificados en FIPA. Estos protocolos permiten a los agentes interactuar con otros agentes para preguntar, responder, negociar, solicitar la realización de acciones, etc.

En la figura 2.4 se muestra cómo diferentes *hosts* tienen sus propios elementos y comparten el entorno de comunicación. En cada host se ejecuta una máquina virtual de Java (JVM) denominada contenedor (container). Cada contenedor provee un entorno de ejecución completo que permite a los agentes ejecutarse concurrentemente. En el contenedor principal (Main Container) residen el AMS y el DF. El resto de contenedores de agentes están conectados con el contenedor principal. La plataforma JADE proporciona un entorno seguro que permite que los agentes se conozcan y se puedan comunicar mediante el lenguaje de comunicación, FIPA-ACL.

Actualmente, JADE se puede implementar en diversas plataformas incluyendo dispositivos móviles con funcionalidad J2ME-CLDC, que pueden ser desarrollados mediante las librerías JADE-LEAP, que son totalmente compatibles con las librerías de JADE.

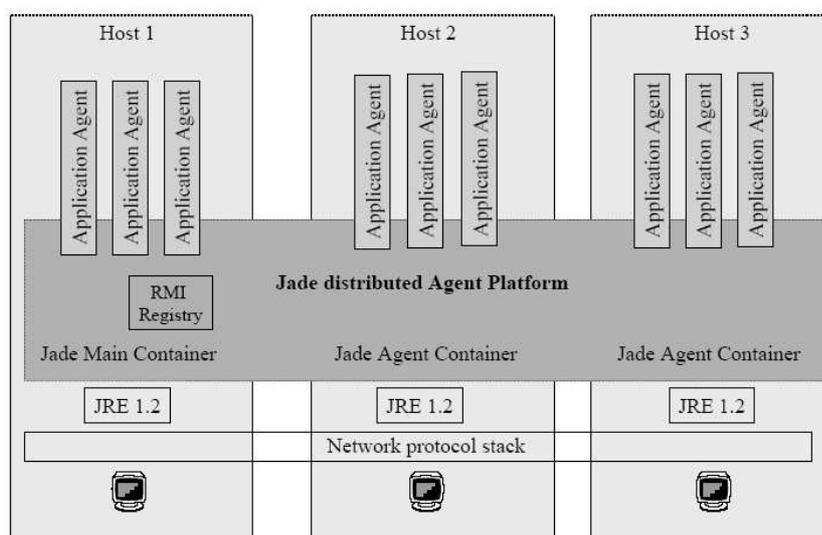


Figura 2.4: Plataforma de agentes JADE distribuida sobre varios contenedores [Jad05].

2.6. Ontologías y Gestión del Conocimiento

La necesidad de los sistemas distribuidos de utilizar y compartir información implica la utilización de vocabularios comunes que permitan describir y representar de forma unívoca, para todos los componentes del sistema, el conocimiento que se tiene del mismo.

La representación de este conocimiento se enfoca mediante el diseño de formalismos computacionalmente apropiados que permiten expresar y representar la información de un área particular. Este conocimiento se ha representado en los sistemas de información utilizando diversos formalismos: en las bases de datos se han utilizado diagramas entidad-relación para definir los conceptos y sus relaciones en un determinado universo; en programación se han utilizado gramáticas y estructuras de datos como clases y objetos, en Ingeniería del Software se ha propuesto el uso de lenguajes de modelado, como UML, donde es posible definir clases y sus relaciones.

Otro de los formalismos utilizados son las ontologías que proporcionan una forma de representar y compartir conocimiento haciendo uso de un vocabulario común. Mediante esta representación permiten utilizar un formato de intercambio de este conocimiento, permitiendo la posibilidad de ampliar, integrar o reutilizar otras ontologías [Sam05].

Existen diferentes definiciones de ontología, dependiendo de los autores, aunque una de las más aceptadas es [Gru]: *las ontologías se definen como una especificación formal y explícita de una conceptualización compartida*. En ella se clasifican los elementos que componen una ontología en:

- *Conceptos*: son las ideas básicas que se intentan formalizar. Los conceptos pueden ser clases de objetos, métodos, planes, estrategias, procesos de razonamiento, etc.
- *Relaciones*: representa la interacción y enlace entre los conceptos del dominio. Suelen formar la taxonomía del dominio.
- *Funciones*: son un tipo concreto de relación donde se identifica un elemento mediante el cálculo de una función que considera varios elementos de la ontología.
- *Instancias*: se utilizan para representar objetos determinados de un concepto.
- *Axiomas*: son teoremas que se declaran sobre relaciones que deben cumplir los elementos de la ontología. Permiten junto al mecanismo de la herencia de conceptos, inferir conocimiento que no esté indicado explícitamente en la taxonomía de conceptos.

En el campo de los agentes, las ontologías son utilizadas como base del conocimiento, lo que permite que los agentes puedan comunicarse y comprender el contenido de los mensajes. FIPA define y especifica el concepto de *servicio ontológico* [FIP98]. Esta especificación trata únicamente los aspectos relacionados con el formato de comunicación de la ontología, mientras que la implementación interna y las capacidades de la misma son realizadas por los desarrolladores.

2.6.1. El Modelo de Referencia de Contenido de JADE

Como se ha comentado, en la descripción del apartado 2.5.2, JADE implementa protocolos de comunicación que permiten a los agentes comunicarse. Sin embargo, también es necesario implementar como se representa el conocimiento, es decir, cuál es el formato de la información y su significado.

En la comunicación la información es representada como una expresión de contenido, que está formada por un lenguaje de contenido y un formato adecuado. Para poder trabajar con expresiones de contenido es necesario clasificar todos los posibles

elementos que aparecen en el transcurso del acto de comunicación [Jad04]. Para ello JADE, utilizando el lenguaje ACL definido por FIPA, ha clasificado en *Predicados* y *Términos* los elementos que pueden intervenir en una expresión de contenido:

- *Predicados*: Son expresiones que explican el estado de una situación. Sólo pueden tomar valores verdadero o falso.

(Mide (Meteo :M1)(Tipo_med: Viento))

- *Términos*: Expresiones que identifican entidades existentes, tanto abstractas como concretas, y sobre las que los agentes pueden hablar o razonar. A su vez, estos se clasifican en:

- *Conceptos*: Expresiones que indican entidades con una estructura compleja que puede ser definida en concepto de propiedades. Es importante destacar que los conceptos no tienen sentido por si mismos como contenido de un mensaje ACL.

(Meteo :Name M1 :Cod_carretera A-3 :Pk 90)

- *Acciones* (de agente): Es un tipo de concepto especial que define aquella acción que un agente puede desarrollar.

(Informar_estado(:Cod_carretera A-3 :Tipo_med Nieve)).

- *Primitivas*: Acciones que identifican entidades atómicas (Strings, enteros, etc.).
- *Agregados*: Son expresiones que identifican entidades que están formadas por grupos de entidades.
- *Expresiones de identidad referencial*: Son aquellas entidades para las cuales un determinado predicado es cierto.
ALL ?X (Mide ?x (Tipo_med: Viento))
- *Variabes*: expresiones que identifican elementos genéricos cuyos valores se desconocen de antemano.

La utilización de lenguaje de contenido, como soporte de ontologías de JADE, se fundamenta en el desarrollo de clases en JAVA, una para cada uno de los tipos definidos en la ontología desarrollada, y que se corresponden con cada uno de los elementos descritos. Así pues, el manejo de expresiones de contenido se realiza mediante objetos JAVA, que no son más que instancias de las clases.

2.7. Evolución de la Tecnología de Agentes

Una de las líneas de investigación más maduras en Europa es el desarrollo de sistemas multiagentes [Lea05]. Existen numerosos grupos de investigación (universidades, institutos de investigación, etc) que están trabajando desde el inicio de la tecnología y que han producido numerosos resultados no únicamente en entornos académicos, sino también industriales.

Como en cualquier tecnología de alto nivel, los SMA desarrollados para aplicaciones industriales y comerciales materializan los resultados de la investigación realizada sobre ellos. A partir de estos resultados, producidos en los últimos 5 años, se puede realizar una previsión de la evolución de la tecnología.

[LMP03] y posteriormente [Lea05] identifican 4 fases en la evolución del desarrollo de los SMA:

- *Estado actual.* Los SMA están diseñados por equipos individuales o entornos de trabajo corporativos. En los sistemas actuales, que se desarrollan para un dominio particular, participan un conjunto de agentes que comparten un conjunto de objetivos. Estos sistemas son escalables únicamente en entornos controlados o simulados.

Los lenguajes de comunicación y los protocolos de interacción están diseñados a medida. Es decir, están diseñados por los desarrolladores antes de que el agente sea ejecutado e interactúe con otros agentes.

Las plataformas de desarrollo, así como las técnicas de diseño y modelado, se realizan a medida, inspiradas por el paradigma orientado a agentes, más que por la utilización de metodologías estandarizadas.

Así pues, la actual demanda de agentes se centra en entornos cerrados. Esto se debe a que: 1) todavía quedan muchos problemas por resolver cuando los agentes se encuentran en entornos abiertos, y 2) en los sistemas en los que intervienen múltiples organizaciones, los acuerdos sobre objetivos son difícilmente alcanzables.

- *Futuro a corto plazo.* En esta fase, los SMA incrementarán sus límites operacionales. Así pues, los agentes tendrán, progresivamente, menos objetivos en común, aunque sus interacciones seguirán realizándose dentro del mismo dominio y seguirán siendo diseñadas por el mismo equipo u organización.

Los lenguajes estándares de comunicación de agente, como FIPA-ACL, también aumentarán su aplicación en el dominio. Sin embargo, los lenguajes de

interacción continuarán integrando lenguajes estandarizados con otros que no lo son.

Los sistemas que se desarrollarán serán capaces de contener un elevado número de agentes, en entornos predeterminados, como por ejemplo, las aplicaciones de computación *grid*.

El desarrollo de plataforma, así como las técnicas y herramientas para el diseño y modelado alcanzarán la madurez en esta fase. Así pues, los sistemas serán diseñados sobre tecnologías e infraestructuras estándares.

Como ejemplos, en esta fase, se diseñarán e implementarán sistemas que permitirán la planificación automática y coordinada entre diferentes departamentos del mismo centro, o sistemas electrónicos de suministros donde los proveedores están relacionados electrónicamente.

- *Futuro a medio plazo.* En esta fase, los SMA permitirán la participación de agentes heterogéneos, diseñados por diferentes equipos y organizaciones. Cualquier agente será capaz de participar en estos sistemas, desarrollando comportamientos públicos y estandarizados. Sin embargo, estos sistemas seguirán siendo desarrollados para dominios de aplicaciones particulares.

Los lenguajes y protocolos que se utilizarán en esta fase serán estandarizados, posiblemente mediante el desarrollo de librerías públicas o protocolos alternativos y compatibles.

Los sistemas desarrollados serán implementados con metodologías específicas y estandarizadas que incluirán plantillas y patrones para diferentes tipos de agentes y organizaciones. El desarrollo de lenguajes de programación y herramientas específicas se extenderá, lo que permitirá la aplicación de técnicas de especificación formal. Los elementos semánticos tendrán una gran importancia en esta fase, por ejemplo para realizar acciones coordinadas entre agentes heterogéneos.

- *Futuro a largo plazo* En esta última fase, se desarrollarán SMA en dominios abiertos que involucrarán la participación de agentes heterogéneos diseñados por diferentes equipos u organizaciones.

Los agentes, que participarán en estos sistemas, serán capaces de aprender los comportamientos adecuados para participar en cualquier interacción que se pueda presentar durante su ejecución. Además la identificación de protocolos de interacción y comunicación, serán seleccionados automáticamente.

Los agentes podrán formar o pertenecer a coaliciones que se crearán dinámicamente y cuyas propiedades (positivas y negativas) no estarán definidas a priori, sino que emergerán a lo largo del proceso de ejecución de los agentes.

En esta fase, los agentes serán considerados como elementos del sistema de alto nivel, fáciles de desarrollar y que podrán ser combinados para formar nuevos componentes y proporcionar nuevos servicios.

Los sistemas serán completamente escalables, sin ningún tipo de restricción (agentes, usuarios, mecanismos de interacción, relaciones, complejidad, etc). Al igual que en la fase anterior, los SMA desarrollados se diseñan e implementan utilizando metodologías, técnicas de programación y verificación específicas.

En la figura 2.5 se presenta un resumen de las tecnologías y su desarrollo en la próxima década.

	Corto Plazo	Medio Plazo	Largo Plazo
Software Industrial	Herramientas de desarrollo Agente UML Servicio orientado a la Computación	Diseños Genéricos para Coordinación Librerías para desarrollo orientado a agentes	La mejor práctica en diseño de sistemas de agentes
Estándares Reconocidos	FIPA ACL Servicio orientado a la Computación Descripción Semántica	Lenguajes de negocio y/o comercio flexibles Librerías de protocolos de Interacción	Herramientas para la evolución de lenguajes de comunicación y protocolos
Infraestructura para Comunidades Abiertas	Minería Web Integración de Datos y Web Semántica Metadatos	Interacción Semántica Web semantica Instituciones Electrónicas Normas dinámicas, roles	Compartido Ontologías mejoradas
Razonamiento en Ambientes Abiertos	Vistas Organizacionales de sistemas de agentes	Entendimiento mejorado de sociedades dinámicas Estrategías de argumentación Teoría y práctica de estrategias de negociación	Sistemas e-Ciencia automatizados y otros dominios de aplicación
Estudio de Tecnologías	Adaptación Personalización Tecnologías Híbridas	Agentes de Desarrollo Autoorganización Aprendizaje distribuido	Reconfiguración en tiempo de ejecución y rediseño
Confianza y Reputación	Seguridad y fiabilidad Pruebas de Fiabilidad Protocolos de Obligación	Mecanismos de Reputación Métodos formales para sistemas abiertos de agentes	Técnicas de confianza para la adaptación con agentes maliciosos

Figura 2.5: Evolución de la tecnología de agentes [Lea05].

2.8. Aplicaciones de los SMA al Tráfico Rodado

La tecnología de agentes está realizando importantes aportaciones en la resolución de problemas en diversos dominios de aplicación (comercio electrónico, medicina, recuperación de información, telecomunicaciones, etc) [Mas04], [GY04].

En este apartado se muestran los desarrollos más relevantes relacionados con la aplicación de los sistemas multiagentes al dominio del tráfico. Las aplicaciones se pueden clasificar dependiendo del usuario al que vayan destinadas: por un lado están las aplicaciones destinadas a los operadores de tráfico, que ofrecen soporte sobre la gestión y control de la red viaria, y por otro las aplicaciones enfocadas a los conductores, que proveen información acerca del estado del tráfico, rutas alternativas, etc.

A continuación se describen algunos de los sistemas multiagente orientados a los gestores del tráfico.

- El sistema *KITS* [KHB00] es un entorno basado en el conocimiento, desarrollado durante los años 1992/94 y financiado por la Union Europea bajo el programa de investigación ATT/DRIVE.

El modelo de conocimiento se estructura en dos organizaciones fundamentales:

- *Funcional*, donde el problema es descompuesto en unidades funcionales especializadas y cada una de ellas es capaz de resolver problemas específicos del dominio.
- *Topológica* que implementa la aproximación jerárquica del análisis y control de la red viaria.

El modelo KITS está estructurado en una colección de unidades de conocimiento que pertenecen a tres tipos: *Agentes*, *Actores* y *Supervisores*. Los agentes representan las capacidades básicas funcionales (como identificación de problemas, modelado del comportamiento del tráfico, suministro de datos, etc) del modelo de conocimiento de KITS. Los actores son las unidades de conocimiento encargadas de la gestión y evaluación del tráfico dentro de áreas concretas de la red viaria. Los supervisores representan las unidades de conocimiento más elevado del modelo y se encargan de construir una interpretación completa y consistente de las condiciones de tráfico en la red viaria.

El sistema ha sido validado en diferentes ciudades europeas como Colonia, Trondheim, Genova y Madrid.

- El sistema *TRYS* es un sistema multiagente como soporte a la toma de decisiones para la gestión de tráfico urbano en tiempo real [HCM96]. *TRYS* divide la red viaria en secciones no disjuntas, llamadas *áreas problemáticas*, cuya suma es el conjunto global de la red viaria que modela (ver figura 2.6).

A cada una de estas áreas se le asigna un agente local, cuyos objetivos son: monitorizar el tráfico en su área, detectar los posibles incidentes que ocurran

en ella y proponer acciones de gestión y control que permitan solucionar estos problemas. Para ello el agente tiene tres tipos de conocimiento: la estructura física de la red viaria de su área, los problemas de tráfico y su detección y las estrategias de gestión de tráfico.

Por encima de los agentes, se encuentra un agente coordinador, cuyo objetivo es determinar la compatibilidad de las medidas propuestas por los agentes locales y si hubiera incompatibilidades, definir que medida es la prioritaria.

Cuando un agente local detecta un incidente, propone un conjunto de medidas al agente coordinador, que se encarga de analizar las medidas con las existentes y determinar las medidas globales para la red viaria completa.

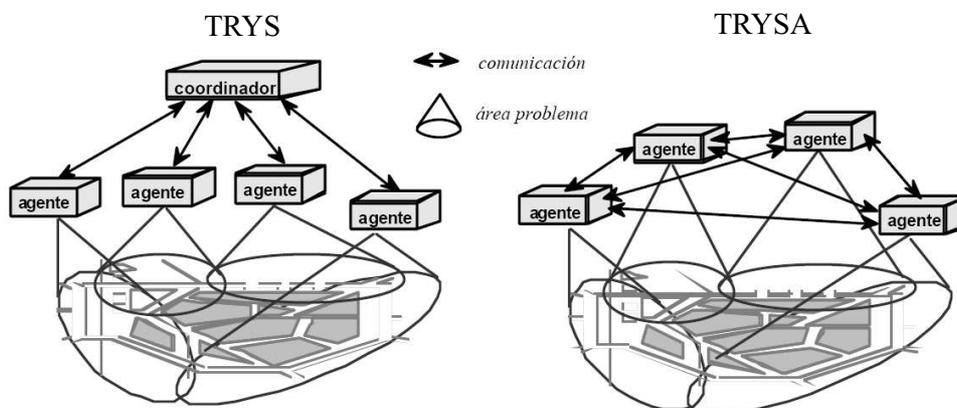


Figura 2.6: Sistema TRYS y TRYSA [HOS01].

En el sistema *TRYSA* (figura 2.6), basado en el sistema *TRYS*, no existe un agente coordinador. En este sistema los agentes dejan de ser benevolentes para convertirse en agentes autónomos y autointeresados proporcionando un sistema multiagente descentralizado [HOS01]. En esta situación, como se observa en la figura 2.6, cada estrategia de gestión y control de tráfico que cada agente desea implementar debe ser negociada con los agentes locales adyacentes.

Ambos sistemas, *TRYS* y *TRYSA*, han sido probados en Barcelona.

- El sistema *FLUIDS* [KHB00] es un sistema basado en el conocimiento de interfaces inteligentes como soporte a la toma de decisiones. El sistema fue desarrollado durante los años 1994/96 y financiado por la Union Europea bajo el programa de investigación *Telematics Applications*. Este modelo surge de la experiencia obtenida en los sistemas anteriores, *KITS* y *TRYS*, donde se detectó un aumento de las funcionalidades que ofrecían los sistemas a los operadores.

FLUIDS mejora la interacción entre el operador y el sistema mediante el desarrollo de un intérprete inteligente. Este intérprete distingue tres componentes principales: El *gestor de presentación*, que se encarga de la entreda/salida del sistema, el *gestor de resolución de problemas*, que contiene el modelo de conocimiento para la implementación automática de herramientas que permiten obtener las respuestas y por último el *gestor de conversación* que es el intérprete inteligente entre el usuario y el sistema. El gestor de conversación se encarga de seleccionar los elementos adecuados, pertenecientes al gestor de resolución de problemas, para proporcionar la respuesta adecuada a la pregunta realizada por el operador.

El sistema ha sido validado en diferentes ciudades europeas como Turin y Barcelona.

- *MASHGREEN DM* es un sistema multiagente para la diagnosis del comportamiento del tráfico en entornos urbanos basado en modelos cualitativos [FL01]. El sistema, desarrollado en un entorno cooperativo, está compuesto por tres tipos de agentes: *monitorización*, *detección* y *diagnosis* que comparten la misma arquitectura software. El agente de monitorización se encarga de la monitorización cualitativa del tráfico. Esta monitorización se realiza de dos formas: mediante los datos reales proporcionados por los sensores de tráfico y mediante la simulación cualitativa de la evolución del tráfico. El agente de diagnosis compara los resultados obtenidos por el agente de monitorización y los analiza con los problemas que pueden producirse y que son proporcionados por el agente de detección. Los incidentes detectados son enviados al agente interfaz que se encarga de avisar al operador de la posible presencia de incidentes en la red viaria.
- En [dOBL05] se presenta una aproximación, mediante agentes cooperativos, para la coordinación semafórica. El modelo se basa en la aplicación de la teoría de juegos para la coordinación de las señales en una red viaria. En el sistema cada uno de los agentes representa un semáforo con su plan de señales, que debe coordinar con los agentes vecinos. El sistema es descentralizado y los agentes forman, dinámicamente, grupos para acordar planes de señalización.
- En [vvDH05] se presenta un banco de pruebas para la gestión y control de tráfico mediante agentes. El sistema se compone de tres modelos: *interacciones*, *inteligencia* y *mundo*. El modelo de interacciones se encarga de gestionar las interacciones entre los agentes, (siguiendo el estándar FIPA), que componen el sistema. El modelo de inteligencia se utiliza para modelar la inteligencia individual de los agentes, bien mediante inferencia por *reglas* o inferencia *bayesiana*. El modelo del mundo se encarga de modelizar el entorno donde los

agentes se ejecutan. En este caso, la red viaria, se simula mediante un simulador microscópico, *Paramics*, que permite simular el comportamiento del tráfico (llegando hasta el nivel de detalle de vehículo).

Partiendo de este entorno como base, se desarrollan diferentes aplicaciones que permiten simular escenarios de aplicación para sistemas multiagentes, como por ejemplo el desarrollo de control de accesos (*ramp metering*⁶) o planes de señalización.

- Otras aplicaciones de SMA al tráfico se centran en el desarrollo de simuladores. La aplicación de agentes, en este campo, presenta ventajas sobre la aproximación tradicional [GY04], ya que permite obtener simulaciones y previsiones de comportamiento en tiempo real, a la vez que permite modelar, de manera totalmente independiente, los distintos comportamientos de los conductores. Un ejemplo, el simulador microscópico *CityTraffic*, [CIT05] que combina sensores en tiempo real con un sistema de agentes distribuido que se encargan de predecir la evolución del tráfico.

En el marco de los servicios orientados al usuario, se han desarrollado multitud de plataformas que permiten proporcionar información tanto *pre-trip* como *on-trip*.⁷

- *TrafficDodger* [TDO04] es un sistema multiagente que permite al usuario el cálculo de itinerarios y sus tiempos de recorrido estimados, incluyendo la información del estado del tráfico en tiempo real.
- Track-R [GTCM03] es un sistema que proporciona al usuario la mejor ruta para ir de una ciudad a otra. Cada agente *track-r* es el responsable de gestionar una área geográfica y calcular la mejor ruta entre dos ciudades. Los agentes pueden comunicarse entre si para proveer rutas entre ciudades que pertenezcan a regiones distintas. El prototipo del sistema incluye el área de la comunidad de Madrid y de la Comunidad Valenciana y esta siendo ampliado al area metropolitana de Barcelona.
- Uno de los servicios donde más sistemas se están desarrollando son los servicios de notificación (alertas) [FRE], [TEL]. En estos sistemas, el usuario, mediante su agente interfaz, identifica los segmentos de la red viaria sobre los que quiere recibir información y en que periodo de tiempo. El agente interfaz se encarga de contactar con los agentes que sirven esta información, e informa al usuario cuando sea necesario.

⁶El ramp metering es una estrategia de gestión de tráfico que consiste en el la restricción de accesos entre redes.

⁷La información *pre-trip* es aquella que recibe el usuario antes de comenzar el viaje o recorrido, mientras que la información *on-trip* es la que recibe cuando se encuentra realizando el viaje.

- Otro de los sistemas desarrollados es ESWIT, (Emparejador de Servicios Web de Información de Tráfico), orientado a facilitar, asistir, y optimizar los procesos de anuncio, descubrimiento e invocación de Servicios Web dinámicos relacionados con el área de información sobre tráfico vial. La plataforma final, permite que usuarios (representados por agentes clientes) soliciten a agentes emparejadores la búsqueda de Servicios Web acordes con las capacidades semánticas que están buscando, para después ser invocados. De igual forma, los servicios anunciados son representados por agentes proveedores dentro de la plataforma. Para poder llevar a cabo su cometido, se hace uso de una ontología de dominio soporte tanto del emparejamiento de servicios como de la descripción de estos [Sam05].

2.9. Conclusiones

En este capítulo se han descrito los agentes y los sistemas multiagentes. A pesar de que el concepto de agente no está consensuado, sí existe un conjunto de propiedades que deben cumplir los agentes y que permiten el desarrollo de los sistemas multiagentes, independientemente del concepto de agente.

A partir de los diferentes conceptos de agentes y de la definición de un sistema multiagente, se ha descrito el contexto tecnológico y la participación de los SMA en el ámbito de las tecnologías emergentes. De las arquitecturas de agentes existentes, cabe destacar la arquitectura FIPA, ya que además de ser una de las más extendidas es, desde Junio de 2005, una organización de estandarización perteneciente a *IEEE Computer Society*. FIPA desarrolla, desde su creación en 1996, estándares que han contribuido al desarrollo de los Sistemas multiagentes. Además la plataforma de FIPA contiene todos los elementos necesarios para poder desarrollar y utilizar agentes.

En el capítulo también se han descrito las principales metodologías y plataformas para el diseño de sistemas multiagentes. Las metodologías analizan y modelan el sistema en base al desarrollo de un conjunto de modelos. De éstas, destaca Ingenias, ya que integra los modelos presentes en otras metodologías e incorpora el modelo de entorno, que describe las interacciones de los agentes con el entorno donde se encuentran. En el marco de las plataformas de soporte, JADE es una de las más utilizadas. JADE, que es una implementación de la arquitectura de FIPA, no solo es un entorno de desarrollo sino que también implementa la plataforma y el conjunto de agentes encargados de gestionarla (por ejemplo, el DF y el AMS).

A lo largo del capítulo se ha mostrado cómo los agentes y los SMA son entornos

especialmente adecuados para el desarrollo de aplicaciones en entornos distribuidos. La interacción, no solo entre agentes del mismo SMA, sino también entre agentes pertenecientes a distintas plataformas, mediante lenguajes y protocolos estandarizados, facilita la comunicación y el desarrollo de actividades coordinadas. Estas actividades coordinadas pueden formar parte del objetivo inicial de los agentes, (entornos cooperativos) o bien negociarse durante la ejecución de los agentes (entornos autointeresados).

La tecnología de agentes no ha llegado todavía a su cima, sino que está en plena fase de evolución como lo demuestra la presencia, cada vez mayor, de los sistemas multiagentes en otros dominios: Medicina, Economía, Sistemas de producción, etc. Uno de los campos donde mayor auge está teniendo la tecnología de agentes es en el dominio del transporte. Esto se debe a las características intrínsecas del transporte, (dominio altamente distribuido y dinámico, gestión y control descentralizado, problemas complejos que requieren soluciones negociadas entre diferentes actores, etc.), donde los sistemas multiagentes representan una solución viable a todos estas características. Como ejemplo, se muestran en el capítulo algunos de los sistemas más representativos, muchos de los cuales han sido instalados en las principales ciudades europeas.

Capítulo 3

Negociación Estratégica

En este capítulo se presenta una introducción a la negociación estratégica como mecanismo para el desarrollo de interacciones entre diferentes jugadores que negocian sobre algún elemento y cómo la teoría de juegos, más concretamente, los *juegos extensivos*, permiten implementar estos mecanismos.

Para ello, primero se presentan los conceptos sobre negociación y teoría de juegos y los diferentes tipos de juegos existentes: estratégicos, extensivos y coaliciones. De ellos, se ha prestado un especial interés a los juegos extensivos. A partir de los juegos extensivos se describen los protocolos de negociación, su clasificación y elementos que lo componen, así como los parámetros para su evaluación. En la última parte del capítulo se presenta un conjunto de protocolos de negociación desarrollados por distintos autores hasta la fecha. Cada uno de los protocolos está enfocado a un dominio de aplicación concreto y se desarrollan en diferentes entornos de negociación (horizonte finito o infinito, información completa e incompleta, ...).

3.1. Introducción

La evolución de los sistemas informáticos en los últimos años ha dejado patente que estos sistemas no trabajan de manera aislada. Los nuevos sistemas pasan a ser elementos activos y forman parte de las nuevas comunidades virtuales. Estas comunidades, complejas y distribuidas, han pasado de estar formadas únicamente por sistemas informáticos a incluir también a personas.

El aumento de elementos que pertenecen a estas comunidades y la diversidad de cada uno de ellos, unido a la necesidad de interactuar entre sus elementos, hacen

necesario el desarrollo de sistemas de comunicaciones fiables y comprensibles para todos sus miembros. Las diferentes capacidades de cada elemento y las competencias a la hora de realizarlas implican desarrollar estrategias de coordinación y cooperación para el desarrollo de actividades conjuntas. La coordinación y/o cooperación es fundamental en entornos inteligentes, donde cada elemento de la comunidad es autointeresado y sus objetivos están determinados por el tipo o afiliación de ese elemento. Ahora bien, los diferentes elementos pueden o deben cooperar para la resolución de problemas complejos que ellos mismos de forma aislada no podrían solucionar.

Uno de los mecanismos principales de cooperación es la negociación. La negociación se define como el encuentro para resolver una situación entre diferentes participantes. En el encuentro, cada uno de los participantes oferta y demanda un conjunto de recursos así como las condiciones de la negociación, que permiten para llegar a un acuerdo. Si el resultado de la negociación es positivo, cada uno de los participantes se compromete a desarrollar los acuerdos realizados. Este compromiso no es permanente debido a que se pueden producir situaciones posteriores al acuerdo donde el entorno sufra modificaciones. Estas modificaciones pueden hacer no viables los términos del protocolo acordados para alguno de los elementos que participan en la negociación.

Para lograr acuerdos entre los diferentes elementos de la comunidad, los mecanismos de interacción entre todos ellos deben estar claramente definidos y deben ser conocidos y aceptados por todos. 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* [OR05].

3.2. Conceptos sobre Negociación y Teoría de Juegos

La teoría de juegos estudia las interacciones entre los distintos elementos que participan en una negociación, donde el resultado no sólo depende de su actuación sino también de las decisiones tomadas por el resto de elementos que participan en la negociación.

Un juego es una descripción de la estrategia de interacción que incluye las restricciones sobre las acciones que los elementos pueden realizar así como de sus intereses pero que en ningún momento especifica las acciones que se llevan a cabo.

Los elementos que componen un juego son: participantes o jugadores, acciones,

información, estrategias, beneficios, resultados y equilibrios [Kra01]. Los participantes son elementos individuales que pueden tomar decisiones a lo largo del juego con el objetivo de maximizar su beneficio. Las acciones definen el posible conjunto de actuaciones que un participante puede desarrollar, dependiendo del conocimiento que el jugador tenga del entorno de negociación, esto es de la información. Las estrategias definen los planes de acción que cada participante ejecuta a lo largo del juego y dependiendo de ellas obtienen unos beneficios. Los beneficios cuantifican el resultado final de la negociación. El resultado define los acuerdos tanto positivos como negativos obtenidos en el proceso. Por último, el equilibrio define la equidad del protocolo independientemente del participante.

Existen tres aproximaciones para modelar las interacciones como juegos [OR94], [Kra01]:

- **Estratégicos:** También conocidos como juegos en *forma normal*. En estos juegos se definen todas las posibles estrategias de cada participante y los beneficios obtenidos de aplicar cada una de las elecciones estratégicas del resto de participantes. Ninguno de los participantes de un juego estratégico conoce las elecciones que el resto va a realizar.

El alto nivel de abstracción que presentan los modelos estratégicos permiten utilizarlos en un amplio abanico de situaciones, [OR94] si bien hay que tener en cuenta que con este grado de abstracción no se pueden establecer muchas conclusiones del resultado cuando el juego ha concluido.

El concepto de solución comúnmente utilizado para predecir el resultado de un juego estratégico es mediante la *teoría de Nash* [Nas53]. Esta teoría permite determinar una situación estable en la cual los jugadores mantienen unas expectativas adecuadas acerca del comportamiento y las acciones de los otros jugadores. Una acción desarrollada por un jugador i , se encuentra en equilibrio de *Nash* si no existe otra acción j desarrollada por otro jugador que mejore el rendimiento producido por la acción i .

- **Extensivos:** Un juego extensivo es una definición explícita de la estructura de los problemas de decisión que los jugadores pueden encontrar en cada situación estratégica [OR94]. Este modelo permite estudiar las soluciones posibles al juego donde cada jugador considera su plan de actuación no sólo al principio del juego, sino también en cualquier instante del juego donde el jugador deba tomar una decisión.

En este tipo de juegos se detallan todos los elementos que intervienen en el juego, para ello se definen los distintos estados de la interacción, las condiciones bajo las cuales cada uno de los participantes ejecuta alguna acción, la infor-

mación que cada uno posee en cada uno de los estados y cual es la motivación de cada participante.

Un juego en forma extensiva se define como un árbol compuesto por nodos, ramificaciones y las funciones que asignan valores a cada uno de ellos [Kra01]. Las hojas del árbol representan el conjunto de posibles soluciones del juego. La secuencia de eventos que puede ocurrir mientras se desarrolla la negociación es un camino desde el nodo raíz hasta una de las hojas.

La utilización del equilibrio de Nash en este tipo de modelos puede conducir a una solución de equilibrio absurdo [Tir88]. A esta solución absurda se llega ya que las estrategias en equilibrio de Nash sólo se encuentran al inicio del juego y no en cada uno de los estados intermedios que tiene el juego. El concepto de equilibrio perfecto de subjuego [OR94] permite analizar la negociación de este tipo de juegos. Una estrategia de un juego extensivo cumple con el equilibrio perfecto de subjuegos si para cada una de las estrategias desarrolladas en cada elección posible a lo largo del juego, ésta cumple con el equilibrio de Nash.

- **Coaliciones:** Este tipo de juego consiste en la descripción de las interacciones sociales de los jugadores. Estas interacciones sirven para el desarrollo o refuerzo de acuerdos comunes. Los acuerdos comunes permiten a los jugadores o a coaliciones de ellos llegar a acuerdos para desarrollar acciones que pueden ir en contra de sus propios intereses individuales [KR84]. Así pues, al contrario que en las dos primeras aproximaciones (no cooperativas), en ésta los jugadores cooperan para desarrollar acciones conjuntas.

Un juego de coaliciones consiste en una especificación de las coaliciones que se han formado y de las acciones conjuntas que se van a desarrollar. Este tipo de juegos se puede diferenciar claramente de los juegos no cooperativos ya que enfocan la resolución de la negociación en los grupos de jugadores que pueden realizar las acciones, más que en un único jugador individual y por el hecho de que no consideran los detalles de cómo las coaliciones de jugadores funcionan internamente.

3.2.1. Estrategias de Negociación

Una estrategia de negociación es un plan completo de conducta que especifica el comportamiento del jugador. Es decir, cuales son las decisiones que debe tomar bajo cualquier circunstancia que se le pueda presentar [OR94], [DBS03].

Las estrategias se pueden clasificar en *puras* y *mixtas*:

- Una estrategia *pura* es aquella que determina una única acción para cada conjunto de información. Es decir, cuando un jugador debe decidir cual es la siguiente acción que debe realizar, esta estrategia le especifica concretamente cual es esa acción.
- Una estrategia *mixta* consiste en una distribución de probabilidad sobre el conjunto de estrategias puras de un jugador. Esto es, para un jugador i , una estrategia mixta consiste en un vector de m_i componentes que asocian una probabilidad de desarrollo a cada estrategia E_i y cuya suma es igual a 1.

La estrategia que desarrolla un jugador se define como *óptima* si es la estrategia que proporciona al jugador el mayor beneficio en el juego.

3.2.2. Información del Entorno de Negociación

Los estados de información de los jugadores determinan el conocimiento que cada jugador tiene sobre el entorno de la negociación. Esta información puede clasificarse en información *completa* e *incompleta*[OR94]:

1. Un juego se denomina de información *completa* si todos los jugadores, que participan en él, conocen: los jugadores que participan, el conjunto de acciones que todos pueden realizar y los resultados posibles de realizar cada una de las acciones. Es decir, si todos los jugadores tienen un conocimiento completo de todas las variables que intervienen en el juego.
2. Un juego es de información *incompleta* si algún jugador desconoce alguno de los elementos que participa en el juego.

Además, los juegos de información incompleta también pueden clasificarse atendiendo al conocimiento que los jugadores tienen de las acciones que han realizado a lo largo del juego. En este caso, los juegos se clasifican en juegos con *memoria perfecta* o *imperfecta*:

- a) Un juego tiene memoria *perfecta* si los jugadores recuerdan todos los movimientos en los que él ha realizado una acción, desde el inicio del juego.
- b) Un juego tiene memoria *imperfecta*, si a lo largo del mismo, los jugadores olvidan las elecciones que se han realizado en situaciones anteriores.

3.3. Juegos Extensivos

Un juego *extensivo* es una descripción detallada de la estructura secuencial de los problemas de decisión encontrados por los jugadores en una situación estratégica.

Estos juegos se pueden clasificar, dependiendo del conocimiento sobre la información de la negociación, en juegos de información *perfecta* o *imperfecta*. Un juego se define de información perfecta si cada uno de los jugadores, a la hora de tomar una decisión, está perfectamente informado de todos los eventos que han ocurrido previamente. Es decir, el jugador recuerda cuales han sido las elecciones realizadas hasta ese instante. Por el contrario, un juego se define de información imperfecta, si en el momento de tomar la decisión, un jugador desconoce cual ha sido el evento previo que ha llevado a esa situación.

3.3.1. Juegos Extensivos con Información Completa

Un juego extensivo con información completa se compone de los siguientes elementos [OR94]:

- Un conjunto finito, N , compuesto por n jugadores.
- Un conjunto H de secuencias (finitas o infinitas). Cada miembro de H es una historia, y cada componente de una historia es una acción, acc , realizada por un jugador. El conjunto H satisface las siguientes propiedades:
 - Una secuencia vacía, \emptyset , es miembro de H .
 - Si una secuencia de acciones $(acc^k)_{k=1\dots n} \in H$ y $l < n$ entonces $(acc^k)_{k=1\dots l} \in H$.
 - Si una secuencia de acciones $(acc^k)_{k=1}^\infty$ satisface que $(acc^k)_{k=1\dots l} \in H$ para cada entero positivo l , entonces $(acc^k)_{k=1}^\infty \in H$.

Una historia $(acc^k)_{k=1\dots n} \in H$ es *terminal* si es infinita o si no existe una $(acc^{n+1})/(acc^k)_{k=1\dots n+1} \in H$.

- Una función P que asigna a cada historia no terminal un miembro del conjunto N . Es decir, P es la función que determina quien es el jugador que va a realizar la acción después de la historia h .

Por consiguiente, un juego extensivo se define como una tripleta $\{N, H, P\}$, donde se cumple que al inicio del juego el conjunto H está formado únicamente por la historia vacía. Si el conjunto de historias, H , es finito, el juego extensivo es finito.

En este tipo de juegos, el equilibrio de Nash es insatisfactorio, esto se debe a que dicho equilibrio sólo se cumpliría en la situación inicial, no en los estados intermedios del juego. La solución para analizar el equilibrio en los juegos extensivos con información perfecta se basa en el *equilibrio perfecto en subjuegos* [OR94].

Un subjuego es una parte de un juego total que es un juego en si mismo. Esto es, contiene todas las consecuencias futuras de su acción e incluye toda la información necesaria para jugar esa parte del juego (ver figura 3.1). Un subjuego es por tanto un subconjunto que satisface que [DBS03]:

- Se inicia en un nodo de decisión único.
- Contiene todos los sucesores de ese nodo, siendo un sucesor de un nodo n cada uno de los posibles nodos que pueden alcanzarse siguiendo una sucesión de ramas que se inician en n .
- Si tiene parte de un conjunto de información entonces tiene todos los nodos de ese conjunto de información.

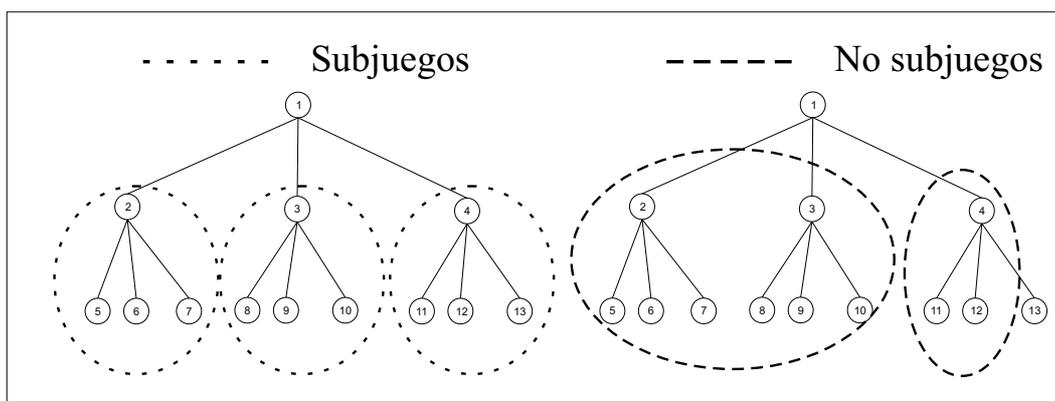


Figura 3.1: Subjuegos. En el árbol de la izquierda se presentan los posibles subjuegos al juego original. En el árbol de la derecha se muestran dos subconjuntos del juego original que no son subjuegos.

Para la determinación del equilibrio perfecto en subjuegos se supone que las acciones que los jugadores realizan en cada una de las estrategias deben ser óptimas dadas las estrategias de los otros jugadores para cada una de las historias.

Definimos un equilibrio perfecto en un subjuego Γ como la estrategia S^* en el juego en la que para cualquier historia h , la estrategia S^* es un equilibrio de Nash para ese subjuego.

3.3.2. Juegos Extensivos con Información Incompleta

Un juego extensivo con información incompleta se compone de los elementos que forman los juegos de información completa, es decir, el conjunto N de jugadores, el conjunto H con la historia y además se compone de:

- Una función P que asigna a cada historia no terminal un miembro del conjunto $N \cup \{c\}$. Es decir, P es la función que determina quien es el jugador que va a realizar la acción después de la historia h . Si $P(h) = c$ entonces el azar determina la acción que se realizará después de la historia h .
- Una función f_c que asocia a cada historia h para la que $P(h) = c$ una medida de probabilidad. Es decir, $f_c(acc, h)$ es la probabilidad de que la acción acc ocurra después de la historia h .
- Una partición I_i de $\{h \in H : P(h) = i\}$ donde el conjunto posible de acciones a realizar para dos historias distintas, h y h' es el mismo si ambas historias se encuentran en el mismo elemento de la partición. Los miembros de una partición, $I_i \in I_i$ se denominan conjuntos de información del Jugador i .

Así pues, definimos un juego extensivo con información incompleta como una quintupla de valores $\{N, H, P, f_c, I_i\}$, donde se cumple que al inicio del juego el conjunto H esta formado únicamente por la historia vacía. En este juego, después de ocurrir una historia $h \in I_i \in I_i$ el jugador i sabe que ha ocurrido una historia h en I_i , pero no conoce la historia h que ha ocurrido.

La figura 3.2 muestra las tres primeras etapas de un juego extendido. Al iniciarse el juego, el jugador a realiza una acción, del conjunto de acciones posibles (acc_a^1 , acc_a^2 y acc_a^3). En ese instante, el jugador b , sabe que ha ocurrido una historia h y que debe realizar una acción. Ahora bien, el jugador b no conoce cual es la historia h pero conoce el conjunto de información de esa etapa, definido como I_b^1 y la probabilidad de que se encuentre en uno de los miembros de ese conjunto (nodos 2, 3, 4). Así pues, dependiendo de estas creencias, determina la acción que va a realizar. En este punto, es el jugador a el que conoce que ha ocurrido una nueva historia h' y debe determinar la siguiente acción a realizar. Al igual que ocurre en la etapa anterior con el jugador b , el jugador a no conoce la historia h' que ha ocurrido, pero si conoce el conjunto de información I_a^i en el que se encuentra (es decir, a sabe si esta en I_a^1 , I_a^i o I_a^i) y las probabilidades de estar en cada uno de los miembros de I_a^i . Luego el jugador a escoge de nuevo una acción. Este proceso se repite hasta que llegamos a una historia h^t que es terminal.

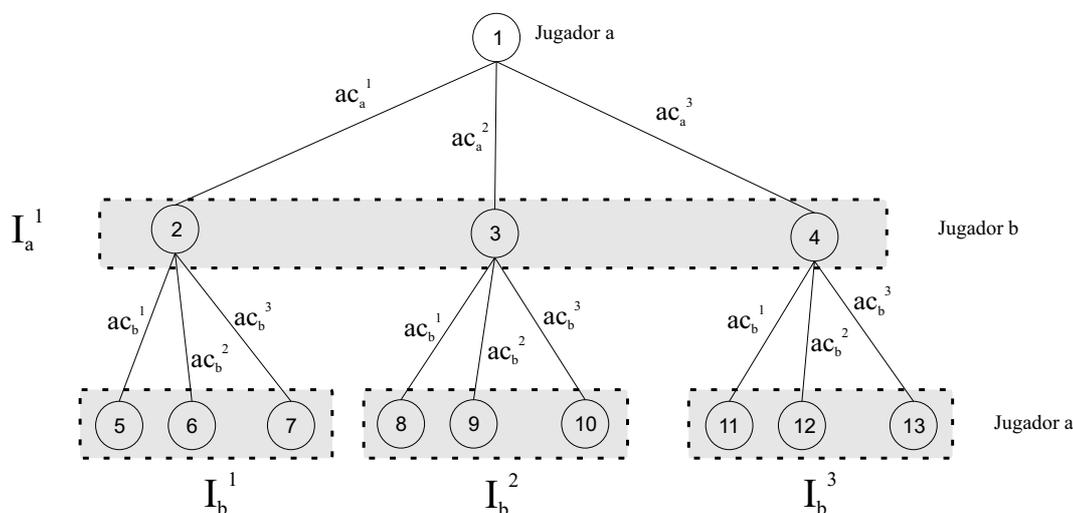


Figura 3.2: Árbol de un juego extendido con información incompleta.

El equilibrio perfecto en subjuegos, aplicado a los juegos extensivos con información perfecta, es un perfil de estrategia donde todas las estrategias del jugador son óptimas, dadas las estrategias de sus oponentes. Ahora bien, en los juegos con información imperfecta los jugadores no conocen las estrategias que están desarrollando los otros jugadores.

La solución para la determinación del equilibrio consiste en el *equilibrio secuencial* que consiste no sólo en el perfil de la estrategia sino que también tiene en cuenta el sistema de creencias de los jugadores. El sistema de creencias especifica, para cada conjunto de información, las creencias de cada jugador sobre la historia h ocurrida.

Para definir el equilibrio secuencial definimos primero el concepto de *valoración*. Una valoración es un par (β, μ) donde β es un perfil de estrategia y μ es una función que asigna a cada conjunto de información una probabilidad sobre el conjunto de historias en el conjunto de información. Es decir, μ se refiere al sistema de creencias que define la probabilidad que un jugador i asigna a cada una de las historias que hay en I_i , si éste es alcanzado.

Una valoración es un equilibrio secuencial de un juego extensivo finito con memoria perfecta si es *secuencialmente racional* y *consistente*[OR94].

- Una valoración es secuencialmente racional si para cada jugador i y cada conjunto de información $I_i \in \mathcal{I}_i$, la estrategia de i es la mejor respuesta a las estrategias de los otros jugadores partiendo de las creencias en I_i .
- Una valoración es consistente si el perfil de estrategia β es completamente

mixto, μ es el único sistema de creencias cuyas probabilidades son iguales a las implicadas por β .

3.4. El Protocolo de Negociación

El modelo de negociación como un juego extensivo necesita de una descripción explícita de la estructura secuencial del proceso y de los problemas de decisión de los jugadores. Esta descripción se denomina protocolo de negociación y juega un papel significativo para determinar el resultado de la negociación.

3.4.1. Componentes de un Protocolo de Negociación

A continuación se describen los componentes de un protocolo de negociación [Kra01], [Rea94]:

- El entorno de negociación, con los jugadores que participan, los roles que cada uno de ellos puede desarrollar, los servicios, recursos y la agenda donde se 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 cuando 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.
- 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 cual 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 cuales son las estrategias óptimas que maximizan el beneficio de los jugadores durante la negociación.

3.4.2. Entorno de Negociación

Las principales características que caracterizan el entorno de un protocolo de negociación son [FWJ04a], [Kra01], [OR94]:

- El **tiempo** y la noción que los jugadores implicados tienen del mismo. Por un lado, los jugadores pueden trabajar con un horizonte *infinito*, donde no existe ninguna instante temporal máximo donde el acuerdo debe alcanzarse o bien con horizonte *finito* donde existen unos instantes de tiempo que definen los valores temporales topes hasta los que se puede negociar.

Otra característica es la forma en la que transcurre el tiempo a lo largo de todo el proceso de negociación. Por un lado, tenemos intervalos *discretos* y *equidistantes*, durante los cuales los jugadores realizan una acción en un instante t y esperan una reacción en un instante conocido, $t+1$ o los intervalos *continuos* y *variables*, donde el tiempo transcurre en tiempo real y los jugadores desconocen el siguiente instante de tiempo en el cual se producirá una reacción a su acción.

Por último, es importante destacar como afecta el paso del tiempo a los jugadores. Es decir, si un jugador obtiene beneficios conforme el tiempo discurre o por el contrario necesita alcanzar un acuerdo lo antes posible ya que pierde beneficio con el paso del tiempo.

- El **conocimiento** del entorno de negociación que los distintos jugadores tienen. En entornos de información *completa*, los jugadores conocen todas las posibles variables que intervienen en la negociación incluyendo la información privada del resto de jugadores. En contraposición a este conocimiento, se encuentran los entornos donde la información que disponen los jugadores es *incompleta*, esto es, desconocen algunas de las variables que median en el protocolo de negociación.

Para poder trabajar con entornos de información incompleta, existen dos teorías bien diferenciadas: el *principio de revelación* [San99], [GL77] y la utilización de las *creencias* de los jugadores [HS72]. La primera teoría se basa en compartir toda la información de los jugadores involucrados en el proceso de negociación antes de que empiece el proceso y la segunda se basa en la utilización del conocimiento propio del jugador en función de su información y su experiencia. Para ello el jugador utiliza una función que asigna, a cada uno de los posibles valores, una probabilidad.

- La tercera característica que define un protocolo de negociación es el **número de elementos** que intervienen en la negociación. Los protocolos que negocian sobre más de un elemento llevan asociada una *agenda* de negociación.

Ésta define los elementos que se negocian y el orden de negociación si es que existiera. Otro factor es la determinación de la agenda ya que puede ser *exógena*, es decir definida antes de iniciar la negociación, o bien *endógena*, definida durante el propio proceso de negociación, en este caso cada vez que se logra un acuerdo o desacuerdo sobre un elemento se decide cual es el siguiente elemento a negociar.

Los elementos que pertenecen a la agenda pueden ser *independientes*, donde el acuerdo o desacuerdo de uno de los elementos no afecta las variables de negociación del resto de elementos, o por el contrario ser *dependientes*, donde los resultados de negociación de un elemento pueden afectar positiva o negativamente el acuerdo del resto.

La forma en la que los elementos de la negociación que pertenecen a la agenda y sobre los que se ha alcanzado un acuerdo se implementan es definida como *secuencial* o *simultánea*. En la implementación secuencial los elementos de la negociación se van ejecutando conforme se van acordando, mientras que en la implementación simultánea, se ejecutan todos a la vez cuando el proceso de negociación ha finalizado.

3.4.3. Reglas de Encuentro

Las reglas de encuentro definen las pautas de comportamiento de los jugadores a lo largo de la negociación. Es decir, definen las circunstancias bajo las cuales los participantes en la negociación realizan las interacciones [OR94].

Función de utilidad

La función de utilidad permite valorar los beneficios de las ofertas que se reciben y las contraofertas que se realizan. Los jugadores tienen una función de utilidad sobre todos los posibles resultados de la negociación. Esto incluye también al resultado de conflicto. La naturaleza de la función de utilidad depende del dominio específico donde se desarrolle el protocolo, si bien el tiempo y los recursos empleados en la negociación deben formar parte de ella.

En trabajos previos sobre modelos formales [Rea94], la función de utilidad de estos modelos era rara vez discutida o presentada. Se asumía que cada jugador conocía su función. Sin embargo, en el diseño de jugadores autónomos se requiere la especificación detallada de la función de utilidad. Además, debe pertenecer a alguna de las siguientes categorías [Kra01]:

- *Ganancias/pérdidas fijas por unidad de tiempo.* La evolución de la negociación tiene un coste/beneficio sobre la utilidad del resultado. Los costes pueden deberse a gastos producidos por el precoste de negociación y los beneficios a la utilización del servicio sobre el que se está negociando.
- *Ratio de descuento por unidad de tiempo.* En esta situación, cada jugador tiene fijado un ratio de descuento fijo conforme avanza la negociación.
- *Modelos con sistemas financieros.* Existe un sistema monetario que permite al jugador tomar prestado o prestar según una tarifa interesada. Esto no debe interpretarse como que los jugadores intercambian dinero sino como una forma de valorar los resultados.
- *Modelos con horizontes finitos.* Esta función de utilidad se aplica cuando el resultado de la negociación es sólo válido para n intervalos de tiempo. Además, la función de utilidad debe valorar el desacuerdo como el peor resultado posible dentro de la negociación, así como también apreciar la utilización de los recursos propios disponibles, para de esta forma intentar mantener el máximo tiempo posible el recurso sobre el que se está negociando.

Situación de conflicto

La situación de conflicto se define como la peor situación resultante con el fin de que los jugadores no estén tentados de abandonar la negociación. Ahora bien, los jugadores deben de tener alguna motivación para negociar. En [Kra01] se argumenta la participación de jugadores autointeresados en la negociación en que, por un lado, normalmente los procesos de negociación no tienen mayor coste que el del tiempo empleado en ella, que no suele valorarse y por otro lado, es importante negociar para prevenir posibles situaciones futuras en las que nosotros seamos los interesados en la negociación. También hay que valorar la posible amenaza de que si no negociamos, el jugador oponente pueda comprometer el entorno, como por ejemplo: dañar el recurso.

Generación de ofertas y contraofertas

A partir de la función de utilidad que cuantifica las ofertas y las contraofertas, un jugador puede determinar cual es el siguiente paso que debe realizar cuando recibe una oferta. Dada una oferta en un instante de tiempo t , un jugador puede realizar tres acciones: 1) aceptar la oferta, 2) rechazar la oferta y realizar una contraoferta y 3) abandonar la negociación con lo que se alcanza la situación de conflicto.

Sea $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(j)$ una oferta del jugador a al jugador opuesto \hat{a} en el instante t sobre el elemento de negociación j . La acción que el agente \hat{a} puede realizar en $t+1$ definida como $Acc(\hat{a}, t+1)$ es:

$$Acc(\hat{a}, t+1) \begin{cases} \text{Abandonar la negociación} \\ \text{Aceptar la oferta} \\ \text{Realizar la contraoferta } Oferta_{\hat{a} \rightarrow a}^{t+1}(j) \end{cases} \begin{cases} \text{Si } t > T_{max} \\ \text{Si } U (Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(j)) > Oferta_{\hat{a} \rightarrow a}^{t+1}(j) \\ \text{En otro caso} \end{cases}$$

Tácticas de negociación

La generación de los valores de la oferta inicial o de las siguientes contraofertas se realiza mediante la aplicación de funciones llamadas *tácticas* [FSJ98], [SFJ97]. Estas funciones o tácticas se calculan en base a uno de los componentes del protocolo de negociación (tiempos, recursos, etc). Existen tres aproximaciones para la generación de tácticas:

■ Tácticas dependientes del tiempo

En las tácticas dependientes del tiempo, el principal criterio a utilizar es el tiempo que resta para alcanzar el tiempo límite de la negociación. Así pues, estas tácticas varían el valor de la oferta a realizar dependiendo del instante de tiempo t en el que se encuentre la negociación y del tiempo límite, T_{max} .

Estas tácticas definen una función $\phi_r^a(t)$ dependiente del tiempo que modela la evolución de las ofertas. El resultado de esta función debe estar siempre dentro del intervalo $[0,1]$, es decir $0 \leq \phi_r^a(t) \leq 1$ y que $\phi_r^a(T_{max})=1$. Esto garantiza que el valor resultante de aplicar la función se mantenga siempre dentro del rango de intervalos válidos para la negociación.

La forma de implementar la función $\phi_r^a(t)$ proporciona un amplio rango de funciones dependientes del tiempo. [SFJ97] distingue dos tipos de familias de funciones para proporcionar estas funciones: *polinómicas* y *exponenciales*. Ambas están parametrizadas por un valor $\beta \in \mathfrak{R}$ que determina el grado de convergencia de la función. Para un mismo valor elevado de β la función polinómica concede mas rápidamente al inicio que la exponencial, teniendo a partir de entonces un comportamiento similar. Para valores pequeños de β , la función exponencial espera más tiempo que la polinómica hasta empezar a conceder.

La función $\phi_r^a(t)$ queda definida pues, como:

- Polinómica: $\phi_r^a(t) = k_r^a + (1 - k) \left(\frac{\min(t, T_{max})}{T_{max}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$

- Exponencial: $\phi_r^a(t) = e^{(1 - \frac{\min(t, T_{max})}{T_{max}})^{\beta} \ln(k_r^a)}$

donde k es la constante que definida por el jugador que, multiplicada por el tamaño del intervalo, determina el valor de elemento j en la oferta inicial del jugador a . La función $\phi_r^a(t)$ proporciona un infinito número de tácticas posibles, una para cada valor de β . Este infinito conjunto de valores ha sido clasificado y agrupado en tres conjuntos de tácticas [SFJ97], [FWJ04a]:

- *Boulware*: donde para valores de β inferiores a 1 la oferta inicial se mantiene hasta que casi se agota el tiempo de negociación.
- *Conceder*: donde para valores de β superiores a 1, la oferta converge rápidamente hacia el máximo valor que el jugador puede negociar sobre ese recurso.
- *Lineal*: donde para el valor de β igual a 1, la oferta se incrementa linealmente conforme avanza el tiempo.

En la figura 3.3 se representan tanto la función polinómica (a la izquierda) y la exponencial (a la derecha) de $\phi_r^a(t)$. En las gráficas se observan los posibles resultados dependiendo del valor de β

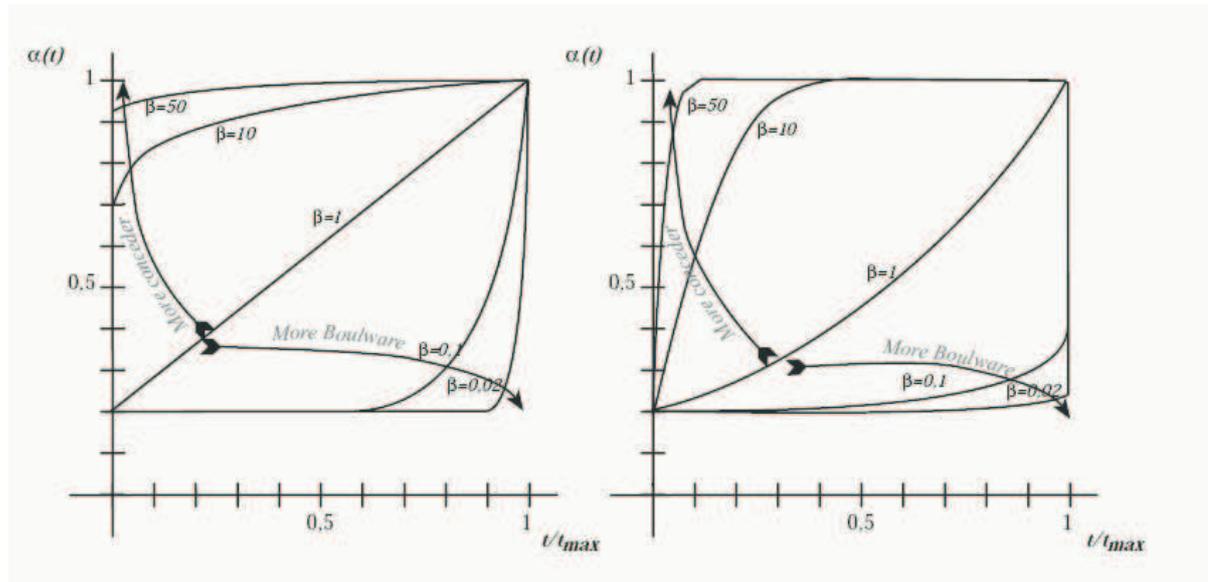


Figura 3.3: Representación de la función $\phi_r^a(t)$. La gráfica izquierda representa el comportamiento de la forma polinómica mientras que el derecho representa la exponencial [FSJ98].

■ Tácticas dependientes de los recursos

La generación de tácticas dependientes de los recursos se realiza de manera similar a la generación de tácticas basadas en el tiempo. De hecho, [SFJ97] y [FSJ98] identifican las tácticas basadas en el tiempo como un tipo de tácticas basadas en recursos donde el recurso que utiliza la táctica es el tiempo de la negociación.

Por consiguiente, el modelado de tácticas dependientes de los recursos se realiza de manera similar a la expuesta en el apartado anterior, utilizando las mismas funciones, pero utilizando el valor del cual depende la negociación, cualquier tipo de recurso, dinámico. Este valor representa un heurístico sobre cuantos recursos hay en el entorno. Para situaciones en las que los recursos son escasos es necesario aumentar la presión de la negociación para llegar a acuerdos lo antes posible, mientras que si los recursos son abundantes la negociación puede ser relajada.

Los recursos de los cuales dependen las tácticas pueden ser cualquiera de los elementos que participa en el entorno de la negociación. Desde el número de posibles jugadores que cohabitan en el entorno y que pueden colaborar en la solución de un problema, hasta recursos monetarios en entornos bursátiles o de almacenamiento en problemas de logística y localización de recursos.

■ **Tácticas basadas en la imitación del contrincante**

Este conjunto de tácticas están basadas en imitar el comportamiento realizado por el jugador contrario en la oferta anterior. El conjunto de posibles tácticas imitativas dependen de la forma en que implementan la imitación, bien de manera proporcional, solo valorando las últimas ofertas, o absoluta valorando el comportamiento desde el inicio de la negociación.

Las tácticas más utilizadas dentro de este grupo son las basadas en el *Tit-For-Tat* [Hof83], [FSJ98]. Esta táctica se basa en realizar una oferta que coopera/concede en el instante inicial y después imita las acciones del oponente. Existen multitud de variantes a esta táctica. Entre ellas cabe destacar: *Relative Tit-For-Tat* donde el jugador reproduce exactamente el comportamiento de su oponente en $n \geq 1$ pasos anteriores. *Random Absolute Tit-For-Tat* donde el jugador modifica el valor de su oferta exactamente por la cantidad que su oponente ha variado la suya en la oferta anterior. En el *Average Tit-For-Tat* el jugador calcula la media de variaciones de las ofertas en un conjunto de $n \geq 1$ pasos y realiza la contraoferta en función de ese valor.

3.4.4. Estrategias e Información sobre la Negociación

Una estrategia de negociación es una especificación de acciones, normalmente ofertas y respuestas, que un jugador planea realizar a lo largo de la negociación. Las estrategias combinan las tácticas en función del histórico de la negociación y de la información que el jugador tiene sobre el entorno de la negociación [SFJ97]. Una estrategia de negociación de un jugador es una función que a partir del histórico de la negociación genera el siguiente movimiento [Kra01].

En una negociación existen un conjunto de estrategias diferentes que son compatibles con el entorno de negociación actual y que proporcionan cada una de ellas un resultado diferente.

El propósito de un jugador es encontrar la estrategia óptima. Una estrategia óptima es aquella que le permite determinar la mejor acción de todas las posibles para lograr un acuerdo sobre un elemento de la negociación. Este acuerdo es el que maximiza la función de utilidad definida para el jugador.

Los estados de información de los jugadores determinan el conocimiento que cada jugador tiene sobre el entorno de la negociación. La información que un jugador posee puede clasificarse como pública, esto es conocida por todos los jugadores involucrados en la negociación, o privada, solo conocida por él [FWJ04a]. Los modelos basados en entornos de negociación donde los jugadores no conocen todos los elementos del entorno de negociación se denominan entornos de negociación con información incompleta [FWJ02a]. Esta falta de información se centra en los parámetros específicos de los oponentes en la negociación, como por ejemplo los factores de descuento sobre el tiempo, los instantes máximos de negociación o los valores máximos de aceptación de un determinado recurso.

3.5. Análisis de Resultados

El análisis de resultados de los protocolos de negociación no es una tarea trivial. Los jugadores son auto-interesados, entonces cuando decimos que una negociación ha tenido éxito, ¿para cual de los participantes? Además cada jugador puede tener su propia función para valorar el grado de beneficio obtenido.

Sin embargo, existen algunos parámetros que nos permiten analizar los resultados de los protocolos y el equilibrio obtenido en la negociación [OR94], [FWJ04a]:

- *Unicidad*: si la solución al juego es única, entonces ésta es identificada unívoco-

camente por todos los jugadores.

- *Eficiencia*: un acuerdo es eficiente si no se desperdician recursos y si maximiza el número de jugadores de acuerdo con el resultado de la negociación. Esto es, el resultado es Pareto-Óptimo. Un resultado se define Pareto-Óptimo si no existe otro resultado que mejora la utilidad del resultado para un jugador, empeorándola para otro.
- *Simetría*: un protocolo es simétrico si no existen tratos discriminatorios para los jugadores que participan en él. Por ejemplo, un protocolo se dice simétrico con respecto a la identidad del primer jugador si el resultado de la negociación es independiente del jugador que la inicie.
- *Distribución*: este parámetro permite evaluar como se reparten los beneficios obtenidos con la negociación.

3.6. Protocolos de Negociación

Hasta el momento se han desarrollado diferentes protocolos que utilizan de manera diversa los elementos que intervienen en el entorno de negociación. Cada uno de estos protocolos se enmarca dentro de un dominio en concreto, aunque la mayor parte se centra en el dominio de la logística, la localización de recursos y de la economía y los mercados. A continuación se enumeran algunos de los protocolos más relevantes.

Rubinstein [Rub52], [OR05] define el concepto de protocolo de ofertas alternativas. En este protocolo dos jugadores negocian sobre el contenido de una tarta de tamaño 1. Un acuerdo sobre la negociación es un par $X = (X_1, X_2)$ donde X_i define la parte de la tarta que comparte el jugador i . Las preferencias de los jugadores sobre X son diametralmente opuestas, es decir, cada jugador prefiere tener un trozo de tarta lo más grande posible. El protocolo de negociación es el siguiente: los jugadores pueden realizar acciones en instantes de tiempo en el conjunto infinito de valores de $T = \{1, 2, \dots\}$. En cada instante, uno de los jugadores (supongamos i), propone un acuerdo al otro jugador (supongamos j). El jugador j tiene dos posibles alternativas: aceptar la oferta o rechazarla. Si j acepta la oferta realizada por i , la negociación acaba y el acuerdo es implementado. Pero si j no acepta la oferta, el instante de tiempo para a ser $t+1$ y el jugador j realiza ahora una oferta al jugador i que puede aceptar o rechazar.

El entorno de negociación de este modelo presenta dos inconvenientes: por un lado utiliza un horizonte de negociación infinito, lo que es imposible de aplicar a

situaciones reales, donde el tiempo es un factor importante en la negociación, y por otro no incluye penalizaciones según avanza el tiempo lo que hace que los agentes no tengan prisa por alcanzar un acuerdo.

[KWZ95] presenta un modelo de negociación de ofertas alternativas con restricciones temporales. Este protocolo resuelve satisfactoriamente el problema de la negociación en un intervalo de tiempo finito mediante la creación de penalizaciones sobre la negociación según avanza el tiempo. Ahora bien, este protocolo es también difícil de aplicar a entornos de negociación reales ya que trabaja con un modelo de información completa. Esto es, los jugadores conocen toda la información del entorno y de los jugadores contrarios.

[HS72] introduce el concepto de negociación con información incompleta y desarrolla un protocolo que proporciona una solución general para la negociación de dos jugadores con información incompleta, aunque sigue manteniendo un horizonte infinito de negociación. Otro modelo de información incompleta [FLT85] analiza la negociación entre un vendedor y un comprador con un horizonte infinito en el cuál, los precios de reserva de los jugadores es desconocido.

[VS99] presenta un protocolo de negociación con restricciones temporales e información incompleta. El protocolo se compone de dos jugadores, 1 y 2 , que negocian, de nuevo, sobre el reparto de una tarta. Cada uno de ellos tiene un instante de tiempo máximo para alcanzar el acuerdo, d_1 y d_2 respectivamente. Estos instantes de tiempo, conocidos como *deadlines*, forman parte de la información privada de cada uno de los agentes, es decir, el jugador 1 no conoce d_2 y el jugador 2 no conoce d_1 . El protocolo se inicia en el instante de tiempo $t = 0$, donde ambos jugadores piden la tarta completa para si mismos ($X_1^0 = 1$ y $X_2^0 = 1$). En cualquier instante de tiempo t , un jugador i puede modificar su oferta. Si existe un instante de tiempo $t < d_1, d_2$ en el cual $X_1^t + X_2^t \leq 1$ la negociación termina. Si existe alguna porción de la tarta sin asignar, esto es ($X_1^t + X_2^t < 1$), ésta se distribuye en partes iguales entre los jugadores. En este protocolo se asume: 1) que un agente i no obtiene ningún beneficio si se alcanza el acuerdo después de d_i y 2) que los agentes prefieren entregar todo su beneficio al oponente para alcanzar un acuerdo antes de su deadline. Con estas dos suposiciones el autor define la esencia de la negociación con deadlines: existe una pequeña pero positiva utilidad asociada al logro de un acuerdo en la negociación.

[FSJ98] describe un modelo de negociación cuyo propósito es el acuerdo sobre el suministro de un servicio entre los jugadores. El modelo define las estrategias y tácticas que determinan cómo generar las ofertas iniciales, evaluar las propuestas recibidas y cómo calcular la siguiente propuesta a realizar. Las tácticas a desarrollar por un jugador se clasifican en tres familias: dependientes del tiempo, dependientes de los recursos e imitativas.

[Kra01] presenta diferentes modelos de negociación para diferentes entornos. Un primer modelo de negociación es definido para el dominio del almacenamiento de datos. El modelo se basa en entornos donde distintos servidores descentralizados deben almacenar y compartir documentos. El protocolo se basa en el protocolo de ofertas alternativas presentado por Rubinstein [Rub52] y en una primera aproximación, se desarrolla y analiza el modelo de negociación para un entorno de información completa, para posteriormente ampliarlo a un entorno de información incompleta. Para trabajar en este entorno, se aplica el principio de revelación.

El segundo modelo descrito se basa en la utilización de recursos compartidos. En este modelo los jugadores utilizan recursos que en un momento dado pueden ser requeridos por otros jugadores para realizar diferentes tareas. Al igual que con el primer modelo, desde un entorno de información completa, extiende el modelo a uno con información incompleta, solo que esta vez en lugar de aplicar el principio de revelación utiliza las creencias que los jugadores poseen sobre la información de los otros jugadores.

El tercer modelo presentado extiende de nuevo el modelo de utilización de recursos compartidos pero para una negociación con múltiples atributos. Es decir, un jugador no sólo necesita un recurso sino que lo necesita con unas determinadas características, por ejemplo no sólo cuanto tiempo lo van a tener sino también cuándo dispondrá de él.

[FWJ02b] presenta también un modelo de negociación con deadlines y asume que los agentes tienen información incompleta del entorno. En este protocolo intervienen dos jugadores que negocian por un recurso, uno de ellos es el vendedor, propietario del recurso, y otro es el comprador, que desea adquirirlo. Cada uno de los jugadores tiene un instante de tiempo máximo para alcanzar un acuerdo en la negociación. Además, tienen un valor tope, a partir del cual inician la negociación, y otro de reserva, a partir del cual aceptan el acuerdo. Los jugadores no conocen ni el tiempo máximo de negociación del oponente ni los valores máximo y de reserva entre los que el oponente va a negociar. Ahora bien, cada agente tiene unas creencias sobre estos valores. Estas creencias están definidas como pares $\langle \alpha_i, t_i \rangle$ donde α_i representa la probabilidad de que el instante tope del agente oponente sea t_i . La definición sobre las creencias de los valores de reserva se define de manera análoga.

Los protocolos presentados por [VS99], [Kra01] y [FWJ02b] permiten ser implementados en entornos reales debido a sus características principales: información incompleta y límites temporales (deadlines). Sin embargo todos ellos negocian únicamente sobre un elemento en cada negociación.

Actualmente se está trabajando en el desarrollo de protocolos multielemento, en

los que hay más de un elemento como objeto de la negociación. Estos protocolos introducen el concepto de agenda. La agenda de negociación identifica no sólo los elementos que intervienen en la negociación sino que también define el orden en que se negocian los elementos. La agenda de negociación puede ser exógena, es decir definida externamente por los agentes antes de que comience la negociación o por el contrario endógena, donde una vez alcanzado un acuerdo/desacuerdo sobre un elemento de la misma se decide cual es el siguiente elemento a negociar [FWJ04a].

Uno de los factores a determinar en protocolos multielemento es cuando la negociación ha tenido éxito. [BH99] presenta un modelo en el que sólo se considera que la negociación ha finalizado con éxito si se ha llegado a un acuerdo sobre todos los elementos que componen la agenda. Además, la implementación de los acuerdos sobre los elementos de la agenda se realiza una vez la negociación ha terminado.

En [FWJ04a] se extiende el modelo de negociación sobre un elemento, presentado en [FWJ02b], a un modelo multielemento basado en una agenda exógena. En este modelo, los jugadores, de nuevo un comprador y un vendedor, negocian sobre un conjunto de elementos independientes entre si. El protocolo es de información incompleta (los agentes desconocen los precios de reserva de los oponentes) y con un horizonte finito de negociación (cada uno de los jugadores tiene un tiempo máximo de negociación que el otro jugador desconoce). La agenda se compone del conjunto de elementos sobre los cuales el vendedor y el comprador quieren llegar a un acuerdo, si bien los elementos son independientes. Esto es, el acuerdo o desacuerdo sobre un elemento de la agenda no afecta a la negociación del resto de elementos pendientes de negociar.

Varios autores han tratado sobre la importancia de las agendas y la influencia del orden de negociación de los elementos sobre el resultado final. En [FWJ04b] se analiza la importancia no sólo del protocolo de negociación sino también de la agenda elegida para alcanzar los resultados óptimos en la negociación. Para ello, se introduce el concepto de agenda *óptima*. Una agenda se considera óptima si proporciona la máxima utilidad para cada uno de los elementos que la componen [FWJ04b]. [Ind00] también presenta un estudio sobre el impacto de la agenda y sus efectos sobre la eficiencia de la negociación. En este estudio se determina que como los jugadores de un protocolo tienen distintas preferencias sobre las posibles agendas, ésta debe ser elegida endógenamente.

3.7. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una introducción a la negociación estratégica. Este tipo de negociación es una herramienta útil para la toma de decisiones en las interacciones entre jugadores.

A lo largo del capítulo se han descrito los principales conceptos sobre este tipo de negociación prestando especial interés a los juegos extensivos. Para ello, se han identificado cuales son los componentes elementales que forman un protocolo de negociación: entorno de la negociación, reglas de encuentro, estrategias de actuación y el conocimiento de los jugadores acerca de la negociación. También se ha descrito cuales son los elementos necesarios para evaluar la convergencia y el equilibrio del protocolo.

En la última parte se ha presentado un estado del arte de los protocolos de negociación desarrollados hasta la fecha. Los protocolos se han descrito por orden temporal. En esta relación se observa que existen diferentes protocolos, cada uno con unas características específicas (información completa, incompleta, horizonte finito, infinito, etc). Sin embargo, los protocolos de negociación multielemento analizados son una extensión de los protocolos de negociación con un único elemento, pero en los que la negociación multielemento se plantea como una sucesión de negociaciones independientes, una para cada elemento de la agenda. Ahora bien, existen entornos de negociación multielemento donde los elementos que forman parte de la agenda están relacionados entre si, y su negociación debe realizarse mediante un único protocolo. En el siguiente capítulo se expone un protocolo de negociación multielemento donde los componentes de la agenda están relacionados entre si.

Las características de los SMA y de los agentes se adaptan perfectamente a los protocolos de negociación descritos [Kra01]. Los protocolos presentados en [FSJ98], [VS99], [FWJ02b], [FSJ98], [Kra01], [Ind00], [FWJ04b], [BH99] se han implementado mediante la utilización de sistemas multiagentes donde los agentes son los jugadores.

Parte II

Propuestas y Contribuciones

Capítulo 4

Búsqueda de la Solución al Problema

4.1. Origen del Problema

El origen del trabajo de investigación descrito en este documento tuvo lugar a raíz de la participación en distintos proyectos de gestión de tráfico [ART05], [SER05], y, en concreto, en el desarrollo de Planes de Gestión de Tráfico (PGTs).

La investigación realizada permitió conocer en profundidad la problemática existente a la hora de especificar PGT y de tomar decisiones de control. A su vez, conocer las estrategias seguidas por diferentes administraciones europeas para solventar estos problemas, facilitó el contacto con las metodologías utilizadas y también mostró las carencias tecnológicas que existían en este entorno.

Básicamente esta problemática se debe al elevado volumen de información, muchas veces redundante, que se necesita para definir un PGT (descrito en el capítulo 1) y a la utilización del soporte de papel de los manuales con el procedimiento a seguir, lo que hace que éstos sean inviables desde un punto de vista práctico.

Las primeras actuaciones realizadas para solventar este problema se centraron en el desarrollo de herramientas software que facilitasen la utilización, en tiempos razonables, de los contenidos incluidos en los PGTs. Para ello, tal y como se ha comentado en el apartado 1.4.3, se presentaron dos iniciativas, en las que he participado activamente: un prototipo HTML y posteriormente, su versión mejorada en XML.

4.2. Cuestiones Planteadas

Los desarrollos anteriores permitieron solventar los problemas operacionales que existían para poner en práctica la utilización de los planes de gestión de tráfico, pero los PGTs seguían siendo una mera guía que los operadores debían seguir cuando se produce un incidente en la red viaria. Por lo tanto, aún seguían existiendo problemas, que se exponen a continuación:

- No existían unos criterios cuantificables que los operadores pudiesen utilizar para determinar el escenario en el que se ha producido el incidente, además la información que debían utilizar para poder especificar dicho escenario era elevada y se encontraba distribuida entre diferentes sistemas que no están integrados.
- Los PGTs incluían las medidas que debían ser tomadas ante un incidente de forma aislada en una sección de carretera considerada como independiente. Las medidas de gestión se aplicaban en la zona local para paliar el problema producido, pero no tenían en consideración la posible aparición de problemas secundarios en otras secciones, ni hacían referencia a cómo ni cuando debían ser retiradas.
- Generalmente, los PGTs no incluían medidas coordinadas entre diferentes centros, pero cuando lo hacían, tanto a nivel nacional como internacional, aparecían muchas dificultades relacionadas con las diferentes estructuras organizativas, las diferentes definiciones para el mismo problema, los diferentes lenguajes de comunicación empleados, y lo que es más grave, la prioridad que cada CGT le otorgaba al incidente ocurrido en un área fuera de su jurisdicción y ante la cual se le requieren medidas restrictivas en su propia zona, lo cual va contra los intereses particulares de su gestión.

Ante esta situación se plantearon una serie de cuestiones que se recogen a continuación y que fueron las siguientes:

- ¿Cómo conseguir activar medidas coordinadas entre diferentes CGTs para resolver una incidencia?
- ¿Que protocolos de negociación automática pueden desarrollarse para prestar soporte al usuario en la activación de estas medidas?
- ¿Como describir los elementos que forman parte del entorno (carreteras, incidencias, escenarios, medidas, etc.) de forma común para que los diferentes

CGTs y organizaciones implicadas puedan no sólo intercambiar la información, sino también comprenderla?

4.3. Hoja de Ruta

Así pues, la búsqueda de respuestas a estas cuestiones marcó el inicio de la investigación, recogida en este trabajo.

La primera acción realizada fue el análisis de los diferentes modelos de coordinación y negociación existentes, para de esta forma poder definir cuáles son los entornos en los que se pueden realizar actividades coordinadas entre sistemas auto-interesados. Este análisis ha determinado la importancia de la teoría de juegos y su aportación en el desarrollo de negociaciones estratégicas automáticas.

Una vez identificada la teoría de juegos, se han estudiado los diferentes protocolos de negociación automática existentes y se han identificado sus componentes. El resultado del estudio ha determinado la existencia de una base sólida, aunque sin embargo, se ha detectado la necesidad de extender los protocolos para permitir la *negociación de multiples servicios relacionados entre si*.

Los protocolos existentes permiten la negociación de múltiples elementos, pero ésta se realiza de forma secuencial e independiente. Esto es, se negocian a la vez dos o más elementos, pero éstos son independientes y presentan soluciones a dos problemas distintos aunque del mismo tipo. Por lo tanto, el acuerdo o desacuerdo sobre uno u otro elemento no influye en la negociación sobre el resto de los elementos.

Por ejemplo, un comprador y un vendedor negocian sobre la compra/venta de tres libros diferentes: a , b y c , pero sin relación entre ellos. Supongamos que el comprador necesita un conjunto de temas que se encuentran en uno o varios libros, por lo que el vendedor ofrece dos opciones, 1) el libro a que los contiene todos y 2) los libros b y c que cada uno tiene una parte pero entre ambos contienen todos los temas requeridos. Así pues, tanto comprador como vendedor deben negociar sobre los tres elementos a la vez, sabiendo que si por ejemplo, se rechaza el libro a , el comprador necesitará comprar los libros b y c .

Por lo tanto, se ha procedido al desarrollo de una propuesta de un nuevo protocolo de negociación automática con múltiples servicios relacionados en entornos con información incompleta, que se describe en el capítulo 5, y que ha sido implementado en un entorno multiagente.

La elección de la *tecnología de agentes* para la implementación del protocolo,

frente a aplicaciones distribuidas tradicionales, se justifica debido a sus características principales: autonomía, flexibilidad, fiabilidad, inteligencia, habilidad social y modularidad. Estas características permiten a los agentes realizar tareas de forma fiable y autónoma, sin la constante comunicación con el usuario. Además, gracias a la habilidad social, pueden interactuar con otros agentes o con sistemas remotos, lo que permite el desarrollo de actividades coordinadas. A su vez, los SMA facilitan la repartición de tareas, presentan mayor tolerancia a fallos que los sistemas centralizados, tienen mejor eficiencia debido a la simultaneidad en la ejecución de las tareas, aumentan la optimización gracias a que los agentes pueden crearse o eliminarse según las necesidades o recursos disponibles.

Para que los agentes pudieran interactuar se ha desarrollado una *ontología específica de negociación* que ofrece, a los agentes, un vocabulario común para poder comunicarse y utilizar el protocolo de negociación.

Una vez diseñado el protocolo genérico, éste se ha adaptado para el dominio de la gestión del tráfico. En concreto, se ha creado un *protocolo para la negociación automática de itinerarios alternativos* donde las carreteras que componen los itinerarios pertenecen a distintas organizaciones. Por tanto, se identificó el entorno de aplicación y se definieron las características propias para su aplicación en este dominio.

Para mejorar el desarrollo del protocolo y su aplicación se revisó la literatura en materia de agentes aplicados al tráfico. El objeto de esta revisión ha sido el análisis de los diferentes sistemas multiagente, las arquitecturas desarrolladas y sus funcionalidades. Tras esta revisión, se estudiaron las diferentes organizaciones para la elaboración de estándares en el área de los SMA. Fruto de este estudio se pudo determinar que FIPA es la arquitectura más consolidada y documentada, estando plenamente aceptada por la comunidad de investigadores. Una de las funciones de FIPA es la de aportar una serie de normas para implementar y diseñar SMA de forma correcta. Debido a la gran diversidad de sistemas, FIPA proporciona un estándar que constituye un marco de referencia. Su modelo de administración de agentes ha permitido establecer los elementos básicos que deberían formar parte del SMA. Una vez identificado el modelo de referencia adecuado, era necesario elegir el marco de trabajo apropiado para el desarrollo de software, orientado al despliegue de SMA y que a su vez cumpliera con los estándares de FIPA para agentes inteligentes. La plataforma elegida fue JADE, ya que es un marco de referencia obligada para el resto de sistemas desarrollados y se ha convertido en una de las plataformas más populares tanto por su difusión como por su potencia. Esta elección fue motivada por las siguientes razones: plataforma pública bajo licencia GPL¹, plenamente

¹General Public License.

documentada, sigue las especificaciones y estándares de FIPA y, por último, ofrece mejoras y actualizaciones continuas gracias a una comunidad de desarrolladores muy amplia.

Otra de las aportaciones realizadas ha sido la creación de una *ontología genérica de tráfico interurbano*. Para poder realizar esta ontología, en un primera fase, se ha recopilado información no sólo de los PGTs existentes sino también de diferentes sistemas ITS. Así pues, con toda esta información se ha construido una ontología para el dominio del tráfico interurbano, subclasificada en los dominios que se puede observar en el capítulo 7. La utilización de la ontología desarrollada permite tener un vocabulario común que identifica con un único nombre y significado los diferentes elementos que intervienen en la gestión del tráfico. Esta ontología sirve de marco base para la comunicación e integración de información entre los distintos actores, tanto sistemas ITS internos como organizaciones externas que participan en el desarrollo de un plan.

Así pues, una vez seleccionada tanto la arquitectura, como la plataforma, se ha realizado el diseño del SMA, en el que se han integrado todos los resultados previos. En primer lugar se transformó la ontología al modelo de representación de conocimiento de JADE y se comprobó que este nuevo modelo seguía representando el conocimiento general, es decir, no se perdía expresividad.

Para el diseño del sistema fue necesario analizar las metodologías existentes, y determinar cual era la más adecuada. La metodología elegida fue *Ingenias*, ya que integra y extiende otras metodologías. No obstante, el estudio de estas metodologías y concretamente, la utilización de *Ingenias*, solamente ha constituido un medio o herramienta para alcanzar los objetivos y no se ha realizado ninguna aportación en este marco. La extensión de metodologías para el desarrollo de agentes queda fuera del alcance de esta tesis. Así pues, se desarrollaron los modelos de agente, organización, interacción y entorno.

Por último, una vez concluido todo el proceso de diseño se ha implementado el *SMA como soporte a la gestión del tráfico* en el que se integraron todos los elementos: los PGTs, la ontología de tráfico, el protocolo de negociación para el cálculo de itinerarios alternativos y un módulo de soporte para la difusión de información via señalización variable.

En la figura 4.1 se puede observar de forma esquemática el proceso seguido, desde la identificación de los problemas iniciales hasta la implementación del prototipo que integra todos los elementos surgidos de esta investigación. En la figura, los elementos representados por cuadrados con bordes redondeados identifican las aportaciones realizadas en esta tesis.

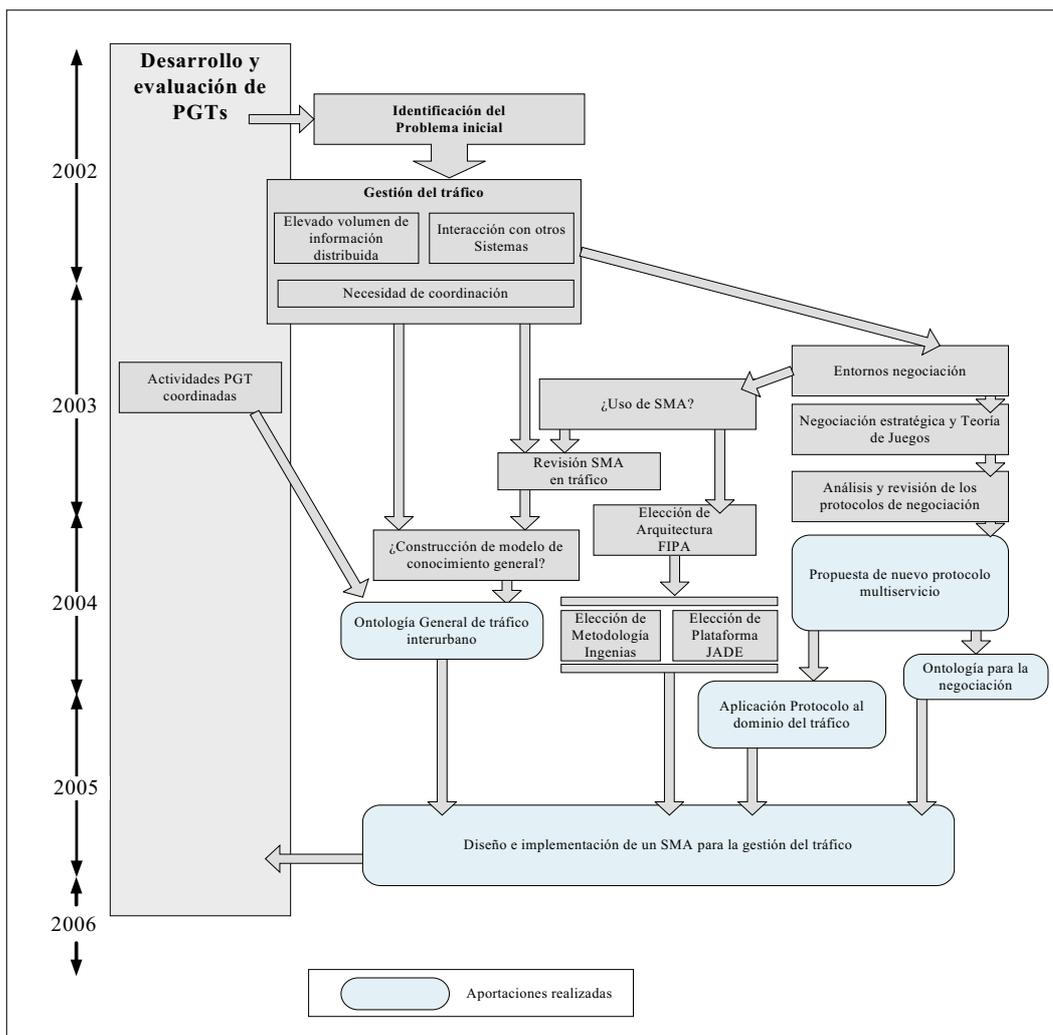


Figura 4.1: Proceso seguido en la búsqueda de soluciones.

Capítulo 5

Protocolo de Negociación Multiservicio

En este capítulo se expone un nuevo protocolo de negociación entre agentes. A diferencia de otros protocolos existentes, donde los elementos que se negocian son independientes, en este protocolo los servicios están directamente relacionados y el acuerdo sobre alguno de los servicios del protocolo puede influir en la evolución de la negociación del resto de servicios.

En el primer apartado del capítulo se introduce el concepto de protocolo y las características que lo definen. Posteriormente, se define el entorno de 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. En el tercer apartado se define el protocolo presentado, describiendo todos los componentes necesarios: los instantes temporales críticos que influyen en el proceso de negociación, las reglas de encuentro, la agenda con los servicios a negociar, las ofertas y contraofertas, la función de utilidad que permite valorar las ofertas realizadas y recibidas, el conocimiento que los agentes tienen del entorno de la negociación y las tácticas de negociación. Una vez descritos el entorno de negociación y el protocolo se realiza un estudio de los posibles escenarios de negociación que se pueden presentar durante la ejecución del protocolo. Este análisis permite clasificar las agendas de negociación y, como consecuencia de esta clasificación, se establecen las tácticas temporales óptimas por servicio. Al combinar estos resultados con las tácticas óptimas por servicio se obtienen las tácticas mixtas óptimas por recurso y servicio. Para ilustrar estas tácticas se analizan una serie de situaciones ejemplo. En el apartado quinto se describen las estrategias de negociación cuando se considera el entorno con información incompleta. Finalmente el protocolo se evalúa en el apartado sexto

mediante el análisis de su convergencia y del equilibrio de negociación.

5.1. Introducción

La creciente distribución de recursos y competencias en los sistemas informáticos está llevando al desarrollo de nuevos mecanismos que permitan la coordinación de estos sistemas para poder desarrollar tareas conjuntas que, sin esta coordinación, serían difícilmente realizables. Ahora bien, cuando nos encontramos con sistemas autónomos, autointeresados, con diferentes competencias y objetivos, es necesario establecer y definir claramente los mecanismos que permitan a los sistemas implementar estas tareas para alcanzar, no solo los objetivos que cada sistema puede conseguir individualmente, sino también otros objetivos que precisan de la colaboración con otros sistemas, bien sea por competencias o por recursos. Uno de estos mecanismos es la negociación. La negociación se implementa mediante protocolos que describen cuáles son las reglas de encuentro por la que diversos agentes resuelven una situación.

El entorno donde se enmarca el protocolo es un entorno multiagente en el cual los agentes, mediante la utilización de recursos, suministran servicios que proporcionan unas determinadas prestaciones a diferentes usuarios. Si alguno de los recursos presenta problemas o deja de estar disponible, el servicio asociado no puede ser prestado y, por lo tanto, los agentes han de negociar para implementar nuevos servicios que permitan mantener las mismas prestaciones.

El protocolo de negociación que se presenta posee las siguientes características:

- Basado en el modelo clásico de ofertas alternativas propuesto por Rubinstein [Rub52], presentado en el capítulo 3. A este modelo se le han incorporado restricciones temporales que definen el marco temporal en el que la negociación tiene lugar. Los intervalos de tiempo en los que se producen las ofertas alternativas, (es decir, ofertas y contraofertas) son intervalos discretos y equidistantes. En este entorno los agentes pierden beneficio con el paso del tiempo, aunque esta disminución de beneficios es diferente para cada uno de los agentes.
- Agenda exógena de negociación multielemento: los elementos, servicios, sobre los que se va a negociar están definidos antes de comenzar la negociación y las ofertas en un instante t sobre cada uno de los elementos es una entrada en la agenda. Los agentes negocian ofreciendo entradas en la agenda de negociación.
- Implementación secuencial. Si a lo largo del proceso de negociación se llega a

un acuerdo sobre algún servicio de la agenda, éste pasa a implementarse en ese mismo instante y se elimina de la agenda.

- Los servicios que componen la agenda están relacionados. Esto, junto a la implementación secuencial, implica que los posibles acuerdos o desacuerdos sobre los elementos de la agenda afectan a la negociación del resto de elementos.
- Como los agentes son autónomos, los factores que determinan sus estrategias de negociación son privados y no son conocidos por el resto de agentes. Así pues, los agentes no tienen un conocimiento completo del entorno de negociación. Para poder trabajar con esta falta de información, se han utilizado dos aproximaciones: 1) el principio de revelación [San99], [GL77] para determinar los parámetros iniciales del entorno de la negociación; y 2) la utilización de las creencias de los agentes para la generación de ofertas a lo largo del protocolo.
- La generación de ofertas y contraofertas por parte de los agentes se basa en la utilización de tácticas combinadas basadas en diferentes criterios para cada uno de los elementos de la agenda. Por un lado se utilizan tácticas basadas en el tiempo, esto es, cuánto tiempo ha transcurrido desde que ha comenzado la negociación y, cuánto tiempo resta para que poder llegar a un acuerdo sobre un determinado elemento. Por otro lado también se aplican tácticas que tienen en cuenta los elementos que componen la agenda y las relaciones existentes entre ellos.

Estas características han sido desarrolladas en los componentes del protocolo de negociación, que aplicado a agentes, según [OR94], [Kra01] y [Rea94], son:

- El entorno de negociación, que incluye los agentes que participan, los roles que cada uno de ellos puede desarrollar, (y que permiten identificar los comportamientos y las tareas de cada uno de ellos), los posibles elementos a negociar y la agenda.
- El protocolo de negociación que define:
 - Las reglas de encuentro, donde se define el modo en que los agentes realizan las ofertas y contraofertas, la función de utilidad para valorar las ofertas y determinar cuándo se aceptan o no, y, por último, cuándo se implementan los servicios acordados.
 - La situación de conflicto que especifica lo que ocurre en el entorno si no se llega a un acuerdo en la negociación. Esto es, qué ocurre si se sobrepasa el tiempo máximo de la negociación o si alguno de los agentes implicados en la negociación renuncia a seguir negociando.

- Los estados de información de los agentes que definen el conocimiento que éstos tienen del entorno de la negociación (incluyendo lo que cada agente conoce del resto de agentes). Este conocimiento permite al agente desarrollar diferentes estrategias de negociación que permiten determinar cuál es la siguiente acción a tomar.
- Los escenarios de negociación que describen el conjunto de posibles situaciones que se pueden producir a lo largo de la negociación
- Las estrategias óptimas y los acuerdos de equilibrio, si existen, que permiten maximizar el beneficio que los agentes obtendrán en la negociación y racionalizar el empleo del protocolo.

5.2. El Entorno de Negociación

El entorno de negociación está formado por agentes. Los agentes proporcionan servicios a los usuarios. Cada servicio precisa de uno o varios recursos para implementarse y cada recurso está gestionado por un único agente. Un recurso puede, en principio, ser utilizado en varios servicios. Cada servicio tiene asociado un valor, calidad de servicio, que describe su eficacia.

Los agentes pueden tener problemas mientras suministran servicios a los usuarios. Los problemas aparecen por diferentes causas, por ejemplo el deterioro o la saturación de un recurso. Estos problemas pueden dificultar o incluso impedir que los agentes continúen suministrando el servicio que utiliza ese recurso con la calidad de servicio acordada previamente con el usuario. Además, si el problema no se soluciona, el entorno puede volverse inestable, ya que el problema puede crecer y extenderse, por lo que otros recursos, servicios y agentes pueden verse afectados.

Para resolver esta situación, los agentes pueden implementar nuevos servicios. El objetivo de estos nuevos servicios es intentar mantener la funcionalidad que proporcionaba el servicio problemático a los usuarios y, de paso, liberar de trabajo al recurso con problemas para que su agente responsable disponga de él y trate de arreglarlo. Ahora bien, la implementación de estos nuevos servicios puede que implique la utilización de recursos que están localizados en otros agentes, por lo que los agentes deben negociar para poder implementar los nuevos servicios.

En la negociación intervienen dos agentes, uno, el agente m que juega el rol de manager, o sea, el agente que detecta un problema en un recurso propio y para solucionarlo debe implementar servicios que además de recursos propios necesitan recursos del otro agente, el agente c , que juega el rol de cooperador.

Un servicio S^j es definido como $\langle r_m^1, r_m^2, \dots, r_m^t, r_c^1, r_c^2, \dots, r_c^s \rangle$ donde r_a^i representa el recurso i del agente a ($a=m$ o $a=c$). La calidad de servicio de S^j es proporcionada por la función $Q(S^j)$. Cada servicio S^j posee un tiempo de desarrollo, $T_{desarrollo}^j$, esto es, el tiempo que transcurre desde que se acuerda su implementación hasta que realmente se pone en funcionamiento. S^p identifica el servicio que presenta problemas (por lo que su calidad de servicio viene dada por $Q(S^p)$). Los recursos que pertenecen a S^p no pueden utilizarse en la negociación de ningún otro servicio, ya que S^p sigue activo y la utilización de alguno de sus recursos para otro servicio podría empeorar la situación del servicio S^p .

Cuando un agente detecta un problema en uno de sus recursos, identifica cuál es el servicio al que pertenece ese recurso, esto es, S^p y cuáles son los posibles servicios alternativos que podría implementar para que el usuario se vea afectado lo menos posible. En este entorno se está realizando el supuesto que el agente que posee el recurso que presenta problemas es capaz de identificar el conjunto de servicios alternativos que pueden suplir a S^p . Así pues, el agente m define una agenda $A = (S^1, \dots, S^k)$ que contiene el conjunto de posibles servicios que pueden reemplazar al servicio S^p . La calidad de servicio de la agenda $Q(A)$ se define como la suma de las calidades de servicio de cada uno de los servicios que la componen:

$$Q(A) = \sum_{i=1}^k Q(S^i) \quad \forall S^i \in A \quad (5.1)$$

La agenda puede clasificarse dependiendo del valor de $Q(A)$:

- Incompleta: el acuerdo de todos los servicios que componen la agenda no alcanza $Q(S^p)$. Esto es, $Q(A) < Q(S^p)$
- Completa: el acuerdo de los servicios que la componen permite alcanzar o superar $Q(S^p)$. A su vez, las agendas completas se pueden clasificar en dos, dependiendo de la existencia de servicios óptimos o no:
 - Óptima. Una agenda es óptima, si existe al menos un servicio que sea óptimo. Un servicio S^i de la agenda es óptimo si $Q(S^i) > Q(S^p)$.
 - No Óptima. No existe ningún servicio en la agenda cuya calidad sea igual o mayor que $Q(S^p)$.

Los agentes negocian sobre la utilización de cada uno de los recursos que intervienen en los diferentes servicios existentes en la agenda. La utilización de un recurso es proporcionada por la función $Use(r)$ que representa el uso actual del recurso r .

Supóngase que el agente a gestiona un recurso r que es objeto de negociación y el agente \hat{a} (el opuesto de a^1) precisa del recurso r . Para este recurso, se definen 4 valores:

- $\text{MinReq}(r)$ y $\text{MaxReq}(r)$, que definen, respectivamente, el mínimo y máximo valor de utilización requerido por el agente \hat{a} .
- $\text{MinOf}(r)$ y $\text{MaxOf}(r)$, que definen, respectivamente, el mínimo y el máximo valor de utilización ofrecido por el agente a .

Las valores de utilización de un recurso por parte de los agentes son diametralmente opuestas en este entorno autointeresado. Un agente pretenderá alcanzar un acuerdo cediendo el mínimo posible uso de los recursos propios y solicitando el máximo uso posible de los recursos ajenos. Esto le permitirá mantener sus recursos disponibles para poder implementar otros servicios. Así pues, un agente ofrecerá inicialmente valores lo más cercanos posibles a $\text{MinOf}(r)$ para los recursos que gestiona y valores cercanos a $\text{MaxReq}(r)$ para los recursos que no gestiona. El área de acuerdo de uso de un recurso se define como el intervalo $[\max(\text{MinReq}(r), \text{MinOf}(r)), \min(\text{MaxReq}(r), \text{MaxOf}(r))]$ (ver figura 5.1).

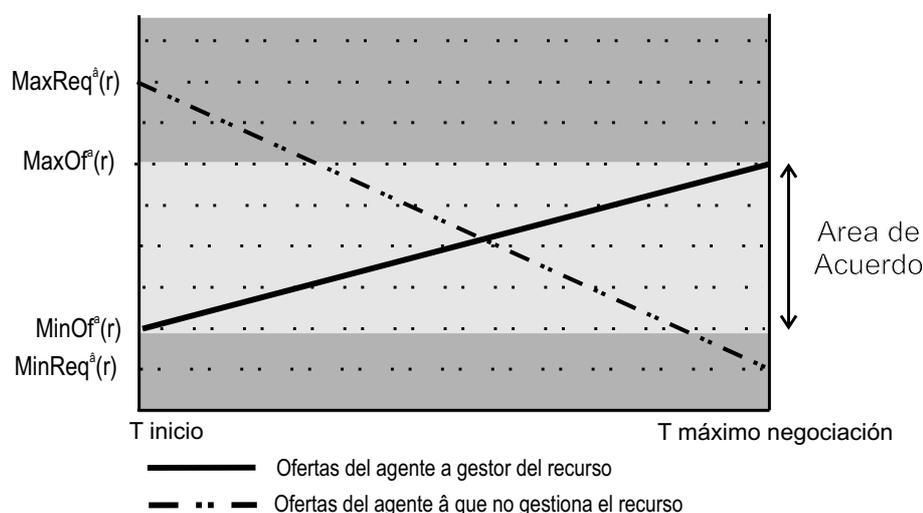


Figura 5.1: Ejemplo de la evolución de la negociación sobre un recurso. En el instante inicial, el agente que gestiona el recurso empieza ofreciendo la utilización más baja posible, mientras que el agente que no lo gestiona solicita el máximo que requiere. En esta imagen se muestra la evolución de las ofertas y contraofertas utilizando una evolución lineal.

El acuerdo para el desarrollo de un servicio se logra cuando se han acordado los valores de utilización de todos los recursos que lo componen.

¹Si $a=\text{manager}$ entonces $\hat{a}=\text{cooperador}$ y viceversa.

5.3. El Protocolo de Negociación

El protocolo propuesto está basado en el protocolo de ofertas alternativas de Rubinstein [Rub52], con periodos discretos de tiempo $T = \{0, 1, 2, \dots\}$. Esto es, un agente, en t^i , hace una oferta, el otro agente la analiza y responde en t^{i+1} . La respuesta puede ser: o bien acepta la oferta, o bien la rechaza y responde con una nueva oferta (es decir, una contraoferta), o bien abandona la negociación.

La negociación se realiza conjuntamente sobre todos los servicios que pueden sustituir al servicio que presenta problemas, S^p . Los agentes realizan ofertas independientes sobre los servicios que componen la agenda. Este proceso se repite hasta que se produce uno de estos tres casos:

Caso 1: Se llega a un acuerdo satisfactorio sobre el contenido de la agenda. Esto es, se ha alcanzado $Q(S^p)$.

Caso 2: Se sobrepasa el tiempo máximo de la negociación. En esta situación se pueden producir dos situaciones:

- a) Se ha logrado algún acuerdo sobre algún servicio sin alcanzar $Q(S^p)$
- b) No se ha logrado ningún acuerdo.

Caso 3: Alguno de los agentes decide abandonar la negociación, antes de alcanzar el tiempo máximo de la negociación, por lo que se llega a una situación de conflicto.

Definimos una oferta general $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t$ como el conjunto de ofertas individuales que el agente a realiza al agente \hat{a} en el instante t sobre todos los servicios que componen la agenda, $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t = \{Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(S^1), \dots, Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(S^k)\}$ donde $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(S^i)$ es la oferta que el agente a realiza al agente \hat{a} en el instante t sobre la utilización de cada uno de los recursos de S^i , es decir:

$$Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(S^i) = \{(Use(r^1), \dots, (Use(r^n))\} \quad (5.2)$$

donde r^1, \dots, r^n son los recursos utilizados por S^i .

El tiempo máximo de la negociación de cada servicio S^i , $T_{negociacion}^i$ se determina por la diferencia entre $T_{resolucion}$, que es el instante de tiempo previsto por el agente manager y que indica el instante temporal a partir del cual la negociación con otros servicios no va a ayudar a rebajar la gravedad de los problemas ocasionados por S^p y $T_{desarrollo}^i$, el tiempo que los agentes necesitan para poder preparar los recursos para desarrollar el servicio S^i . El tiempo máximo de la negociación en toda la agenda es

T_{max} , es decir, el tiempo máximo durante el cual los agentes pueden realizar ofertas y contraofertas, es por tanto el mayor de los tiempos de negociación de todos los servicios que componen la agenda (Eq 5.3).

$$T_{max} = \max(T_{negociacion}^1, \dots, T_{negociacion}^k) \quad (5.3)$$

donde $T_{negociacion}^i = T_{resolucion} - T_{desarrollo}^i$ con $1 \leq i \leq k$

Además, para que la negociación pueda conducir a un acuerdo, se debe cumplir que los agentes que negocian sobre el servicio S^i deben ofrecer valores topes² para los recursos que pertenecen a S^i , al menos en el último instante de la negociación sobre el servicio S^i (es decir, en $T_{negociacion}^i$). Si esto no fuera así, no se podría garantizar la posibilidad de alcanzar acuerdos, puesto que al no verse forzados a ofrecer en algún momento sus valores topes los agentes no tendrían interés en emplear tiempo negociando.

El protocolo se dice que finaliza con *éxito completo* (caso 1) si antes de llegar a T_{max} se ha logrado alcanzar uno o más acuerdos que permitan desarrollar servicios que igualen o superen $Q(S^p)$. Si con el desarrollo de los servicios acordados no se logra alcanzar $Q(S^p)$, el protocolo finaliza con *éxito parcial* (caso 2a). El grado de satisfacción de este éxito parcial se cuantifica mediante la comparación de la calidad de los servicios acordados respecto de $Q(S^p)$. Si por el contrario se alcanza el instante de tiempo T_{max} y no se ha alcanzado ningún acuerdo, el protocolo acaba en una situación de conflicto (caso 2b).

Cuando un agente \hat{a} recibe una *Oferta* $_{a \rightarrow \hat{a}}^t$ la evalúa y construye una contraoferta compuesta por una acción para cada uno de los servicios que componen la oferta recibida. La función $Acc(S^i, t)$ define la acción que va a desarrollar en el instante $t+1$ para el servicio S^i . El resultado de la función $Acc(S^i, t)$ puede ser:

1. Abandonar la negociación (*Opt out*). Esta situación se puede producir por dos motivos. El primer motivo es que el instante de tiempo t supere el tiempo máximo de la negociación, T_{max} y no se haya acordado la implementación de ningún servicio. El segundo motivo por el que un agente pueda abandonar la negociación puede deberse a causas externas al protocolo (como por ejemplo, la aparición de recursos inhábiles, prioridades de uso de recursos para otros servicios, etc).
2. Abandonar la negociación sobre S^i , (*opt*) y borrarlo de la agenda si $t > T_{negociacion}^i$ y continuar negociando con el resto de servicios que quedan en

²Si el agente a gestiona el recurso r entonces este valor tope es $MaxOf(r)$ y si no lo gestiona es $MinReq(r)$.

la agenda. Esto implica que se ha superado el tiempo máximo de negociación sobre el servicio S^i , pero todavía no se ha alcanzado T_{max} . En esta situación, la negociación sobre el servicio S^i no tiene sentido por lo que el agente \hat{a} asigna un opt como resultado final para el servicio S^i en la oferta.

3. Aceptar la oferta del servicio S^i si las utilidades de las ofertas recibidas para cada uno de los recursos de S^i son mayores o iguales que las utilidades de las ofertas que el agente \hat{a} va a ofrecer en el siguiente paso ($t + 1$). Como consecuencia, el servicio S^i sobre el que se ha logrado el acuerdo se comienza a desarrollar en este momento y se elimina de la agenda de negociación.
4. Realizar una contra oferta sobre el servicio S^i . Esto es, añadir a la contraoferta una nueva entrada para el servicio S^i , $Oferta_{\hat{a} \rightarrow a}^{t+1}(S^i)$. Si alguno de los recursos del servicio S^i ha recibido una oferta cuya utilidad sea superior o igual a la que el agente \hat{a} va a ofrecer en la contraoferta entonces el agente \hat{a} acepta la oferta recibida para ese recurso (este valor aceptado se mantiene por ambos agentes hasta el final de la negociación sobre el servicio S^i). Para el resto de recursos del servicio S^i , el agente \hat{a} calcula los nuevos valores que va a ofrecer en la contraoferta.

El resultado de negociación queda completamente especificado mediante la k -tupla $Res = \{(\langle S^1, t^1 \rangle |opt), \dots, (\langle S^k, t^k \rangle |opt)\}$ donde cada elemento de la tupla puede ser, o bien un par $\langle S^i, t^i \rangle$ en el que S^i representa un vector con los usos acordados para los recursos del servicio S^i y el instante de tiempo t^i en que se ha alcanzado el acuerdo, o bien opt que indica que no ha habido acuerdo sobre ese servicio. Se observa que si $Res = \{opt, \dots, opt\}$ el resultado final de la negociación es un $opt out$, es decir, el protocolo acaba en una situación de conflicto.

5.3.1. Situación de Conflicto

La situación de conflicto aparece cuando algún agente involucrado abandona la negociación, es decir, ejecuta un $opt out$, o cuando se supera T_{max} y no se ha producido un acuerdo sobre algún servicio de la agenda. Cuando esta situación se produce, el problema detectado con S^p puede continuar creciendo y llegar a afectar a otros servicios. Por lo tanto, el entorno puede degenerar a un estado de colapso, donde la totalidad de los recursos se encuentran afectados por el problema. Por esta razón, los agentes tratan de evitar alcanzar una situación de conflicto.

5.3.2. Función de Utilidad

La función de utilidad permite a los agentes evaluar las ofertas sobre los servicios de la agenda. La función de utilidad es una función de von Neumann-Morgenstein (ver capítulo 3) que incluye factores de descuento basados en el tiempo transcurrido para transmitir la idea de lo beneficioso que puede llegar a ser el alcanzar un acuerdo cuanto antes.

Sea $U_a(r)$ la función de utilidad para el agente que gestiona el recurso r y $U_{\hat{a}}(r)$ la función de utilidad para el agente que no gestiona el recurso r . Ambas funciones se definen como:

$$U_a(r) = MaxOf(r) - Use(r) \quad (5.4)$$

$$U_{\hat{a}}(r) = Use(r) - MinReq(r) \quad (5.5)$$

La utilidad de un servicio S^i para el agente a se define como la suma de utilidades de los recursos gestionados por a que intervienen en el servicio:

$$U_a(S^i) = \sum_{j=1}^n U(r^j) * \delta^a * \Phi_a(r^j, S^i) \quad (5.6)$$

donde δ^a es la función del agente a que penaliza la utilidad según avanza el tiempo y $\Phi_a(r^j, S^i)$ es la función que indica si un recurso r^j que interviene en el servicio S^i pertenece al agente a ($\Phi_a(r^j, S^i) = 1$ sii r^j es gestionado por el agente a y es utilizado en el servicio S^i , y $\Phi_a(r^j, S^i) = 0$ en otro caso).

5.3.3. Generación de Ofertas y Contraofertas

Cuando un agente \hat{a} recibe una oferta $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t$ debe determinar la siguiente acción a realizar. Para ello, el agente debe evaluar cada una de las ofertas individuales de los servicios. Así pues, el agente necesita conocer cuál es el valor de las ofertas que él va a realizar para estos servicios en $t+1$ y compararlas con las recibidas.

La generación de estas ofertas se realiza mediante la aplicación de funciones denominadas *tácticas* [FSJ98], [SFJ97]. Existen tres aproximaciones genéricas para desarrollar las tácticas: 1) basadas en restricciones temporales; 2) basadas en los recursos de la negociación; y 3) imitativas. La aplicación de cada una de estas tácticas al protocolo presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:

- Las tácticas basadas en restricciones temporales [FWJ04b] intentan alcanzar acuerdos sobre los servicios antes de que se cumplan los tiempos límite, pero

estas tácticas no garantizan que estos acuerdos sean los óptimos, ya que no se consideran las calidades de los servicios de la agenda ni las relaciones que cada agente puede establecer entre los servicios que requiere/ofrece.

- Las tácticas basadas en los recursos de la negociación [SFJ97] modifican los valores de las ofertas dependiendo del número de recursos acordados y de su importancia, pero no tienen en cuenta los tiempos límites de la negociación. Por lo tanto, en negociaciones con límites temporales estrictos, es decir, con horizonte finito, el proceso de negociación puede acabar antes de que se haya alcanzado el acuerdo.
- Las tácticas basadas en la imitación [FSJ98] no son adecuadas en este entorno debido a que la evolución del tiempo sobre los beneficios es diferente para cada uno de los agentes inmersos en la negociación y, por lo tanto, imitar el comportamiento de un agente para generar las contraofertas no resulta conveniente.

Para resolver algunos de los inconvenientes de este tipo de tácticas el protocolo implementa una combinación de las tácticas basadas en las restricciones temporales y de las basadas en los recursos de la negociación. A continuación se describe cómo se aplica cada una de las siguientes tácticas y cómo se combinan para obtener el valor en la contraoferta.

Tácticas basadas en restricciones temporales

La función $f^t(r)$ proporciona el valor de la oferta sobre un recurso r perteneciente a uno de los servicios, S^i , a negociar en el instante de tiempo t , $0 < t \leq T_{negociacion}^i$. Si el recurso r es gestionado por el agente a , éste propone al inicio, en $t=0$, el mínimo valor que quiere ofrecer, $MinOf(r)$ y según avanza el tiempo, aumenta su oferta hasta llegar al máximo valor que puede ofrecer, $MaxOf(r)$. En cambio, el agente \hat{a} comienza pidiendo la máxima utilización del recurso que pertenece a a , $MaxReq(r)$, para ir disminuyendo su oferta hasta alcanzar $MinReq(r)$.

Para modelar la evolución de las ofertas según avanza el tiempo se utiliza la función $\phi_r(t)$. Esta función proporciona un valor que debe estar siempre en el intervalo $[0, 1]$ y también debe cumplir que $\phi_r(T_{negociacion}^i)=1$. Esto garantiza que el valor de $f^t(r)$ se mantendrá siempre entre el rango de intervalos posibles de los recursos para la negociación, es decir $[MinOf(r), MaxOf(r)]$ si el recurso es gestionado por a o $[MinReq(r), MaxReq(r)]$ si es gestionado por \hat{a} .

Por lo tanto, si el recurso r pertenece al agente a , $f^t(r)$ se define como:

$$f^t(r) = \begin{cases} \text{MinOf}(r) & \text{Si } t = 0 \\ \text{MinOf}(r) + \phi_r(t) * (\text{MaxOf}(r) - \text{MinOf}(r)) & \text{Si } 0 < t \leq T_{negociacion}^i \end{cases}$$

Y si el recurso r no es gestionado por a como:

$$f^t(r) = \begin{cases} \text{MaxReq}(r) & \text{Si } t = 0 \\ \text{MaxReq}(r) + \phi_r(t) * (\text{MinReq}(r) - \text{MaxReq}(r)) & \text{Si } 0 < t \leq T_{negociacion}^i \end{cases}$$

En el capítulo 3 se han presentado dos tipos de familias de funciones (polinómicas y exponenciales) que permiten definir la función $\phi_r(t)$. La opción elegida en el protocolo es la polinómica (ec. 5.7) debido a que, para un mismo valor de β converge más rápidamente hacia el comportamiento esperado [FSJ98], [SFJ97].

$$\phi_r(t) = \left(\frac{\min(t, T_{max})}{T_{max}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (5.7)$$

La función $\phi_r(t)$ proporciona un infinito número de tácticas posibles, una para cada valor de β . Este infinito conjunto de valores ha sido clasificado y agrupado en tres conjuntos de evoluciones [SFJ97], [FWJ04a]:

- **Boulware:** (valores de β inferiores a 1) la oferta inicial se mantiene hasta que casi se agota el tiempo de negociación.
- **Conceder:** (valores de β superiores a 1), la oferta converge rápidamente hacia la oferta final.
- **Lineal:** (valor de β igual a 1), la oferta se incrementa linealmente conforme avanza el tiempo.

Tácticas basadas en los recursos de la negociación

Las tácticas basadas en los recursos de negociación permiten modificar los valores de las ofertas y contraofertas dependiendo de la cantidad de recursos ya acordados, los que todavía faltan por acordar y los recursos que quedan en el entorno y que podrían ser utilizados como componentes de los servicios a negociar. [SFJ97] y [FSJ98] interpretan la utilización de tácticas basadas en los recursos que intervienen en negociación de manera similar a las tácticas dependientes del tiempo³.

Esta interpretación es adecuada en el protocolo que se propone por las siguientes razones:

³Cuanto más recursos quedan disponibles, durante más tiempo se puede negociar y viceversa, cuantos menos recursos, antes ha de alcanzarse un acuerdo.

- El entorno de negociación es multiservicio, donde cada servicio se compone de múltiples recursos, y el resultado de la negociación depende de los servicios acordados.
- Los servicios que intervienen en la negociación pueden estar relacionados entre si. Además, la implementación de los servicios acordados se realiza de forma secuencial, esto es, según se van acordando. Esta implica que el acuerdo/desacuerdo sobre alguno de los servicios influye en las tácticas de negociación a utilizar en el resto de servicios pendientes de negociación.

En el protocolo propuesto, para determinar la táctica a utilizar, se clasifican los servicios que pertenecen a la agenda. Esta clasificación se realiza en función de la calidad de servicio que cada servicio tiene en la negociación:

- **Servicio óptimo (SO):** un servicio S^i es óptimo, si $Q(S^i) \geq Q(S^p)$. Un acuerdo sobre este servicio proporciona que la negociación finalice con éxito completo.
- **Servicio básico (SB):** un servicio S^i es básico, si $Q(S^i) < Q(S^p)$ pero su implementación es necesaria para alcanzar $Q(S^p)$.
- **Servicio normal (SN):** un servicio S^i es normal, si $Q(S^i) < Q(S^p)$ y su desacuerdo no afecta a la posibilidad de alcanzar $Q(S^p)$.

La pertenencia de un servicio a uno de los tres tipos puede variar a lo largo de la negociación en función de la evolución en el acuerdo o desacuerdo del resto de servicios. Por ejemplo, como se puede observar en la tabla 5.1, un servicio que al inicio de la negociación es normal, puede convertirse en básico por el acuerdo de otro servicio.

No obstante, varios servicios pueden pertenecer al mismo tipo por lo que resulta necesaria alguna función que permita establecer alguna prioridad entre ellos.

Definimos w_a^i como el grado de importancia del servicio S^i para el agente a donde $\sum_{i=1}^k w_a^i = 1$ (es decir, la importancia de la agenda para el agente a es 1) y sujeto a que:

- Si S^i es el único servicio en la agenda, $w_a^i = 1$.
- Si existen varios servicios, S^1, \dots, S^k pero sólo uno de ellos, S^o , es óptimo entonces $w_a^o = 1$ y $w_a^i = 0 (i \neq o)$ para el resto de servicios.

$Q(S^p) = 100$, $t^b < t^c < t^d$ y Agenda = { $S1, S2, S3, S4$ }					
en t^b		en t^c		en t^d	
Calidad	Tipo	Calidad	Tipo	Calidad	Tipo
$Q(S1) = 100$	Óptimo	opt	—	opt	—
$Q(S2) = 80$	Normal	$Q(S2) = 80$	Básico	opt	—
$Q(S3) = 40$	Normal	$Q(S3) = 40$	Básico	$Q(S3) = 40$	Normal
$Q(S4) = 10$	Normal	$Q(S4) = 10$	Normal	$Q(S4) = 10$	Normal

Tabla 5.1: Ejemplo de Servicios y su clasificación. En el instante t^b , existe un servicio óptimo, $S1$, por lo que no puede existir ningún servicio básico. En el instante t^c , no se ha logrado alcanzar un acuerdo sobre $S1$, por lo que se vuelven a clasificar los elementos de la agenda. En esta situación tanto $S2$ como $S3$ son básicos ya que si no se logra un acuerdo sobre los dos servicios, no se alcanza $Q(S^p)$. En el instante t^d , de nuevo se produce un desacuerdo, esta vez sobre $S2$, y el resto de servicios, $S3$ y $S4$ pasan a ser normales.

- Si existen varios servicios, S^1, \dots, S^k y no hay ningún servicio óptimo y sólo uno de ellos, S^b , es básico entonces $w_a^b = 1$ y $w_a^i = 0 (i \neq b)$ para el resto de servicios.

La función $R_a^i(r)$ proporciona el valor de la oferta que el agente a realiza sobre un recurso r perteneciente al servicio S^i :

$$R_a^i(r) = \begin{cases} MinOf(r) + w_a^i * (MaxOf(r) - MinOf(r)) & \text{Si el recurso } r \text{ pertenece al agente } a \\ MaxReq(r) - w_a^i * (MaxReq(r) - MinReq(r)) & \text{Si el recurso } r \text{ no pertenece al agente } a \end{cases}$$

Combinación de ambas tácticas

La aplicación individualizada de las tácticas presentadas (restricciones temporales y por recursos) no garantiza que los agentes alcancen un acuerdo satisfactorio antes de que el proceso de negociación finalice. En las tácticas basadas en los recursos, los agentes no tienen en cuenta los instantes de tiempo (ni el actual ni el instante de tiempo en el que la negociación acaba para cada servicio S^i , $T_{negociacion}^i$) por lo que la negociación puede finalizar sin que se alcance un acuerdo. En las tácticas basadas en las restricciones temporales, los agentes intentan negociar antes de que venzan los tiempos máximos de cada uno de los servicios, pero no tienen en cuenta la importancia de los servicios para el agente, por lo que se pueden producir situaciones en las que los agentes alcanzan acuerdos sobre servicios que luego no son necesarios resultando en un malgasto de los recursos.

En el protocolo propuesto para resolver los problemas se realiza un proceso de combinación de ambas tácticas para determinar el valor de la contraoferta sobre cada recurso r de cada servicio de la agenda.

La integración de ambas tácticas se realiza mediante la función $ROffer_a^{t,i}(r)$. Si el recurso sobre el que se negocia es gestionado por el agente a la función $ROffer_a^{t,i}(r)$ es:

$$ROffer_a^{t,i}(r) = \begin{cases} MaxOf(r) & Si f_a^t(r) + R_a^i(r) - MinOf(r) \geq MaxOf(r) \\ (f_a^t(r) + R_a^i(r) - MinOf(r)) & Si f_a^t(r) + R_a^i(r) - MinOf(r) < MaxOf(r) \end{cases}$$

Si por el contrario el recurso r no es gestionado por a la función se define como:

$$ROffer_a^{t,i}(r) = \begin{cases} MinReq(r) & Si f_a^t(r) + R_a^i(r) - MaxReq(r) \leq MinReq(r) \\ (f_a^t(r) + R_a^i(r) - MaxReq(r)) & Si f_a^t(r) + R_a^i(r) - MaxReq(r) > MinReq(r) \end{cases}$$

La función $ROffer_a^{t,i}(r)$ permite la generación de ofertas y contraofertas en función del tiempo t y del servicio S^i sobre el que se realiza la oferta. La figura 5.2 presenta un ejemplo de la combinación de ambas tácticas. En este ejemplo se muestra la evolución de las ofertas realizadas por un agente a sobre un recurso r que él gestiona. La función $f_a^t(r)$ está desarrollando una táctica *Boulware* (que se caracteriza por mantener la oferta inicial, $MinOf(r)$, hasta que nos acercamos al tiempo máximo de la negociación de ese servicio, $T_{negociacion}^i$). La función $R_a^i(r)$ ofrece durante toda la negociación un valor constante. La función combinada $ROffer_a^{t,i}(r)$ inicia la negociación con el valor que ofrece $R_a^i(r)$, pero en lugar de mantener esa oferta, evoluciona conforme avanza el tiempo según $f_a^t(r)$. Esta situación se mantiene hasta que se alcanza el máximo valor posible que el agente puede ofertar. A partir de ese instante t' , el valor de $ROffer_a^{t,i}(r)$ es el máximo posible, $MaxOf(r)$.

En la figura 5.3 se presenta un ejemplo de la evolución de las ofertas realizadas por un agente a para un recurso r que es gestionado por el agente \hat{a} . En esta situación, la función $f_a^t(r)$ está desarrollando una táctica *Lineal* (que se caracteriza por modificar la oferta inicial, $MaxReq(r)$, según avanza el tiempo hasta alcanzar el valor tope requerido, $MinReq(r)$ en $T_{negociacion}^i$). La función $R_a^i(r)$ ofrece durante toda la negociación el valor constante, asociado a la importancia del servicio al que pertenece el recurso para el agente. La función combinada $ROffer_{\hat{a}}^{t,i}(r)$ inicia la negociación con el valor que ofrece $R_a^i(r)$, pero en lugar de mantener esta oferta, evoluciona conforme avanza el tiempo según $f_a^t(r)$. Esta situación se mantiene hasta que se alcanza el valor tope posible que el agente puede ofertar, $MinReq(r)$. A partir de ese instante, t' , el valor de $ROffer_{\hat{a}}^{t,i}(r)$ se mantiene constante.

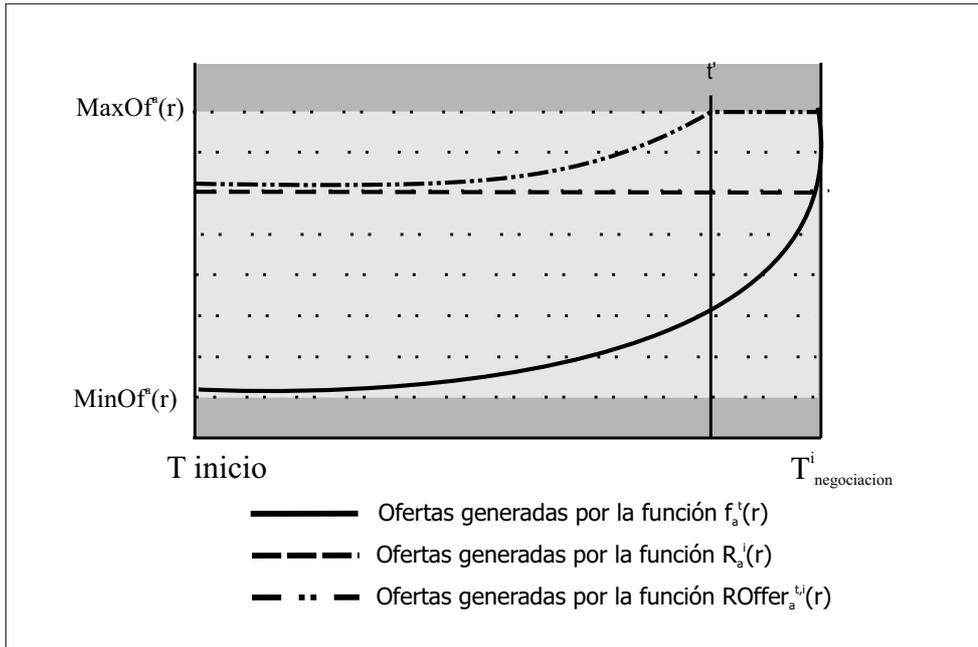


Figura 5.2: Ejemplo de la evolución de las ofertas realizadas por el agente a sobre el recurso r (gestionado por el agente a) mediante la combinación de una táctica *Boulware* y una táctica constante basada en los recursos.

5.3.4. Estado de Información/Conocimiento de los Agentes

En este protocolo se está realizando el supuesto que el conocimiento que tienen los agentes sobre el entorno de negociación es incompleto. Esta situación es la que más se aproxima a los entornos reales en los que cada agente no desea compartir cierta información con los demás para intentar evitar que los demás agentes saquen ventaja de sus intenciones/necesidades/debilidades.

Existen dos aproximaciones bien diferenciadas para trabajar en entornos con información incompleta [Sandholm99a]:

- El principio de revelación. En esta aproximación los agentes comparten toda su información antes de empezar el proceso de negociación.
- La utilización de las creencias y experiencia que los agentes obtienen durante los diferentes encuentros que se realizan durante el proceso de negociación.

El modelo de negociación propuesto utiliza las dos aproximaciones. Esto es debido a varios factores. Aplicando únicamente el principio de revelación pueden aparecer conflictos de intereses en los agentes, puesto que estos deben revelar toda su

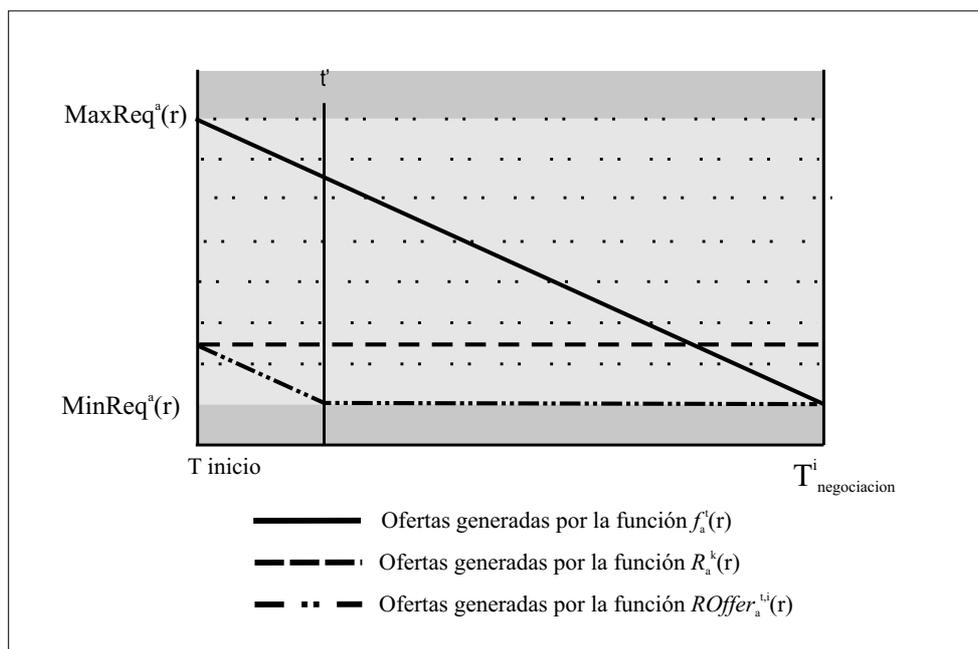


Figura 5.3: Ejemplo de evolución de las ofertas realizadas por el agente a sobre el recurso r (gestionado por \hat{a}) mediante la combinación de una táctica temporal lineal y una táctica constante basada en la importancia de los servicios.

información. Además, la evolución del problema y la relación existente entre los servicios que componen la agenda, implicaría que al utilizar el principio de revelación los agentes deberían estar intercambiando información constantemente, lo que reduciría el tiempo disponible para alcanzar un acuerdo. Sin embargo, la identificación y características de un servicio problemático y la agenda, con los servicios disponibles que pueden suplirlo, deben ser públicos.

Ahora bien, los problemas producidos por S^p pueden afectar a los recursos gestionados por el agente cooperador por lo que se define $T_{frontera}$ como el instante temporal en el que los problemas producidos por S^p comienzan a afectar al agente cooperador. La gravedad de estos problemas para el agente cooperador puede ser la prevista por el agente manager o diferente, por lo que el agente cooperador en $T_{frontera}$ se adaptará a la realidad que detecta.

Al inicio del protocolo de negociación, los agentes intercambian información: el tiempo que tardará el servicio problemático $Q(S^p)$ en afectar al otro agente, $T_{frontera}$, y los distintos tiempos que les llevaría implementar los servicios, $T_{desarrollo}^i$. El resto de información del protocolo (como los valores máximos y mínimos ofrecidos y requeridos para cada recurso, la importancia de los servicios para los agentes y las experiencias de negociaciones anteriores) pertenecen a la parte privada de los

agentes.

Así pues, el estado de información/conocimiento de cada agente contiene:

- Información pública:
 - La agenda de negociación (incluidos los recursos de cada servicio y el agente al que pertenecen) y el servicio S^p que presenta problemas.
 - La calidad de servicio y el tiempo de desarrollo de cada servicio de la agenda.
 - $T_{negociacion}^i$ para cada servicio S^i de la agenda.
- Información privada para cada agente a :
 - El mínimo y máximo uso que el agente a puede ofrecer para cada recurso que gestiona.
 - El mínimo y máximo uso que el agente a puede requerir para cada recurso que no gestiona.
 - Para cada recurso r gestionado por el agente a , el agente a tiene una lista de creencias sobre lo que el agente \hat{a} supone que puede ser el valor máximo que el agente a puede llegar a ofrecer. Esta lista está formada por n pares (v_i, α_i) donde v_i representa el valor máximo que el agente \hat{a} cree que el agente a puede llegar a ofrecer con probabilidad α_i . La lista $Posibles_{\hat{a}}(r)$ está ordenada de mayor a menor valor de v_i y se asume que uno de estos valores es el valor correcto respecto del máximo valor que el agente a podría llegar a ofrecer.
 - Para cada recurso r no gestionado por el agente a , el agente a tiene una lista de creencias sobre lo que el agente \hat{a} supone que puede ser el valor mínimo que el agente a puede llegar a requerir. Esta lista está formada por m pares (v_j, β_j) donde v_j representa el valor mínimo que el agente \hat{a} cree que el agente a puede llegar a requerir con probabilidad β_j . La lista $Posibles_{\hat{a}}(r)$ está ordenada de menor a mayor valor de v_j y se asume que uno de estos valores es el valor correcto respecto del mínimo valor que el agente a podría llegar a requerir.
 - Su función de utilidad.

5.4. Escenarios de Negociación

Los escenarios de negociación definen la situación en tiempo real del entorno de negociación. A partir de los escenarios, los agentes determinan cuáles son las tácticas adecuadas que deben aplicar en cada posible situación. Los posibles escenarios de negociación que pueden darse en el entorno de negociación dependen de dos factores:

1. Las relaciones entre los tiempos que intervienen en la negociación: el instante temporal donde se solucionará el problema, $T_{resolucion}$, el tiempo de desarrollo que ambos agentes necesitan desde que se ha alcanzado el acuerdo hasta que se puede implementar el servicio, $T_{desarrollo}^i$, y el tiempo en el que los problemas afectarán a los recursos del agente cooperador, $T_{frontera}$ (ver figura 5.4). Estas relaciones permiten definir dos tipos de cooperación: *Cooperación conocida* y *cooperación ciega*. En la *cooperación conocida*, el agente cooperador ya está sufriendo los problemas ocasionados por el servicio S^p , (es decir, se ha sobrepasado $T_{frontera}$) por lo que el agente cooperador es capaz de determinar su propia previsión de la evolución del problema. En la *cooperación ciega* aún no se ha alcanzado $T_{frontera}$ por lo que el agente cooperador no conoce la evolución real del servicio (sólo conoce la previsión que le ha comunicado el agente manager).

En la figura 5.4 se presentan dos casos bien diferenciados. En el *caso a*, se presenta la negociación sobre un servicio S^i cuyo tiempo máximo de negociación, $T_{negociacion}^i$ finaliza después de que se haya alcanzado $T_{frontera}$. En esta situación, el agente cooperador coopera de manera ciega hasta $T_{frontera}$ y a partir de este instante empieza a cooperar de manera conocida. En el *caso b*, el tiempo máximo de negociación, $T_{negociacion}^i$ finaliza antes de alcanzar $T_{frontera}$ por lo que durante toda la negociación sobre el servicio S^i el agente negocia sin conocer los efectos reales del problema, es decir, realiza una cooperación ciega.

2. Las relaciones entre las $Q(S^i)$ de los servicios que componen la agenda. Los agentes intentan alcanzar $Q(S^p)$ bien mediante un servicio *óptimo*, que ofrece una calidad de servicio mayor o igual a $Q(S^p)$, o bien mediante la acumulación de calidades de servicio de varios servicios no óptimos. En función de las calidades de los servicios que se van acordando se pueden producir dos situaciones: a) *cooperación optimista* donde $Q(S^p)$ no se ha alcanzado todavía pero puede alcanzarse con los elementos que quedan en la agenda y b) *cooperación imperativa*, donde $Q(S^p)$ no se puede alcanzar y los agentes intentan alcanzar un acuerdo que maximice la calidad de servicio ofrecida.

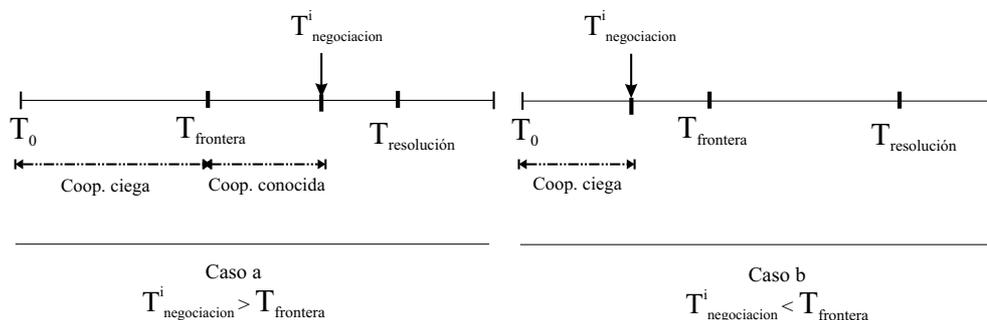


Figura 5.4: Relaciones entre los tiempos de negociación y el tiempo de frontera para el agente cooperador, que da lugar a dos tipos posibles de negociación dependiendo del instante en el que se está negociando.

Por lo tanto, el conjunto de posibles escenarios de negociación puede clasificarse atendiendo al tipo de cooperación (conocida o ciega) y a las relaciones entre las calidades de servicio de los servicios de la agenda de negociación (optimista o imperativa). La tabla 5.2 presenta los distintos escenarios existentes y los tipos de agente que pueden estar en cada uno de ellos.

Escenario	Tipo de cooperación	Calidad de servicio	Rol del Agente
E1	Conocida	Optimista	Manager/Cooperador
E2	Conocida	Imperativa	Manager/Cooperador
E3	Ciega	Optimista	Cooperador
E4	Ciega	Imperativa	Cooperador

Tabla 5.2: Escenarios de negociación.

El conjunto de combinaciones posibles de escenarios que se pueden producir a lo largo del proceso de negociación es: El agente manager se puede encontrar únicamente en el escenario E1 y E2, puesto que conoce la situación del problema. Si está en el escenario E1, el agente cooperador sólo puede estar en el escenario E1 ó E3, ya que si el manager está en E1, la negociación es optimista para ambos agentes. Si por el contrario el manager se encuentra en el escenario E2, el cooperador puede estar en los escenarios E2 ó E4, puesto que la negociación es imperativa. La tabla 5.3 presenta estas combinaciones.

El escenario de negociación de un agente a en un instante t es común para todos los servicios de la agenda. Ahora bien, las estrategias que desarrolla el agente a para cada uno de los servicios de la agenda no dependen únicamente del escenario en que se encuentre sino que también dependen del tipo de servicio sobre el cual se esté realizando la oferta, ya que si esto no fuera así, se estaría utilizando la

Ag. Manager	Ag. cooperador
E1	E1 o E3
E2	E2 o E4

Tabla 5.3: Combinación de escenarios.

misma táctica de negociación para todos los servicios que intervienen en la agenda, independientemente de la clasificación del servicio y de la importancia del mismo para el resultado final de la negociación.

Recordemos la clasificación de servicios descrita anteriormente, donde los posibles servicios que componen la agenda se clasifican en tres tipos: óptimos, básicos y normales (ver sección 5.3.3). Recordemos también que la pertenencia de un servicio, S^i a un grupo u otro puede variar a lo largo de la negociación en función del acuerdo o desacuerdo realizado hasta el momento del resto de servicios y esto puede modificar la táctica que aplicamos a lo largo de la negociación sobre el servicio S^i .

En el instante de tiempo en que se produce un acuerdo o desacuerdo sobre alguno de los servicios que pertenecen a la agenda de negociación se produce un *evento de negociación*. El instante de tiempo t , en el que se produce un evento asociado a un servicio S^k , se encuentra entre el instante $t=0$ y el tiempo tope ($T_{resolucion} - T_{desarrollo}^k$), si el evento es producido por un acuerdo o bien exactamente en $T_{negociacion}^k$ si el evento es producido por un desacuerdo.

Para poder determinar las estrategias óptimas que cada uno de los agentes deben aplicar en cada paso de la negociación, se ha de determinar primero a que categoría pertenece la agenda de negociación (recordemos que en el apartado 5.2 se han clasificado las agendas en completas -óptimas y no óptimas- e incompletas). Para cada posible tipo de agenda se analizará el conjunto de posibles resultados de negociación mediante el empleo del *árbol de negociación*.

El árbol de negociación representa la secuencia de acuerdos o desacuerdos sobre los servicios, esto es, los diferentes eventos que se producen durante la negociación y cómo, dependiendo del servicio sobre el que se produzca el acuerdo/desacuerdo, el protocolo proporciona un resultado u otro. El árbol está formado por: nodos que representan el resultado de la negociación sobre uno de los servicios (una A identifica un acuerdo y una D un desacuerdo) -sin determinar sobre cual de ellos-; y por ramas, que representan las diferentes opciones que en el proceso de negociación se pueden producir con los servicios que restan por negociar.

Para analizar las estrategias que se pueden aplicar al negociar sobre cada uno de los tres tipos de agendas se ha supuesto que en la agenda hay 3 servicios: S^1 , S^2 y S^3 (el análisis resulta igualmente válido si hay más de tres servicios).

5.4.1. Agenda Completa con Servicio Óptimo

En este caso, de los 3 servicios que componen la agenda, al menos uno de ellos es óptimo.

Al inicio de la negociación, en $t = 0$, los agentes negocian sobre todos los servicios que pertenecen a la agenda. La estrategia inicial de negociación para cada uno de los servicios se mantiene hasta que se produce un evento de negociación. Este primer evento se puede producir: a) debido a un acuerdo sobre un servicio S^i de la agenda o b) por que hemos llegado al instante de tiempo $T_{negociacion}^i$ y se produce un desacuerdo sobre S^i .

Como consecuencia de este primer evento de negociación, en función del tipo de servicio y del acuerdo o desacuerdo sobre él, se pueden presentar las siguientes situaciones:

- a: Se produce un acuerdo sobre S^i que es un servicio óptimo. En esta situación, el protocolo de negociación acaba con *éxito completo* y se comienza a desarrollar S^i .
- b: Se produce un desacuerdo sobre S^i que es un servicio óptimo. En esta situación se borra de la agenda S^i y entonces puede suceder:
 1. Que hayan más servicios óptimos en la agenda, por lo que la negociación continúa en el mismo escenario optimista.
 2. Que no hayan más servicios óptimos en la agenda, por lo que hay que analizar los servicios que quedan en la agenda. Si con los servicios restantes se puede alcanzar $Q(S^p)$ nos encontraríamos en una situación de agenda óptima sin servicio óptimo (el escenario continúa siendo optimista). Si, por el contrario, no se puede alcanzar $Q(S^p)$ la agenda es incompleta y entonces el escenario de negociación pasa a ser un escenario imperativo.
- c: Se produce un acuerdo sobre S^i , pero S^i no es óptimo. En esta situación, el protocolo de negociación continúa con la negociación sin ninguna modificación en el mismo escenario.

- d:** Se produce un desacuerdo sobre S^i , pero S^i no es óptimo. En esta situación, el protocolo de negociación continúa con la negociación sin ninguna modificación en el mismo escenario.

Este proceso se repite hasta que se llega a un acuerdo que logra alcanzar $Q(S^p)$ o bien hasta que se alcanza el instante de tiempo T_{max} en el que finaliza la negociación. El proceso de negociación y el conjunto de posibles resultados dependiendo de los posibles acuerdos/desacuerdos sobre los servicios de la agenda se muestra en el árbol de negociación (figura 5.5).

Al analizar los diferentes resultados del árbol de la figura 5.5 se observa que:

- Los resultados de las soluciones 1, 8 y 12 son idénticos. Sólo se ha logrado el acuerdo sobre el servicio óptimo. Ahora bien, el resultado 1 consigue que $Q(S^p)$ se alcance al inicio del protocolo, mientras que los resultados 8 y 12 retrasan la implementación del servicio con la consiguiente pérdida de beneficios debido a que se acuerdan más tarde.
- Los resultados 2, 3, 5 y 9 alcanzan $Q(S^p)$. Estos resultados pueden producirse por dos motivos, bien porque la suma de la calidad de servicio de los servicios acordados sea igual o mayor que $Q(S^p)$ o bien porque uno de los servicios acordados sea el óptimo. Si alguno de los servicios acordados es el óptimo, entonces se ha implementado un servicio que resulta no ser necesario, esto es, se están malgastando recursos del entorno. Situación que seguro ocurre en el resultado 3.
- En los resultados 4, 6 y 10, a pesar de llegar a un acuerdo sobre dos servicios, no se alcanza $Q(S^p)$. Esta situación se produce cuando el servicio sobre el que no hay acuerdo es el servicio óptimo. Esta situación es diferente a una situación de conflicto (*opt out*) ya que se ha acordado suplir el servicio S^p con servicios que no alcanzan $Q(S^p)$.
- Las soluciones 7, 11 y 13 son similares a las soluciones 4, 6 y 10. En ninguna de ellas se alcanza $Q(S^p)$. La diferencia radica en que, en estos resultados, sólo se ha llegado a acordar un servicio.
- El resultado 14 es el peor resultado posible porque no se ha llegado a acuerdos para la implementación de ningún servicio lo que desemboca en la situación de conflicto.

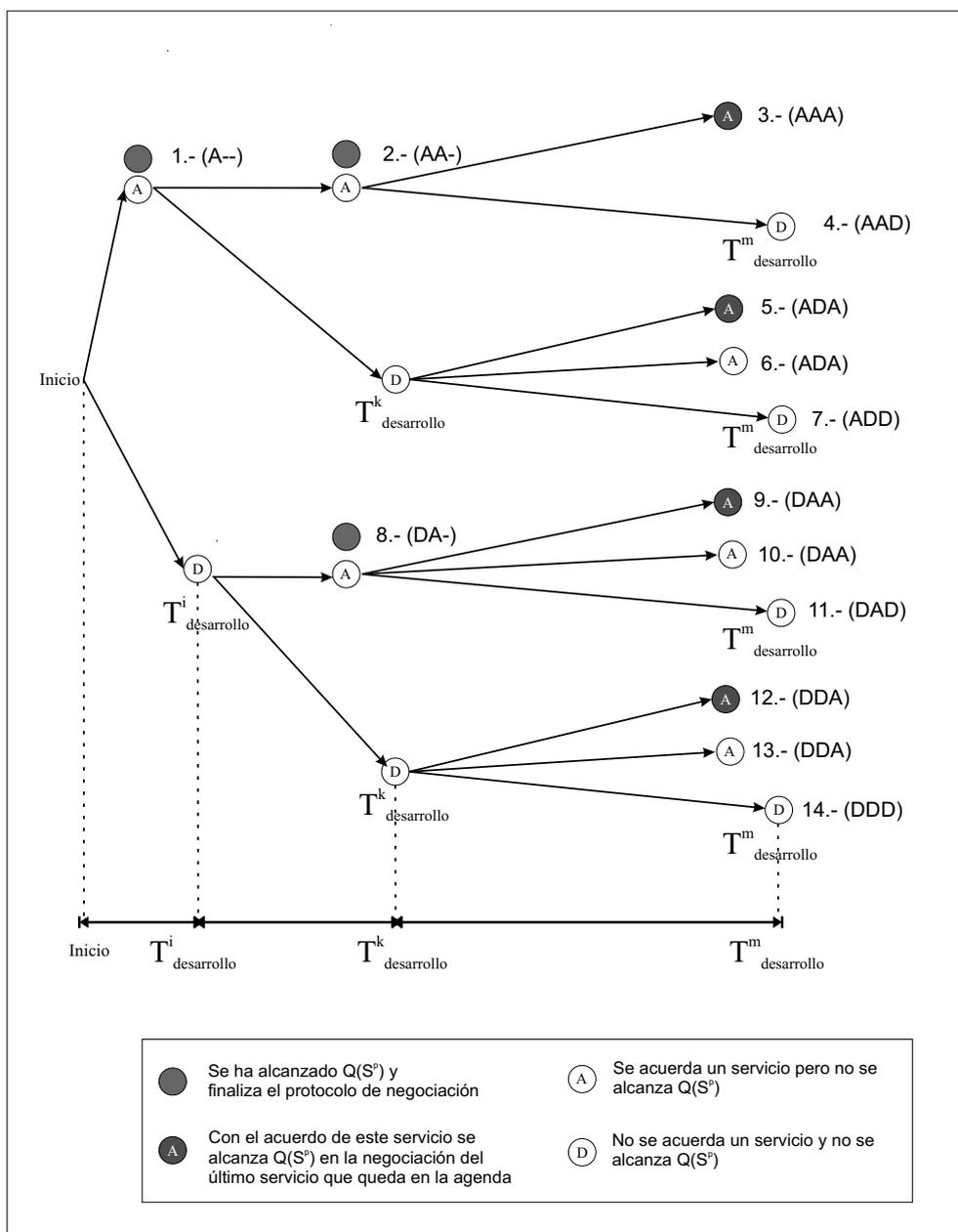


Figura 5.5: Conjunto posible de resultados y árbol de negociación de un protocolo con agenda completa y uno o varios servicios óptimos. Los tres servicios se identifican por S^i , S^k y S^m indicando que el orden en el que se realiza un acuerdo o desacuerdo de cada servicio S^1, S^2 ó S^3 no es relevante (lo que si es relevante es la clasificación a la que pertenece el servicio).

5.4.2. Agenda Completa Sin Servicio Óptimo

En este entorno de negociación, para que se llegue a un resultado de éxito completo, se debe lograr al menos el acuerdo en dos o más servicios, de lo contrario es

imposible tener una calidad de servicio que alcance $Q(S^p)$. La figura 5.6 muestra el árbol de posibles resultados del proceso de negociación para una agenda completa en la que no existe un servicio óptimo. El procedimiento seguido es idéntico al realizado en el caso anterior.

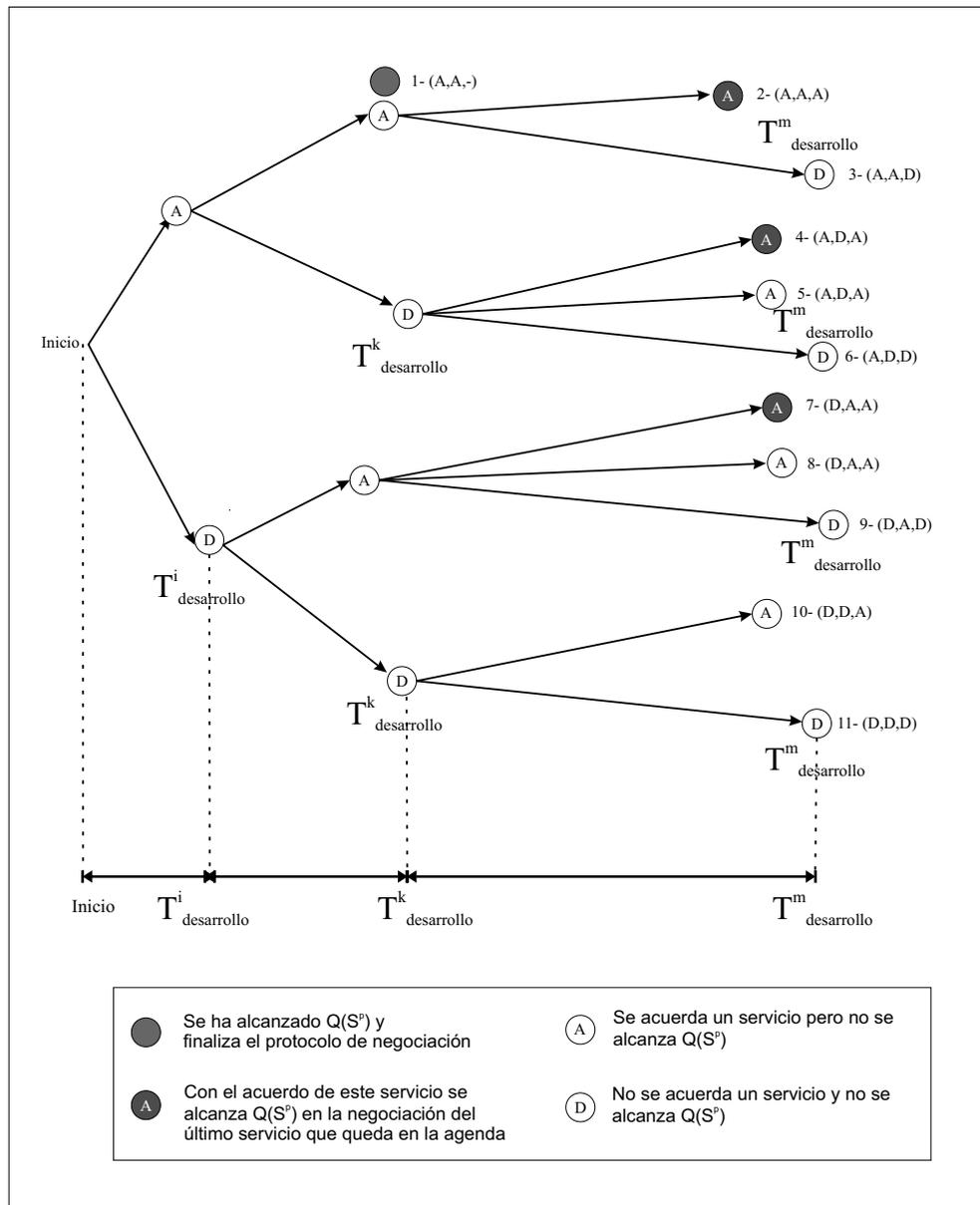


Figura 5.6: Conjunto posible de resultados y árbol de negociación de un protocolo con agenda completa sin servicio óptimo. Los tres servicios se identifican por S^i , S^k y S^m indicando que el orden en el que se realiza un acuerdo o desacuerdo de cada servicio S^1, S^2 ó S^3 no es relevante (lo que si es relevante es la clasificación a la que pertenece el servicio).

Los resultados que se aprecian en el árbol son:

- El primer acuerdo sobre un servicio no alcanza nunca $Q(S^p)$ ya que no existe servicio óptimo.
- En los resultados 1, 4 y 7 se alcanza $Q(S^p)$ al lograr el acuerdo sobre otro servicio. Esto implica que el último servicio acordado es un servicio básico.
- El resultado 2 alcanza $Q(S^p)$ cuando se logra un acuerdo sobre todos los servicios que componen la agenda.
- En los resultados 3, 5, 6, 8, 9 y 10 no se llega a obtener $Q(S^p)$ pero se acuerdan varios servicios. Como consecuencia el servicio sobre el que no se ha llegado al acuerdo es un servicio básico. Esta situación es diferente a una situación de conflicto (*opt out*) ya que se ha acordado suplir el servicio S^p con servicios que no alcanzan $Q(S^p)$.
- El resultado 11 es el peor resultado posible ya que se produce una situación de conflicto al no acordarse ningún servicio.

5.4.3. Agenda Incompleta

La figura 5.7 representa el árbol de los posibles resultados del proceso de negociación para una agenda incompleta. En este tipo de agendas nunca se llega a alcanzar la calidad de servicio $Q(S^p)$, aunque la cooperación para el desarrollo de servicios es necesaria para no llegar a una situación de conflicto.

Analizando los resultados del árbol se observa que:

- El resultado 1 presenta el mejor acuerdo posible. Se acuerdan todos los servicios de la agenda.
- Los resultados 2, 3, 4, 5, 6, y 7 logran el acuerdo sobre alguno de los servicios, aunque no se puede decidir, de forma absoluta, qué resultado de éstos es el mejor, ya que depende de las calidades de servicio individuales de los servicios de la agenda.
- El resultado 8 es el peor resultado posible, ya que se produce una situación de conflicto al no acordarse ningún servicio.

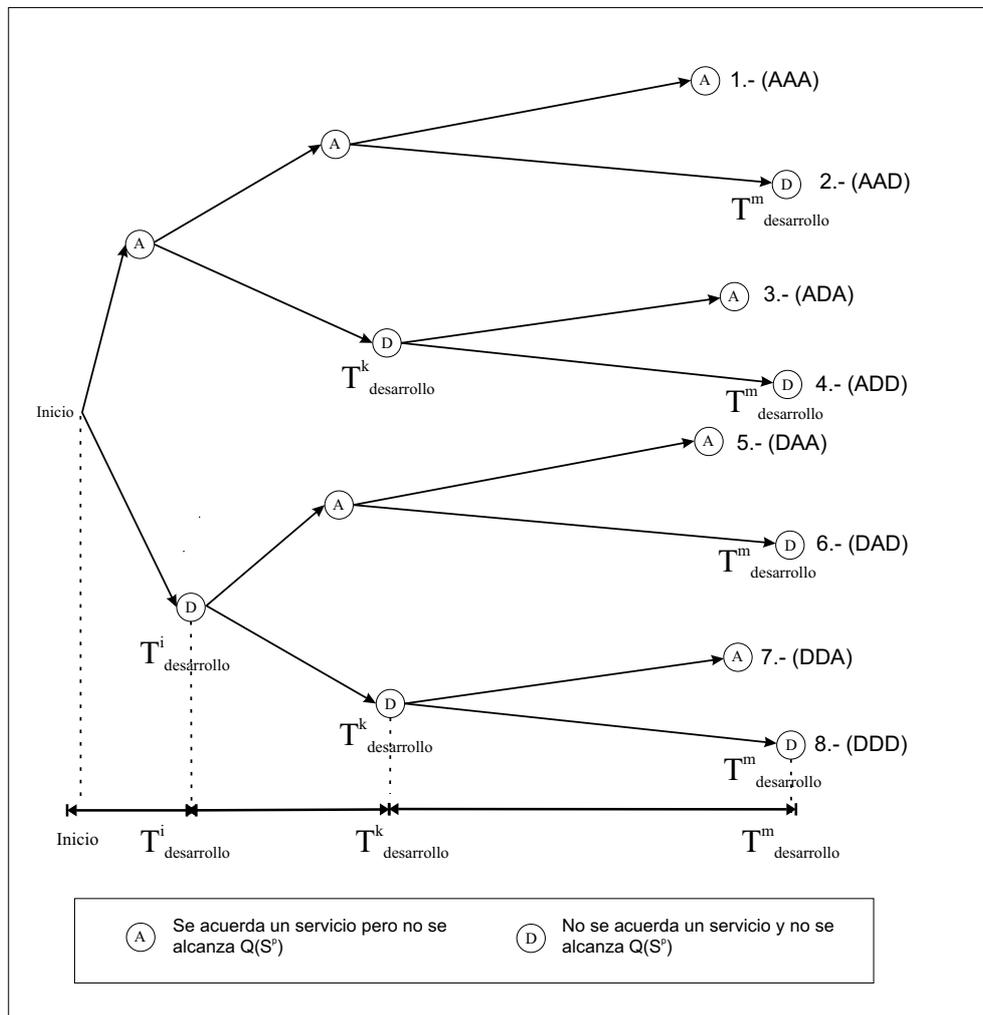


Figura 5.7: Conjunto posible de resultados y árbol de negociación de un protocolo con agenda incompleta. Los tres servicios se identifican por S^i , S^k y S^m ; indicando que el orden en el que se realiza un acuerdo o desacuerdo de cada servicio S^1, S^2 ó S^3 no es relevante (lo que si es relevante es la clasificación a la que pertenece el servicio).

5.4.4. Tácticas Temporales Óptimas por Servicio

Una vez analizado el conjunto de posibles resultados de la negociación dependiendo del tipo de servicios que componen la agenda, se tienen que determinar las tácticas óptimas que cada uno de los agentes debe aplicar en cada posible situación.

Para analizar las tácticas óptimas se ha de considerar:

- El escenario en el que la negociación se encuentre: E1, E2, E3 o E4.

- El servicio sobre el que se negocia. Observando los diversos árboles de negociación expuestos anteriormente y las conclusiones obtenidas, queda patente la necesidad de implementar diferentes estrategias para cada servicio, dependiendo de la clasificación del mismo. Por ejemplo, la negociación sobre un servicio óptimo debe ser diferente que la negociación de un servicio normal.
- Los servicios que quedan en la agenda. Es decir, aquellos servicios sobre los que todavía no se ha llegado a un acuerdo/desacuerdo a lo largo del proceso de negociación.
- Como el agente cooperador puede ser afectado, en $T_{frontera}$, por el servicio problemático respecto de la previsión realizada por el agente manager. Si los problemas detectados por el agente cooperador son más severos, éste negociará intentando acelerar el proceso de alcanzar un acuerdo.

Además, se recuerda que los agentes que negocian sobre el servicio S^i ofrecen los valores tope de los recursos que pertenecen a S^i , al menos, cuando se alcanza $T_{negociacion}^i$ (como ya se apuntó en la sección 5.3).

En el análisis de estas tácticas se considera, para cada posible escenario, los distintos tipos de agenda posibles y el tipo de servicio sobre el que se negocia.

Escenario 1

En este escenario, el problema real, producido por el servicio S^p , es conocido por los dos agentes. Ambos conocen, el problema y sus repercusiones. Además, el escenario de negociación es optimista, por lo que se puede lograr alcanzar la calidad de servicio de $Q(S^p)$.

- **Agenda óptima con, al menos, un servicio óptimo.**
 - *Se negocia sobre uno de los óptimos, pero hay más óptimos.* En esta situación, los agentes saben que éste no es el único servicio con el que pueden alcanzar $Q(S^p)$. Por lo tanto, la determinación de la prioridad de los servicios óptimos para el agente no puede ser determinada únicamente por las tácticas temporales.
Si el agente *manager* aplicase una táctica *Conceder* estaría perdiendo utilidad ya que se podría alcanzar un acuerdo sobre uno de los servicios óptimos sin conocer apenas el comportamiento de las ofertas del resto de los otros servicios óptimos. Así pues, el agente *manager* aplica una

táctica *Lineal*, que le permite intentar alcanzar un acuerdo rápido sobre un servicio óptimo y, a la vez, observar el comportamiento temporal de las ofertas sobre el resto de servicios óptimos.

En cambio, el agente *cooperador* debe evaluar la previsión de la evolución del problema realizada por el agente *manager*. Si la previsión es correcta (es decir, el incidente tiene, en el peor de los casos, la evolución prevista por el agente *manager*), el agente *cooperador* aplica una táctica *Lineal*. Por el contrario, si la previsión es incorrecta (es decir, la evolución del incidente supone más problemas que los inicialmente previstos) el agente *cooperador* aplica una táctica *Conceder*. Esta concesión permite al agente *cooperador* intentar acelerar el acuerdo sobre alguno de los servicios óptimos.

- *Se negocia sobre el único óptimo que existe.* El servicio sobre el que se negocia es el único que permite alcanzar $Q(S^p)$. Por lo tanto, ambos agentes desarrollan una táctica *Conceder*. Al existir un único servicio óptimo, los agentes deben alcanzar el acuerdo sobre él lo antes posible. En esta situación no tiene sentido alargar la negociación, ya que este servicio es el que mejores resultados puede proporcionar y cuanto más se tarde en alcanzar el acuerdo, menor será el beneficio obtenido por la implementación de este servicio (recordemos que la función de utilidad es una función von Neumann-Morgenstein, descrita en la sección 5.3.2, que incluye factores de descuento basados en el tiempo).
 - *Se negocia sobre el resto de servicios.* El acuerdo sobre el resto de servicios de la agenda no es relevante, ya que existen servicios óptimos en la agenda, luego los dos agentes aplican una táctica *Boulware*. Esta táctica permite intentar retrasar el acuerdo sobre los servicios normales para poder alcanzar antes un acuerdo sobre los óptimos. Si esto no fuera así, y se alcanzara el acuerdo sobre un servicio normal antes que el acuerdo sobre un óptimo, se estarían malgastando recursos, ya que se implementarían dos servicios, y con uno de ellos, el óptimo, bastaría para finalizar el protocolo con un *éxito completo*.
- **Agenda óptima sin servicio óptimo pero con, al menos, un servicio básico.**
- *Se negocia sobre uno de los básicos, pero hay más básicos.* En esta situación, los agentes saben que hay varios servicios básicos que permiten alcanzar $Q(S^p)$. Por lo tanto, la determinación de la prioridad de los servicios básicos para el agente no puede ser determinada únicamente por las tácticas temporales.

Si el agente *manager* aplicase una táctica *Conceder* estaría perdiendo utilidad ya que se podría alcanzar un acuerdo sobre uno de los servicios básicos sin conocer apenas el comportamiento de las ofertas del resto de los otros servicios básicos. Así pues, este agente aplica una táctica *Lineal*, que le permite intentar alcanzar un acuerdo rápido sobre un servicio básico y, a la vez, observar el comportamiento temporal de las ofertas sobre el resto de servicios básicos.

En cambio, el agente *cooperador* debe evaluar la previsión de la evolución del problema facilitada por el agente *manager*. Si la previsión es correcta (es decir, el incidente tiene, en el peor de los casos, la evolución prevista por el agente *manager*) el agente *cooperador* aplica una táctica *Lineal*. Por el contrario, si la previsión es incorrecta (es decir, la evolución del incidente supone más problemas de los inicialmente previstos) el agente *cooperador* aplica una táctica *Conceder*. Esta concesión permite al agente *cooperador* intentar acelerar el acuerdo sobre alguno de los servicios básicos.

- *Se negocia sobre el único básico que existe.* El servicio sobre el que se negocia es el único que permitirá alcanzar $Q(S^p)$. Por lo tanto, ambos agentes desarrollan una táctica *Conceder*. En esta situación, no tiene sentido alargar la negociación, ya que este servicio es el que mejores resultados puede proporcionar y cuanto más se tarde en alcanzar el acuerdo menor será el beneficio obtenido por la implementación de este servicio.
- *Se negocia sobre el resto de servicios.* El acuerdo sobre el resto de servicios de la agenda no es relevante, ya que existen servicios básicos en la agenda, luego los dos agentes aplican una táctica *Boulware*. Esta táctica permite intentar retrasar el acuerdo sobre los servicios normales para poder alcanzar antes un acuerdo sobre los básicos. Si esto no fuera así, se podrían implementar más servicios de los necesarios y se estarían malgastando recursos.

■ **Agenda Incompleta.**

Esta situación no se puede producir, ya que si nos encontramos en el escenario 1, la negociación puede alcanzar $Q(S^p)$, lo que contradice la definición de agenda incompleta.

La tabla 5.4 resume las tácticas que cada agente desarrollará para el escenario 1 en función de su rol, la agenda y del tipo de servicio sobre el que se esté negociando.

Tácticas temporales de negociación						
Escenario		Agenda	Tipo Servicio	Previsión	Tácticas	
Manager	Cooperador				Manager	Cooperador
E1	E1	ACSO	+Óptimos	Adecuada	L	L
				Inadecuada	L	C
E1	E1	ACSO	Un óptimo	Adecuada	C	C
				Inadecuada	C	C
E1	E1	ACSO	Resto	Adecuada	B	B
				Inadecuada	B	B
E1	E1	ACSB	+Básicos	Adecuada	L	L
				Inadecuada	L	C
E1	E1	ACSB	Un básico	Adecuada	C	C
				Inadecuada	C	C
E1	E1	ACSB	Resto	Adecuada	B	B
				Inadecuada	B	B
E1	E1	AI	Imposible			

Tabla 5.4: Tácticas temporales óptimas para cada agente donde los acrónimos de la columna *Agenda* identifican los tipos posibles de agenda y significan: *ACSO* indica que negociamos sobre una agenda completa con servicio óptimo, *ACSB* indica que se negocia sobre una agenda completa en la que existen básicos (pero no óptimos), *AI* indica que la agenda es incompleta, los acrónimos de la columna *tipo servicio* identifican el servicio sobre el que se está negociando: *+óptimos* indica que hay varios óptimos en la agenda y que se negocia sobre uno de ellos, *óptimo* que sólo hay un óptimo en la agenda y que se está negociando sobre él, *+básicos* indica que hay varios básicos en la agenda y que se negocia sobre uno de ellos, *básico* que sólo hay un básico en la agenda y que se está negociando sobre él, *Resto* que indica aquellos servicios que tienen una clasificación menor que el de la fila inmediatamente superior y la columna *previsión* indica la evaluación que el agente cooperador realiza de la previsión del problema.

Escenario 2

En este escenario el problema real producido por el servicio S^p es conocido por los dos agentes. Ahora bien, no existe posibilidad de obtener un acuerdo que termine con éxito completo, es decir que alcance $Q(S^p)$.

Esta situación, negociación imperativa, puede producirse por dos motivos: 1) porque la agenda inicial no sea optimista; y 2) porque no se haya llegado a un acuerdo sobre alguno de los servicios óptimos o básicos y la clasificación de la agenda se haya modificado.

- **Agenda óptima con, al menos, un servicio óptimo.**

Esta situación no se puede producir, ya que si nos encontramos en el escenario 2, la negociación no puede alcanzar $Q(S^p)$ lo que contradice la definición de agenda óptima.

- **Agenda óptima sin servicio óptimo pero con, al menos, un servicio básico.**

Al igual que en la situación anterior, en el escenario 2 no puede existir una agenda óptima.

- **Agenda Incompleta.**

En la agenda incompleta sólo existen servicios normales, luego la prioridad sobre la negociación de uno u otro servicio no puede ser determinada exclusivamente por las tácticas temporales.

Por lo tanto, el agente *manager* aplica una táctica *Boulware*, ya que de esta forma da opción a poder alcanzar acuerdos que suavicen los problemas producidos por S^p intentando evitar la situación de conflicto.

Sin embargo, el agente *cooperador* debe evaluar la previsión de la evolución del problema facilitada por el agente *manager*. Si la previsión es correcta (es decir, el incidente tiene, en el peor de los casos, la evolución prevista por el agente *manager*) el agente *cooperador* aplica una táctica *Boulware*. Por el contrario, si la previsión es incorrecta (es decir, la evolución del incidente supone más problemas de los inicialmente previstos) el agente *cooperador* aplica una táctica *Conceder*. Esta concesión permite al agente *cooperador* intentar acelerar el acuerdo sobre alguno de los servicios normales, que si bien no solucionan completamente el problema si puede reducir los efectos que este produce.

La tabla 5.5 resume las tácticas que cada agente desarrollará para el escenario 2 en función de su rol, la agenda y del tipo de servicio sobre el que se esté negociando.

Escenario 3

El agente *cooperador* es el único que puede encontrarse en esta situación, ya que no conoce, por si mismo, las repercusiones del problema (por lo tanto tampoco podrá realizar una evaluación de la previsión del mismo). Además, como el escenario de negociación es optimista, el agente intentará retrasar los acuerdos, en la medida de lo posible, puesto que los problemas detectados por el agente *manager* no son todavía detectados por el agente *cooperador*.

- **Agenda óptima con, al menos, un servicio óptimo.**

Tácticas temporales de negociación						
Escenario		Agenda	Tipo Servicio	Previsión	Tácticas	
Manager	Cooperador				Manager	Cooperador
E2	E2	ACSO	Imposible			
E2	E2	ACSB	Imposible			
E2	E2	AI	Normales	Inadecuada	B	B
				Adecuada	B	C

Tabla 5.5: Tácticas temporales óptimas para cada agente donde los acrónimos de la columna *Agenda* identifican los tipos posibles de agenda y significan: *ACSO* indica que negociamos sobre una agenda completa con servicio óptimo, *ACSB* indica que se negocia sobre una agenda completa en la que existen básicos (pero no óptimos), *AI* indica que la agenda es incompleta, la columna *tipo servicio* identifica el servicio sobre el que se está negociando y la columna *previsión* indica la evaluación que el agente cooperador realiza de la previsión del problema.

- *Se negocia sobre uno de los óptimos, pero hay más óptimos.* En esta situación, el agente cooperador sabe que éste no es el único servicio con el que pueden alcanzar $Q(S^p)$. Por lo tanto, la determinación de la prioridad de los servicios óptimos para el agente no puede ser determinada únicamente por las tácticas temporales. En esta situación, si los agentes aplicasen una táctica *Conceder* estarían perdiendo utilidad ya que se podría alcanzar un acuerdo sobre uno de los servicios óptimos sin conocer el comportamiento de las ofertas del resto de servicios óptimos. Así pues, los agentes aplican una táctica *Lineal*, que permite intentar alcanzar un acuerdo rápido sobre un servicio óptimo y, a la vez, observar el comportamiento temporal de las ofertas sobre el resto de servicios óptimos.
- *Se negocia sobre el único óptimo que existe.* El servicio sobre el que se negocia es el único que permite alcanzar $Q(S^p)$, por lo que aplica una táctica *Lineal*. Al existir un único servicio óptimo, el agente debe alcanzar el acuerdo sobre él lo antes posible. Ahora bien, como el agente no conoce la veracidad de las repercusiones reales del problema producido por S^p no negocia concediendo, sino que negocia linealmente.
- *Se negocia sobre el resto de servicios.* El acuerdo sobre el resto de servicios de la agenda no es relevante, ya que existen servicios óptimos en la agenda, luego aplica una táctica *Boulware*. Esta táctica permite intentar retrasar el acuerdo sobre los servicios normales para poder alcanzar antes un acuerdo sobre los óptimos. Si esto no fuera así y se alcanzara el acuerdo sobre un servicio normal, antes que el acuerdo sobre un óptimo, se estarían malgastando recursos, ya que se implementarían dos servicios, y con uno de ellos, el óptimo, bastaría para finalizar el protocolo con un

éxito completo.

▪ **Agenda óptima sin servicio óptimo, pero con, al menos, un servicio básico.**

- *Se negocia sobre uno de los básicos, pero hay más básicos.* En esta situación, el agente sabe que hay varios servicios básicos que permiten alcanzar $Q(S^p)$. Por lo tanto, la determinación de la prioridad de los servicios básicos para el agente no puede ser determinada únicamente por las tácticas temporales. Si los agentes aplicasen una táctica *Conceder* estarían perdiendo utilidad ya que se podría alcanzar un acuerdo sobre uno de los servicios básicos sin conocer el comportamiento del resto de las ofertas de los otros servicios básicos existentes en la agenda. Así pues, los agentes aplican una táctica *Lineal* que permite alcanzar un acuerdo rápido y, a la vez, observar el comportamiento temporal de las ofertas sobre el resto de servicios básicos.
- *Se negocia sobre el único básico que existe.* El servicio sobre el que se negocia es el único que permitirá alcanzar $Q(S^p)$. Por lo tanto, el agente aplica una táctica *Lineal*. Al existir un único servicio básico, el agente debe alcanzar el acuerdo sobre él lo antes posible. Ahora bien, como el agente no conoce la veracidad de las repercusiones reales del problema producido por S^p no negocia concediendo, sino que negocia linealmente.
- *Se negocia sobre el resto de servicios.* El acuerdo sobre el resto de servicios de la agenda no es relevante, ya que existen servicios básicos en la agenda, luego aplica una táctica *Boulware*. Esta táctica permite intentar retrasar el acuerdo sobre los servicios normales para poder alcanzar antes un acuerdo sobre los básicos. Si esto no fuera así, se podrían implementar más servicios de los necesarios, con el consiguiente malgasto de recursos.

▪ **Agenda Incompleta.**

Esta situación no se puede producir, ya que si nos encontramos en el escenario 3, la negociación puede alcanzar $Q(S^p)$, lo que contradice la definición de agenda incompleta.

La tabla 5.6 resume las tácticas que el agente manager desarrollará si se encuentra en el escenario 1 y el cooperador si se encuentra en el escenario 3, teniendo en cuenta además, la agenda y el tipo de servicio sobre el que se esté negociando.

Tácticas temporales de negociación					
Escenario		Agenda	Tipo Servicio	Tácticas	
Manager	Cooperador			Manager	Cooperador
E1	E3	ACSO	+Óptimos	L	L
E1	E3	ACSO	Un óptimo	C	L
E1	E3	ACSO	Resto	B	B
E1	E3	ACSB	+Básicos	L	L
E1	E3	ACSB	Un básico	C	L
E1	E3	ACSB	Resto	B	B
E1	E3	AI	Imposible		

Tabla 5.6: Tácticas temporales óptimas para cada agente donde los acrónimos de la columna *Agenda* identifican los tipos posibles de agenda y significan: *ACSO* indica que negociamos sobre una agenda completa con servicio óptimo, *ACSB* indica que se negocia sobre una agenda completa en la que existen básicos (pero no óptimos), *AI* indica que la agenda es incompleta y los acrónimos de la columna *tipo servicio* identifican el servicio sobre el que se está negociando: *+óptimos* indica que hay varios óptimos en la agenda y que se negocia sobre uno de ellos, *óptimo* que sólo hay un óptimo en la agenda y que se está negociando sobre él, *+básicos* indica que hay varios básicos en la agenda y que se negocia sobre uno de ellos, *básico* que sólo hay un básico en la agenda y que se está negociando sobre él, *Resto* que indica aquellos servicios que tienen una clasificación menor que el de la fila inmediatamente superior

Escenario 4

El agente cooperador es el único que puede encontrarse en esta situación ya que no conoce, por si mismo, las repercusiones del problema producido por S^p (por lo tanto tampoco podrá realizar una evaluación de la previsión del mismo). Además, el escenario de negociación es imperativo, es decir, no se puede alcanzar $Q(S^p)$.

- **Agenda óptima con, al menos, un servicio óptimo.**

Esta situación no se puede producir, ya que si nos encontramos en el escenario 4, la negociación no puede alcanzar $Q(S^p)$ lo que contradice la definición de agenda óptima.

- **Agenda óptima sin servicio óptimo pero con, al menos, un servicio básico.**

Al igual que en la situación anterior, en el escenario 4 no puede existir una agenda óptima.

- **Agenda Incompleta.**

En la agenda incompleta sólo existen servicios normales, luego la prioridad sobre la negociación de uno u otro servicio no puede ser determinada exclusivamente por las tácticas temporales. Por lo tanto, ambos agentes aplican una táctica *Boulware* ya que, de esta forma, los agentes dan opción a poder alcanzar acuerdos que suavicen los problemas producidos por S^p intentando evitar la situación de conflicto.

La tabla 5.7 resume las tácticas que el agente manager desarrollará si se encuentra en el escenario 2 y el cooperador si se encuentra en el escenario 4, teniendo en cuenta además, la agenda y el servicio sobre el que se esté negociando.

Tácticas temporales de negociación					
Escenario		Agenda	Tipo Servicio	Tácticas	
Manager	Cooperador			Manager	Cooperador
E2	E4	ACSO		Imposible	
E2	E4	ACSB		Imposible	
E2	E4	AI	Normales	B	B

Tabla 5.7: Tácticas temporales óptimas para cada agente donde los acrónimos de la columna *Agenda* identifican los tipos posibles de agenda y significan: *ACSO* indica que negociamos sobre una agenda completa con servicio óptimo, *ACSB* indica que se negocia sobre una agenda completa en la que existen básicos (pero no óptimos), *AI* indica que la agenda es incompleta y la columna *tipo servicio* identifica el servicio sobre el que se está negociando.

5.4.5. Tres Ejemplos del Comportamiento del Protocolo Propuesto

Para ilustrar el comportamiento de las tácticas temporales propuestas en el protocolo se exponen a continuación tres ejemplos que abarcan las situaciones más interesantes que se pueden presentar.

Ejemplo 1: Agenda con un servicio básico y dos servicios normales

Supongamos el siguiente entorno de negociación:

- Existe un servicio problemático S^p con $Q(S^p)=100$.

- La agenda está compuesta por tres servicios S^1 , S^2 y S^3 , donde $Q(S^1) = 40$, $Q(S^2) = 80$ y $Q(S^3) = 30$.
- El servicio S^1 , cuyo tiempo máximo de negociación es $T_{negociacion}^1$, se compone de un sólo recurso, r^1 , que es gestionado por el agente cooperador.
- El servicio S^2 , cuyo tiempo máximo de negociación es $T_{negociacion}^2$, se compone de dos recursos: r^2 que es gestionado por el agente manager y r^3 que es gestionado por el agente cooperador.
- El servicio S^3 , cuyo tiempo máximo de negociación es $T_{negociacion}^3$, se compone de dos recursos: r^4 que es gestionado por el agente manager y r^5 que es gestionado por el agente cooperador.

Al iniciar la negociación los agentes clasifican la agenda y los servicios de la agenda, esto es: la agenda es completa sin servicio óptimo, los servicios S^1 y S^3 son servicios normales y el servicio S^2 es un servicio básico. Inicialmente, el agente *manager* está en un escenario E1, de cooperación *conocida* y *optimista*, mientras que el agente *cooperador* está en un escenario E3, de cooperación *ciega* y *optimista*.

En el instante inicial de la negociación, $t = 0$, el agente manager aplica para cada recurso una táctica, dependiendo de la clasificación del servicio al que pertenezca el recurso. Así pues, siguiendo las tácticas presentadas en la tabla 5.6, para los recursos r^1 , r^4 y r^5 aplica una táctica *Boulware*, y para r^2 y r^3 una táctica *Conceder*. En cambio, el agente cooperador aplica para los recursos r^1 , r^4 y r^5 una táctica *Boulware* y para r^2 y r^3 una táctica *lineal*, según la tabla 5.6. Los resultados de aplicar estas tácticas se muestran en la figura 5.8.

Ahora bien, estas tácticas no se mantienen durante todo el proceso. Cuando se alcanza el instante de tiempo $T_{frontera}$ sólo se ha alcanzado el acuerdo sobre el recurso r^3 . A partir de $T_{frontera}$, el agente *cooperador* modifica su escenario, que pasa de E3 a E1, ya que la cooperación pasa a ser *conocida*. En esta situación, el agente manager mantiene sus tácticas sobre los recursos pero el cooperador las modifica, según la tabla 6.2, quedando de la siguiente forma: mantiene la táctica *Boulware* para r^1 , r^4 y r^5 pero cambia a *Conceder* la táctica del recurso r^2 . En la figura 5.9 se muestra la evolución del protocolo de negociación a partir de $T_{frontera}$. Estas tácticas se mantienen hasta el siguiente evento de negociación, que se produce en el punto c de la figura 5.9, debido al acuerdo sobre r^2 .

En esta situación se puede implementar el servicio S^2 (que además se borra de la agenda), con los usos acordados para los servicios r^2 y r^3 , pero la negociación continúa porque $Q(S^2) > Q(S^1)$. Para ello, los agentes clasifican de nuevo los servicios que quedan por negociar, en este caso tanto S^1 como S^3 pasan a ser básicos (ya

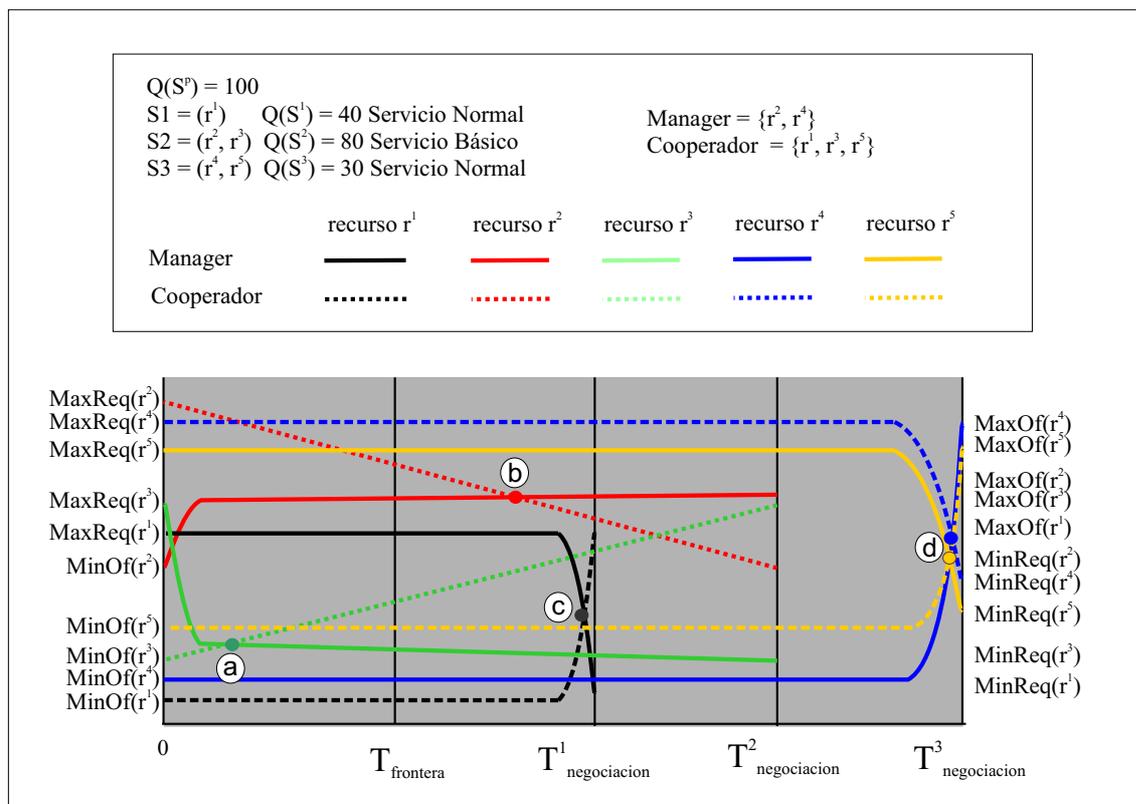


Figura 5.8: Tácticas de negociación iniciales del ejemplo 1. En la figura se observa que la negociación sobre los recursos del servicio S^i nunca supera $T^i_{negociacion}$. En el punto *a* se alcanza un acuerdo sobre el recurso r^3 (que pertenece a S^2). En el punto *b* se alcanzaría un acuerdo sobre r^2 (S^2) luego el servicio S^2 se comenzaría a desarrollar en este instante de tiempo. La negociación continuaría ya que $Q(S^p) > Q(S^2)$. En el punto *c* se alcanzaría un acuerdo sobre el recurso r^1 y por tanto, sobre el servicio S^1 , que finalizaría la negociación ya que con la implementación de S^1 y S^2 se alcanzaría $Q(S^p)$. El punto *d* indica el instante temporal en el que se acordarían los recursos r^4 y r^5 de no haberse alcanzado previamente $Q(S^p)$.

que actualmente tenemos acordado un servicio, S^2 , con una $Q(S^2) = 80$, luego para alcanzar $Q(S^p) = 100$, el servicio S^1 , con $Q(S^1) = 40$, es básico y el servicio S^3 , con $Q(S^3) = 30$, también).

Al pasar S^1 y S^3 a ser servicios básicos, ambos agentes modifican sus tácticas de negociación pasando a aplicar los dos una táctica *Lineal* (ver tabla 6.2). Utilizando estas tácticas se llega al punto *d* de la figura 5.9 en el que se produce el acuerdo sobre el servicio S^1 . Como se ha alcanzado $Q(S^p)$ el protocolo finaliza con *éxito completo*.

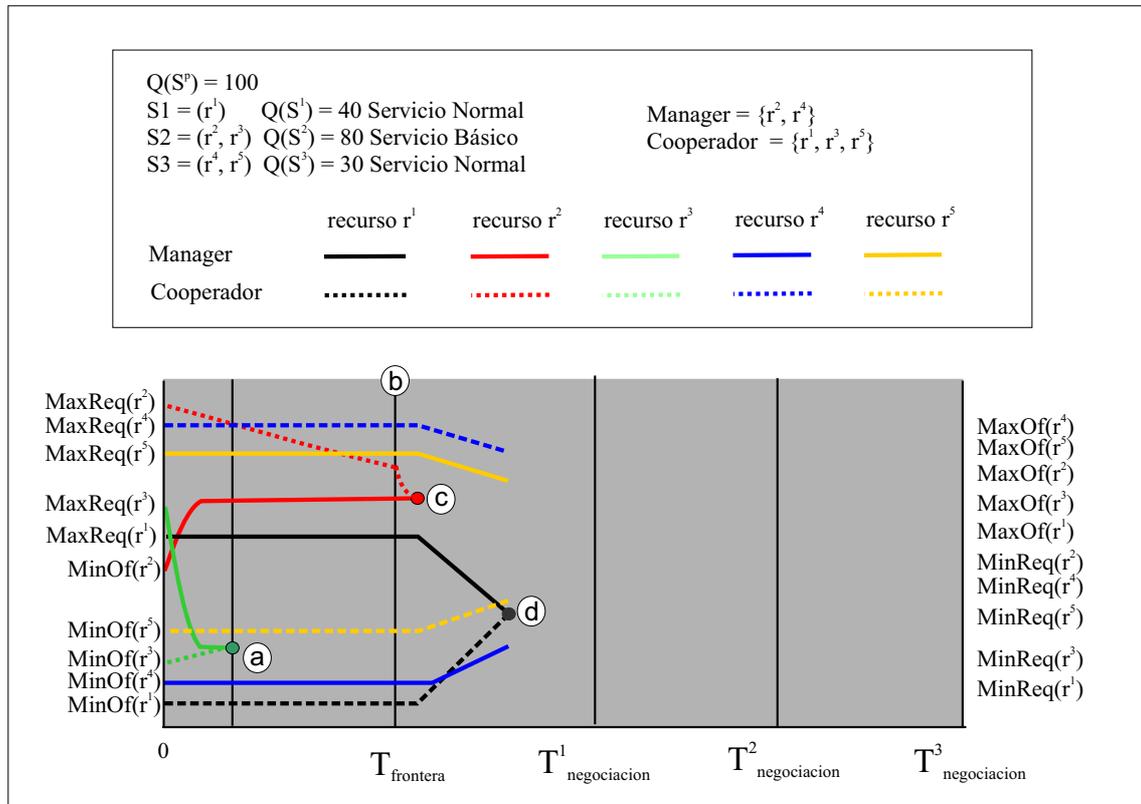


Figura 5.9: Evolución de las tácticas de negociación del ejemplo 1. El punto a muestra el instante en el que se ha acordado el recurso r^3 . El punto b indica el momento en el que se pasa $T_{frontera}$. El punto c muestra el instante en el que se acuerda el recurso r^2 y, por tanto, el servicio S^2 está acordado y pasa a implementarse. Como consecuencia se reordenan los tipos de los servicios restantes y se produce un cambio de tácticas, que provoca el acuerdo del recurso r^1 en el punto d y, por lo tanto, del servicio S^1 . En este instante el protocolo finaliza su ejecución con éxito completo al poder suministrar nuevos servicios que superan $Q(S^p)$.

Ejemplo 2: Agenda con un servicio óptimo y un servicio normal

Supongamos el siguiente entorno de negociación:

- Existe un servicio problemático S^p con $Q(S^p)=100$.
- La agenda está compuesta por dos servicios S^1 y S^2 , donde $Q(S^1) = 30$ y $Q(S^2) = 100$.
- El servicio S^1 , cuyo tiempo máximo de negociación es $T^1_{negociacion}$, se compone de un sólo recurso, r^1 , que es gestionado por el agente cooperador.
- El servicio S^2 , cuyo tiempo máximo de negociación es $T^2_{negociacion}$ se compone de

dos recursos, r^2 que es gestionado por el agente manager y r^3 que es gestionado por el agente cooperador.

- El intervalo de negociación para el uso del recurso r^3 es disjuncto. Esto es, no se puede alcanzar un acuerdo sobre él.

Al iniciar la negociación, los agentes clasifican la agenda y los servicios que hay en ella, esto es: la agenda es completa con servicio óptimo, el servicio S^1 es un servicio normal y el servicio S^2 es un servicio óptimo. Inicialmente el agente *manager* está en un escenario $E1$, de cooperación *conocida* y *optimista*, mientras que el agente *cooperador* está en un escenario $E3$, de cooperación *ciega* y *optimista*.

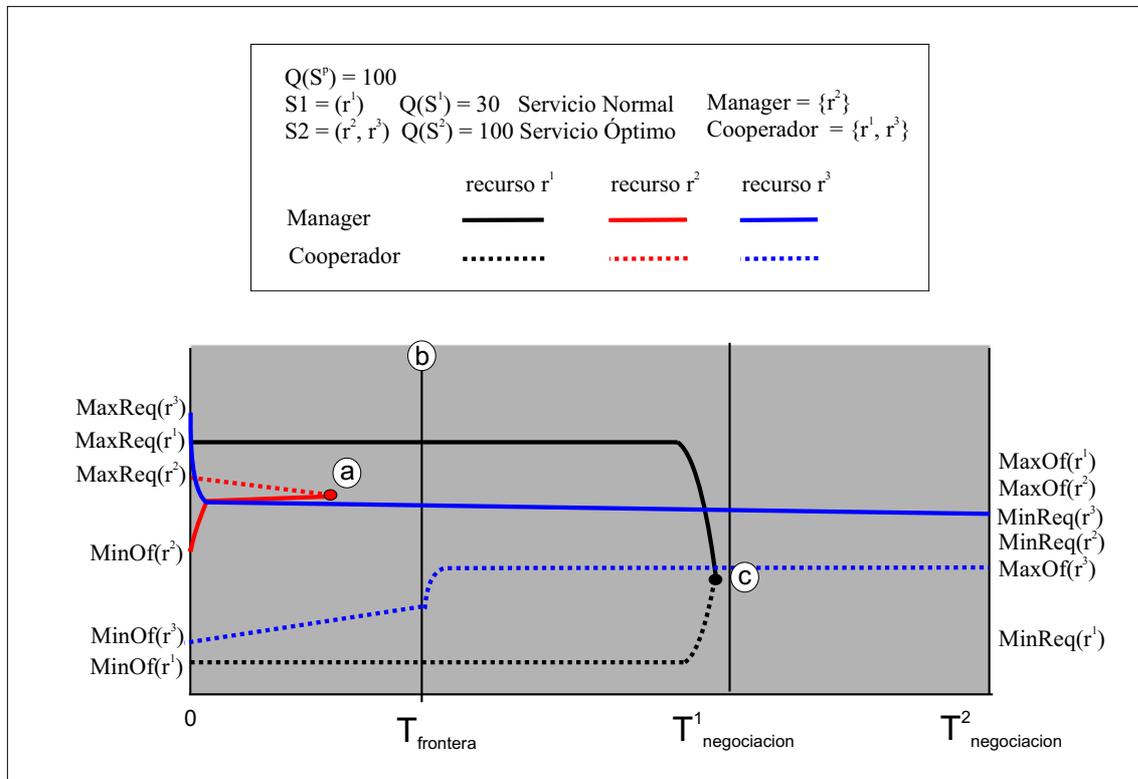


Figura 5.10: Evolución de las tácticas de negociación iniciales del ejemplo 2. El punto *a* muestra el instante en el que se ha acordado el recurso r^2 . El punto *b* indica el momento en el que se pasa $T_{frontera}$. En este instante el agente cooperador para de un escenario E^3 a un E^1 y modifica sus tácticas. El punto *c* muestra el instante en el que se acuerda el recurso r^1 y por tanto, el servicio S^1 está acordado y pasa a implementarse. La negociación continúa ya que no se ha alcanzado $Q(S^p)$. Al alcanzar el instante $T^2_{negociacion}$ el protocolo finaliza su ejecución sin alcanzar un acuerdo sobre S^2 por lo que finaliza con un éxito parcial.

En el instante inicial de la negociación, $t = 0$, el agente manager aplica (siguiendo las tácticas presentadas en la tabla 5.6) las siguientes tácticas: para r^1 aplica

una táctica *Boulware* y para r^2 y r^3 una táctica *Conceder*. En cambio, el agente cooperador aplica para el recurso r^1 una táctica *Boulware* y para r^2 y r^3 una táctica *Lineal*, según la tabla 5.6. Los resultados de aplicar estas tácticas se observan en la figura 5.10. En el punto *a* de la figura, los agentes llegan a un acuerdo sobre el recurso r^2 , pero esto no produce ningún evento de negociación, ya que es un acuerdo sobre un recurso, no sobre un servicio. Así pues, los agentes siguen negociando hasta que se alcanza $T_{frontera}$ (punto *b*). En este instante el agente cooperador pasa a un escenario E1 donde la cooperación es conocida, por lo que modifica su táctica sobre los recursos que pertenecen al servicio óptimo, esto es, el recurso r^3 , que pasa a ser una táctica *Conceder*.

Las tácticas se mantienen hasta que se produce el siguiente evento de negociación, en el punto *c*, debido al acuerdo sobre el recurso r^1 . Esto implica que S^1 se puede desarrollar y se elimina de la agenda. Este evento no modifica la táctica sobre r^3 . La negociación sobre el servicio S^2 continúa, hasta que se alcanza $T_{desarrollo}^2$, sin lograr un acuerdo sobre r^3 , lo que implica que tampoco se ha alcanzado un acuerdo sobre el servicio óptimo S^2 . Esto implica que el protocolo finaliza con un éxito parcial.

Ejemplo 3: Agenda con varios servicios óptimos

En este ejemplo se tiene el siguiente entorno de negociación:

- Existe un servicio problemático S^p donde $Q(S^p)=100$.
- La agenda está compuesta por dos servicios S^1 y S^2 , donde $Q(S^1) = Q(S^2) = 100$.
- El servicio S^1 , cuyo tiempo máximo de negociación es $T_{negociacion}^1$, se compone de un sólo recurso, r^1 , que es gestionado por el agente cooperador.
- El servicio S^2 , cuyo tiempo máximo de negociación es $T_{negociacion}^2$, se compone de dos recursos: r^2 que es gestionado por el agente manager y r^3 que es gestionado por el agente cooperador.

Al iniciar la negociación, los agentes clasifican la agenda y los servicios de la agenda, esto es: la agenda es completa con servicio óptimo, y ambos servicios, S^1 y S^2 son óptimos. El agente *manager* está en un escenario E1, de cooperación *conocida* y *optimista*, mientras que el agente *cooperador* está en un escenario E3, de cooperación *ciega* y *optimista*.

En el instante inicial de la negociación, $t = 0$, el agente manager aplica, (siguiendo las tácticas presentadas en la tabla 5.6) para los tres recursos (r^1 , r^2 y r^3) una táctica

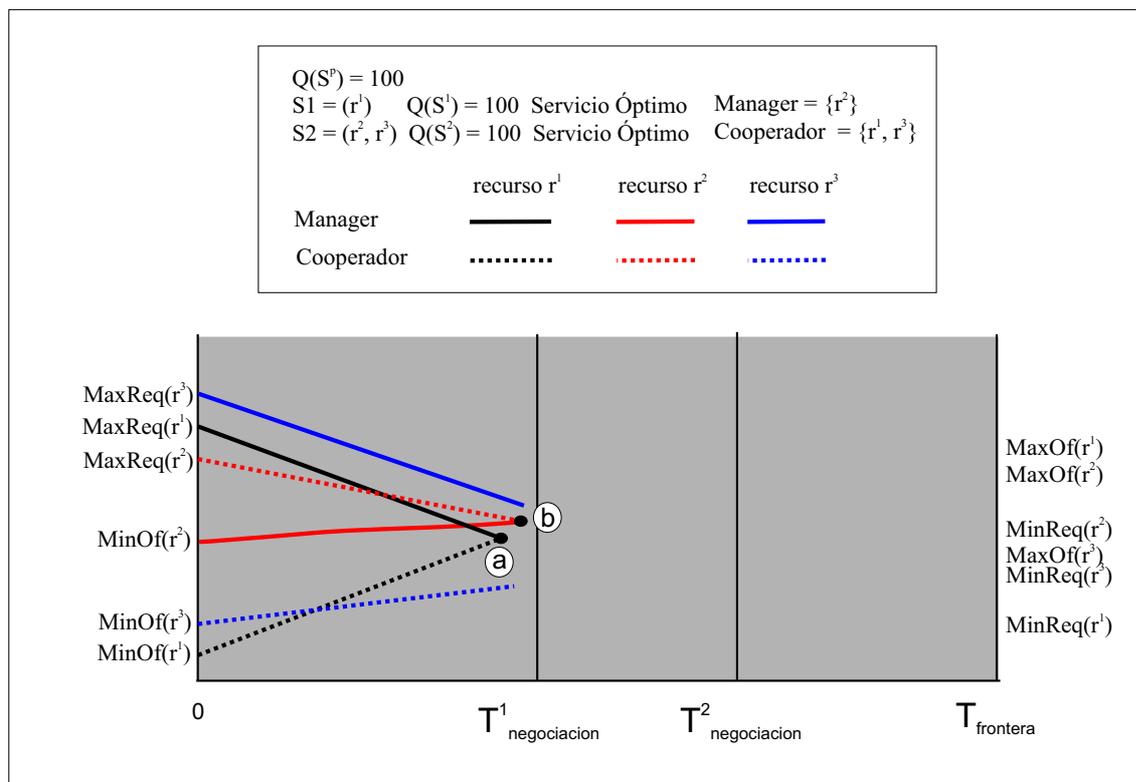


Figura 5.11: Evolución de las tácticas de negociación del ejemplo 3.

Lineal. El agente cooperador aplica (siguiendo también las tácticas presentadas en la tabla 5.6) la misma táctica: *Lineal*.

Los resultados de aplicar estas tácticas se observan en la figura 5.11. En el punto *a* de la figura, los agentes llegan a un acuerdo sobre el recurso r^1 , lo que implica que el servicio S^1 ha sido acordado. Como este servicio es óptimo, el protocolo finaliza con éxito completo.

5.5. Estrategias de Negociación

Las estrategias de negociación definen la secuencia de acciones que el agente va a desarrollar durante la ejecución del protocolo de negociación. Para ello, es necesario conocer los escenarios de negociación en el que nos encontramos ya que éstos determinan la táctica para generar las ofertas.

Una estrategia de un agente *a* para un recurso *r* se define como una cuadrupla

$Est^a(r) = [Valor_{ini}(r), Valor_{fin}(r), t, tact]$ donde $Valor_{ini}(r)$ define el valor de uso que ofertará el agente a en el instante que se inicia la estrategia, $Valor_{fin}(r)$ el valor de uso tope que ofertará el agente a en el instante final de la negociación, identificado como t , y $tact$ que define la táctica empleada en la generación de ofertas y contraofertas para ir desde $Valor_{ini}(r)$ hasta $Valor_{fin}(r)$.

El instante final de la estrategia, t , puede corresponderse con dos valores distintos:

1. $T_{negociacion}^i$ del servicio S^i al que pertenece el recurso r
2. $T_{frontera}$ si el agente que desarrolla la estrategia es el agente cooperador y se cumple que $T_{frontera} < T_{negociacion}^i$ y el instante actual de la negociación todavía no ha superado $T_{frontera}$. Esta situación se produce porque en el instante de tiempo en el que la negociación alcanza $T_{frontera}$, el agente cooperador modifica su escenario actual, que cambia de una negociación ciega a una negociación conocida, lo que implica que modificará sus tácticas de negociación.

5.5.1. Estrategias Óptimas con Información Incompleta

Una estrategia óptima para un agente es aquella que permite alcanzar un acuerdo en la negociación de un servicio maximizando el beneficio que el agente puede obtener. Para ello, la estrategia indica cómo y cuándo utilizar cada posible valor de uso de los recursos en cada oferta y contraoferta.

Estrategias óptimas por recurso

Con el fin de determinar cuáles son las estrategias óptimas por recurso, se va a realizar un análisis de la situación ejemplo para posteriormente proceder a su generalización.

El resultado de la negociación de un recurso $r \in S^i$, gestionado por el agente a , depende de las estrategias que desarrollen ambos agentes. Como los dos agentes tienen un mismo tiempo límite, $T_{negociacion}^i$, para la negociación del recurso, ambos saben que el agente opuesto ofrecerá su valor tope de uso en ese instante (el agente a ofrecerá $MaxOf(r)$ y el agente \hat{a} ofrecerá $MinReq(r)$). Ahora bien, como el entorno de negociación es un entorno con información incompleta, ninguno de los agentes conoce el valor tope del oponente. No obstante, el agente a tiene unas creencias, expresadas mediante probabilidades, acerca de cuál puede ser el valor tope que el agente \hat{a} estima que tiene el agente a . Además, una de estas creencias debe coincidir

con el valor tope real del agente a . La misma situación ocurre con las creencias del agente \hat{a} .

Supongamos que el agente a , tiene la siguiente lista de creencias:

$$Posibles^{\hat{a}}(r) = \{(MaxOf_1(r), \alpha_1), (MaxOf_2(r), \alpha_2), (MaxOf_3(r), \alpha_3)\}^4$$

Recíprocamente, supongamos también que el agente \hat{a} , tiene la siguiente lista de creencias:

$$Posibles^a(r) = \{(MinReq_1(r), \beta_1), (MinReq_2(r), \beta_2), (MinReq_3(r), \beta_3)\}^5$$

En la figura 5.12, se muestra un ejemplo del conjunto de posibles estrategias temporales que ambos agentes podrían realizar al aplicar las tácticas lineales para la generación de ofertas. En la figura se observa que existen dos estrategias, una para cada agente, que son imposibles de realizar, ya que los valores de uso de las creencias quedan fuera de los valores tope que los agentes pueden ofertar. Por lo tanto, como primera medida, se eliminan del conjunto de estrategias aquellas estrategias imposibles de realizar.

Así pues, las estrategias que cada uno de los agentes pueden aplicar son:

$$\begin{aligned} \blacksquare a \left\{ \begin{array}{l} Est_2^a(r) = [MinOf(r), MaxOf_2^{\hat{a}}(r), t, tact] \\ Est_3^a(r) = [MinOf(r), MaxOf_3^{\hat{a}}(r), t, tact] \end{array} \right. \\ \blacksquare \hat{a} \left\{ \begin{array}{l} Est_2^{\hat{a}}(r) = [MaxReq(r), MinReq_2^a(r), t, tact] \\ Est_3^{\hat{a}}(r) = [MaxReq(r), MinReq_3^a(r), t, tact] \end{array} \right. \end{aligned}$$

donde t define el tiempo máximo de aplicación de la estrategia actual y $tact$ define la táctica empleada. Recordemos que la táctica final empleada sobre un recurso es $ROffer_a^{t,i}(r)$, la combinación lineal de la táctica de las estrategias óptimas temporales y la táctica basada en la importancia de los servicios para los agentes.

Definimos $U_a^{esp}(Est_i^a(r))$ como la utilidad que un agente a espera recibir si aplica la estrategia $Est_i^a(r)$. Así pues, si el agente a aplica la estrategia $Est_2^a(r)$ obtendrá una utilidad $U_a(MaxOf_2^{\hat{a}}(r))$. Se observa que el agente a , al ofrecer su valor tope real asegura el acuerdo, en $T_{negociacion}^i$ (siempre y cuando el área de acuerdo sea no nula) a costa de ganar la mínima utilidad posible.

$$U_a^{esp}(Est_2^a(r)) = U_a(MaxOf_2^{\hat{a}}(r))$$

⁴Por ejemplo, el agente a cree que el agente \hat{a} espera que a ofrezca el valor $MaxOf_1(r)$ con probabilidad α_1 , al menos en el instante $T_{negociacion}^i$.

⁵Por ejemplo, el agente \hat{a} cree que el agente a espera que \hat{a} solicite el valor $MinReq_1(r)$ con probabilidad β_1 , al menos en el instante $T_{negociacion}^i$.

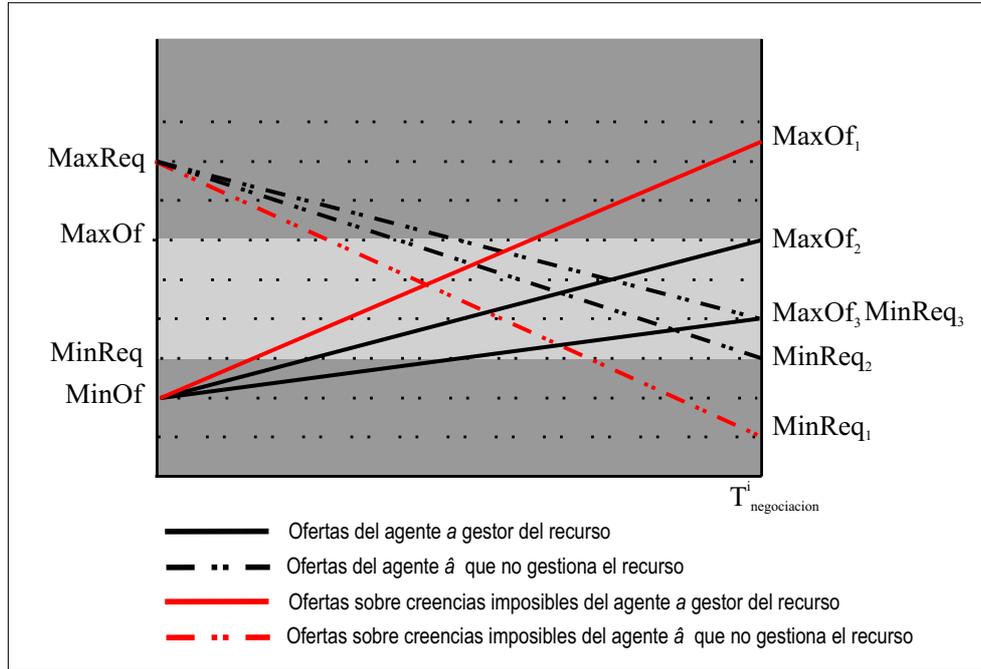


Figura 5.12: Conjunto de posibles estrategias sobre un recurso. Las creencias $MaxOf_1$ y $MinReq_1$ quedan fuera de los valores tope de los agentes a y \hat{a} , por lo tanto, se eliminan las estrategias (en rojo) que tengan como valores tope estos valores.

En cambio, si aplica la estrategia $Est_3^a(r)$ en vez de la estrategia $Est_2^a(r)$ el agente a puede conseguir una mayor utilidad, pero a costa de poder alcanzar un opt porque la estrategia correcta fuera $Est_2^a(r)$. Es decir, el agente a tiene una probabilidad $(1 - \alpha_3)$ de equivocarse al haber seleccionado la estrategia $Est_3^a(r)$ y una probabilidad α_3 de acertar con $Est_3^a(r)$.

$$U_a^{esp}(Est_3^a(r)) = (1 - \alpha_3) * U(opt) + \alpha_3 * U_a(MaxOf_3^{\hat{a}}(r))$$

Análogamente, calculamos las utilidades esperadas del agente \hat{a} : si el agente \hat{a} aplica la $Est_2^{\hat{a}}(r)$ obtendrá una utilidad $U_{\hat{a}}(MinReq_2^a(r))$. En cambio, si el agente \hat{a} selecciona la estrategia $Est_3^{\hat{a}}(r)$ tiene una probabilidad $(1 - \beta_3)$ de equivocarse y una probabilidad β_3 de acertar.

$$\begin{aligned} U_{\hat{a}}^{esp}(Est_2^{\hat{a}}(r)) &= U_{\hat{a}}(MinReq_2^a(r)) \\ U_{\hat{a}}^{esp}(Est_3^{\hat{a}}(r)) &= (1 - \beta_3) * U_{\hat{a}}(opt) + \beta_3 * U_{\hat{a}}(MinReq_3^a(r)) \end{aligned}$$

Generalizando este análisis, si el conjunto de creencias del agente a es:

$$Posibles^{\hat{a}}(r) = \{(MaxOf_1(r), \alpha_1), \dots, (MaxOf_n(r), \alpha_n)\}$$

entonces la utilidad esperada para el agente a de la $Est_i^a(r)$, con $i \geq j$ siendo j la posición en el vector de creencias del valor tope real, es:

$$U_a^{esp}(Est_i^a(r)) = \begin{cases} U_a(MaxOf_i^{\hat{a}}(r)) & Si \quad i = j \\ 1 - (\alpha_i + \alpha_{i+1} + \dots + \alpha_n) * U_a(opt) + \\ + (\alpha_i + \alpha_{i+1} + \dots + \alpha_n) * \\ * U_a(MaxOf_i^{\hat{a}}(r)) & Si \quad i > j \end{cases}$$

Análogamente, si el conjunto de creencias del agente \hat{a} es:

$$Posibles^a(r) = \{(MinReq_1(r), \beta_1), \dots, (MinReq_m(r), \beta_m)\}$$

entonces la utilidad esperada para el agente \hat{a} de la $Est_l^{\hat{a}}(r)$, con $l \geq k$ siendo k la posición en el vector de creencias del valor tope real, es:

$$U_{\hat{a}}^{esp}(Est_l^{\hat{a}}(r)) = \begin{cases} U_a(MinReq_f^{\hat{a}}(r)) & Si \quad l = k \\ 1 - (\beta_l + \beta_{l+1} + \dots + \beta_m) * U_a(opt) + \\ + (\beta_l + \beta_{l+1} + \dots + \beta_m) * \\ * U_a(MinReq_f^{\hat{a}}(r)) & Si \quad l > k \end{cases}$$

Las estrategias óptimas para el recurso r , $Est_o^a(r)$ y $Est_o^{\hat{a}}(r)$, son las estrategias que proporcionan la máxima utilidad esperada:

$$\begin{aligned} Est_o^a(r) &= \max(Est_j^a(r), Est_{j+1}^a(r), \dots, Est_n^a(r)) \\ Est_o^{\hat{a}}(r) &= \max(Est_l^{\hat{a}}(r), Est_{l+1}^{\hat{a}}(r), \dots, Est_m^{\hat{a}}(r)) \end{aligned}$$

Estrategias óptimas por servicio

La estrategia óptima de un agente a para un servicio S^i definida como $Est_o^a(S^i)$ es aquella que utiliza las estrategias óptimas para todos los recursos que componen S^i :

$$Est_o^a(S^i) = (Est_o^a(r^1), \dots, Est_o^a(r^n)) \quad \forall r^k \in S^i$$

La utilidad esperada de la estrategia óptima $Est_o^a(S^i)$ se define como:

$$U_a^{esp}(Est_o^a(S^i)) = \sum_{k=1}^n U(Est_o^a(r^k)) \quad \forall r^k \in S^i \quad (5.8)$$

La utilidad esperada de la estrategia óptima de un servicio S^i modifica la función que determina la siguiente acción a realizar por el agente a al recibir una oferta $Oferta_{\hat{a} \rightarrow a}^t$. En esta situación, un agente a acepta la oferta $Oferta_{\hat{a} \rightarrow a}^t(S^i)$ si la

utilidad de la oferta recibida es mayor que la utilidad esperada de la oferta a realizar en $t + 1$. De esta forma la función que determina la siguiente acción a realizar, $Acc(S^i, t)$, queda definida de la siguiente manera:

1. Abandonar la negociación (*Opt out*). Esta situación se puede producir por dos motivos. El primer motivo es que el instante de tiempo t supere el tiempo máximo de la negociación, T_{max} y no se haya acordado la implementación de ningún servicio. El segundo motivo por el que un agente pueda abandonar la negociación puede deberse a causas externas al protocolo (como por ejemplo, la aparición de recursos inhábiles, prioridades de uso de recursos para otros servicios, etc).
2. Abandonar la negociación sobre S^i , (*opt*) y borrarlo de la agenda si $t > T_{negociacion}^i$ y continuar negociando con el resto de servicios que quedan en la agenda. Esto implica que se ha superado el tiempo máximo de negociación sobre el servicio S^i , pero todavía no se ha alcanzado T_{max} . En esta situación, la negociación sobre el servicio S^i no tiene sentido por lo que el agente a asigna un *opt* como resultado final para el servicio S^i en la oferta.
3. Aceptar la oferta del servicio S^i si las utilidades de las ofertas recibidas para cada uno de los recursos de S^i son mayores o iguales que las utilidades esperadas de las ofertas que el agente a va a ofrecer en el siguiente paso ($t + 1$). Como consecuencia, el servicio S^i sobre el que se ha logrado el acuerdo se comienza a desarrollar en este momento y se elimina de la agenda de negociación.
4. Realizar una contraoferta sobre el servicio S^i . Esto es, añadir a la contraoferta una nueva entrada para el servicio S^i , $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(S^i)$. Si alguno de los recursos del servicio S^i ha recibido una oferta cuya utilidad sea superior o igual a la utilidad esperada de la oferta que el agente a va a realizar en la contraoferta entonces el agente a acepta la oferta recibida para ese recurso (y este valor aceptado se mantiene por ambos agentes hasta el final de la negociación sobre el servicio S^i). Para el resto de recursos del servicio S^i , el agente a calcula los nuevos valores que va a ofrecer en la contraoferta.

5.6. Evaluación del Protocolo de Negociación

Uno de los aspectos cruciales en el diseño de protocolos de negociación es realizar una evaluación mediante los criterios que miden la convergencia del protocolo y el equilibrio obtenido en los acuerdos [Fatima04b]. La convergencia del protocolo garantiza que los valores de las ofertas y contraofertas a lo largo de la negociación

tiendan a encontrarse en un instante anterior al final de la negociación. Por otro lado, el equilibrio de negociación en los acuerdos obtenidos garantiza que el mecanismo de negociación sea estable.

5.6.1. Análisis de la Convergencia

Un modelo de negociación converge si, en algún momento a lo largo del proceso de negociación, la utilidad de una oferta recibida por un agente a en el instante t es mayor o igual que la utilidad de la oferta que ese agente va a realizar en el instante $t+1$ [Sierra97].

Supongamos que los agentes, m y c negocian sobre un servicio S^k compuesto por los siguientes recursos $\langle r_m^1, r_m^2, \dots, r_m^t, r_c^1, r_c^2, \dots, r_c^s \rangle$ donde r_a^i representa el recurso i gestionado por el agente a ($a=m$ o $a=c$).

Sea r un recurso gestionado por el agente a . Sea $MaxOf_{\hat{a}}^{topemax}(r)$ como el primer valor de la lista de posibles que da lugar a una estrategia válida⁶. Análogamente, definimos $MinReq_{\hat{a}}^{topemin}(r)$ para el agente \hat{a} como el primer valor de la lista de posibles que da lugar a una estrategia válida⁷.

El análisis de la convergencia para la estrategia óptima por recurso se realiza de la forma siguiente:

caso a: Si la estrategia óptima para el agente a es $Est_o^a(r) = Est_{topemax}^a(r)$ y la estrategia óptima para el agente \hat{a} es $Est_o^{\hat{a}}(r) = Est_{topemin}^{\hat{a}}(r)$ entonces el protocolo tiene garantizada la convergencia (es decir, converge con una probabilidad igual a 1) si el área de acuerdo es no nula⁸, es decir si

$$[MinOf_a(r), MaxOf_{\hat{a}}^{topemax}(r)] \cap [MinReq_{\hat{a}}(r), MaxReq_{\hat{a}}^{topemin}(r)] \neq \emptyset \quad (5.9)$$

caso b: Si la estrategia óptima para el agente a es $Est_o^a(r) = Est_{topemax+1}^a(r)$ y la estrategia óptima para el agente \hat{a} es $Est_o^{\hat{a}}(r) = Est_{topemin}^{\hat{a}}(r)$ entonces el protocolo converge con una probabilidad igual a $(\alpha_{topemax+1} + \alpha_{topemax+2} + \dots + \alpha_n) * 1$. Es decir, la probabilidad de que converja disminuye porque hay una probabilidad $(1 - (\alpha_{topemax+1} + \alpha_{topemax+2} + \dots + \alpha_n))$ de que el valor tope real

⁶Como la lista de creencias, $Posibles^{\hat{a}}(r)$, está ordenada de mayor a menor y uno de esos valores es el que el agente a realmente posee, resulta que $MaxOf_{\hat{a}}^{topemax}(r)$.

⁷Como la lista de creencias, $Posibles^a(r)$, está ordenada de menor a mayor y uno de esos valores es el que el agente \hat{a} realmente posee, resulta que $MinReq(r) = MinReq_{\hat{a}}^{topemin}(r)$.

⁸Esto es debido a que los agentes ofertan sus valores topes al menos en el último instante de negociación para cada recurso r de cada servicio S^i .

que el agente \hat{a} está dispuesto a solicitar sea mayor que $MaxOf^{topemax+1}$. En cambio, el agente a no arriesga ya que va a requerir el valor tope real y, por lo tanto, la probabilidad de llegar a un acuerdo en el valor real es igual a 1.

caso c: Si la estrategia óptima para el agente a es $Est_o^a(r) = Est_{topemax}^a(r)$ y la estrategia óptima para el agente \hat{a} es $Est_o^{\hat{a}}(r) = Est_{topemin+1}^{\hat{a}}(r)$ entonces el protocolo converge con una probabilidad igual a $1 * (\beta_{topemin+1} + \beta_{topemin+2} + \dots + \beta_m)$. Es decir, la probabilidad de que converja disminuye porque hay una probabilidad $(1 - (\beta_{topemin+1} + \beta_{topemin+2} + \dots + \beta_m))$ de que el valor tope real que el agente a esta dispuesto a ofrecer sea menor $MinReq^{topemin+1}(r)$. En cambio, el agente \hat{a} no arriesga ya que va a solicitar el valor tope real y, por lo tanto, la probabilidad de llegar a un acuerdo en el valor real es igual a 1.

caso d: Si la estrategia óptima para el agente a es $Est_o^a(r) = Est_{topemax+1}^a(r)$ y la estrategia óptima para el agente \hat{a} es $Est_o^{\hat{a}}(r) = Est_{topemin+1}^{\hat{a}}(r)$ entonces el protocolo converge con una probabilidad igual a $(\alpha_{topemax+1} + \alpha_{topemax+2} + \dots + \alpha_n) * (\beta_{topemin+1} + \beta_{topemin+2} + \dots + \beta_m)$. Es decir, la probabilidad de que converja disminuye porque hay una probabilidad $(1 - (\alpha_{topemax+1} + \alpha_{topemax+2} + \dots + \alpha_n))$ de que el valor tope real que el agente \hat{a} está dispuesto a solicitar sea mayor que $MaxOf^{topemax+1}$ y hay una probabilidad $(1 - (\beta_{topemin+1} + \beta_{topemin+2} + \dots + \beta_m))$ de que el valor tope real que el agente a esta dispuesto a ofrecer sea menor $MinReq^{topemin+1}(r)$.

.

.

.

Generalizando el análisis de los casos anteriores, si la estrategia óptima para el agente a es $Est_o^a(r) = Est_{topemax+i}^a(r)$ y la estrategia óptima para el agente \hat{a} es $Est_o^{\hat{a}}(r) = Est_{topemin+j}^{\hat{a}}(r)$ entonces el protocolo converge con una probabilidad igual a $(\alpha_{topemax+i} + \alpha_{topemax+i+1} + \dots + \alpha_n) * (\beta_{topemin+j} + \beta_{topemin+j+1} + \dots + \beta_m)$.

Si extendemos la convergencia del recurso r a todos los recursos del servicio S^k , la negociación sobre S^k converge si, y solo si, todos los recursos que lo componen convergen antes de $T_{negociacion}^k$.

5.6.2. Equilibrio de la Negociación

En el entorno de negociación los agentes no conocen los valores reales de uso que el agente opuesto está dispuesto a ceder para cada recurso, aunque cada agente

tiene una lista de creencias al respecto. Sin embargo, los agentes sí conocen las ofertas realizadas durante la ejecución del protocolo de negociación. Así pues, nos encontramos en un entorno de información incompleta con memoria perfecta.

Para evaluar el equilibrio de la negociación en este entorno se utiliza el concepto de equilibrio secuencial (ver capítulo 3.3.2). El equilibrio secuencial en un juego extensivo se basa en tres conceptos clave: *Valoración*, *racionalidad secuencial* y *consistencia*, en la que una valoración de un juego está en equilibrio secuencial si es consistente y es racionalmente secuencial [OR94].

Definimos una valoración como un par (σ, μ) donde σ es la estrategia óptima del recurso r , $Est_o^a(r)$, y μ es la función que asigna a cada posible estado de información del agente una probabilidad. Esto es, μ proporciona los valores de probabilidad incluidos en la lista de creencias $Posibles(r)$. Recordemos que una negociación es racionalmente secuencial si, para cada uno de los posibles estados de información de un agente, la estrategia de un agente es la mejor respuesta a las estrategias del otro agente.

El agente m inicia la negociación y selecciona una estrategia inicial para el servicio S^k . Mientras no se produzca ningún evento de negociación, el agente m utiliza esta estrategia para generar las ofertas de los recursos del servicio S^k . La estrategia seleccionada es una de las n posibles estrategias que el agente m puede aplicar y se basa en la estrategia del oponente (ya que a pesar que m no conoce la estrategia concreta que va a aplicar c , si tiene un conjunto de creencias sobre ellas). La estrategia seleccionada es la Est_o^m que le proporciona la máxima utilidad esperada. Así pues, el agente m utiliza Est_o^m para generar la siguiente oferta.

Cuando el agente c recibe la oferta, no conoce la estrategia que el agente m está desarrollando, pero, al igual que m , el agente c tiene una lista de creencias acerca de las l posibles estrategias de m . Del conjunto de l posibles estrategias, c selecciona aquella que le proporciona la mayor utilidad esperada, es decir, selecciona Est_o^c , que es la que utiliza desde ese momento hasta el siguiente evento de negociación.

La valoración (σ, μ) es secuencialmente racional ya que los agentes utilizan sus estrategias óptimas, basadas en las creencias sobre el agente opuesto, a lo largo de toda la negociación para determinar el valor de la siguiente oferta.

La segunda condición para obtener el equilibrio se basa en la consistencia de la valoración. La consistencia relaciona las creencias de los agentes con las estrategias desarrolladas en cada uno de los instantes de la negociación. La valoración (σ, μ) es consistente ya que μ es la función que asigna la probabilidad a cada una de las posibles estrategias y la estrategia seleccionada en cada situación es la estrategia óptima. Es decir, no existe ninguna creencia que permita obtener un mejor resultado

que la creencia que genera la estrategia óptima.

Por lo tanto, el protocolo está en equilibrio secuencial.

5.7. Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un modelo de negociación para múltiples servicios compuestos por múltiples recursos, basado en el modelo de ofertas alternativas de Rubinstein, al que se le han añadido restricciones temporales para alcanzar un acuerdo.

El protocolo desarrollado presenta las siguientes características: protocolo para la negociación de múltiples servicios relacionados entre si, en un entorno de información incompleta y con la combinación de diferentes tácticas para la generación de ofertas y contraofertas.

Al contrario que en otros protocolos desarrollados previamente por otros autores [Kra01], [FWJ04a], [Ind00], los diferentes servicios que componen la agenda de negociación pueden combinarse entre si para proporcionar una posible solución al problema. Es decir, los servicios están relacionados entre si y el acuerdo/desacuerdo sobre uno de ellos genera eventos de negociación que afectan a la evolución de la negociación del resto de servicios.

La relación entre los servicios a negociar implica que las tácticas a desarrollar para la generación de ofertas y contraofertas, en función del tiempo o de los recursos existentes en el entorno, no sean suficientes para obtener las estrategias óptimas. Para solucionar este problema se han combinado ambas tácticas como propuesta de trabajo.

El análisis de los servicios que se pueden negociar y sus relaciones con la calidad de servicio del servicio problemático al que se pretende sustituir, ha permitido establecer una clasificación de los servicios como óptimos, básicos y normales, que se ha mostrado muy útil para determinar las tácticas a desarrollar por cada agente en la negociación y cómo estas tácticas evolucionan según varíe la composición de la agenda de negociación.

El protocolo de negociación se desarrolla en un entorno de información incompleta donde los agentes no conocen todos los valores del entorno. Cada uno de los agentes desconoce los valores tope de negociación de los recursos que componen los servicios, ya que forman parte del conocimiento privado de los agentes. La solución adoptada para trabajar con esta falta de información ha sido la utilización de las

creencias que los agentes tienen sobre las creencias del agente opuesto, aproximación ya realizada en otros protocolos de negociación [FWJ04a].

La evolución dinámica de la negociación ha hecho necesaria la identificación de todos los posibles escenarios de negociación en los que se pueden encontrar los agentes a lo largo del proceso de negociación. Esto ha sido fundamental para determinar las diferentes situaciones que pueden producirse en la negociación en función de: 1) las relaciones entre los instantes temporales: $T_{negociacion}^i$, $T_{frontera}$, y T_{max} ; y 2) las relaciones entre las calidades de servicio de los servicios que componen la agenda y el servicio problemático. El reducido número de escenarios, cuatro, y las restricciones entre ellos ha permitido simplificar la búsqueda de estrategias para la determinación de las tácticas adecuadas que los agentes deben aplicar en cada situación.

Cabe destacar que en el protocolo propuesto las estrategias desarrolladas en cualquiera de los escenarios que pueden producirse a lo largo del proceso de negociación convergen hacia el acuerdo, siempre que el área real de acuerdo sea no nula. Además, el protocolo presenta un equilibrio secuencial.

El protocolo desarrollado permite negociar un conjunto de soluciones a un problema dado en una única negociación. Esto presenta una ventaja fundamental, ya que los agentes conocen en todo momento como evoluciona la negociación de los servicios utilizados para resolver el problema y lograr de esta forma un acuerdo lo más satisfactorio posible para ambos.

Este protocolo puede ser aplicado en dominios muy variados, como por ejemplo en el dominio de las redes de computadoras (provisión de servicios, ancho de banda, etc) o en el dominio de la ingeniería del tráfico (provisión de itinerarios alternativos frente a incidentes de tráfico).

Capítulo 6

Negociación para el Desarrollo de Itinerarios Alternativos

En este capítulo se presenta una adaptación del protocolo descrito en el capítulo anterior a un dominio real. Este dominio se enmarca dentro del ámbito del tráfico interurbano. Las características específicas de este entorno: extensas redes viarias, diferentes centros de gestión de tráfico y diversidad de equipamiento, hacen necesario el desarrollo coordinado de estrategias de gestión y control del tráfico.

La adaptación del protocolo se centra en el marco del desarrollo de itinerarios alternativos para la redirección de flujos de tráfico cuando se produce un incidente en un itinerario principal. En estas situaciones, los centros de gestión de tráfico deben activar un conjunto de itinerarios alternativos para poder garantizar, a los usuarios, la vialidad entre distintos puntos de la red viaria.

En la primera parte del capítulo se presenta una introducción al dominio del tráfico, especialmente centrado al desarrollo de itinerarios alternativos. Una vez definido el problema, se describe el entorno en el que se aplicará el protocolo. Éste se define, en una primera aproximación, para la negociación sobre un único itinerario y posteriormente se extiende su aplicación a la negociación sobre varios itinerarios. En ambos apartados se detalla: la situación de conflicto, la generación de ofertas y contraofertas, la función de utilidad de los itinerarios, la secuencia de acciones y el estado de información de cada agente. También se analizan los escenarios, las estrategias óptimas, la convergencia y equilibrio del proceso de negociación.

6.1. Introducción

Como se ha descrito en el capítulo 1, la aplicación de las nuevas tecnologías a la ingeniería del tráfico y el transporte ha hecho posible el desarrollo de sistemas avanzados para la gestión y control del tráfico. Uno de los objetivos de estos sistemas avanzados, conocidos como Sistemas Inteligentes de Transporte, es el de mejorar la movilidad de personas y mercancías reduciendo los efectos negativos que los incidentes provocan sobre la red viaria.

Existen diferentes situaciones que provocan la aparición de incidentes en la red viaria: accidentes, vialidad invernal, obras, eventos públicos, etc. Todos estos incidentes modifican la capacidad de la red viaria y suelen producir importantes congestiones en ella. Estas congestiones no sólo afectan a la circulación y a la seguridad vial sino que también suponen un importante incremento del consumo de combustible y de las emisiones de gases a la atmósfera. Del conjunto de posibles incidentes, los que mayor repercusión tienen sobre la red viaria son los incidentes producidos por accidentes o problemas de vialidad invernal. Esto se debe a que es muy difícil prever de antemano el incidente y cuál será el comportamiento del tráfico cuando éste ocurra.

Como se ha presentado en el capítulo 1, una de las principales estrategias de gestión y control del tráfico frente a incidentes son los planes de gestión de tráfico. Un plan de gestión de tráfico define el conjunto de medidas que debe aplicarse cuando ocurre un incidente en una determinada carretera. Estas medidas dependen principalmente de los parámetros del incidente: localización, severidad, duración, etc.

Si el incidente es leve o las condiciones de tráfico son favorables, (por ejemplo, baja intensidad de tráfico) las medidas pueden ser desarrolladas únicamente por el centro de gestión en cuyas carreteras se localiza el incidente. Sin embargo, existen otras situaciones en las que los centros de gestión necesitan realizar medidas coordinadas con otros centros adyacentes, como sucede, por ejemplo, con incidentes severos ocurridos en horas punta, donde las medidas de gestión que puede aplicar localmente no son suficientes para solucionar los problemas ocasionados por este incidente.

Una de las medidas coordinadas utilizadas en los planes de gestión de tráfico son los *itinerarios alternativos*. Con la activación de estos itinerarios, los centros de gestión garantizan la vialidad a los usuarios y minimizan las congestiones de tráfico. Ahora bien, a pesar de que los itinerarios a activar han sido acordados previamente, mediante la realización de los correspondientes planes de gestión, los centros de

gestión deben negociar entre ellos cuando ocurre el incidente, sobre cómo y cuándo se activa el itinerario. Esta situación se produce porque el tráfico que circula tanto por la ruta donde ocurre el incidente como por el itinerario alternativo puede ser muy variado dependiendo de la hora y del día en que éste se produzca. Por ejemplo, no es lo mismo un incidente en los accesos a una gran ciudad un día laborable en hora punta, que un festivo a esa misma hora, etc.

El protocolo, que se describe a continuación, se centra en la negociación de itinerarios alternativos entre diferentes centros de gestión de tráfico. El protocolo pretende automatizar, de manera óptima, la implementación de itinerarios en función del tráfico existente en el momento del incidente. Para ello, la negociación se basa en el protocolo de negociación descrito en el capítulo anterior.

6.2. Definición del Problema

La activación de itinerarios alternativos es una tarea complicada con múltiples factores (flujos de tráfico, intervalos de tiempo, ...) y que implica la coordinación de diversos organismos para su puesta en marcha dependiendo del tipo de itinerario. Estos factores conllevan que la activación de un itinerario alternativo sea difícil de realizar y que en muchos casos no sea viable.

El desarrollo de un itinerario alternativo se divide en dos fases: planificación e implementación.

1. En la fase de planificación se realiza un estudio pormenorizado de la red viaria. El resultado de este estudio determina un conjunto de pares, $\langle \text{segmento}, \text{incidente} \rangle$, que permiten establecer el itinerario alternativo. Además, para cada itinerario alternativo es necesario analizar detalladamente todas sus características. Este análisis determina las organizaciones involucradas en su activación y el tiempo de desarrollo que tardarán cada una de ellas en ponerlo en marcha. En esta fase también se determina el tiempo de recorrido de los vehículos a través del itinerario y el tipo de vehículos que podrán circular por él, (pesados, articulados, etc.) además del ámbito de aplicación (local, regional, nacional o internacional).
2. En la segunda fase se activa el itinerario. Para ello, una vez ha ocurrido el incidente, se determina el estado del tráfico en tiempo real y los mecanismos necesarios para poder activar el itinerario. El estado del tráfico permite conocer la cantidad de tráfico que realmente se puede redireccionar por el itinerario y

que no traslade o genere problemas en él, ya que de lo contrario lo único que se conseguiría sería empeorar la situación global de la red viaria.

La primera fase se realiza mediante el desarrollo de estudios previos. Esta fase permite conocer todos los requisitos para la implementación de los itinerarios alternativos, pero no define como deben implementarse. En la implementación de los itinerarios, segunda fase, el tiempo es una variable fundamental, que garantiza que la solución al problema sea la adecuada para resolver, o al menos minimizar, los problemas ocasionados por el incidente. Así pues, los centros de gestión de tráfico, deben, a partir de los itinerarios, determinar los flujos de tráfico adecuados para cada uno de los itinerarios. Estos flujos deben disminuir los que circulan por el itinerario principal, y redireccionarlos por los itinerarios alternativos sin que aparezcan problemas en ellos.

6.3. Entorno de Aplicación

A continuación se describe el entorno donde se aplica el protocolo. Para ello se va a utilizar un escenario que define los elementos básicos que intervienen en la gestión del tráfico y que se utilizará posteriormente para realizar las pruebas.

Los distintos elementos que integran una red viaria, y que se pueden apreciar en la figura 6.1, son:

- Centros de gestión de Tráfico (CGTs): responsables de la gestión y el control del tráfico. Cada centro tiene un conjunto de carreteras bajo su competencia y es el encargado del desarrollo de las estrategias de gestión en ellas según sus propios criterios.
- Carreteras: conjunto de segmentos agrupados que componen la red viaria general. Las carreteras pueden pertenecer a uno o más centros de gestión de tráfico y básicamente conectan un origen y un destino. Están clasificadas de acuerdo a sus características. En el escenario presentado se trabaja con tres grupos¹: autovías, carreteras de primer orden o nacionales, y carreteras de segundo orden o regionales. En el ejemplo, presentado en la figura 6.1, aparecen varias carreteras:

- CARRETERAS={A-3, A-31, A-35, N-400}

¹En el mundo real existe una clasificación mucho mayor del orden de las carreteras



Figura 6.1: Entorno de tráfico interurbano.

- Segmentos: tramos de carreteras de características homogéneas. Un segmento sólo puede pertenecer a un único centro de gestión de tráfico y a una sola carretera. Los segmentos se agrupan por centro de gestión de tráfico, así pues en la figura 6.1, tenemos:
 - $SEGMENTOS_{CGTM} = \{sm1, \dots, sm8\}$
 - $SEGMENTOS_{CGTV} = \{sv1, \dots, sv6\}$
- Enlaces: identifican los puntos de unión entre segmentos. Dependiendo de la función del enlace se pueden clasificar en: iniciales, finales, frontera, bifurcaciones, uniones, etc. Para el desarrollo del protocolo sólo vamos a tener en cuenta tres tipos: iniciales, finales y de frontera.
 - Enlaces Iniciales = {Madrid}
 - Enlaces Finales = {Valencia}
 - Enlaces Frontera = $\{Enl_{fr1}, Enl_{fr2}, Enl_{fr3}\}$
- Itinerario: conjunto de segmentos que permiten llegar desde un origen a un destino. Los orígenes y destinos pueden pertenecer a distintos CGTs. Un itinerario puede estar formado por segmentos de diferentes carreteras. Un itinerario se

define como alternativo cuando es elegido como sustituto de otro itinerario en el que ocurre un incidente. En el ejemplo aparecen tres itinerarios que permiten llegar desde el enlace Madrid hasta Valencia.

- ITINERARIO1={sm1,sm2,sm3,sv3,sv2,sv1},
- ITINERARIO2={sm1,sm6,sm7,sm8,sv6,sv2,sv1},
- ITINERARIO3={sm1,sm2,sm4,sm5,sv5,sv4,sv1}

Este último itinerario, aunque no se especifica en la figura, está compuesto por segmentos que pertenecen a dos carreteras distintas, la A-31 y la A-35.

- Incidentes: identifican situaciones anómalas de cualquier tipo en la carretera. Un incidente se compone de los siguientes elementos: código de carretera, punto kilométrico, tipo de problema y severidad.
- Nivel de servicio: parámetro cualitativo que define la libertad de movimiento de un conductor dentro del flujo de tráfico. Los niveles de servicio de tráfico se clasifican en siete niveles [Boa00]: A, B, C, D, E, F y G, donde A supone la carretera con el menor nivel de servicio, es decir, sin prácticamente tráfico, y el nivel de servicio G implica que la carretera está totalmente congestionada.

Los centros de gestión de tráfico se encargan del control y de la gestión de la red de carreteras bajo sus competencias. Cada centro de gestión de tráfico tiene un agente gestor que se encarga de las estrategias de gestión y control del tráfico. Los agentes gestionan la vialidad de los flujos de tráfico de manera general entre orígenes y destinos. Ahora bien, existen situaciones especiales, producidas por incidentes, en las que la vialidad en los itinerarios se reduce, pudiendo incluso llegar a ser nula.

Para solucionar el problema los agentes gestores de cada centro pueden determinar itinerarios alternativos que permitan a los usuarios alcanzar el destino que tenían planeado. Si este nuevo itinerario implica el uso de segmentos de la red viaria que pertenecen a otros centros de gestión de tráfico, los agentes deben negociar para poder activar este itinerario.

La negociación sobre el itinerario se basa en el nivel de servicio que los agentes están dispuestos a mantener en un itinerario. Es decir, los agentes negocian sobre la cantidad de vehículos que pueden redireccionar por un itinerario hasta alcanzar un nivel de servicio. La determinación de cómo los itinerarios alternativos deben desarrollarse, es decir, el conjunto de medidas a aplicar para conseguir la redirección de los flujos (señalización variable, ramp metering, etc.) no forma parte del protocolo.

Para determinar el volumen de tráfico que puede ser redireccionado por un itinerario, los agentes realizan ofertas del nivel de servicio en el enlace de frontera entre

ambos centros. Los valores que cada centro pretende obtener son opuestos. Un agente *demandante*, es decir, aquel que solicita la activación de un itinerario alternativo, intenta reducir al mínimo posible el flujo de tráfico en el itinerario donde se encuentra el segmento donde ha ocurrido el incidente y redireccionar el máximo posible de ese tráfico por el itinerario alternativo. Por el contrario, el agente *cooperador*, es decir, el que no tiene el incidente en su red viaria, pero gestiona el tráfico en segmentos del itinerario alternativo, intenta minimizar las redirecciones de los flujos de tráfico.

Esta situación se produce porque el comportamiento del tráfico frente a incidentes es poco predecible, por lo que las redirecciones de flujos de tráfico pueden generar congestiones en los itinerarios alternativos, ocasionando problemas en la red de carreteras del agente cooperador. Otro punto a tener en cuenta, son las molestias que el redireccionamiento puede causar a los usuarios: mas kilómetros de recorrido, más tiempo de viaje, etc.

Así pues, para cada itinerario, los agentes tienen dos niveles de servicio [*MinLos*, *MaxLos*], entre los que deben mantener el estado del tráfico. *ActLos*, se define como el nivel de servicio actual y describe el estado del tráfico en el instante que se produce el problema (por lo que no se ve afectado todavía por el incidente). La tabla 6.1 describe los intervalos de los valores de negociación dependiendo del rol que desempeñe el agente y de si el itinerario es el principal o el alternativo.

Rol	Itinerario	Intervalo	
		Valor inicial	Valor tope
Demandante	Principal	MinLos	ActLos
Demandante	Alternativo	MaxLos	ActLos
Cooperador	Principal	ActLos	MinLos
Cooperador	Alternativo	ActLos	MaxLos

Tabla 6.1: Intervalos de negociación para cada itinerario.

En este dominio, el recurso a negociar es el valor del nivel de servicio en el enlace de frontera y como éste es único para cada itinerario se denotará por I^p al valor a negociar del nivel de servicio del enlace de frontera en el itinerario principal y por I^{alt} al valor a negociar del nivel de servicio del enlace de frontera en el itinerario alternativo.

Cada servicio, denominado *itinerario combinado* (que permite redireccionar tráfico de un itinerario principal a otro alternativo), perteneciente a la agenda de negociación se compone de dos recursos, en enlace de enlace de frontera en I^p y el enlace de frontera en I^{alt} . Los agentes alcanzan un acuerdo sobre un itinerario combinado

cuando han alcanzado un acuerdo sobre los niveles de servicio a obtener en cada uno de los enlaces de frontera, esto es, I^p e I^{alt} .

Las características del entorno definido y de las situaciones anómalas de tráfico que pueden ocurrir en ellas, así como su posible solución mediante la aplicación de itinerarios alternativos, se ajustan al mecanismo de negociación definido en el capítulo anterior:

- El entorno donde se produce el problema es un entorno distribuido, en el que los agentes que intervienen en su solución tienen intereses distintos, lo que implica la necesidad de desarrollar estrategias de negociación para obtener soluciones óptimas al problema.
- La información que cada uno de los agentes posee del entorno es incompleta. Un centro de gestión de tráfico no tiene por qué conocer cuál es el estado actual del tráfico de la red de carreteras que son competencia de otro centro.
- Si no se llega a un acuerdo para la implementación de un itinerario combinado, la congestión producida por el incidente puede llegar a saturar la red viaria gestionada por los agentes involucrados.
- La agenda de negociación está compuesta por varios itinerarios combinados, que están altamente relacionados entre sí y que se deben implementar de forma secuencial. Es decir, una vez logrado el acuerdo sobre un itinerario, éste pasa automáticamente a implementarse, sin esperar que se negocien el resto de itinerarios.
- Los centros de gestión de tráfico son *autointeresados*, por lo que son reacios a modificar los flujos de tráfico, ya que generan insatisfacción en sus usuarios y los problemas de tráfico pueden trasladarse a otros puntos de la red viaria. Por consiguiente, la negociación es necesaria para implementar estrategias coordinadas que garanticen la fluidez del tráfico en la red viaria.

6.4. Protocolo de Negociación

El protocolo de negociación se basa en el protocolo de ofertas alternativas con restricciones temporales presentado en el capítulo anterior. En este protocolo intervienen dos agentes, uno por cada centro de gestión involucrada. Los agentes pueden interpretar distintos roles. El rol *demandante*, donde el agente d detecta un incidente en su red viaria y quiere iniciar estrategias de gestión de tráfico compartidas, y el

rol *cooperante* donde el agente c participa en la implementación de estrategias de gestión solicitadas por el agente d .

Así pues, definimos d como el agente que representa al CGT donde se produce el problema de tráfico y c el agente del CGT que puede verse afectado por las congestiones ocasionadas por estos problemas. Sea $T_{resolucion}$ el tiempo que el agente d estima que mediante la negociación de itinerarios alternativos se puede ayudar a rebajar la gravedad del incidente. Sea A la agenda de negociación, que contiene los posibles itinerarios combinados sobre los que se va a negociar. Sea $T_{frontera}$ el instante temporal en el que el agente d prevé que los problemas producidos por el incidente afectarán a las carreteras del agente c , y $T_{desarrollo}^{comb}$ el tiempo que ambos agentes tardarán en activar el itinerario combinado I^{comb} una vez hayan alcanzado un acuerdo sobre él. En consecuencia, el tiempo máximo de la negociación, $T_{negociacion}$, durante el cual los agentes pueden negociar es la diferencia entre el tiempo de resolución de la negociación, $T_{resolucion}$, y el tiempo que los agentes tardarán en poner en funcionamiento el itinerario, $T_{desarrollo}^{comb}$.

$$T_{negociacion} = T_{resolucion} - T_{desarrollo}^{comb} \quad (6.1)$$

La calidad de servicio, $Q(I^i)$, del itinerario I^i clasifica el itinerario en función de las características de la carretera y de la longitud del mismo. Así pues, definimos la calidad de servicio, $Q(I^i)$, como el tiempo medio que un vehículo tarda en recorrer I^i en situaciones de tráfico normal. La relación entre la calidad de servicio de los itinerarios, RQI (que identifica la calidad de servicio de un itinerario combinado), se define como el cociente entre la calidad de servicio del itinerario principal, $Q(I^p)$, y la calidad de un itinerario alternativo, $Q(I^{alt})$ (ec. 6.2). Si el valor resultante es mayor que uno, la calidad del itinerario alternativo mejora la calidad del itinerario que presenta problemas, mientras que si es menor que uno implica que el itinerario alternativo tiene peor calidad de servicio, o lo que es lo mismo, que los vehículos van a tardar más en alcanzar el destino si las condiciones del tráfico fueran normales.

$$RQI(I^{comb}) = \frac{Q(I^p)}{Q(I^{alt})} \quad (6.2)$$

El protocolo finaliza con *éxito completo* si antes de llegar el tiempo máximo de la negociación se ha logrado alcanzar uno o más acuerdos que permitan desarrollar itinerarios combinados donde la suma de sus respectivas RQI sea mayor o igual que uno. Si con el desarrollo de los itinerarios combinados acordados la suma de las RQI es menor que uno, el protocolo finaliza con *éxito parcial* y el grado de satisfacción se cuantifica mediante RQI . Si por el contrario, alguno de los agentes abandona la

negociación o se alcanza el instante de tiempo T_{max} y no se ha alcanzado ningún acuerdo, el protocolo acaba en una *situación de conflicto*.

Al igual que ocurre en el protocolo de negociación expuesto en el capítulo anterior, para ayudar a que la negociación pueda conducir a un acuerdo, se debe cumplir que los agentes que negocian sobre un itinerario deben ofrecer sus niveles de servicio topes para los enlaces de frontera, al menos, en el instante final de la negociación. Si esto no fuera así, no se podría garantizar la posibilidad de alcanzar acuerdos, puesto que al no verse forzados a ofrecer en algún momento sus valores topes los agentes no tendrían interés en emplear tiempo negociando.

6.4.1. Negociación sobre un Itinerario Combinado

En una primera aproximación, la negociación se define para una agenda con un único itinerario combinado. El objeto de esta simplificación es poder comprender cómo se realiza la negociación sobre un itinerario combinado. Es decir, la definición y la descripción de la secuencia de negociación, la situación de conflicto, la definición de los valores que componen la oferta, la función de utilidad y los posibles estados de información de un agente durante la negociación. Una vez definido el protocolo para un único itinerario combinado, se extiende para una agenda compuesta por varios itinerarios combinados.

La secuencia de la negociación sobre la agenda compuesta por un itinerario combinado se puede apreciar en la figura 6.2 y es:

1. Cuando el agente demandante, d , detecta un incidente, el agente determina cuál es su evolución prevista y el área de influencia. A su vez identifica el agente que está o puede estar implicado en la negociación y el posible itinerario a implementar. Una vez el agente d tiene esta información, envía un mensaje al agente cooperante implicado, c , que contiene:
 - La información del incidente que se compone de: la localización exacta, (incluyendo código de carretera, punto kilométrico y sentido), la severidad del incidente, la duración estimada, el tiempo previsto para que los problemas de tráfico producidos alcancen las carreteras gestionadas por el otro agente, $T_{frontera}$, y el enlace de frontera donde se producirá esta situación.
 - La agenda de negociación compuesta por el tiempo máximo de negociación y el itinerario combinado, I^{comb} , compuesto por el itinerario principal y el itinerario alternativo, que permitirá garantizar la circulación. Esta

información incluye el tiempo de implementación y la calidad de servicio de ese itinerario.

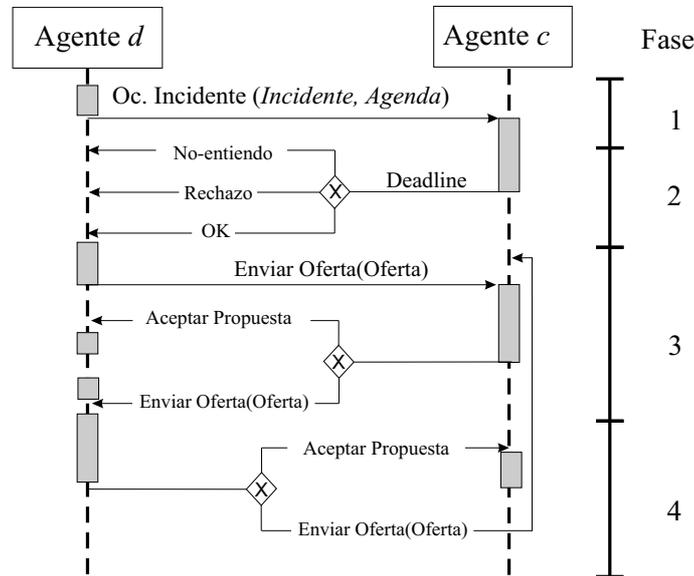


Figura 6.2: Secuencia de negociación de un itinerario. Cuando el agente *d* detecta un incidente, determina el itinerario alternativo y le envía un mensaje con la información al agente *c*. Una vez el agente *c* valida la información, el agente *d* realiza la primera oferta. Si *c* acepta la propuesta el protocolo finaliza, si por el contrario no la acepta, *c* genera una nueva propuesta y se la envía a *d*. Si éste la acepta, la negociación termina, sino *d* genera una nueva contraoferta y el protocolo vuelve hasta el paso 3.

2. Cuando *c* recibe este mensaje, ejecuta el rol de cooperador y analiza el contenido del mensaje. Este análisis se centra, por un lado, en la evaluación del incidente y de los posibles problemas que pueda ocasionar en su red viaria, y por otro, en la validación del itinerario propuesto y en su tiempo de implementación.
3. Negociación de las ofertas. Una vez los agentes tienen validada la agenda, se comienza la negociación para la activación del itinerario combinado. Para ello el agente *d* envía una propuesta con una oferta de implementación de este itinerario. La oferta contiene el nivel de servicio que *d* considera que se debe alcanzar en el enlace de frontera del itinerario principal y el nivel de servicio que puede alcanzarse en el enlace de frontera al redireccionar el tráfico por el itinerario alternativo. El agente *c* analiza la oferta realizada para cada uno de los enlaces de frontera de los itinerarios que componen el itinerario combinado y la viabilidad de implementarlo con los niveles de servicio ofrecidos. Si acepta la oferta realizada en ambos enlaces de frontera, el itinerario relacionado con la oferta pasa a implementarse y se finaliza el protocolo.

4. Si alguna de las ofertas de los enlaces de frontera no es aceptada, entonces c envía una contraoferta a d para la oferta no aceptada conteniendo los valores de los niveles de servicio que c está interesado en redireccionar. El agente d analiza los efectos sobre su red de la oferta realizada por c . Si acepta la oferta, el itinerario pasa a implementarse. Si no la acepta, el agente d prepara una nueva contraoferta y el protocolo se reinicia desde el paso 3.

Este proceso se repite hasta que: 1) se logra un acuerdo para la activación del itinerario I^{comb} , o 2) la negociación acaba con *opt out*. Recordemos, del capítulo anterior, que el *opt out* se puede producir porque uno de los agentes abandona la negociación antes de alcanzar el tiempo máximo de negociación, o porque éste se alcanza y no se ha llegado a un acuerdo sobre la activación del itinerario.

Situación de conflicto

La situación de conflicto se produce cuando los agentes no llegan a un acuerdo, sobre el itinerario combinado propuesto, antes de que se alcance el tiempo máximo de la negociación, $T_{negociacion}$. Esta situación es el peor resultado posible para ambos agentes. El conflicto implica que los centros no han llegado a un acuerdo para la implementación de una estrategia coordinada, es decir, la redirección de tráfico de un itinerario principal por otro itinerario alternativo, y sólo pueden aplicar estrategias individuales (locales) para poder gestionar los problemas generados por el incidente.

El agente d , responsable de las carreteras donde ocurre el incidente, sólo puede aplicar estrategias individuales para intentar minimizar los problemas, así pues, los problemas del tráfico crecen aguas arriba del incidente. Por el contrario, el agente c conoce la existencia de un problema de tráfico en las carreteras que gestiona d , comunicado al inicio de la negociación, pero desconoce su evolución ya que se encuentra fuera de su ámbito de gestión.

En esta situación, sin la activación del itinerario combinado por el que redireccionar tráfico, la congestión de tráfico aumenta y puede acabar saturando la red viaria. La situación de conflicto en el entorno equivale a tener todos los segmentos de la red viaria involucrados (tanto los del itinerario original como los del alternativo) en una situación de congestión. Además, puede generar desconfianza entre los agentes. Ésto puede afectar a futuras negociaciones ya que los agentes serán reacios a desarrollar actividades coordinadas, o pedirán fuertes contrapartidas.

Ofertas y contraofertas

Sea $Oferta_{a\rightarrow\hat{a}}^t(I^{comb})$ la oferta realizada por el agente a en un instante de tiempo t al agente \hat{a} . La oferta está compuesta por un par de elementos, uno para cada enlace de frontera que compone el itinerario combinado y que puede contener los siguientes elementos:

- Un valor que indica el nivel de servicio en el enlace de frontera del itinerario relacionado (principal o alternativo) y que representa el nivel de servicio que se desea mantener en él.
- *OK*, que indica que la última oferta, realizada por el agente \hat{a} , sobre ese enlace de frontera ha sido aceptada por el agente a .
- *opt out*, que indica que el agente a abandona la negociación.

Función de utilidad de un itinerario

La función de utilidad permite valorar las ofertas realizadas por los agentes sobre los niveles de servicio a aplicar en los enlaces de frontera. El concepto de utilidad de la oferta, para cada uno de los agentes, consiste en analizar la situación del tráfico que provocaría los niveles de servicio propuestos en la oferta en los enlaces de frontera. Para esto, cada agente realiza una previsión² sobre cuáles pasarían a ser los niveles de servicio de cada segmento de cada uno de los itinerarios si se aceptara la oferta recibida.

Sea $Los(Seg_a^i)$ una función que permite cuantificar el nivel de servicio de un segmento Seg^i de una red viaria bajo las competencias del agente a .

$$Los(Seg_a^i) = \begin{cases} -2k & Los(Seg_a^i) = F, G \\ -k & Los(Seg_a^i) = E \\ 0 & Si \quad Los(Seg_a^i) = D \\ +k & Los(Seg_a^i) = C \\ +2k & Los(Seg_a^i) = A, B \end{cases}$$

Donde k es una constante que permite ponderar el valor de los distintos tipos de uso de los segmentos. El valor específico de k es dependiente del dominio en el que se enmarca la negociación. En los extremos de la función, valores de $+2k$ y $-2k$, se han agrupado los dos niveles de servicio máximos y mínimos de uso de los segmentos. Esta agrupación se debe a que, a pesar de la existencia de diferencias a

²Por ejemplo, mediante una simulación de la evolución temporal de tráfico.

nivel cualitativo del nivel de servicio del segmento, la utilidad del servicio se puede considerar semejante. Para niveles de servicio A o B, el segmento está infrautilizado, por lo que puede aumentar el flujo de tráfico que circula por él sin que aparezcan congestiones. Para los valores opuestos, F y G la situación es la inversa, el servicio está saturado en ambos niveles y un aumento en el flujo de tráfico es imposible.

La utilidad de un itinerario se define como la suma de los niveles de servicio que se obtendrían si se aplicara el nivel de servicio de la oferta en los segmentos del itinerario principal y de los niveles de servicio en el itinerario alternativo, previa aplicación del factor RQI sobre la previsión del comportamiento del tráfico para la oferta recibida.

$$U_a(I^i) = \sum Los(Seg_a^i) + RQI * \left(\sum Los(Seg_a^j) \right) \quad \forall Seg_a^i \in I^p, \forall Seg_a^j \in I^{alt} \quad (6.3)$$

Secuencia de acciones

El conjunto de posibles acciones que un agente realiza cuando recibe una oferta es el siguiente: 1) abandonar la negociación bien porque se supera el tiempo máximo de la negociación y no se ha llegado a un acuerdo sobre el itinerario combinado o bien porque el agente no desea seguir negociando; 2) aceptar la oferta recibida en el instante t si ésta es mayor que la oferta que el agente va a realizar en el instante $t+1$; y 3) realizar una contraoferta.

Estado de información del agente

Los estados de información definen el conocimiento que los agentes tienen del entorno de negociación. En el dominio del tráfico, el entorno es de información incompleta, ya que los agentes desconocen parte de la información del entorno, como, por ejemplo, el estado del tráfico en las carreteras de otros centros de gestión.

La información en cada estado se puede agrupar en: a) información sobre el incidente, Inc , que incluye la localización del problema (carretera, segmento, punto kilométrico y sentido) y sus características (severidad, duración estimada y evolución), b) información acerca del itinerario alternativo, I^{alt} , compuesta por los segmentos y el nivel de servicio actual de cada uno de ellos, y c) la información privada que el agente posee sobre el entorno de negociación.

Así pues, el estado de información de cada agente contiene:

- Información pública:
 - Información sobre el incidente, Inc , y sus características.
 - El itinerario alternativo, I^{alt} , y su calidad de servicio.
 - El itinerario combinado, I^{comb} y el tiempo máximo de negociación, $T_{negociacion}$.
- Información privada para el agente *demandante*:
 - El mínimo y máximo valor que puede ofrecer, tanto para el itinerario principal donde se produce el incidente como para el itinerario alternativo.
 - Su función de utilidad.
 - Para el enlace de frontera del itinerario principal, el agente *demandante* tiene una lista de creencias, $Posibles_c(I^p)$, sobre lo que el agente *cooperador* supone que puede ser el máximo nivel de servicio que el agente *demandante* puede llegar a ofrecer. Esta lista está formada por n pares (los_i, α_i) donde los_i representa el máximo nivel de servicio que el agente *cooperador* cree que el agente *demandante* puede llegar a ofrecer con probabilidad α_i . La lista, $Posibles_c(I^p)$ está ordenada de mayor a menor valor de los_i y se asume que uno de estos valores es el valor correcto respecto del máximo valor que el agente *demandante* podría llegar a ofrecer.
 - Para el enlace de frontera del itinerario alternativo, el agente *demandante* tiene una lista de creencias, $Posibles_c(I^{alt})$, sobre lo que el agente *cooperador* supone que puede ser el mínimo nivel de servicio que el agente *demandante* puede llegar a ofrecer. Esta lista está formada por m pares (los_j, β_j) donde los_j representa el mínimo nivel de servicio que el agente *cooperador* cree que el agente *demandante* puede llegar a ofrecer con probabilidad β_j . La lista, $Posibles_c(I^{alt})$ está ordenada de menor a mayor valor de los_j y se asume que uno de estos valores es el valor correcto respecto del mínimo valor que el agente *demandante* podría llegar a ofrecer.
- Información privada para el agente *cooperador*:
 - El mínimo y máximo valor que puede ofrecer, tanto para el itinerario principal donde se produce el incidente como para el itinerario alternativo.
 - Su función de utilidad.
 - Para el enlace de frontera del itinerario principal, el agente *cooperador* tiene una lista de creencias, $Posibles_d(I^p)$, sobre lo que el agente *demandante* supone que puede ser el mínimo nivel de servicio que el agente *cooperador* puede llegar a ofrecer. Esta lista está formada por l pares (los_r, γ_r) donde los_r representa el mínimo nivel de servicio que el agente *demandante* cree

que el agente *cooperador* puede llegar a ofrecer con probabilidad γ_r . La lista, $Posibles_d(I^p)$ está ordenada de menor a mayor valor de los_r y se asume que uno de estos valores es el valor correcto respecto del mínimo valor que el agente *cooperador* podría llegar a ofrecer.

- Para el enlace de frontera del itinerario alternativo, el agente *cooperador* tiene una lista de creencias, $Posibles_d(I^{alt})$, sobre lo que el agente *demandante* supone que puede ser el máximo nivel de servicio que el agente *cooperador* puede llegar a ofrecer. Esta lista está formada por o pares (los_o, δ_o) donde los_o representa el máximo nivel de servicio que el agente *demandante* cree que el agente *cooperador* puede llegar a ofrecer con probabilidad δ_o . La lista, $Posibles_d(I^{alt})$ está ordenada de mayor a menor valor de los_o y se asume que uno de estos valores es el valor correcto respecto del máximo valor que el agente *cooperador* podría llegar a ofrecer.

6.4.2. Negociación sobre Múltiples Itinerarios Combinados

Una vez definido el protocolo de negociación para un único itinerario combinado, extendemos su funcionalidad a entornos donde el conjunto de soluciones para el problema no sea único, es decir, existan varios itinerarios combinados sobre los que redireccionar el tráfico. Esta situación se adapta mejor a entornos reales, donde los centros de gestión de tráfico deben determinar cuál es el itinerario o itinerarios óptimos, a partir del estado del tráfico, de su previsión y del conjunto de posibles itinerarios alternativos. La necesidad de determinar una solución óptima y negociada es fundamental para la resolución del problema inicial y para que no se trasladen los problemas de tráfico de un punto a otro de la red viaria.

El nuevo entorno del protocolo no varía del anterior, esto es, un protocolo de ofertas alternativas entre dos agentes, uno por cada centro de gestión de tráfico. En una de las carreteras de uno de los centros de gestión ocurre un incidente y el centro determina la necesidad de implementar algún itinerario alternativo conjuntamente con otro centro de gestión. Así pues este agente ejecuta el rol del demandante de ayuda, d , y el segundo agente ejecuta el rol del cooperador, c .

En esta situación, la agenda de negociación se compone de todos los posibles itinerarios combinados al itinerario donde se produce el problema³. Cada uno de los itinerarios tiene un tiempo de activación distinto. Esto se debe a las características intrínsecas de cada uno de los itinerarios (número de segmentos que lo componen,

³Los itinerarios combinados que pertenecen a la agenda han sido definidos y acordados exógenamente por los agentes.

sistemas ITS que facilitan su activación, etc.). Un itinerario combinado I^{combi} tiene un tiempo máximo de negociación, $T_{negociacion}^{combi}$, definido por la ecuación 6.1.

El tiempo máximo de la negociación con multiples itinerarios combinados, T_{max} , es definido por la ecuación 6.4, y se corresponde con el máximo tiempo de negociación de los itinerarios combinados que componen la agenda de negociación. Ahora bien, a pesar de existir un tiempo máximo de negociación, la negociación sobre un itinerario combinado individual, I^{combi} no puede sobrepasar su tiempo de negociación, $T_{negociacion}^{combi}$. Si esta situación se permitiera, la activación del itinerario no tendría sentido porque cuando se lograra su activación se habría superado $T_{resolucion}$, por lo cual la solución adoptada ya no sería válida.

$$T_{max} = \max (T_{negociacion}^{combi1}, \dots, T_{negociacion}^{combn}) \quad (6.4)$$

La secuencia de inicio del protocolo es la misma que se ha descrito para un único itinerario, el agente d detecta un incidente, determina su evolución, la red de carreteras afectadas y el agente involucrado en la posible solución. Una vez determinada esta información, le envía un mensaje al agente implicado que contiene toda la información descrita anteriormente más la agenda de negociación. Una vez el agente c ha recibido el mensaje, ha confirmado que entiende el problema y ha aceptado la agenda, comienza la negociación.

Situación de conflicto

Al igual que ocurre con la negociación con un único itinerario combinado, la situación de conflicto es el peor resultado posible para ambos centros de gestión.

Cuando existen varios itinerarios combinados en la agenda, debemos distinguir dos situaciones de conflicto: a) la situación de conflicto sobre un único itinerario combinado, identificada por *opt* y b) la situación de conflicto para todo el proceso de negociación, esto es, *opt out*.

La situación de conflicto sobre el proceso de negociación, *opt out*, se ha definido con anterioridad, en la negociación sobre un único itinerario combinado, y se refiere a un desacuerdo general en el protocolo, que supone que la solución al problema de tráfico mediante itinerarios alternativos ha fracasado. En cambio, la situación de conflicto, *opt*, sobre un único itinerario, I^{combi} , se produce cuando al alcanzar el instante de tiempo $T_{negociacion}^{combi}$, no se ha logrado un acuerdo sobre el itinerario I^{combi} y además, todavía quedan en la agenda más itinerarios combinados sobre los que negociar. En esta situación, los agentes todavía pueden lograr redireccionar el tráfico por alguno de los itinerarios que quedan en la negociación.

Ofertas y contraofertas

Sea $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(I^{comb})$ la definición de una oferta realizada sobre el itinerario combinado I^{comb} . Esta oferta está basada en la definición dada en el apartado 6.4.1. Definimos $Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(A)$ como el conjunto de ofertas realizadas por el agente a al agente \hat{a} en el instante de tiempo t sobre todos los itinerarios combinados que forman la agenda de negociación:

$$Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(A) = \{ Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(I^{comb1}), \dots, Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(I^{comb n}) \}$$

Determinación de Acciones

Una acción define cual es el paso que un agente va a realizar en el siguiente instante de tiempo. Recordemos que cuando la negociación es sobre un único itinerario, un agente, tal y como se ha descrito en el apartado 6.4.1, puede: abandonar la negociación, aceptar la oferta recibida o bien rechazarla y realizar una contraoferta.

En la negociación con múltiples itinerarios combinados, para un instante de tiempo t , un agente puede realizar una acción que afecte a todo el protocolo de negociación, acción *global* o un conjunto de acciones *individuales*, cada una de las cuales afecta únicamente a uno de los itinerarios combinados que componen la agenda.

Una acción *global* finaliza el protocolo, bien con un acuerdo o bien con un *opt out*. La primera situación ocurre cuando se logra un acuerdo sobre un itinerario combinado I^{comb} que supera $Q(I^p)$, definido como *éxito completo* (ver apartado 6.4), o bien cuando se ha alcanzado T_{max} y existe algún acuerdo sobre uno o más itinerarios combinados pero estos no superan $Q(I^p)$, definido como *éxito parcial*. La situación de *opt out* se produce cuando uno de los agentes abandona totalmente la negociación o bien se alcanza T_{max} sin lograr acuerdo alguno.

Una acción *individual*, (aceptar, contraofertar o rechazar), produce un *evento de negociación* (ver apartado 5.4). Una acción individual puede convertirse en global por dos razones: 1) se ha logrado un acuerdo sobre un itinerario combinado I^{comb} y se alcanza $Q(I^p)$ por lo que el protocolo finaliza con *éxito completo* o 2) se produce un desacuerdo en I^{comb} , siendo éste el último itinerario combinado de la agenda y además, no se ha alcanzado el acuerdo sobre ningún otro itinerario combinado, lo que implica alcanzar una situación de conflicto (*opt out*).

Estado de información del agente

Partiendo de los estados de información de los agentes definidos anteriormente (apartado 6.4.2) extendemos la información de los agentes para la negociación con multiples itinerarios combinados.

En este nuevo entorno existe un conjunto de itinerarios combinados como posibles alternativas al itinerario donde se produce el incidente. Así pues, es necesario la utilización de una agenda de negociación, A , que se compone de los itinerarios combinados a negociar. Esto es, $A = \{I^{comb1}, I^{comb2}, \dots, I^{comb n}\}$.

El entorno de información incompleta se mantiene, luego los valores máximos y mínimos de negociación, para cada itinerario, de un agente a son desconocidos para el agente \hat{a} . Sin embargo, el agente \hat{a} tiene una lista de creencias, $Posibles_a(I^i)$ sobre las creencias que el agente a tiene sobre los valores tope del agente \hat{a} para cada uno de los enlaces de frontera de cada itinerario.

Actualización del entorno de negociación

La activación secuencial de los itinerarios combinados implica que se pueden producir situaciones en las que los agentes deben recomponer sus estados de información de acuerdo con la evolución de la negociación.

Supongamos el siguiente entorno de aplicación: un itinerario principal, I^p , en el que se produce un incidente y dos itinerarios alternativos I^{alt1} e I^{alt2} donde el itinerario I^{alt1} se encuentra aguas arriba de I^{alt2} . La agenda de negociación tiene dos itinerarios combinados, I^{comb1} e I^{comb2} , donde el itinerario I^{comb1} se compone de I^p e I^{alt1} y el itinerario I^{comb2} se compone de I^p e I^{alt2} .

Los tiempos de desarrollo de cada uno de los itinerarios combinados vienen definidos por $T_{desarrollo}^{comb1}$ y $T_{desarrollo}^{comb2}$ respectivamente. Definimos $T_{negociacion}^{comb1}$ y $T_{negociacion}^{comb2}$ como los tiempo máximos de negociación de cada uno de los itinerarios combinados y t es el instante de tiempo actual. Supongamos también que en el instante actual, t , se ha logrado alcanzar un acuerdo sobre el itinerario combinado I^{comb1} . En este contexto se pueden presentar dos situaciones:

1. El desarrollo del itinerario combinado I^{comb1} empieza antes de que finalice el tiempo de negociación de I^{comb2} . Esto es, $(t + T_{desarrollo}^{comb1}) < T_{negociacion}^{comb2}$. Cuando se produce esta situación, los resultados del desarrollo de I^{comb1} afectan a I^{comb2} y, además, ambos agentes tienen tiempo para modificar el entorno de

la negociación que les permita adaptarse a esta nueva situación. Así pues, los agentes actualizarán sus creencias cuando se alcance el instante de tiempo $t + T_{desarrollo}^{comb1}$, ya que en este instante temporal es cuando los nuevos flujos de tráfico empiezan a afectar a I^{comb2} .

- El desarrollo del itinerario I^{comb1} empieza una vez finalizado el tiempo de negociación de I^{comb2} . Esto es, $(t + T_{desarrollo}^{comb1}) \geq T_{negociacion}(I^{comb2})$. En esta situación, la implementación de I^{comb1} y su consecuente redirección de tráfico no afecta a la negociación sobre I^{comb2} . Esto se debe a que, cuando el flujo de tráfico en el itinerario principal alcance el nivel acordado por I^{comb1} , esto es, en el instante temporal $t + T_{desarrollo}^{comb1}$ el tiempo máximo de negociación de I^{comb2} ya ha vencido, con lo que o no se ha llegado a un acuerdo sobre él o se ha acordado un acuerdo con los valores del entorno inicial. En esta situación no hace falta actualizar la información del entorno ya que no influye en la negociación.

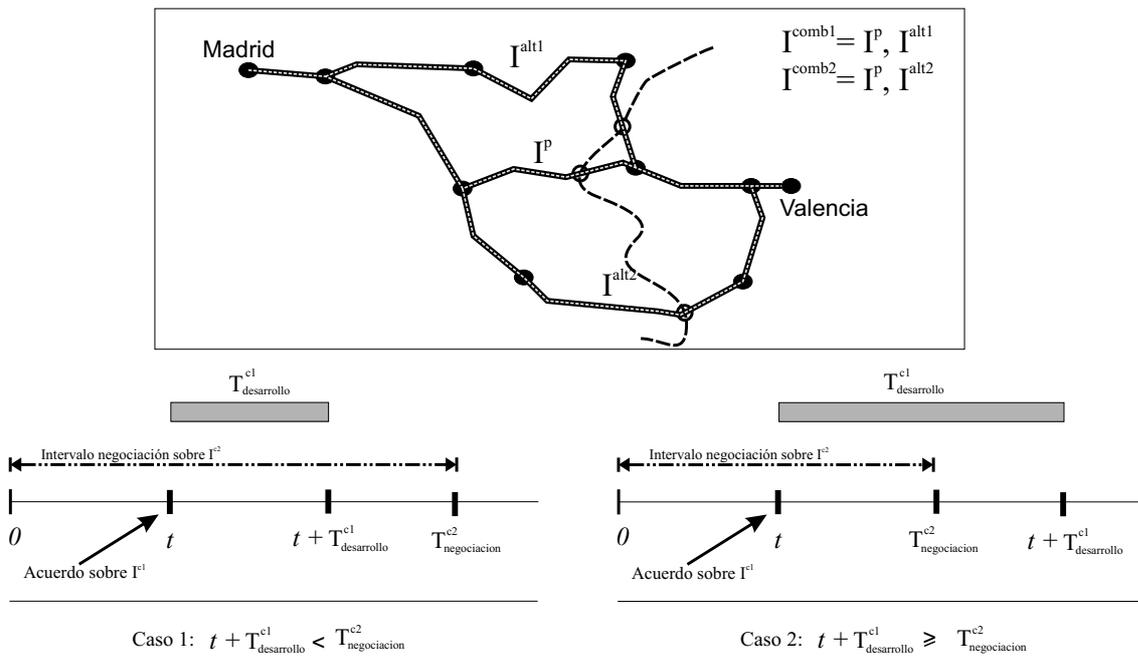


Figura 6.3: Relación entre los tiempos de negociación. En la parte superior de la figura, se observa la red viaria y como, en sentido Madrid-Valencia, el itinerario alternativo I^{alt1} está aguas arriba del itinerario alternativo I^{alt2} . En la parte inferior se observa la relación de los tiempos de negociación de los itinerarios combinados. En el caso 1 se aprecia como la actualización del entorno de negociación si tiene sentido, ya que los agentes tienen tiempo para reaccionar. Esta situación no ocurre en el caso 2, donde cuando I^{comb1} empieza a aplicarse, esto es, en $t + T_{desarrollo}^{comb1}$, la negociación sobre I^{comb2} ya ha finalizado.

En esta segunda situación (y también en algunos casos de la primera situación)

puede suceder que para un mismo recurso, en nuestro caso I^p , se acuerde, para cada negociación, dos valores finales distintos, uno en cada servicio, en nuestro caso, itinerarios combinados. Como los agentes son autointeresados, el agente demandante se quedará con aquel valor que resulte más beneficioso para sus intereses.

6.4.3. Generación de Ofertas y Contraofertas

Recordemos que cuando un agente recibe una oferta, en el instante t , debe determinar la acción que va a realizar, esto es, si la acepta o no. Y si no la acepta, cuál es la contraoferta que realiza. Recordemos también que, para determinar esta acción, el agente necesita conocer la oferta que va a realizar en $t+1$ y así poder comparar la oferta recibida con la que va a ofrecer.

Tal y como se ha descrito en la sección 5.3.3, el protocolo combina dos tipos de tácticas: tácticas basadas en las restricciones *temporales* y tácticas basadas en los *recursos* que intervienen en la negociación (en esta adaptación, itinerarios).

Teniendo en cuenta los itinerarios combinados que componen la agenda de negociación, la relación entre sus calidades de servicio, RQI (ecuación 6.2) y la clasificación de servicios, realizada en el apartado 5.3.3, clasificamos los itinerarios combinados en:

- Itinerarios Óptimos. Un itinerario combinado se considera óptimo si $RQI \geq 1$.
- Itinerarios Básicos. Un itinerario combinado es básico si $RQI < 1$ pero la implementación de ese itinerario es necesaria para mediante la negociación de otros itinerarios alcanzar conjuntamente $Q(I^p)$.
- Itinerarios Normales. Un itinerario combinado es normal si $RQI < 1$ y su desacuerdo no influye en poder alcanzar $Q(I^p)$.

Tácticas basadas en restricciones temporales

La función $f_d^t(I^k)$ determina el valor del nivel de servicio de la siguiente oferta que el agente demandante debe realizar para el enlace fronterizo del itinerario I^k , en función del instante temporal en el que se realice la oferta.

$$f_d^t(I^k) = \begin{cases} \text{MinLos}(I^k) & \text{Si } t = 0 \text{ y } I^k = I^p \\ \text{MinLos}(I^k) + \phi_{comb}^d(t) * (\text{MaxLos}(I^k) - \text{MinLos}(I^k)) & \text{Si } t > 0 \text{ y } I^k = I^p \\ \text{MaxLos}(I^k) & \text{Si } t = 0 \text{ y } I^k = I^{alt} \\ \text{MaxLos}(I^k) - \phi_{comb}^d(t) * (\text{MaxLos}(I^k) - \text{MinLos}(I^k)) & \text{Si } t > 0 \text{ y } I^k = I^{alt} \end{cases}$$

Análogamente, definimos $f_c^t(I^k)$ como la función que proporciona el valor de la oferta que realizará el agente cooperador.

$$f_c^t(I^k) = \begin{cases} \text{MaxLos}(I^k) & \text{Si } t = 0 \text{ y } I^k = I^p \\ \text{MaxLos}(I^k) - \phi_{comb}^c(t) * (\text{MaxLos}(I^k) - \text{MinLos}(I^k)) & \text{Si } t > 0 \text{ y } I^k = I^p \\ \text{MinLos}(I^k) & \text{Si } t = 0 \text{ y } I^k = I^{alt} \\ \text{MinLos}(I^k) + \phi_{comb}^c(t) * (\text{MaxLos}(I^k) - \text{MinLos}(I^k)) & \text{Si } t > 0 \text{ y } I^k = I^{alt} \end{cases}$$

donde $\phi_{comb}^a(t)$ es la función que permite al agente a implementar, para cada itinerario, los tácticas basadas en las restricciones temporales: *Boulware*, *Lineal* y *Conceder* (ver apartados 3.4.3 y 5.3.3).

Tácticas basadas en los itinerarios combinados

La importancia de un itinerario combinado para un agente se obtiene a partir de su calidad de servicio. Definimos, de manera análoga a la realizada en el apartado 5.3.3, w_a^{comb} como el grado de importancia del itinerario combinado I^{comb} para el agente a . El valor w_a^{comb} se encuentra sujeto a:

- $\sum_{1 \leq combi \leq n} w_a^{combi} = 1$
- Si I^{comb} es el único itinerario combinado de la agenda, entonces $w_a^{comb} = 1$.
- Si existen varios itinerarios combinados, $I^{comb1} \dots I^{combk}$, pero sólo uno de ellos, I^{combo} es óptimo, entonces $w_a^{combo} = 1$ y $w_a^{combk} = 0$ para el resto de itinerarios.
- Si existen varios itinerarios combinados, $I^{comb1} \dots I^{combk}$, no hay ninguno que sea óptimo y sólo uno de ellos, I^{combbb} es básico, entonces $w_a^{combbb} = 1$ y $w_a^{combk} = 0$ para el resto de itinerarios.
- Si existen varios itinerarios combinados, $I^{comb1} \dots I^{combk}$ y de ellos n son óptimos, $I^{combo1} \dots I^{combon}$, entonces $w_a^{comboi} = \frac{RQI(I^{comboi})}{\sum_{j=1}^n RQI(I^{comboj})}$ y $w_a^{combk} = 0$ para los itinerarios restantes.

- Si existen varios itinerarios combinados, $I^{comb1} \dots I^{combk}$ y de ellos n itinerarios básicos $I^{combb1} \dots I^{combbn}$ y no existe en la agenda ninguno óptimo entonces $w_a^{combbi} = \frac{RQI(I^{combbi})}{\sum_{j=1}^n RQI(I^{combbj})}$ y $w_a^{combk} = 0$ para el resto de itinerarios.
- Si existen varios itinerarios combinados, $I^{comb1} \dots I^{combk}$, y todos ellos están clasificados como normales entonces, $w_a^{combi} = \frac{RQI(I^{combi})}{\sum_{j=1}^n RQI(I^{combj})}$

Definimos la función $I_t^d{}^{comb}(I^k)$, como la función del agente demandante que proporciona el valor de la oferta para el enlace de frontera del itinerario I^k que pertenece al itinerario combinado I^{comb} .

$$I_t^d{}^{comb}(I^k) = \begin{cases} MinLos(I^k) + w_d^{comb} * (MaxLos(I^k) - MinLos(I^k)) & \text{Si } I^k = I^p \\ MaxLos(I^k) - w_d^{comb} * (MaxLos(I^k) - MinLos(I^k)) & \text{Si } I^k = I^{alt} \end{cases}$$

Análogamente definimos $I_t^c{}^{comb}(I^k)$ para el agente cooperador

$$I_t^c{}^{comb}(I^k) = \begin{cases} MaxLos(I^k) - w_c^{comb} * (MaxLos(I^k) - MinLos(I^k)) & \text{Si } I^k = I^p \\ MinLos(I^k) + w_c^{comb} * (MaxLos(I^k) - MinLos(I^k)) & \text{Si } I^k = I^{alt} \end{cases}$$

Combinación de ambas tácticas

La integración de ambas tácticas para la generación de la siguiente oferta es la combinación de las tácticas individuales. Esta combinación permite integrar tanto las restricciones temporales como la importancia de los itinerarios. La función $Oferta_a^{t,comb}(I^k)$ en el instante temporal t para el itinerario k , se define para el agente demandante como:

$$Oferta_a^{t,comb}(I^k) = \begin{cases} MaxLos(I^k) & \text{Si } (f_d^t(I^k) + I_t^d{}^{comb}(I^k)) - MinLos(I^k) \geq \\ & \geq MaxLos(I^k) \wedge I^k = I^p \\ f_d^t(I^k) + I_t^d{}^{comb}(I^k) - & \text{Si } (f_d^t(I^k) + I_t^d{}^{comb}(I^k)) - MinLos(I^k) < \\ -MinLos(I^k) & < MaxLos(I^k) \wedge I^k = I^p \\ MinLos(I^k) & \text{Si } (f_d^t(I^k) + I_t^d{}^{comb}(I^k) - MaxLos(I^k)) \leq \\ & \leq MinLos(I^k) \wedge I^k = I^{alt} \\ (f_d^t(I^k) + I_t^d{}^{comb}(I^k)) - & \text{Si } (f_d^t(I^k) + I_t^d{}^{comb}(I^k) - MaxLos(I^k)) > \\ -MaxLos(I^k) & > MinLos(I^k) \wedge I^k = I^{alt} \end{cases}$$

y para el agente cooperador como:

$$Oferta_c^{t,comb}(I^k) = \begin{cases} MinLos(I^k) & Si \quad (f_c^t(I^k) + It_c^{comb}(I^k) - MaxLos(I^k)) \leq \\ & \leq MinLos(I^k) \wedge I^k = I^p \\ \\ f_c^t(I^k) + It_c^{comb}(I^k) - \\ -MaxLos(I^k) & Si \quad (f_c^t(I^k) + It_c^{comb}(I^k) - MaxLos(I^k)) > \\ & > MinLos(I^k) \wedge I^k = I^p \\ \\ MaxLos(I^k) & Si \quad (f_c^t(I^k) + It_c^{comb}(I^k)) - MinLos(I^k) \geq \\ & \geq MaxLos(I^k) \wedge I^k = I^{alt} \\ \\ f_c^t(I^k) + It_c^{comb}(I^k) - \\ -MinLos(I^k) & Si \quad (f_c^t(I^k) + It_c^{comb}(I^k) - MinLos(I^k)) < \\ & < MaxLos(I^k) \wedge I^k = I^{alt} \end{cases}$$

6.5. Escenarios de Negociación

Los escenarios de negociación de este entorno son equiparables con los escenarios del capítulo anterior ya que los factores que intervienen en la negociación son: los tiempos de implementación de cada uno de los itinerarios alternativos frente al tiempo de resolución, y las relaciones de cada uno de los itinerarios con respecto al resto, en función de las calidades de servicio y de $Q(I^p)$.

Así pues, definimos cuatro escenarios:

- *Escenario 1.* En esta situación, ambos agentes, c y d , conocen con exactitud los problemas que el incidente ocasiona a la red viaria. Esto es, las congestiones de d ya han llegado a c . Además, la calidad de servicio de la agenda permite obtener un acuerdo que logre alcanzar $Q(I^p)$. Ambos agentes, tanto c como d pueden encontrarse en este escenario.
- *Escenario 2.* Al igual que en el escenario anterior, ambos agentes conocen con exactitud los problemas ocasionados, pero en esta situación la implementación de los itinerarios combinados que componen la agenda no permiten alcanzar de ninguna forma $Q(I^p)$. En este escenario también pueden encontrarse ambos agentes.
- *Escenario 3.* Los problemas producidos por el incidente no han alcanzado todavía las carreteras bajo la gestión del agente c . Luego el agente c no conoce la implicación real del problema sobre la red viaria. En este escenario, los itinerarios combinados de la agenda de negociación permiten alcanzar $Q(I^p)$. Recordemos que esta situación sólo puede producirse en el agente cooperador, c , ya que el demandante, d , sí conoce los efectos del incidente sobre la red viaria.

- *Escenario 4.* Al igual que en el escenario 3, el agente c no conoce los problemas que el incidente causa sobre la red viaria. Además, los itinerarios combinados que componen la agenda de negociación no permiten alcanzar $Q(I^p)$. Como ocurre en el escenario anterior, sólo el agente c puede estar en este escenario.

6.5.1. Tácticas Temporales Óptimas

Los escenarios definen las situaciones en las que los agentes se pueden encontrar a lo largo del proceso de negociación, pero no definen completamente ni las tácticas ni las estrategias que deben aplicar en cada uno de los itinerarios en cada escenario. Por lo tanto, las tácticas temporales deben ajustarse no sólo al escenario, sino también al itinerario sobre el que se esté aplicando y a los itinerarios que restan todavía en la agenda.

El conjunto de posibles situaciones que se pueden plantear depende de los itinerarios combinados que componen la agenda. Siguiendo el análisis realizado en el apartado 5.4 existen tres tipos de agenda: agenda completa con itinerario óptimo, agenda completa sin itinerario óptimo y agenda incompleta. A continuación se exponen las tácticas temporales óptimas, de manera análoga a la realizada en el capítulo anterior. Se observa que las tácticas temporales óptimas son las expuestas en el caso general, incluyendo la argumentación de cada una de ellas. (ver el apartado 5.4.4 del capítulo anterior).

Escenario 1

En este escenario, el problema real es conocido por los dos agentes. Ambos conocen el problema y las consecuencias que genera sobre su red viaria. Además, el escenario de negociación es optimista, es decir, se puede lograr alcanzar $Q(I^p)$. La tabla 6.2 resume las tácticas que cada agente desarrollará para el escenario 1 en función del rol, la agenda, el itinerario combinados sobre el que se esté negociando y el resultado de la previsión de la evolución del problema que el cooperador realiza cuando se alcanza $T_{frontera}$.

Escenario 2

En el escenario 2 el problema real es conocido por los dos agentes, por lo que también se debe tener en cuenta el resultado de la previsión realizada por el agente *demandante*. Así pues, las tácticas temporales óptimas del escenario 2 se mantienen

Tácticas temporales de negociación						
Escenario		Agenda	Tipo itinerario	Previsión	Tácticas	
Demandante	Cooperador				Demandante	Cooperador
E1	E1	ACIO	+Óptimos	Adecuada	L	L
				Inadecuada	L	C
E1	E1	ACIO	Un óptimo	Adecuada	C	C
				Inadecuada	C	C
E1	E1	ACIO	Resto	Adecuada	B	B
				Inadecuada	B	B
E1	E1	ACIB	+Básicos	Adecuada	L	L
				Inadecuada	L	C
E1	E1	ACIB	Un básico	Adecuada	C	C
				Inadecuada	C	C
E1	E1	ACIB	Resto	Adecuada	B	B
				Inadecuada	B	B
E1	E1	AI	Imposible			

Tabla 6.2: Tácticas temporales óptimas para cada agente en el escenario 1. Los acrónimos de la columna *Agenda* identifican los tipos posibles de agenda y significan: *ACIO* indica que negociamos sobre una agenda completa con un itinerario combinado óptimo, *ACIB* indica que se negocia sobre una agenda completa en la que existe al menos un itinerario combinado básico (pero ningún óptimo), *AI* indica que la agenda es incompleta. La columna *Tipo itinerario* identifica el itinerario combinado sobre el que se está negociando y la columna *Previsión* la evaluación de la previsión realizada para la evolución del incidente.

iguales que las tácticas expuestas en el apartado 5.4.4 y que quedan reflejadas en la tabla 6.3.

Escenarios 3 y 4

En los escenarios 3 y 4, el agente *cooperador* no puede realizar una previsión porque los problemas de tráfico todavía no han llegado a sus carreteras. Así pues, las tácticas temporales óptimas de los escenarios 3 y 4 se mantienen iguales que las tácticas expuestas en el apartado 5.4.4 y que quedan reflejadas en la tabla 6.4.

Tácticas temporales de negociación						
Escenario		Agenda	Tipo itinerario	Previsión	Tácticas	
Demandante	Cooperador				Demandante	Cooperador
E2	E2	ACIO	Imposible			
E2	E2	ACIB	Imposible			
E2	E2	AI	Normal	Inadecuada	B	B
				Adecuada	B	C

Tabla 6.3: Tácticas temporales óptimas para cada agente en el escenario 2, donde los acrónimos de la columna *Agenda* identifican los tipos posibles de agenda y significan: *ACIO* indica que negociamos sobre una agenda completa con, al menos, un itinerario combinado óptimo, *ACIB* indica que se negocia sobre una agenda completa en la que existen itinerarios combinados básicos (pero no óptimos), *AI* indica que la agenda es incompleta, la columna *tipo itinerario* identifica el itinerario combinado sobre el que se está negociando y la columna *Previsión* la evaluación de la previsión realizada para la evolución del incidente.

6.5.2. Ejemplo del Comportamiento del Protocolo

A continuación se presenta un ejemplo basado en la red viaria presentada en el apartado 6.3 (figura 6.1). En esta entorno suponemos que se produce un incidente meteorológico en el segmento *sv3* del itinerario 1, que es gestionado por el CGT de Valencia (CGTV). Este incidente implica que la vialidad queda restringida y es necesario negociar la redirección del tráfico por los dos itinerarios alternativos posibles, I^2 e I^3 .

Las características del entorno de negociación son las siguientes:

- El itinerario I^1 se identifica como I^p , ya que es en él donde se produce el incidente.
- Los itinerarios I^2 y I^3 se identifican como I^{alt1} e I^{alt2} respectivamente.
- La agenda de negociación se compone de dos itinerarios combinados I^{comb1} y I^{comb2} , donde I^{comb1} esta formado por los itinerarios I^p e I^{alt1} ; e I^{comb2} esta formado por los itinerarios I^p e I^{alt2}
- Ambos itinerarios combinados son básicos.
- El tiempo de resolución del incidente mediante itinerarios alternativos es $T_{resolucion}$ y el tiempo de frontera es $T_{frontera}$. Además, $T_{resolucion} > T_{frontera}$.
- Los tiempos de desarrollo de los itinerarios combinados I^{comb1} y I^{comb2} son

Tácticas temporales de negociación					
Escenario		Agenda	Tipo Itinerario	Tácticas	
Demandante	Cooperador			Demandante	Cooperador
E1	E3	ACIO	+Óptimos	L	L
E1	E3	ACIO	Un óptimo	C	L
E1	E3	ACIO	Resto	B	B
E1	E3	ACIB	+Básicos	L	L
E1	E3	ACIB	Un básico	C	L
E1	E3	ACIB	Resto	B	B
E1	E3	AI	Imposible		
E2	E4	ACIO	Imposible		
E2	E4	ACIB	Imposible		
E2	E4	AI	Normales	B	B

Tabla 6.4: Tácticas temporales óptimas para cada agente cuando el cooperador está en el escenario 3 o 4. Los acrónimos de la columna *Agenda* identifican los tipos posible de agenda y significan: *ACIO* indica que negociamos sobre una agenda completa con un itinerario combinado óptimo, *ACIB* indica que se negocia sobre una agenda completa en la que existe, al menos, un itinerario combinado básico (pero ningún óptimo), *AI* indica que la agenda es incompleta. La columna *tipo itinerario* identifica el itinerario combinado sobre el que se está negociando.

$T_{desarrollo}^{comb1}$ y $T_{desarrollo}^{comb2}$, donde, debido a las características de los itinerarios y al equipamiento disponible, $T_{desarrollo}^{comb1} > T_{desarrollo}^{comb2}$.

- La previsión de la evolución del incidente que el agente demandante ha estimado es errónea.
- El nivel de servicio actual de los enlaces frontera relacionados son: $I^P = C$, $I^{alt1} = C$, $I^{alt2} = B$.
- Además los rangos de los niveles de servicio en cada enlace para cada agente son:
 - Agente demandante
 - $\text{MaxLos}(I^P) = C$ y $\text{MinLos}(I^P) = A$
 - $\text{MaxLos}(I^{alt1}) = E$ y $\text{MinLos}(I^{alt1}) = C$
 - $\text{MaxLos}(I^{alt2}) = E$ y $\text{MinLos}(I^{alt2}) = B$
 - Agente cooperador
 - $\text{MaxLos}(I^P) = C$ y $\text{MinLos}(I^P) = B$
 - $\text{MaxLos}(I^{alt1}) = D$ y $\text{MinLos}(I^{alt1}) = C$

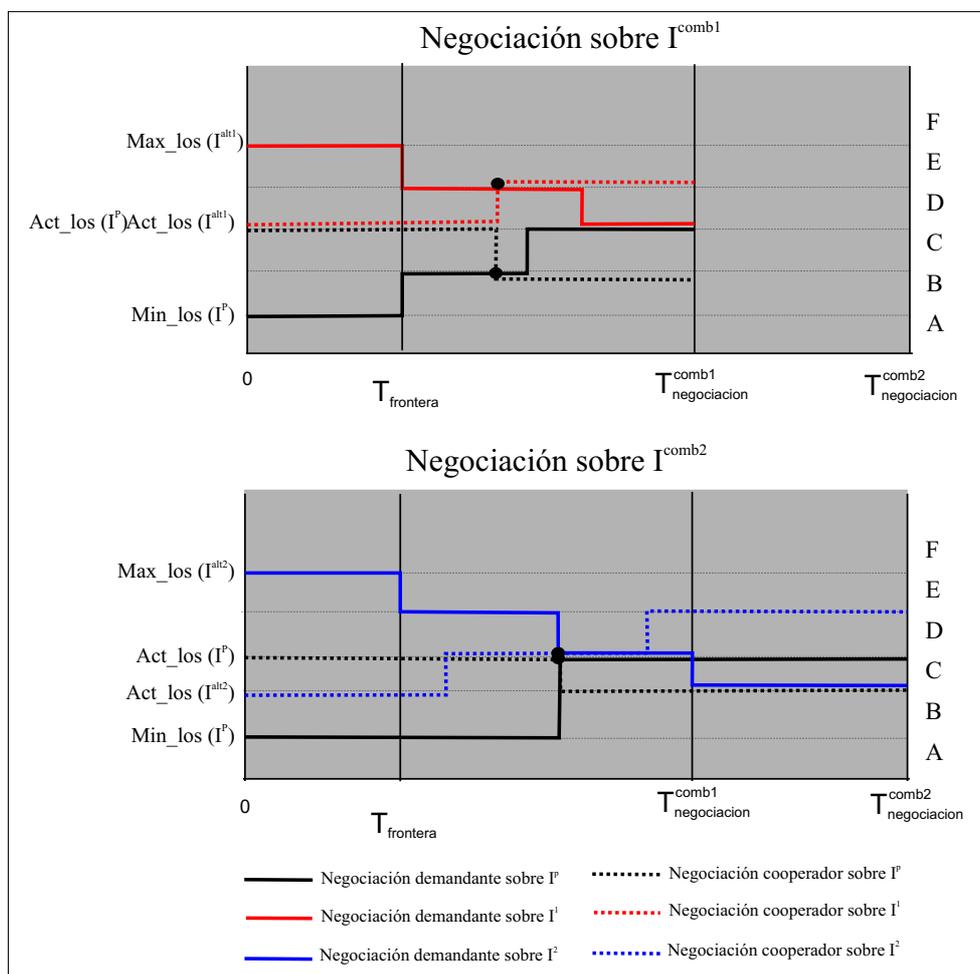


Figura 6.4: Ejemplo de tácticas de negociación iniciales. En la figura se observa como evolucionaría la negociación sobre los dos itinerarios alternativos si no se contemplaran eventos de negociación. Para ambas negociaciones se utilizan tácticas lineales que se representan de forma escalonada debido al carácter discreto de los valores de los rangos. La negociación se ha separado en dos figuras para mejorar la comprensión y visualización. Asimismo, en cada figura se han separado mínimamente (únicamente con efectos de visualización de este ejemplo) la evolución de los valores a negociar.

$$\circ \text{MaxLos}(I^{\text{alt2}}) = D \text{ y } \text{MinLos}(I^{\text{alt2}}) = B$$

Al iniciar la negociación, los agentes clasifican la agenda y los itinerarios combinados que la componen. Esto es, la agenda es completa con dos itinerarios combinados básicos. El agente *demandante* está en un escenario E1, de cooperación *conocida* y *optimista*, mientras que el agente *cooperador* está en un escenario E3, de cooperación *ciega* y *optimista*.

En el instante inicial de la negociación, $t = 0$, el agente demandante aplica, (siguiendo las tácticas presentadas en la tabla 6.4) para los dos itinerarios una táctica *Lineal*. El agente cooperador aplica (siguiendo también las tácticas presentadas en la tabla 6.4) la misma táctica: *Lineal*.

Los resultados de aplicar estas tácticas, sin tener en cuenta ningún evento de negociación, se observan en la figura 6.4.

Ahora bien, a lo largo del proceso de negociación se producen eventos que modifican este comportamiento (figura 6.5). Cuando se alcanza el instante de tiempo $T_{frontera}$ (punto *a*) no se ha alcanzado ningún acuerdo sobre los itinerarios combinados. Sin embargo, en este instante el agente cooperador modifica su escenario a *E1* y analiza la previsión realizada por el agente demandante, puesto que ya conoce cuáles son los efectos que el incidente produce sobre su red viaria. Como consecuencia, el agente cooperador modifica su táctica de negociación, que pasa a ser *Conceder*, ya que los problemas le afectan más de lo inicialmente previsto por el agente demandante (siguiendo las tácticas presentadas en la tabla 6.2). En esta situación, los agentes llegan a un acuerdo sobre los itinerarios que componen I^{comb1} (punto *b*). Este acuerdo produce que el agente demandante modifique sus tácticas de negociación, pasando los dos agentes a utilizar *Conceder*, ya que I^{comb2} es el único itinerario combinado básico existente. Esta aplicación provoca el acuerdo sobre el itinerario I^{comb2} (punto *c*), por lo que el protocolo acaba con éxito completo

6.6. Estrategias de Negociación

Las estrategias de negociación definen la secuencia de acciones que el agente va a desarrollar durante la ejecución del protocolo de negociación. Una estrategia de un agente *a* para un itinerario alternativo I^i se define como:

$$Est^a(I^i) = [Los_{ini}(I^i), Los_{tope}(I^i), t, tact]$$

donde $Los_{ini}(I^i)$ define el nivel de servicio que el agente *a* ofertará, en el instante inicial, para el enlace de frontera del itinerario I^i , $Los_{tope}(I^i)$ define el nivel de servicio tope que el agente *a* ofertará en el enlace de frontera, al menos, en el instante final de la negociación (identificado como *t*) y *tact* que define la táctica empleada en la generación de ofertas y contraofertas para ir desde los valores de inicio hasta los valores tope.

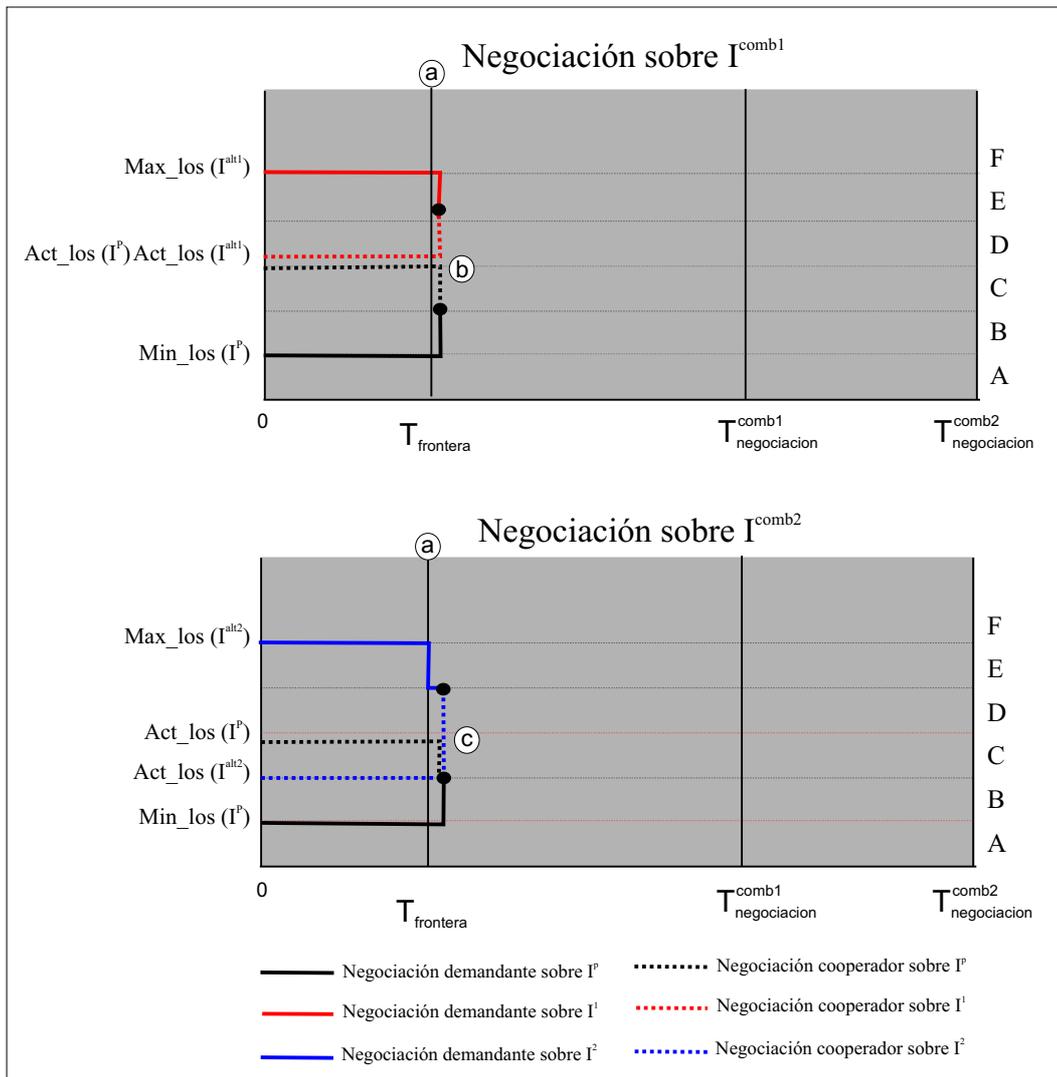


Figura 6.5: Ejemplo de las tácticas de negociación al considerar los eventos de negociación. En el punto *a* se supera $T_{frontera}$, por lo que el agente cooperador modifica su escenario, y, consecuentemente, las tácticas que desarrolla. Esto implica que se alcanza un acuerdo sobre I^{comb1} , esto es, sobre I^p e I^{alt1} (punto *b*). Este acuerdo produce que las tácticas de negociación sobre I^{comb2} se modifiquen de nuevo, alcanzandose el acuerdo en el punto *c*. La negociación se ha separado en dos figuras para mejorar la comprensión y visualización. Asimismo, en cada figura se han separado mínimamente (únicamente con efectos de visualización de este ejemplo) la evolución de los valores a negociar. Las tácticas desarrolladas se representan de forma escalonada debido al carácter discreto de los valores de los rangos.

6.6.1. Estrategias Óptimas de Negociación con Información Incompleta

Una estrategia óptima para un agente es aquella que permite alcanzar un acuerdo en la negociación de un servicio maximizando la utilidad del nivel de servicio de los

itinerarios que intervienen en la negociación. Por consiguiente, la estrategia define cómo y cuándo utilizar cada posible valor de nivel de servicio.

Estrategias Óptimas de Negociación para un Itinerario

El resultado de la negociación sobre un itinerario I^i depende de las estrategias de negociación que desarrollen los agentes. Como $T_{negociacion}^{comb}$ ($I^i \in I^{comb}$) es el mismo para los dos agentes, ambos saben que el agente opuesto ofrecerá, al menos, en $T_{negociacion}^{comb}$ su valor tope. Ahora bien ninguno de los agentes conoce el valor tope del agente opuesto.

Sin embargo, recordemos que el agente *demandante* tiene dos listas con los posibles niveles de servicio sobre los itinerarios I^p e I^{alt} , $Posibles_c(I^p)$ y $Posibles_c(I^{alt})$, con n y m valores respectivamente, y que el agente *cooperador* también tiene dos listas con los posibles niveles de servicio sobre los itinerarios I^p e I^{alt} , $Posibles_d(I^p)$ y $Posibles_d(I^{alt})$, con r y p valores respectivamente:

$$\begin{aligned} Posibles_c(I^p) &= \{(Los_1, \alpha_1), (Los_2, \alpha_2), \dots, (Los_n, \alpha_n)\} \text{ ordenada de mayor a menor} \\ Posibles_d(I^p) &= \{(Los_1, \gamma_1), (Los_2, \gamma_2), \dots, (Los_r, \gamma_r)\} \text{ ordenada de menor a mayor} \\ Posibles_c(I^{alt}) &= \{(Los_1, \beta_1), (Los_2, \beta_2), \dots, (Los_m, \beta_m)\} \text{ ordenada de menor a mayor} \\ Posibles_d(I^{alt}) &= \{(Los_1, \delta_1), (Los_2, \delta_2), \dots, (Los_p, \delta_p)\} \text{ ordenada de mayor a menor} \end{aligned}$$

Por lo tanto, cada uno de los agentes tiene un conjunto de estrategias posibles, dependiendo de sus creencias para cada uno de los itinerarios:

$$\blacksquare \quad d \quad \left\{ \begin{array}{l} Est_1^d(I^p) = [MinLos, Los_1^d(I^p), t, tact] \\ Est_2^d(I^p) = [MinLos, Los_2^d(I^p), t, tact] \\ \dots \\ Est_n^d(I^p) = [MinLos, Los_n^d(I^p), t, tact] \\ \\ Est_1^d(I^{alt}) = [MaxLos, Los_1^d(I^{alt}), t, tact] \\ Est_2^d(I^{alt}) = [MaxLos, Los_2^d(I^{alt}), t, tact] \\ \dots \\ Est_m^d(I^{alt}) = [MaxLos, Los_m^d(I^{alt}), t, tact] \end{array} \right.$$

$$\blacksquare c \left\{ \begin{array}{l} Est_1^c(I^p) = [ActLos, Los_1^c(I^p), t, tact] \\ Est_2^c(I^p) = [ActLos, Los_2^c(I^p), t, tact] \\ \dots \\ Est_r^c(I^p) = [ActLos, Los_r^c(I^p), t, tact] \\ \\ Est_1^c(I^{alt}) = [ActLos, Los_1^c(I^{alt}), t, tact] \\ Est_2^c(I^{alt}) = [ActLos, Los_2^c(I^{alt}), t, tact] \\ \dots \\ Est_p^c(I^{alt}) = [ActLos, Los_p^c(I^{alt}), t, tact] \end{array} \right.$$

donde $Los_l^a(I^i)$ identifica el valor de la creencia l del agente a en el enlace de frontera del itinerario I^i y $Est_l^a(I^i)$ es la estrategia que un agente a desarrollará, si ofrece como nivel de servicio para el itinerario I^i el elemento l de la lista $Posibles_a(I^i)$.

Sin embargo, es factible que alguna de las estrategias a desarrollar sea imposible, porque los valores de las creencias se encuentren fuera del rango real de acuerdo para el agente a . Así pues, el agente a elimina aquellas estrategias imposibles del conjunto de estrategias.

Definimos $U_a^{esp}(Est_l^a(I^i))$ como la utilidad que un agente a espera recibir si aplica la estrategia $Est_l^a(I^i)$. Utilizando el razonamiento realizado en el capítulo anterior, apartado 5.5.1, obtenemos que la utilidad esperada del agente demandante si aplica la estrategia l para el itinerario principal, $U_{esp}(Est_l^d(I^p))$ es:

$$U_{esp}(Est_l^d(I^p)) = (1 - (\alpha_l + \alpha_{l+1} + \dots + \alpha_n)) * U(opt) + (\alpha_l + \alpha_{l+1} + \dots + \alpha_n) * U(I^p)$$

donde si el agente demandante ejecuta la estrategia l tiene una probabilidad $(1 - (\alpha_l + \alpha_{l+1} + \dots + \alpha_n))$ de equivocarse y que esta estrategia acabe en una situación de conflicto, mientras que tiene una probabilidad $(\alpha_l + \alpha_{l+1} + \dots + \alpha_n)$ de acertar con esta estrategia. El resto de utilidades esperadas se obtiene de manera análoga.

Del conjunto de estrategias posibles, la estrategia óptima, $Est_o^a(I^i)$ para un agente a sobre un itinerario I^i es aquella que maximiza la utilidad esperada del conjunto de posibles estrategias a aplicar.

Estrategias Óptimas de Negociación para un Itinerario Combinado

La estrategia óptima de un agente a para un itinerario combinado, I^{comb} es la estrategia que utiliza las estrategias óptimas para los itinerarios que lo componen. Esto es, el itinerario donde ocurre el problema y el itinerario alternativo. Así pues:

$$Est_o^a(I^{comb}) = (Est_o^a(I^p), Est_o^a(I^{alt}))$$

6.7. Evaluación del Protocolo de Negociación

En este apartado se va a evaluar el protocolo de negociación. Para ello, al igual que la evaluación realizada en el apartado 5.6, se estudia la convergencia de las ofertas realizadas y la existencia de equilibrio en la negociación.

6.7.1. Análisis de la Convergencia

La convergencia de las ofertas sobre los itinerarios garantiza que, al menos, en el instante final de la negociación, el valor de la oferta que un agente a recibe es mayor o igual que la oferta que el agente podría realizar en el siguiente instante de tiempo.

La negociación sobre un itinerario I^{comb} converge si los niveles de servicio que componen una oferta individual sobre él, tanto para el itinerario principal I^p como para el alternativo I^{alt} , convergen.

Supongamos que los agentes d y c negocian sobre el desarrollo de un itinerario I^k , que pertenece al itinerario combinado I^{comb} . Sea $Los_d^{tope}(I^k)$ el primer valor de la lista $Posibles_c(I^k)$, que da lugar a las estrategias válidas del agente *demandante*. Análogamente, definimos $Los_c^{tope}(I^k)$ como el primer valor de la lista $Posibles_d(I^k)$ que da lugar a las estrategias válidas del agente *cooperador*.

El análisis de la convergencia de la estrategia óptima para el itinerario I^k se realiza de forma análoga a la realizada para el caso general expuesta en el capítulo anterior. Esto es:

caso a: Si la estrategia óptima para el agente *demandante* es $Est_o^d(I^k)$ definida como $Est_{toped}^d(I^k)$ y la estrategia óptima para el agente *cooperador* definida como $Est_o^c(I^k) = Est_{topec}^c(I^k)$ entonces la negociación sobre el itinerario I^k tiene garantizada la convergencia (es decir, converge con una probabilidad igual a 1) si el área de acuerdo es no nula⁴, es decir si:

$$[MinLos_a(I^k), MaxLos_a^{topea}(I^k)] \cap [MinLos_{\hat{a}}(I^k), MaxLos_{\hat{a}}^{tope\hat{a}}(I^k)] \neq \emptyset$$

caso b: Si la estrategia óptima para el agente *demandante* es $Est_o^d(I^k)$ definida como $Est_{toped+i}^d(I^k)$ y la estrategia óptima para el agente *cooperador* $Est_o^c(I^k)$ definida como $Est_{topec+l}^c(I^k)$ entonces el protocolo converge con una probabilidad igual a:

⁴Esto es debido a que los agentes ofertan sus valores topes, al menos, en el último instante de negociación de cada itinerario.

$$(\alpha_{toped+i} + \alpha_{toped+i+1} + \dots + \alpha_n) * (\beta_{topec+l} + \beta_{topec+l+1} + \dots + \beta_m)$$

Por lo tanto, la negociación sobre el itinerario combinado I^{comb} , compuesto por I^p e I^{alt} , converge si, y solo si, la negociación de los itinerarios que lo componen convergen antes de $T_{negociacion}^{comb}$.

6.7.2. Equilibrio de la Negociación

Este entorno, al igual que en el protocolo del capítulo 5, es un entorno de negociación de información incompleta con memoria perfecta. La información incompleta se debe a que los agentes desconocen los valores tope de los niveles de servicio que el agente oponente está dispuesto a redireccionar por cada uno de los itinerarios, si bien cada agente tiene una lista de creencias al respecto. La memoria es perfecta ya que los agentes si conocen las ofertas realizadas durante todo el protocolo de negociación.

Para evaluar el equilibrio de la negociación se vuelve a utilizar el concepto de equilibrio secuencial (ver capítulo 3.3.2). El equilibrio secuencial en un juego extensivo se basa en tres conceptos clave: *valoración*, *racionalidad secuencial* y *consistencia*.

Definimos una *valoración* como un par (σ, μ) donde σ es la estrategia óptima, Est_o^a , y μ es la función que asigna a cada posible estado de información del agente, una probabilidad. Esto es, μ proporciona los valores de probabilidad incluidos en las listas $Posibles_a(I^i)$. Recordemos que una negociación es secuencialmente racional si, para cada uno de los posibles estados de información de un agente, la estrategia de un agente es la mejor respuesta a las estrategias del otro agente.

El agente d inicia la negociación y selecciona una estrategia inicial, basada en la que cree óptima. La estrategia seleccionada es una de las n posibles estrategias que el agente d puede aplicar y se basa en la estrategia del oponente (ya que a pesar que d no conoce la estrategia concreta del agente c , si tiene un conjunto de creencias sobre ellas). La estrategia seleccionada, Est_o^d , es la que le proporciona la máxima utilidad esperada. Así pues, el agente d utiliza Est_o^d para generar la siguiente oferta. Esta estrategia se mantiene mientras no se produzca ningún evento de negociación.

Cuando el agente c recibe la oferta, no conoce la estrategia que el agente d está desarrollando, pero al igual que el agente d , el agente c tiene un conjunto de creencias acerca de las posibles estrategias de d . Del conjunto de l posibles estrategias, c selecciona aquella que le proporciona la mayor utilidad esperada, es decir, selecciona Est_o^c , que es la que utiliza desde ese momento hasta el siguiente evento de negociación.

La valoración (σ, μ) es secuencialmente racional ya que los agentes utilizan sus estrategias óptimas, basadas en las creencias sobre el agente opuesto, a lo largo de toda la negociación para determinar el valor de la siguiente oferta

La segunda condición para obtener el equilibrio se basa en la consistencia de la valoración. La consistencia relaciona las creencias de los agentes con las estrategias desarrolladas en cada uno de los instantes de la negociación. La valoración (σ, μ) es consistente ya que μ es la función que asigna la probabilidad a cada una de las posibles estrategias y la estrategia seleccionada en cada situación es la estrategia óptima. Es decir, no existe ninguna creencia que permita obtener un mejor resultado que la creencia que genera la estrategia óptima.

Por lo tanto, el protocolo está en equilibrio secuencial.

6.8. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una adaptación del protocolo de negociación multiservicio propuesto en el capítulo 5. El protocolo se ha adaptado en el dominio de la gestión y control del tráfico interurbano. En concreto, a la negociación para el desarrollo de itinerarios alternativos, que permitan redireccionar el flujo de tráfico de un itinerario a otro, con el fin de evitar los problemas producidos por un incidente.

La contribución, expuesta en este capítulo, se centra en la fase de implementación de los itinerarios alternativos y concretamente, en el desarrollo de un protocolo que permita la negociación automática sobre cuáles son los itinerarios alternativos que deben implementarse y cómo debe realizarse esta implementación, es decir, el volumen de tráfico que debe alcanzarse, en cada uno de ellos, hasta lograr el nivel de servicio acordado.

Para realizar la adaptación ha sido necesario analizar el entorno del tráfico interurbano, estudiar sus elementos y realizar una caracterización del problema.

Los resultados de este estudio han determinado que el protocolo multiservicio puede adaptarse perfectamente a la negociación de itinerarios alternativos, si bien hay que modificar algunos aspectos del protocolo:

- La agenda de negociación, ya que en este entorno el itinerario que presenta problemas forma parte de la agenda.
- El contenido de las ofertas y contraofertas.

- Las posibles situaciones de conflicto y las consecuencias de un conflicto individual sobre un itinerario o sobre la negociación en general.
- Las funciones de utilidad que permiten valorar el contenido de las ofertas recibidas

La determinación del parámetro calidad de servicio RQI , que relaciona el tiempo de recorrido del itinerario donde se produce el incidente con el itinerario alternativo, ha permitido clasificar los itinerarios. Esta clasificación de itinerarios se ha realizado mediante el análisis del parámetro calidad de servicio que permite relacionar el tiempo necesario para recorrer el itinerario alternativo con respecto al tiempo necesario en recorrer el itinerario principal donde se produce el incidente.

La implementación secuencial de los itinerarios combinados ha implicado la identificación del conjunto de escenarios posibles en los que cualquiera de los agentes puede encontrarse a lo largo de todo el protocolo. Los escenarios identificados se corresponden con los identificados en el capítulo anterior. Esta correspondencia ha permitido mantener las estrategias que permitan determinar cuáles son las tácticas adecuadas para cada una de las situaciones.

Al igual que el protocolo de negociación mutiservicio, esta adaptación en el marco de la negociación de itinerarios alternativos presenta un equilibrio secuencial. Además, las ofertas realizadas convergen hacia un acuerdo siempre que exista un área real de acuerdo no nula.

El proceso de adaptación del protocolo mutiservicio al dominio de la negociación de itinerarios alternativos ha llevado más trabajo del inicialmente esperado. El protocolo mutiservicio genérico define y describe todos los elementos necesarios para la negociación y la adaptación de algunos de sus elementos (agenda, ofertas, relaciones entre itinerarios) no ha presentado dificultades. Sin embargo, existen otros elementos que han sido más complicados de adaptar: 1) la identificación de los recursos y servicios en el marco de los itinerarios (itinerarios e itinerarios combinados) ha resultado más complicada de lo inicialmente previsto; 2) la utilización de los niveles de servicio, cuyos valores son discretos, ha hecho necesario la creación de una función específica, que permita su cuantificación, para ser utilizados en la función de utilidad; y 3) ha sido necesario comprobar que el conjunto posible de situaciones que se pueden producir a lo largo del proceso de negociación, es decir, los escenarios, se mantenían iguales que los del protocolo mutiservicio.

La adaptación del protocolo de negociación al dominio del tráfico interurbano presenta una alternativa para la negociación automática para la activación de itinerarios alternativos en tiempo real. Sin embargo, esta adaptación, para poder verse

implementada, requiere de un sistema multiagente para la gestión del tráfico donde cada uno de los centros de gestión de tráfico tenga un agente que pueda ejecutar los roles de demandante y cooperador. Una propuesta de sistema multiagente para la gestión de tráfico frente a incidentes se propone en el siguiente capítulo.

Capítulo 7

Un Entorno Multiagente para la Gestión del Tráfico

En este capítulo se presenta un sistema multiagente para la gestión de tráfico interurbano frente a incidentes meteorológicos. El objetivo del sistema es prestar soporte a los operadores encargados de la gestión del tráfico, cuando se producen problemas meteorológicos en la red viaria. Este soporte se centra en la monitorización de parámetros meteorológicos y en la aplicación de estrategias basadas en la activación de planes de gestión de tráfico.

En primer lugar se ha realizado el modelo de conocimiento que permite representar la información del entorno del dominio de tráfico interurbano. Posteriormente, se ha diseñado el sistema multiagente, desarrollando diferentes modelos: organización, agentes, interacciones y entorno. Una vez diseñado el sistema se presentan las estrategias de gestión dinámicas propuestas y por último, se presenta la implementación del sistema.

7.1. Introducción

Los protocolos para el desarrollo de estrategias de gestión y control de tráfico son difíciles de implementar cuando se producen incidentes en la red viaria. Estos incidentes modifican el comportamiento habitual de los vehículos, por lo que la gestión del tráfico bajo estas nuevas condiciones es complicada. Estas dificultades se deben a diversas razones [TF05]:

- Extensas y diversas redes viarias a gestionar. En condiciones normales de circulación, la gestión se suele centrar en vías principales, ya que permiten absorber un mayor flujo de tráfico. Sin embargo, ante problemas de circulación severos, las vías secundarias también son consideradas a la hora de desarrollar estrategias de gestión.
- Los equipos de captación de información de tráfico se encuentran situados a grandes distancias unos de otros y generalmente en vías principales. Estas distancias conllevan grandes periodos de integración de información.
- La información de tráfico está distribuida entre los diferentes centros de gestión de tráfico con competencias en la red viaria, esto implica que los operadores puede que sólo dispongan de información de una parte del problema.
- Existen diferentes organizaciones con competencias no sólo en la gestión del tráfico, sino también en otras tareas fundamentales para la resolución de problemas (mantenimiento de carreteras, protección civil, bomberos, etc.).

Así pues, las organizaciones encargadas de la gestión y control del tráfico necesitan herramientas de soporte para el desarrollo de estrategias de gestión. Estas herramientas, conocidas como Sistemas Avanzados de Gestión de Tráfico (ATMS, de sus siglas en inglés), prestan soporte a los operadores de tráfico tanto en la gestión diaria del tráfico como en la resolución de incidentes [McQ99]. En estas situaciones, el gestor de tráfico debe tomar decisiones que permitan solucionar o al menos paliar los problemas producidos por el incidente en el menor tiempo posible, ya que los efectos del incidente pueden llegar a crecer de forma exponencial en los primeros momentos de producirse, si los volúmenes de tráfico son significativos.

Cuando este conjunto de decisiones se estructuran de forma sistemática y se organizan en un conjunto de estrategias se obtienen lo que se denominan planes de gestión de Tráfico (PGT) (ver capítulo 1). Recordemos que un PGT se estructura en tres niveles: escenarios, medidas y acciones. Los escenarios definen el estado de la situación cuando ocurre un incidente. Dependiendo del escenario se activan un conjunto de medidas para solucionar el problema donde cada medida se compone de un conjunto de acciones para implementarla.

La cantidad de información que compone un PGT hace poco efectiva su utilización si no es mediante una herramienta informática [JTCS03]. Hasta la fecha se han realizado diferentes aproximaciones mediante la creación de prototipos basados en HTML y XML [JTCS03], [TGSC02]. Como se comentó en el capítulo 1, estos modelos no son los más adecuados ya que presentan problemas o limitaciones, como

la activación de estrategias dinámicas o la actualización de planes. Así pues, es necesario el desarrollo de nuevos prototipos que permitan solventar estos problemas y enlazar la ejecución de los PGT con el estado de la circulación en tiempo real.

El prototipo multiagente, que se presenta en este capítulo, ofrece soporte a los operadores de tráfico en la activación de planes de gestión de tráfico. Este soporte se centra en: 1) la determinación del escenario actual en el que se encuentra la red viaria cuando se ha producido un incidente meteorológico, 2) la ejecución de las medidas necesarias, tanto estáticas como dinámicas, definidas por el escenario actual y 3) la coordinación con otros centros de gestión para el desarrollo de itinerarios alternativos coordinados.

Para el desarrollo del prototipo multiagente, primero se ha desarrollado el modelo de conocimiento, utilizando ontologías y el modelo de referencia de contenido de JADE (ver apartado 2.6.1), cada una de ellas para un subdominio concreto del entorno. El conjunto de estas ontologías forma una ontología común, requisito esencial para el desarrollo de los sistemas multiagentes [Mas04]. En el diseño del sistema se ha utilizado la metodología Ingenias [Góm02], que permite diseñar sistemas multiagente mediante la aplicación de meta-modelos y para su implementación se ha utilizado la plataforma JADE [BPR01].

7.2. Modelo de Conocimiento

El funcionamiento de los sistemas multiagente (SMA), se fundamenta en la coordinación y/o cooperación de los agentes que lo forman. Para que esto pueda producirse es necesario definir los modos y mecanismos para que los agentes puedan comunicarse entre sí. La plataforma JADE, utilizada para la implementación del sistema, incorpora un conjunto de mecanismos, basados en el estándar FIPA [FIP02], para la comunicación. Ahora bien, además de estos mecanismos, es necesario definir una ontología común que describa completamente el dominio de aplicación del sistema y que permita a los agentes comprender el contenido de los mensajes que se intercambian.

Las ontologías modelan el conocimiento mediante la definición de todos los elementos que componen un dominio de aplicación. Los elementos son expresados utilizando conceptos, relaciones y reglas. Estas últimas se aplican tanto sobre las propiedades de los conceptos como sobre las distintas asociaciones que se establecen entre ellos. Los modelos ontológicos no sólo modelan el comportamiento y las relaciones de los elementos dentro de un dominio, sino que también modelan las relaciones con elementos que pertenecen a otros dominios.

Así pues, para que el intercambio de información entre dos elementos cualesquiera sea correcto, la información que se transmite debe ser conocida y entendida por ambos. Esto es, debe existir una definición común y pública de todos los elementos que pueden formar parte de esta información.

En el dominio del tráfico interurbano, con un entorno claramente distribuido, el desarrollo de servicios y sistemas avanzados necesita integrar y compartir información de tráfico. Esta información no es solamente fundamental en las aplicaciones encargadas de detectar el estado del tráfico y predecir su evolución, sino también en cualquier servicio que necesite el intercambio de información como soporte básico.

A continuación se presentan las ontologías desarrolladas como soporte del modelo de conocimiento general del dominio del tráfico, por lo que puede servir como base para otros sistemas.

7.2.1. Dominio del Tráfico Interurbano

La ontología que modela el dominio del tráfico interurbano está compuesta por diferentes subdominios (carretera, comportamiento del tráfico, equipamiento y planes de gestión) con el objeto de identificar, clasificar y especificar los diferentes elementos del dominio del tráfico interurbano y sus relaciones.

Dominio de la carretera

Este subdominio describe las características topológicas de las redes viarias interurbanas. Se compone de los siguientes conceptos:

- *Carretera*: representa un camino entre un origen y un destino. Se compone de un conjunto de segmentos y enlaces. Todos y cada uno de los elementos que pertenecen a la carretera son necesarios para ir desde el origen al destino.
- *Itinerario*: al igual que carretera, un itinerario representa un camino entre un origen y un destino, compuesto por segmentos y enlaces que pueden pertenecer a distintas carreteras. Todos y cada uno de los elementos que pertenecen a un itinerario son necesarios para poder ir desde el origen hasta el destino.
- *Segmentos*: representan secciones de un solo sentido con las mismas características: número de carriles, ancho de la calzada, arcenes, etc.
- *Punto*: un punto define una localización exacta dentro de un segmento.

- *Área*: un área define un conjunto de segmentos y enlaces. A diferencia de lo que ocurre con las carreteras y los itinerarios, en este caso no existe continuidad en todos sus elementos.
- *Enlaces*: representan las zonas de la carretera donde se conectan dos o más segmentos. Los enlaces pueden subclasificarse en:
 - *Entrada*: enlaces de entrada a la red modelada.
 - *Salidas*: enlaces de salida de la red modelada.
 - *Bifurcaciones*: representan ramificaciones de un segmento en dos o más segmentos.
 - *Uniones*: enlaces donde dos o más segmentos confluyen en un único segmento.
 - *Acuerdos*: representan enlaces donde se unen segmentos de diferentes características.
 - *Trenzados*: representan enlaces de carretera donde los flujos de tráfico se cruzan entre sí. Por ejemplo, áreas en las que la circulación se ve afectada por los movimientos de entrada y salida.

La figura 7.1 presenta una sección de una red viaria en la que se muestran los diferentes componentes de la red.

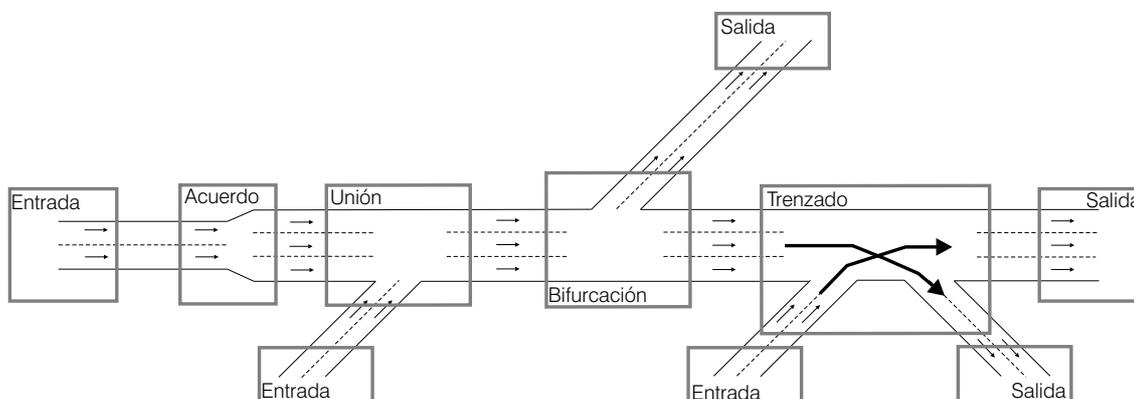


Figura 7.1: Ejemplo de una sección de carretera con los objetos que la componen.

Dominio de comportamiento del tráfico

El segundo subdominio de la ontología está enfocado a definir el comportamiento del tráfico. En este subdominio se describen los parámetros que modelan el com-

portamiento y sus relaciones. Se clasifica en dos grandes grupos: los parámetros de tráfico y los parámetros meteorológicos.

Los parámetros de tráfico son:

- *Volumen*: número total de vehículos en una sección o carril durante un determinado intervalo de tiempo (anual, diario, etc.).
- *Velocidad*: velocidad de los vehículos que circulan por una sección. La velocidad se clasifica en:
 - *Velocidad media*, que corresponde a la media de las velocidades de los vehículos que circulan por un segmento en un periodo de tiempo determinado.
 - *Velocidad instantánea*, que identifica la velocidad de un vehículo individual en un punto concreto.
- *Densidad*: número de vehículos que hay en una sección de una determinada longitud en un instante dado.

Además, existen otros parámetros como: la distancia entre vehículos, longitud de colas, etc.

Los parámetros meteorológicos son:

- *Visibilidad*: indica la distancia a la que se puede distinguir un obstáculo sobre la carretera. Sirve para determinar la distancia de seguridad recomendada entre los vehículos, así como la velocidad máxima a la que pueden circular.
- *Superficie* de la calzada: identifica el estado que tiene la calzada en un instante de tiempo y afecta al grado de adherencia de los vehículos a la calzada.
- *Precipitaciones*: define el grado de precipitaciones sobre la calzada. Incluye tanto precipitaciones en forma de lluvia como de nieve, y su volumen. Su valor afecta directamente a los parámetros de visibilidad y estado de la calzada.
- *Viento*: define la velocidad del viento en una determinada área. Puede modificar las trayectorias de los vehículos. Las características de este parámetro hace que solo se determine la velocidad y no su dirección.

El último parámetro de este subdominio define cualitativamente el estado del tráfico:

- *Nivel de servicio(LoS)*: valor cualitativo que identifica la libertad de maniobra de los conductores en la circulación. Su valor está influenciado tanto por los parámetros de tráfico como por los meteorológicos. Por ejemplo, la Dirección General de Tráfico (DGT) define 4 niveles de servicio para vialidad invernal: 1) *verde* donde ha comenzado a nevar y aunque el estado de la calzada no se ve afectado, hay que extremar las precauciones, 2) *amarillo* en el que las nevadas continúan y la calzada empieza a cubrirse de nieve, 3) *rojo* en el que la calzada se encuentra completamente cubierta de nieve por lo que la circulación solo es posible con el uso de cadenas o neumáticos especiales y 4) *negro* en el que la calzada se encuentra intransitable para cualquier tipo de vehículo.

Dominio del equipamiento

A continuación se presenta el subdominio de equipamiento. Este dominio está enfocado a describir el equipamiento básico disponible a lo largo de las redes viarias (ver figura 7.2):

- *Estaciones de toma de datos (ETD)*: este equipamiento es el encargado de recoger la información de la carretera y transmitirla al centro de gestión de tráfico. Dependiendo del tipo de información que proporcionen, las estaciones se pueden clasificar en:
 - *Estaciones de captura de datos de tráfico*: encargadas de proporcionar información acerca de parámetros del tráfico (velocidad, intensidad, etc.).
 - *Estaciones Meteorológicas*: encargadas de proporcionar información de los parámetros climatológicos.
- *CCTV*: el Circuito Cerrado de Televisión permite la visualización de imágenes de la carretera en tiempo real. Estos sistemas son utilizados, por los operadores de tráfico, para supervisar el estado del tráfico.
- *Postes S.O.S*: estos teléfonos están instalados en las carreteras principales y están conectados directamente con el centro de gestión de tráfico. Permiten la comunicación directa de los conductores con los operadores de tráfico.
- *Señalización variable*: este tipo de equipamientos permite la modificación de la señalización existente en la red viaria. Dependiendo del tipo de mensaje que sean capaces de presentar, las señales variables se clasifican en:
 - *Iconos*: únicamente permiten la presentación de pictogramas.

- *Banderolas*: permiten mostrar un pictograma situado a la derecha o izquierda de unas líneas de texto.
- *PMV*: los Paneles de Mensaje Variable permiten presentar dos pictogramas y, entre ellos, un mensaje de texto.
- *Texto*: este tipo de señales sólo permiten mostrar texto.

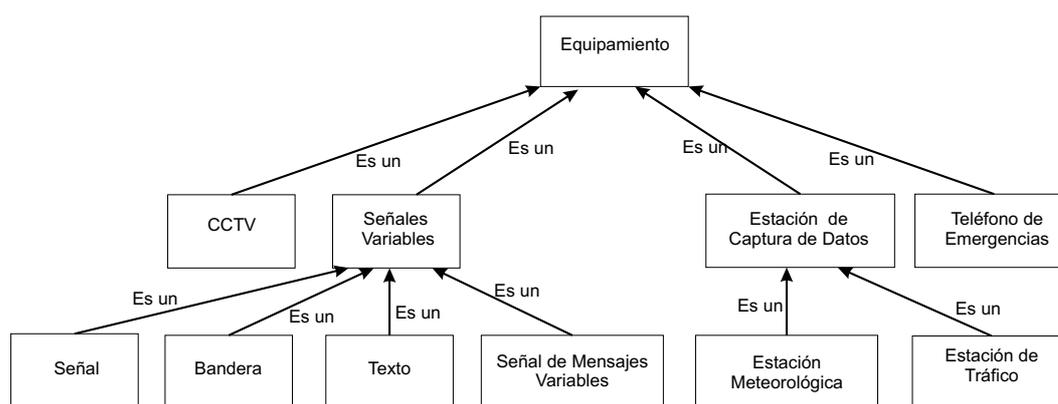


Figura 7.2: Conceptos del subdominio de equipamiento.

Dominio de Planes de Gestión de Tráfico

Este subdominio se encarga de modelar los elementos que componen los planes de gestión de tráfico y las incidencias que se puedan producir en la red viaria.

- *Incidente*: identifica un problema producido en la red viaria. Un incidente es lo suficientemente importante como para modificar el comportamiento del flujo del tráfico. El grado de afección del incidente al tráfico viene definido por la severidad.
- *Severidad*: define la gravedad del incidente. Desde el punto de vista de la gestión del tráfico, la severidad se mide en función del porcentaje que el incidente reduce la capacidad de la vía donde ocurre.
- *Escenario*: un escenario define la situación actual del tráfico en el área de influencia del incidente. El escenario es determinado en función del tipo de incidente que lo produce (localización, duración y severidad) y de cómo este afecta al tráfico (incremento de densidad, *LoS*, cortes de carretera, etc.).

- *Medidas*: representan el conjunto de procedimientos que deben ser ejecutados cuando ocurre un incidente. Las medidas se clasifican en dos grupos: 1) las internas son aquellas que un centro de gestión de tráfico puede implementar por sí mismo; y 2) externas que precisan de la colaboración de otros organismos para su implementación. Una medida se compone de un conjunto de acciones.
- *Acciones*: que definen las actividades independientes que son necesarias para poder desarrollar una medida.
- *Actor*: identifica las organizaciones responsables de realizar alguna acción perteneciente a alguna medida. Si la medida es interna, todas las acciones son desarrolladas por el mismo actor, que ejecuta el plan. Si por el contrario la medida es externa, el actor no identifica solamente el organismo encargado de la gestión, sino que también define la manera de comunicarse y de realizar la petición de implementación de la acción.

7.3. Diseño del Sistema

El diseño de un sistema multiagente debe proporcionar los modelos y métodos que describen los conceptos claves del sistema a implementar [SP04], [Bea98]. Así pues, el diseño debe:

1. Identificar el proceso de desarrollo y ejecución de los agentes tanto individualmente como en conjunto.
2. Definir cómo se tratan las situaciones imprevistas.
3. Identificar cuales son los elementos que permiten al agente tomar las decisiones que permitan lograr objetivos individuales.
4. Como tratar la coordinación entre los agentes que componen el sistema y los agentes externos a él.

La metodología de diseño utilizada ha sido *Ingenias* [Góm02]. Esta metodología concibe el SMA como la representación computacional de un conjunto de modelos. Cada uno de estos modelos muestra una visión parcial del sistema: los agentes que lo componen, las interacciones que existen entre ellos, cómo se organizan para proporcionar la funcionalidad del sistema, qué información es relevante en el dominio y cómo es el entorno en el que se ubica el sistema a desarrollar. La especificación de los modelos se realiza mediante la utilización de *meta-modelos*. Un meta-modelo es

una representación de los tipos de entidades que pueden existir en un modelo, sus relaciones y restricciones de aplicación. Los modelos desarrollados son: el modelo de organización, el modelo de agentes, el modelo de interacciones y el modelo del entorno.

7.3.1. Modelo de Organización

El modelo de organización define el marco en el que el sistema multiagente existe. En él se describe la estructura de la organización, la funcionalidad y las relaciones sociales entre los agentes. En este modelo también se define la arquitectura del sistema y los diferentes agentes que lo componen.

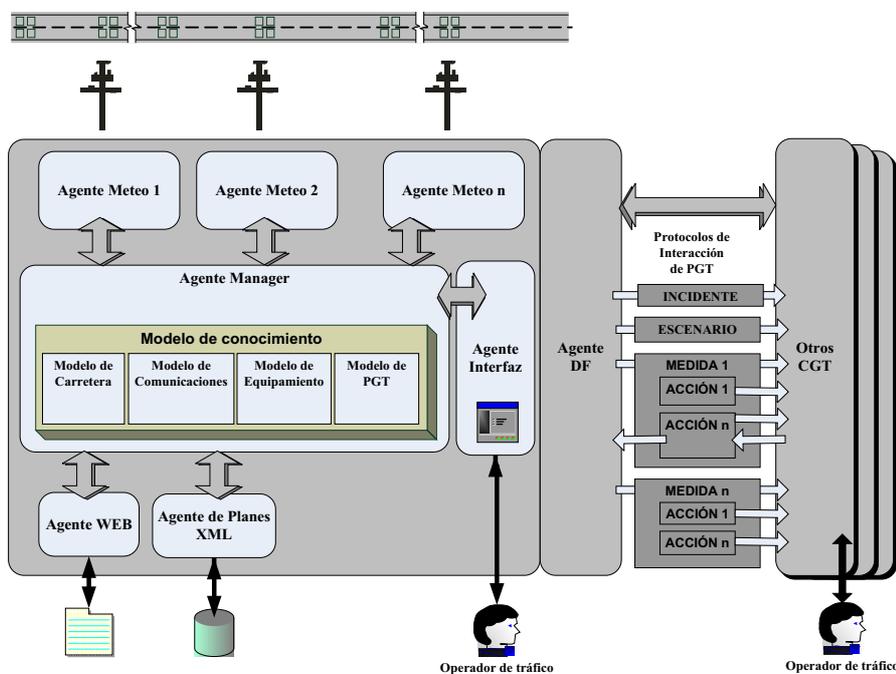


Figura 7.3: Arquitectura del sistema.

El sistema está compuesto por una única organización: el centro de control de tráfico. La organización se compone de los siguientes agentes: Meteo, Manager, Plan XML, Web, Interfaz y DF. En el sistema, sólo existe una única instancia de cada agente, a excepción del agente meteo, del que existe una instancia para cada una de las estaciones meteorológicas que existan en el entorno. La figura 7.3 presenta la arquitectura del sistema.

La principal actividad del sistema es la gestión y control del tráfico frente a

incidentes meteorológicos. Esta actividad general se subdivide en: detectar incidentes, determinar escenario, implementar medidas y activar acciones. Además, cada una de estas actividades se descompone en otras subactividades, que se describen posteriormente, para cada uno de los agentes, en sus correspondientes modelos.

Así pues, el sistema se descompone en cuatro grupos de acuerdo con la descomposición de objetivos, actividades y tareas (figura 7.4):

- El primer grupo, formado por el agente *manager* y todos los agentes *meteo*, se encarga de la identificación de incidentes y de la determinación del escenario actual que produce el incidente. El responsable de esta tarea es el agente *manager* y para realizarla necesita la información proporcionada por los diferentes agentes *meteo* distribuidos a lo largo de la red viaria.
- El segundo grupo está formado por el agente *plan XML*, el agente *manager* y el agente *interfaz*. El objetivo de este grupo es determinar el conjunto de medidas que deben implementarse en el escenario actual. Además, este grupo también se encarga de mostrar al operador este conjunto de medidas.
- El tercer grupo está formado únicamente por el agente *manager*. El objetivo es implementar las medidas y establecer el estado de las acciones que deben realizarse para cada medida.
- El último grupo formado por el agente *manager* y el *interfaz* gráfico que son los encargados de interactuar con el usuario y de mostrar en todo momento la situación del incidente y del plan de gestión de tráfico.

7.3.2. Modelo de Conocimiento del Sistema Multiagente

En este apartado se describe el modelo de conocimiento del sistema multiagente desarrollado. Para la descripción de la ontología se ha utilizado el lenguaje de comunicación de JADE, esto es, *ACL message*, donde la información es representada como una expresión de contenido formada por un lenguaje de contenido y un formato adecuado. Para poder trabajar con expresiones de contenido, JADE clasifica todos los posibles elementos que aparecen en el transcurso del acto de comunicación (descritos en el apartado 2.6.1).

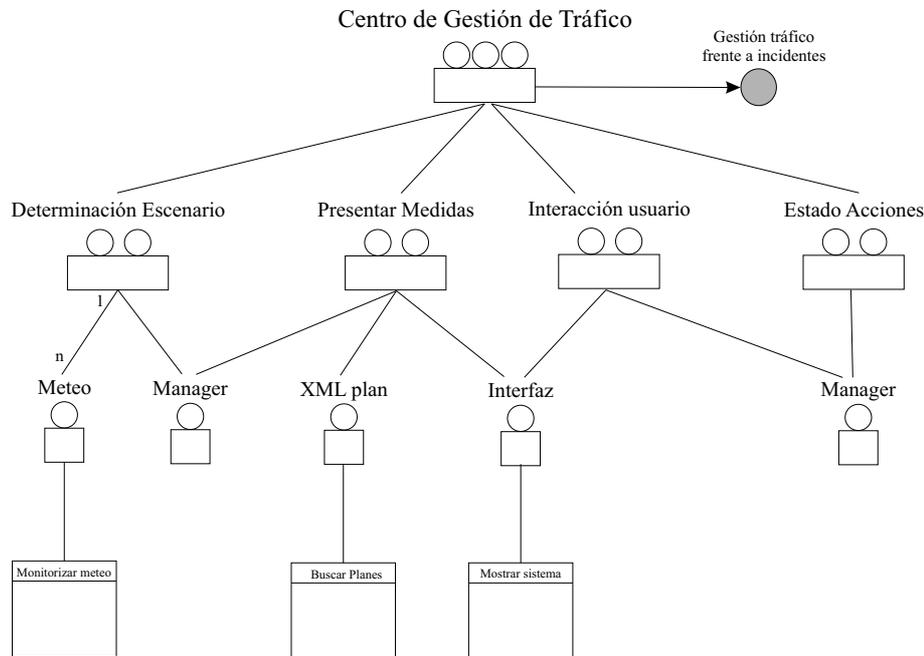


Figura 7.4: Modelo de organización.

Comunicación del sistema

Este subdominio de la ontología permite el funcionamiento cooperativo del sistema multiagente y presta soporte a los agentes del sistema para que puedan coordinarse y monitorizar el estado meteorológico.

Los conceptos identificados en este subdominio son:

- *Rango*: estructura de datos que contiene el rango posible de valores. Se compone de: rango máximo y rango mínimo.
- *Parámetro*: es un tipo de dato que define las características del parámetro proporcionado por las estaciones de captura de datos. Se compone de los siguientes elementos: *Tipo de parámetro*, que identifica el parámetro meteorológico, *Hora*, que determina el instante temporal en el que se ha realizado la medida que se encuentra en *Valor actual*.
- *Estación*: estación meteorológica situada en algún punto de la red de carreteras. Se compone de los siguientes elementos: *Identificador* de la estación, *Código* de carretera y *Pk*, que permiten identificar y situar a la estación en un punto concreto de la red viaria.

- *Mediciones*: es el conjunto de parámetros que una estación es capaz de medir.
- *Alarma*: información relacionada con una medida que ha sobrepasado los límites establecidos por el rango. Se compone de los siguientes elementos: *Tipo de parámetro* y *Valor*.

Las acciones que un agente puede solicitar que otro agente desarrolle son:

- *Actualiza rango*: acción que realizan los agentes meteorológicos a petición del agente gestor. Esta acción está restringida al agente gestor que pertenece al sistema. La acción sirve para delimitar los rangos de los parámetros a partir de los cuales se activan las alarmas. Se componen de: parámetro, sobre el que hay que actualizar el valor de la alarma y el rango de valores.
- *Envía dato*: acción que realiza un agente *meteo* a petición del agente *gestor*. La acción sirve para el envío de la información del valor actual de una determinada medida sin que se haya disparado una alarma.
- *Forzar señal*: acción realizada por el agente *manager* a petición del usuario del sistema (via interfaz gráfico). Esta acción permite fijar la información que se debe mostrar en un panel de mensaje variable determinado.
- *Validar escenario*: acción realizada por el agente *interfaz* a petición del agente *manager*. Cuando este último recibe una alarma por algún problema meteorológico, determina el posible escenario que debe ser validado por el usuario.
- *Mostrar plan*: esta acción es realizada por el agente *interfaz* a petición del *manager*. Una vez el escenario es validado, y el agente *manager* tiene el listado de medidas que deben implementarse, se las envía al agente interfaz para que se las muestre al usuario.
- *Mostrar señal*: acción realizada por el agente *interfaz* a petición del agente *manager*. Cuando se detecta un incidente, el agente *manager* determina la información que debe mostrarse en cada uno de los paneles, que se encuentran bajo la influencia del incidente.

Dominio de la negociación

En este subdominio se presentan los conceptos necesarios para implementar el protocolo de negociación desarrollado en el capítulo 6. Sólo se presentan aquellos elementos del protocolo de negociación que se consideran *públicos*. Es decir, que

forman parte del conocimiento de todos los agentes que intervienen en la negociación. Los elementos del conocimiento privado de cada uno de los agentes no se muestran en la ontología, ya que no forman parte del modelo de conocimiento del sistema.

Los conceptos existentes son:

- *Agenda*, que identifica el conjunto de itinerarios combinados sobre los que se va a negociar.
- *Enl_fr*, que identifica el enlace de frontera de un itinerario que une dos segmentos, donde cada uno de los segmentos pertenece a un centro de gestión de tráfico distinto.
- *Enl_frP*. Subclase de *enl_fr* que identifica el enlace de frontera que pertenece al itinerario principal donde se produce el incidente.
- *Itinerario Combinado*, se compone del enlace de frontera del itinerario donde se produce el incidente, I^p y el enlace de frontera del itinerario alternativo por el cual se va a redireccionar el tráfico, I^{alt} .
- *Oferta_I*, que describe el contenido de una oferta realizada sobre un itinerario combinado. Se compone de un par de valotres, uno para cada uno de los itinerarios que componen el itinerario combinado.
- *Oferta*, conjunto de ofertas individuales, *Oferta_I*, una para cada uno de los itinerarios combinados que componen la agenda.

Además, es importante destacar un conjunto de *primitivas*, esto es, entidades atómicas (strings, enteros, etc) como *OK*, *opt*, *opt out*, T_{max} , $T_{frontera}$, $T_{negociacion}$, *Calidad_itinerario* y *Tipo_itinerario*.

Relaciones Entre las Ontologías

A continuación se describen las relaciones entre los distintos dominios de la ontología propuesta, tanto los subdominios del sistema como los subdominios del tráfico rodado, que se muestran en la figura 7.5:

- *Utiliza* relaciona los elementos del subdominio de equipamiento necesarios para el desarrollo de una acción que pertenece a una medida del subdominio de planes de gestión de tráfico.

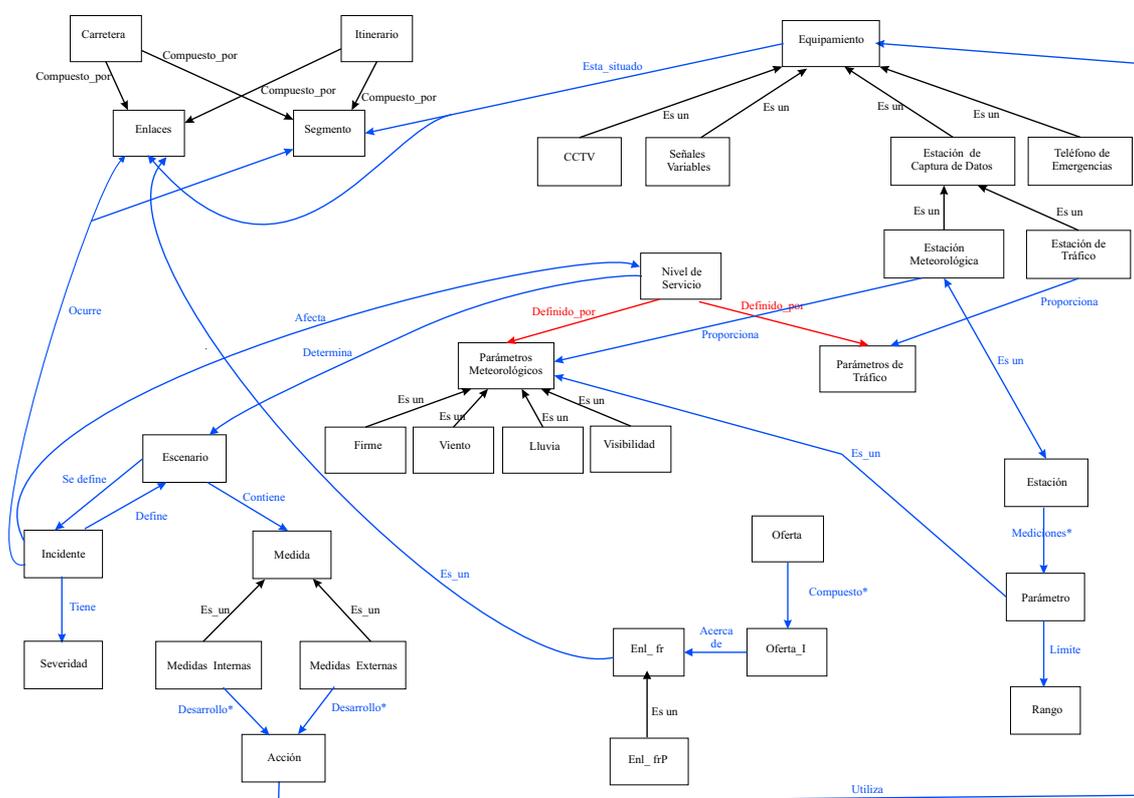


Figura 7.5: Relaciones entre los conceptos del modelo de conocimiento.

- *Esta_situado* identifica los segmentos o enlaces de la red viaria donde se encuentran situados los diferentes equipamientos.
- *Definido_por* relaciona el nivel de servicio existente en la red viaria mediante los parámetros proporcionados por las estaciones de toma de datos.
- El nivel de servicio permite *determinar* cuál es el escenario de activación de un PGT.
- *Ocurre* identifica el segmento o enlace donde se ha producido un incidente.
- Un incidente *afecta* al comportamiento del tráfico por lo que modifica el nivel de servicio de un segmento.
- Un enlace de frontera del subdominio de la negociación *es_una* especialización de un enlace del subdominio de la carretera.
- Una estación del subdominio de comunicación *es_una* especialización de la estación meteorológica del subdominio de equipamiento.

7.3.3. Modelo de Agentes

En este modelo se describen las características particulares de cada uno de los agentes. Esta descripción se centra fundamentalmente en la funcionalidad y en el diseño de control del agente:

- La funcionalidad estudia las responsabilidades del agente, identificando y definiendo las tareas y las acciones que es capaz de ejecutar así como cuáles son los objetivos que se compromete a alcanzar.
- El control del agente está enfocado al comportamiento, durante su ejecución, que permitirá el desarrollo de las tareas adecuadas para alcanzar los objetivos. El comportamiento está relacionado con el *estado mental* del agente, esto es, con los objetivos, creencias, hechos y compromisos que el agente haya adquirido [PS03].

Agente Meteo

Un agente *Meteo* se encarga de la monitorización de la evolución meteorológica. El agente monitoriza el área específica en la que se encuentra situada la estación meteorológica (a la que se encuentra asociado). Para ello, el sistema evalúa constantemente los valores de los sensores de la estación.

Dependiendo del tipo de estación y de los sensores que tenga, el agente puede detectar diferentes parámetros:

- Visibilidad y niveles de aire: temperatura, humedad, velocidad del viento.
- Estado de la superficie de la carretera: presencia de nieve y de hielo.

La tarea de estos agentes es detectar las variaciones significativas en los parámetros meteorológicos (ver figura 7.6). Estas variaciones suponen la aparición de un incidente en alguna sección de la carretera. El objetivo es identificar cuando se producen estos incidentes y comunicar la información al agente manager, para que el sistema pueda actuar en consecuencia.

El agente meteo dispone del modelo de conocimiento del sistema, que le permite interactuar con el resto de agentes, y además tiene parte del modelo de conocimiento de los parámetros del tráfico. En concreto el sistema conoce cuales son los distintos parámetros meteorológicos que afectan a la circulación.

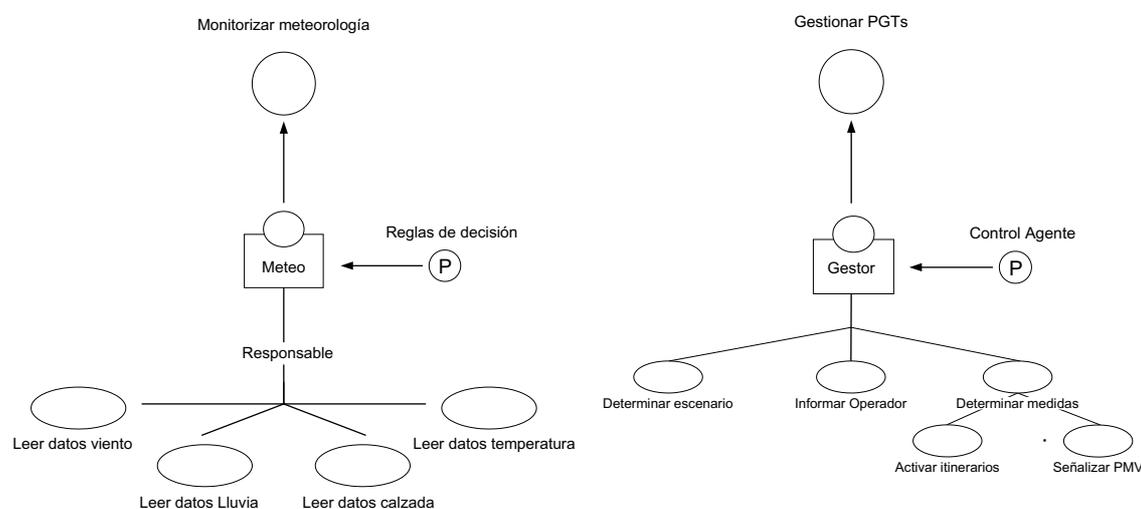


Figura 7.6: Modelo de tareas de los agentes Meteo y Manager.

Agente Manager

El objetivo principal del manager es proporcionar soporte a los operadores del tráfico en la implementación de estrategias de control y gestión de tráfico frente a incidentes meteorológicos. Las acciones que este agente realiza son: 1) determinar el escenario en el que se encuentra un incidente meteorológico comunicado por alguno de los agentes meteo, 2) informar al operador y 3) determinar el conjunto de medidas que hay que implementar para poder solucionar los problemas producidos por el incidente. Las medidas que un agente puede desarrollar se clasifican en medidas internas y externas. Como se ha definido en el apartado 7.2.1 las medidas internas las puede implementar el agente sin necesidad de coordinarse con otros centros de gestión, en cambio para la implementación de medidas externas necesita negociar con otros centros su puesta en marcha.

El agente manager contiene el modelo de conocimiento de tráfico y los recursos disponibles para la gestión de incidencias meteorológicas en la plataforma. Este conocimiento se compone de la red de carreteras bajo su gestión y las características de todos sus componentes, el equipamiento disponible en cada sección de la red y los planes de gestión de tráfico. Además, también dispone del modelo de comunicaciones del sistema.

El manager puede trabajar bajo dos roles: Demandante y Cooperador. En el primer rol, el incidente detectado se encuentra situado en una sección de carretera bajo su competencia y necesita la colaboración de otros centros gestores de tráfico para implementar alguna medida (por ejemplo la activación de un itinerario alternativo).

El agente bajo el rol de demandante es el encargado de iniciar la negociación con estos centros. En el segundo rol, el agente manager recibe una petición externa de otro centro de gestión de tráfico para la implementación de una medida. Como el incidente se ha producido en una sección de carretera fuera de la gestión del manager, éste no conoce el estado real ni del tráfico ni del incidente en área.

Agente de Planes XML

Este agente tiene acceso a la base de datos que contiene los PGTs almacenados en formato XML. El objetivo de este agente es proporcionar al agente manager el PGT y el conjunto de medidas que debe aplicar cuando aparece un incidente. Las acciones que realiza cuando recibe una petición del manager son: primero buscar si existe un PGT asociado con el incidente, (es decir, con sus características y con la sección de carretera donde ha ocurrido). Después, si existe un PGT, el agente devuelve al manager un mensaje con toda la información del PGT en formato XML. Por el contrario, si no existe plan asociado, el agente de planes le devuelve al agente manager un mensaje indicando que no existe ningún plan asociado a ese incidente.

Otra de las tareas que ejecuta el agente de planes es la estadística de las peticiones recibidas. Con esta información, el agente determina cuales son las áreas donde se producen más incidentes, y si para ellos existen o no planes de gestión de tráfico. Con esta información, el agente realiza informes que identifican zonas en las que se producen incidentes y no hay planes asociados.

Al igual que el agente manager, este agente necesita el modelo de conocimiento completo, esto es, tanto el dominio del tráfico, como el dominio del sistema.

Agente WEB

Este agente se encarga de traducir la información del incidente proporcionada por el Agente Manager al formato DATEX [Datex]. DATEX es un pre-estándar que se utiliza para el intercambio de información entre centros de control de tráfico. El objetivo de este agente es difundir, via WEB, la información de los incidentes detectados en la red viaria. El objetivo de este agente es informar a los proveedores de información de tráfico de la existencia de incidentes. Para alcanzar este objetivo, este agente realiza dos tareas, la primera, producir un mensaje DATEX, a partir de la información del incidente recibida del agente manager, y la segunda, distribuir el mensaje a todos los servidores.

Agente Interfaz

El agente interfaz se encarga de la presentación visual de los elementos que componen el sistema y de la interacción del mismo con el operador de tráfico. Los objetivos de este agente son:

- Presentar toda la información relativa con los planes de gestión de tráfico al usuario.
- Gestionar las comunicaciones entre el sistema y el operador de tráfico.

Para poder realizar estos objetivos el agente tiene un conjunto de tareas encomendadas. Por un lado, tiene tareas de representación gráfica: mostrar red, mostrar plan, señalar incidente, mostrar señales, etc. y por otro, tareas de interacción: validar escenario y forzar señal.

Agente DF

El agente DF es el suministrador del directorio de agentes y servicios en la plataforma, especificado por FIPA, y proporcionado por la herramienta JADE [Jad05]. El objetivo de este agente es proporcionar el servicio de páginas amarillas. Para ello, este agente proporciona a los agentes las siguientes tareas: registro, borrarse del registro y buscar servicios disponibles tanto en su misma plataforma como en otras plataformas multiagente.

7.3.4. Modelo de Interacciones

El modelo de interacciones se encarga del diseño y de la definición de los mecanismos de coordinación entre los agentes. En el modelo, no sólo se definen los métodos de comunicación y los protocolos de interacción, sino que también se determinan los agentes participantes, los responsables y la motivación de todos ellos dentro del protocolo de negociación.

Las interacciones del sistema SMA propuesto siguen los protocolos de interacción definidos por FIPA y su implementación se ha desarrollado utilizando las librerías de JADE [BPR01].

Las interacciones del sistema se clasifican en dos grupos: privadas y públicas. Las interacciones privadas son las interacciones internas entre los elementos que

componen el sistema y se clasifican a su vez en internas y externas. Las internas son utilizadas en las comunicaciones entre los agentes que componen el sistema. Por el contrario, las externas son realizadas vía el agente interfaz para realizar o recibir peticiones del usuario.

Las interacciones privadas son:

▪ Interacciones internas:

- *Registro Manager-DF*. Interacción realizada entre el agente *manager* y el agente *DF*. Esta interacción suscribe al agente *manager* en las páginas amarillas del sistema con el servicio *Gestión de Tráfico* y las propiedades del servicio son las carreteras que el *manager* tiene bajo su cargo. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *request protocol* de FIPA (figura 7.7).
- *Registro Meteo-DF*. Interacción entre un agente *Meteo* y el agente *DF*. En él, el agente *meteo* se registra en las páginas amarillas con el servicio monitorización meteorológica cuyos parámetros son el conjunto de parámetros que monitoriza. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *request protocol* de FIPA (figura 7.7).
- *Crear Alarma*. Interacción entre el agente *manager* y un agente *Meteo*. El agente *manager* se suscribe al agente *meteo* para que le indique cuando se alcanzan unos determinados valores en alguno de los parámetros que el *meteo* monitoriza. La suscripción se compone del parámetro meteorológico y del rango de valores posibles para lanzar la alarma. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *subscription protocol* de FIPA.
- *Medidas del Plan*. Interacción entre el agente *manager* y el agente *plan XML* para determinar el conjunto de medidas a implementar frente a un determinado incidente. El *manager* envía un mensaje al agente de *plan XML* con la información del incidente (código de carretera, punto kilométrico, parámetro meteorológico y su valor asociado) y el agente *plan XML* devuelve (si existe en la base de datos de planes) el conjunto de medidas para aplicar en ese incidente. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *request protocol* de FIPA.
- *InfoWeb*. Protocolo de interacción entre el *manager* y el agente *WEB*. El agente *manager* envía un mensaje al agente *Web* con la información de incidente para que sea distribuida por los diferentes servidores Webs. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *request protocol* de FIPA.

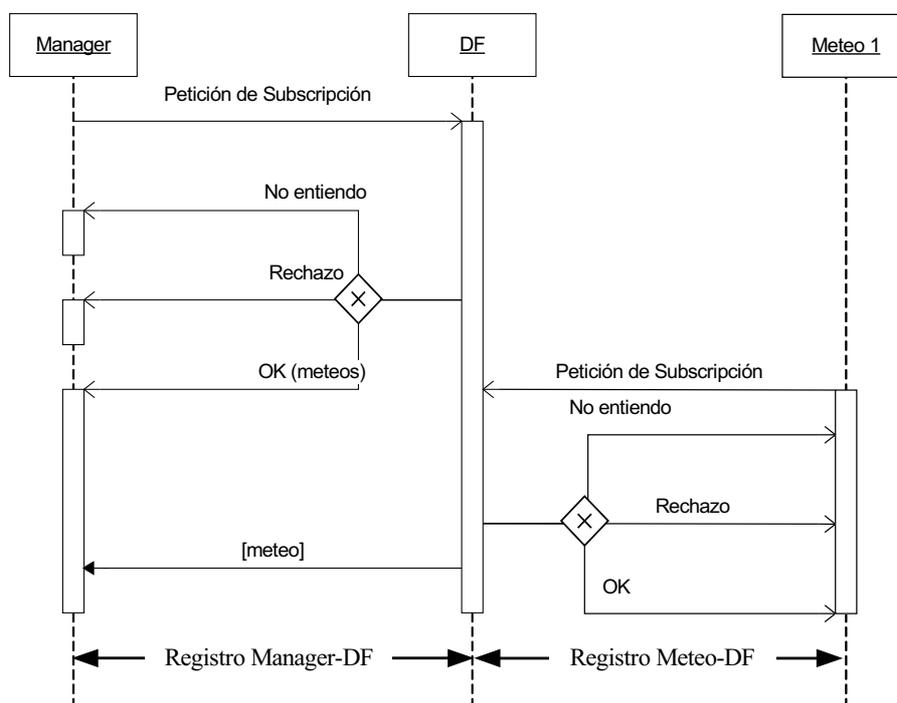


Figura 7.7: Protocolos de interacción para el registro del agente Manager y de un agente meteo.

■ Interacciones externas:

- *Validar escenario*. Interacción entre el agente *manager* y el usuario (operador de tráfico) vía el agente *interfaz*. El *manager* envía un mensaje con el posible escenario de la situación actual producida por el incidente. El agente *interfaz* muestra la información por pantalla y le envía al agente *manager* la contestación del usuario. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *query protocol* de FIPA.
- *Mostrar Plan*. Interacción entre el agente *manager* y el agente *interfaz*. En ella, el agente *manager* envía un mensaje para que el *interfaz* muestre por pantalla las medidas de tráfico que deben implementarse. El mensaje se compone del conjunto de las medidas. El diseño del protocolo está basado en protocolo estándar *request protocol* de FIPA.
- *Mostrar Señales*. Interacción entre el agente *manager* y el agente *interfaz*. El agente *manager* envía un mensaje con la información que el *interfaz* debe mostrar en cada una de las señales dinámicas que posee el sistema. El mensaje se compone del conjunto de las señales y de los posibles mensajes a mostrar en cada una de ellas. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *request protocol* de FIPA.

- *Forzar señal*. Interacción entre el agente *interfaz* y el *manager*. Esta interacción se utiliza cuando el usuario del sistema quiere forzar una señal (situar en ella un mensaje específico). El usuario a través del agente *interfaz* envía un mensaje al *manager* con la señal a forzar y el mensaje a mostrar en ella. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *request protocol* de FIPA.

Las interacciones públicas son las realizadas entre el sistema y otros agentes externos, (es decir, agentes que pertenecen a otras plataformas) para el desarrollo de medidas externas. Las interacciones públicas del sistema son:

- *Información meteo*. Interacción entre el agente *manager* y un agente externo que realiza una petición de información sobre el estado meteorológico de una zona. Un agente externo envía un mensaje requiriendo información sobre cierto parámetro meteorológico en un punto de la red viaria (código de carretera y punto kilométrico). Si el *manager* posee información relacionada se la envía como respuesta a la petición. Si por el contrario no tiene ninguna, responde con un mensaje vacío. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *request protocol* de FIPA.
- *Incidente*. Interacción entre el agente *manager* y los agentes externos con competencias en la gestión del tráfico de las redes viarias adyacentes. En ella, el *manager* envía un mensaje con la información del incidente y su posible evolución. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *query protocol* de FIPA y se puede apreciar en la imagen 7.8.
- *Implementar medida*. Interacción entre el agente *manager* y un agente externo que proporciona un servicio para implementar acciones de tráfico necesarias para la activación de una medida. En el protocolo, primero el agente *manager* envía un mensaje que contiene la información del incidente, la medida a activar y el conjunto de acciones que debe implementar el agente externo. El agente externo evalúa la petición realizada y envía la respuesta. La respuesta puede contener: 1) un mensaje de rechazo a implementar las acciones, 2) un mensaje en el que se indica que no se entiende el mensaje enviado y 3) una propuesta con la activación de las acciones. Cuando el agente *manager* recibe la respuesta, analiza el mensaje y si este contiene una propuesta de activación de acciones, la evalúa. Si esta evaluación es positiva, el *manager* envía un mensaje de aceptación. Entonces, ambos agentes empiezan a implementar las acciones. Si no hay ningún problema en su implementación, la medida es activada. Si por el contrario alguno de los agentes tiene algún problema, el agente *manager* no puede activar la medida. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *contract-net protocol* de FIPA. La figura 7.8 describe este protocolo.

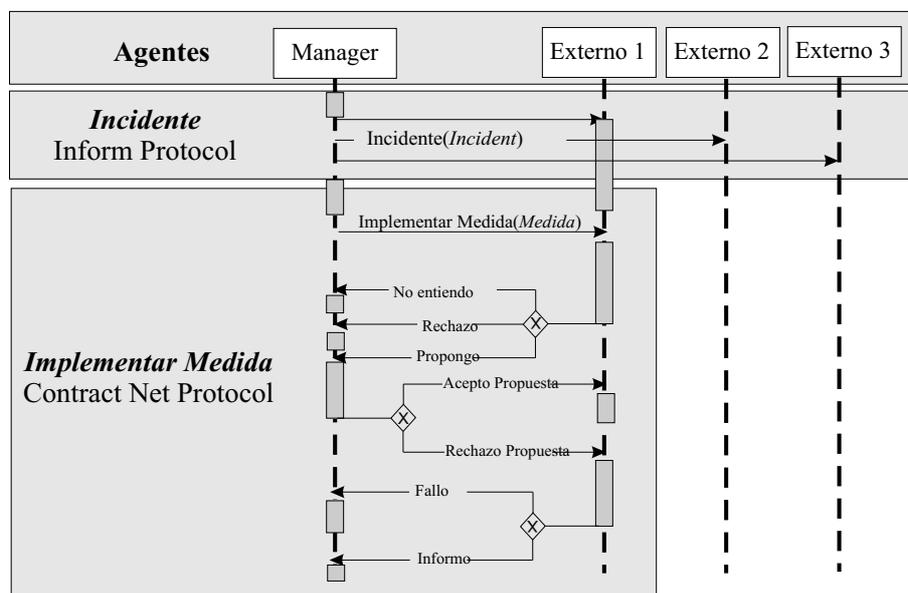


Figura 7.8: Ejemplo de protocolos de interacción. En la parte superior de la imagen observamos el protocolo de interacción *Incidente*, en el que el agente manager envía a varios agentes externos la información del incidente. El segundo protocolo, *Implementar medida* define las interacciones entre el agente manager y un agente externo para implementar una medida conjunta.

- *Suspender medida temporalmente.* Interacción entre el agente *manager* y un agente externo con el que estaba implementando una medida. Esta interacción se produce cuando, por alguna causa (un incidente de mayor severidad, averías, etc), una medida debe suspenderse temporalmente. Uno de los agentes involucrados envía al otro un mensaje con la petición de suspensión temporal. El diseño del protocolo está basado en el protocolo estándar *query protocol* de FIPA.
- *Finalizar Medida.* Interacción entre el agente *manager* y un agente externo con el que estaba implementando una medida para la notificación de finalización de la medida. Cuando el incidente desaparece, el agente *manager* envía un mensaje al agente externo comunicándole que el incidente se ha solucionado y que ya no es necesario seguir manteniendo activas las acciones para implementar la medida. Este protocolo está basado en el protocolo estándar *query protocol* de FIPA.

7.3.5. Modelo de Entorno

El modelo de entorno identifica el conjunto de elementos que permiten al agente percibir como se encuentra el estado del dominio del sistema y sus variaciones. La determinación de estos elementos o entidades es imprescindible para el correcto funcionamiento del sistema, ya que describe los elementos externos con los que el sistema interactúa. Estas entidades pueden ser: recursos del sistema (discos duros, ficheros, etc.), aplicaciones externas (incluyendo los interfaces para poder comunicarse) y/u otros agentes existentes.

Las entidades existentes en el entorno del sistema, que se pueden observar en la figura 7.9, son:

- *Estaciones meteorológicas.* Las estaciones se encargan de la monitorización del estado meteorológico a lo largo de la red de carreteras. A partir de ellas el sistema percibe el estado meteorológico de las carreteras. Cada estación tiene asociado un agente que es el encargado de monitorizar el entorno, supervisando los valores de los parámetros meteorológicos, para poder detectar los posibles incidentes.
- *Base de datos de planes de gestión de tráfico.* La base de datos contiene la información en XML de todos los planes que tiene el centro de gestión. Esta base de datos es mantenida por una aplicación externa al sistema que se encarga de la creación y actualización de los planes. Este recurso es utilizado por el agente de plan XML, para ello el agente accede a la base de datos mediante la realización de consultas al sistema gestor de la base de datos.
- *Dispositivo de usuario.* La interacción con el usuario es fundamental en el sistema. Para ello, hay que modelar estas posibles interacciones e identificar el dispositivo donde el agente interfaz presentará al usuario toda la información relacionada con el sistema. El interfaz del usuario es una aplicación JAVA que se puede ejecutar en sistemas operativos con un entorno de ventanas (*Windows* o *Linux*).
- *Otros CGT.* La implementación de medidas que necesiten la coordinación con otros centros de gestión y control de tráfico, hace necesario un repositorio con los centros de gestión de tráfico con competencias en las carreteras adyacentes. Este repositorio de servicios se encuentra accesible para el agente DF que es el encargado de realizar las interacciones con ellos.
- *Base de Datos CGT.* La base de datos del CGT contiene la información de todos los elementos del entorno, incluyendo los equipos y su estado. El agente

manager necesita interactuar con el BD para actualizar las instancias del entorno (carreteras, segmentos, señalización variable, etc.) y también para conocer cuál es el estado de cada uno de ellos a la hora de activar un PGT (por ejemplo, para saber si un panel de mensaje esta activado o no). Esta interacción se realiza mediante la realización de consultas al sistema gestor de la base de datos.

- *Servidores WEB.* Los servidores web se encargan de proporcionar servicios de información de tráfico a los usuarios. Estos servidores son externos al sistema y se suscriben al agente DF para recibir información de incidentes en formato DATEX. Cuando el sistema detecta un incidente y es notificado al agente web, éste crea una instancia del incidente en formato DATEX y la envía a los distintos servidores web suscritos a ese servicio en el DF.

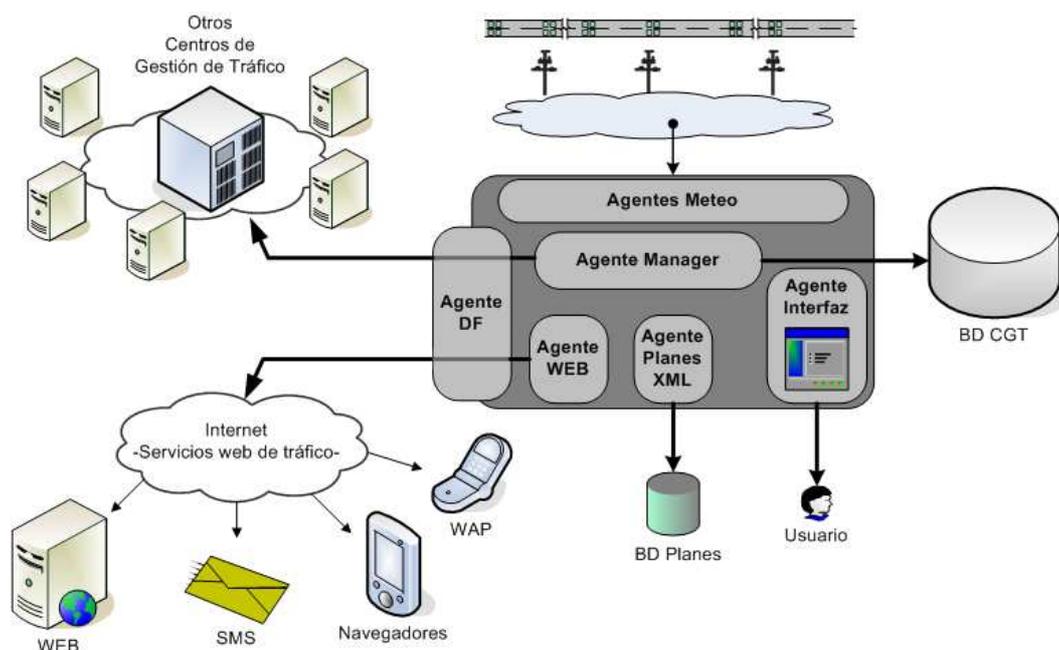


Figura 7.9: Modelo de entorno del sistema.

7.4. Estrategias de Gestión de Tráfico

El desarrollo de las estrategias de gestión, en el marco de aplicación de los PGTs, parten de una situación común: un agente meteo informa al agente manager de la existencia de una incidencia meteorológica, es decir, se ha disparado una alarma,

entonces el agente manager confirma con el operador, el escenario en el que se encuentra la red viaria y solicita al agente de plan XML si existe un PGT para ese incidente. Si existe un PGT, entonces el agente manager tiene un conjunto de medidas que determinan las estrategias de gestión.

Las primeras estrategias de gestión que intenta poner en funcionamiento un CGT son estrategias locales, ya que no requieren coordinación con otros centros u organismos. Estas estrategias, como la habilitación de carriles adicionales, la activación de carriles reversibles, o el desvío utilizando pasos de mediana, aumentan la capacidad de la carretera y pueden solucionar los problemas ocasionados por ciertos tipos de incidentes. Sin embargo, existen otros incidentes, como por ejemplo, los problemas de vialidad invernal, que afectan a una extensa área de carreteras, en la que estas medidas locales no solucionan los problemas, por lo que deben implementarse estrategias coordinadas.

El sistema presta soporte al desarrollo de estrategias de gestión y control de tráfico dinámicas que se realizan en función del estado del tráfico, en tiempo real, cuando ocurre el problema.

La primera estrategia es la determinación de itinerarios alternativos con otros centros de gestión de tráfico. Para ello, se ha implementado el protocolo de negociación multiservicio desarrollado en el capítulo 6 y se ha incluido en el sistema.

La segunda estrategia es la difusión de información, a los usuarios de la red viaria, a través de los diferentes paneles de mensaje variable que se encuentran en la red viaria bajo las competencias del centro de gestión. Esta difusión de información puede incluir la regulación del tráfico, como por ejemplo la prohibición de circulación a vehículos específicos (vehículos articulados, vehículos sin cadenas, etc.) o limitaciones de velocidad.

7.4.1. Determinación de Itinerarios Alternativos

La activación de itinerarios alternativos es una de las estrategias de gestión y control más importantes. Para poder poner en funcionamiento un itinerario, primero debe analizarse cuales son los itinerarios posibles que permiten redireccionar el tráfico y evitar la zona con problemas, después debe determinarse cual es la cantidad de tráfico que ese itinerario es capaz de soportar, sin que genere congestiones, y una vez acordado debe implementarse, esto es, señalar adecuadamente la nueva ruta.

La primera fase, viene determinada por el Plan de Gestión de Tráfico, en formato XML. Una vez se ha identificado el segmento y el escenario se dispone del conjunto

de medidas que deben activarse. En la medida *itinerarios alternativos* se especifica la composición de cada uno de los itinerarios alternativos. Si los itinerarios alternativos, que componen la medida, implican la actuación de otros CGTs, el agente demandante debe negociar cuáles son los itinerarios a activar y cómo debe realizarse esta activación.

El agente manager crea la agenda de negociación a partir de la información proporcionada por la medida itinerarios alternativos. Después, a través del agente DF, identifica al agente cooperador¹. Una vez identificado el agente cooperante implicado, le envía un mensaje, que contiene la información del incidente, el tiempo previsto para que los problemas de tráfico producidos alcancen las carreteras gestionadas por el otro agente, el enlace de frontera del itinerario donde se producirá esta situación y la agenda de negociación.

Una vez el agente cooperador ha analizado el mensaje, y ha respondido con *OK*, se inicia la negociación para poder determinar los flujos de tráfico a redireccionar, siguiendo el protocolo que se describe en el capítulo 6. Un ejemplo de las interacciones entre el agente manager y el cooperador en el proceso de negociación se puede observar en la figura 7.10.

Si la negociación sobre algún itinerario tiene éxito, el agente manager, mediante el agente interfaz, comunica al operador de tráfico el itinerario y los niveles de servicio acordados en cada enlace de frontera para que empiece a desarrollar las acciones necesarias para implementarlo. También indica el tipo de itinerario, (óptimo, básico o normal), y si la negociación ha finalizado con *éxito completo* o si continua con la negociación de más itinerarios alternativos.

Si por el contrario, no se alcanza ningún acuerdo sobre la agenda de negociación, el agente manager presenta un informe con la evolución de la negociación para que el operador determine cuál es el siguiente paso a seguir.

Una vez alcanzado un acuerdo sobre un itinerario, este comenzaría a señalizarse, con el fin de que los usuarios conozcan la nueva ruta. La señalización se realiza en función de los medios disponibles. Si es posible, se realiza mediante la señalización variable, pero si ésta no existe, se señalizará mediante señalización fija o haciendo uso de puntos de control con agentes de tráfico. Estas dos últimas acciones, señalización fija o puntos de control, queda fuera de la determinación dinámica de los itinerarios, aunque el plan en XML sí contempla esta información y es presentada al operador mediante el interfaz gráfico. Además, los tiempos necesarios para instalar la señalización fija y crear los puntos de control, identificados en la medida *itinerarios alternativos*, son tenidos en cuenta para obtener los tiempos de desarrollo de

¹El organismo con competencias de tráfico sobre los itinerarios que componen la agenda.

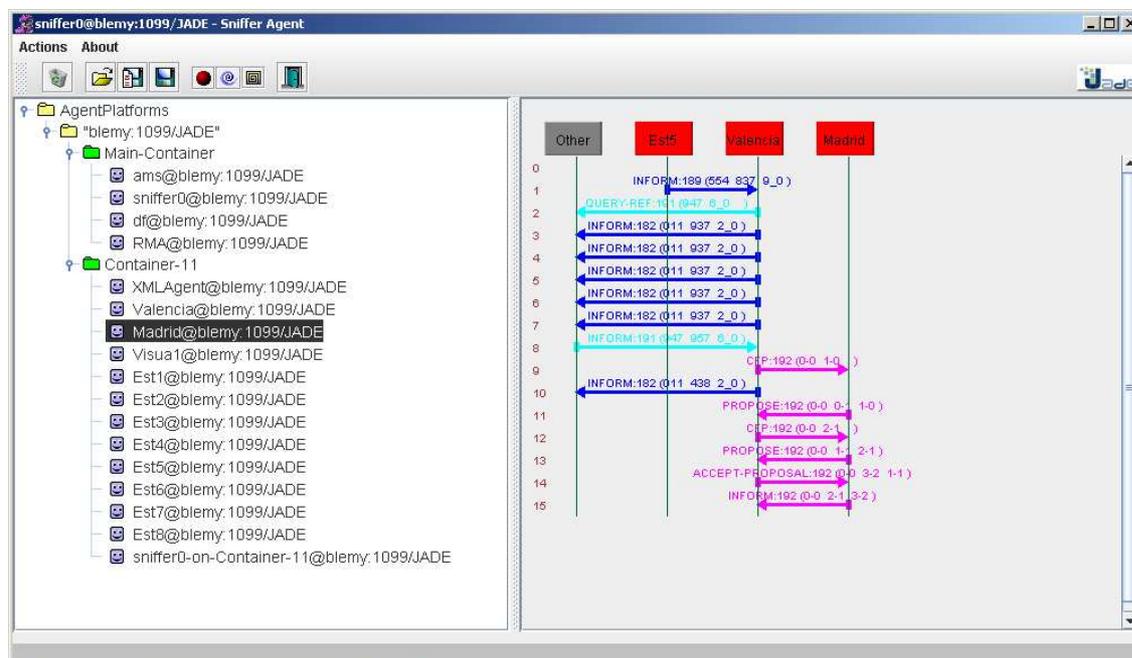


Figura 7.10: Ejemplo de interacciones. Una agente meteo informa al agente manager del CGT de valencia de la existencia de un problema. El agente se comunica con el operador, via el agente interfaz gráfico, y con el agente de planes XML. Una vez dispone de la información relativa al itinerario alternativo a implementar, que incluye el CGT asociado, comienza la negociación.

cada uno de los itinerarios que intervienen en la negociación.

7.4.2. Difusión via PMV

La información proporcionada por los paneles de mensaje variable se realiza en puntos concretos de la red viaria. Esta situación implica que se debe tener en cuenta no sólo el incidente que se acaba de producir, sino también la posible existencia de otros incidentes en el área de influencia del panel en el que se informa. La difusión de información mediante señalización variable se realiza de manera dinámica, esto es, pudiendo modificar el contenido de la información a difundir en cada panel según se modifique el comportamiento del tráfico.

La función que se ha desarrollado para la difusión de información variable se estructura en tres partes: la primera parte consiste en la clasificación de los tipos de mensajes que se pueden difundir, la segunda en la creación de un diccionario de mensajes adecuado para cada uno de los posibles incidentes y la tercera es un mecanismo de selección tanto de las señales a utilizar, como de los mensajes a

difundir en cada una de ellas.

Clasificación de los mensajes

La clasificación de los mensajes se ha realizado en función del contenido de la información que proporcionan [TF05]. Además, se ha introducido un grupo de mensajes, los más prioritarios, que son aquellos que el operador ha introducido manualmente. Los mensajes se pueden agrupar en mensajes de:

- *Divulgación*: proporcionan información general que no afecta directamente a la circulación. Por ejemplo, la campaña realizada por la DGT en el verano de 2004 con mensajes del tipo ‘*Volver es lo importante*’ o la difusión de la hora local y la temperatura.
- *Información*: donde el objetivo de la información es prevenir al usuario de una posible incidencia presente en la calzada, como congestiones, obras, accidentes, etc o realizar recomendaciones de circulación, como velocidades máximas, itinerarios alternativos.
- *Regulación*: La información presentada recoge señalización de obligado cumplimiento por todos los usuarios de la red viaria. Velocidades máximas permitidas, cierres de carretera, utilización de cadenas, etc.
- *Forzado*: Este tipo de información puede ser de diferente significado pero ha sido fijada por un operador.

La diversidad de mensajes que se pueden presentar para un mismo incidente es muy grande. Por ello es necesario la creación de un diccionario de mensajes común, que permita a los operadores de tráfico (y también al sistema MAS) conocer para cada posible incidente el mensaje adecuado. La figura 7.11 muestra el contenido del diccionario con los posibles mensajes para los problemas de visibilidad.

El diccionario está compuesto por pares *<evento, mensaje asociado>* y su definición se realiza en función de tres parámetros:

- Parámetro meteorológico, que provoca el evento, y el valor medido por la estación meteorológica. Permite definir el texto del mensaje.
- Distancia entre la señal y el incidente. Este parámetro indica al usuario la distancia a la que se encuentra el problema.

Parametro	Valor	Mensaje
Visibilidad	600-200 m.	 VISIBILIDAD REDUCIDA A XXXX KM
	< 200 m.	 NIEBLA DENSA A XXXX KM 

Figura 7.11: Ejemplo gráfico del diccionario de datos [TF05].

- El tipo de señal y su clasificación. Esto es, si la señal donde se debe mostrar el panel sólo permite texto, sólo se muestra el texto del mensaje, (o el pictograma si la señal sólo permitiera mostrar pictogramas).

Algoritmo para la selección de los mensajes

La determinación automática de mensajes, cuando se presenta un incidente, se realiza de la siguiente forma: primero hay que identificar el conjunto de señales que se encuentren bajo la influencia del incidente, después, dependiendo de la clasificación de cada señal, se determina el tipo de mensaje que debe visualizarse y por último, se determina si es posible poner el mensaje en el panel (es decir, no hay otro mensaje activo de mayor importancia en ese panel).

Para la identificación de las señales bajo la influencia del incidente, éstas deben cumplir dos reglas:

1. Estar situadas en la misma carretera en la que se produce el incidente o en algún itinerario principal, donde en alguno de sus segmentos se haya producido el incidente.
2. Estar localizadas aguas arriba del incidente. Esto es, la señal debe encontrarse entre el incidente y el usuario siguiendo el sentido de la circulación del usuario.

Una vez se ha determinado el conjunto de señales, mediante la utilización del algoritmo 1, hay que analizar el tipo de mensajes que se debe situar en cada una de ellas. Para ello, el agente manager utiliza el diccionario de mensajes y los parámetros tanto del incidente como de la señal seleccionada.

Algoritmo 1 Algoritmo para la selección de mensajes.

```
SignalList = InfluencedSigns(ev);
For each sign in SignalList{
    Msg = defineMessage(sign, ev)
    If (sign is not active) then {
        PutMessage(Msg, sign);
        Sign.active = true;
    } Else CalculatePriority(Msg, sign.msg)
}
```

Cuando el agente tiene determinado el mensaje que debe poner en la señal, comprueba si la señal está activa, es decir, si está difundiendo otro mensaje o si por el contrario está apagada. Si la señal está apagada, el agente pone el mensaje nuevo e identifica la señal como activa en el sistema. Si por el contrario, la señal ya se encuentra activa, el agente debe determinar cual de los dos mensajes (el existente o el nuevo) es el más prioritario.

Para la determinación del mensaje prioritario, el manager realiza las siguientes comprobaciones, (algoritmo 2): primero, comprueba el grado de clasificación de los mensajes y su importancia. Si uno de los dos mensajes es más prioritario que el otro, ese será el que se difunda en la señal. Si los dos mensajes tienen la misma clasificación, entonces se analiza la distancia relativa de la señal hasta los dos incidentes que producen los mensajes y se sitúa el mensaje cuyo incidente relacionado esté situado a una menor distancia. Si ambas distancias son iguales, implica que ambos incidentes están siendo reportados por la misma estación meteorológica y entonces se evalúan los grados de prioridad de los incidentes. Por ejemplo, una estación puede informar de dos incidentes meteorológicos: Precipitaciones de nieve y problemas en la superficie de la calzada (ambos altamente relacionados).

Si el agente es incapaz de determinar cuál es el mensaje más prioritario, debe informar de esta situación al operador, para que sea él el que determine el mensaje que debe ponerse en esa señal.

7.5. Implementación del Sistema

El sistema ha sido implementado bajo la plataforma JADE. JADE es un entorno software para el desarrollo de sistemas multiagentes que cumple con el estándar FIPA, y soporta todos los servicios básicos de infraestructura especificados en FIPA

Algoritmo 2 Algoritmo para la determinación de la prioridad de los mensajes.

```

{ CalculatePriority(msg, sign.msg) {
  If (msg.type > sign.msg.type) PutMessage(msg,sign);
  Else If (msg.type == sign.msg.type)
    If (msg.ev.dist > sign.msg.ev.dist)
      PutMessage(msg, sign);
    Else If (msg.ev.dist == sign.msg.ev.dist)
      If (msg.ev.wparam > sign.msg.ev.wparam)
        PutMessage(msg,sign);
      Else SendIAMessagerequest(msg,sign.msg)
    }
  }
}

```

(comunicaciones, movilidad, gestión de agentes y localización de agentes), a los que añade algunas utilidades gráficas para facilitar la administración de las plataformas y la depuración de los mensajes intercambiados por agentes en tiempo de ejecución.

Las ontologías presentadas en este capítulo han sido definidas utilizando la herramienta PROTÉGÉ-2000 [PRO05], específica para el desarrollo y descripción de ontologías. Para la utilización de las ontologías en JAVA y más concretamente en la plataforma JADE, se ha utilizado el plug-in *BEAN Generator* [BEA05] que permite generar automáticamente clases de JAVA a partir de la especificación e instanciación de las ontologías en PROTÉGÉ.

Para el desarrollo del agente interfaz se ha utilizado el *eXtensible Graphic Container - XGC* [Tea05]. Este contenedor permite el desarrollo de interfaces gráficas mediante la combinación de XML, SVG y JAVA (junto con dos librerías adicionales: Batik [BAT04] y Xalan-J [XAL04] de Apache). La integración de estas tecnologías permite desarrollar interfaces inteligentes gracias a la utilización de ontologías para la representación de los elementos gráficos, lo que permite dotar a todos los elementos de conocimiento semántico.

En la figura 7.12 podemos observar la pantalla principal de la aplicación del agente interfaz. La ventana se divide en cuatro zonas: en la parte superior derecha se visualiza el mapa esquemáticamente, y la información del equipamiento disponible. En la parte superior izquierda se muestran los incidentes activos, ordenados por segmentos, el escenario actual de cada uno de ellos y las medidas y acciones a desarrollar. En la parte inferior derecha tenemos un conjunto de pestañas, que permiten visualizar las acciones coordinadas que se están desarrollando y también permite al usuario forzar la información mostrada en los paneles de señalización. Por último,

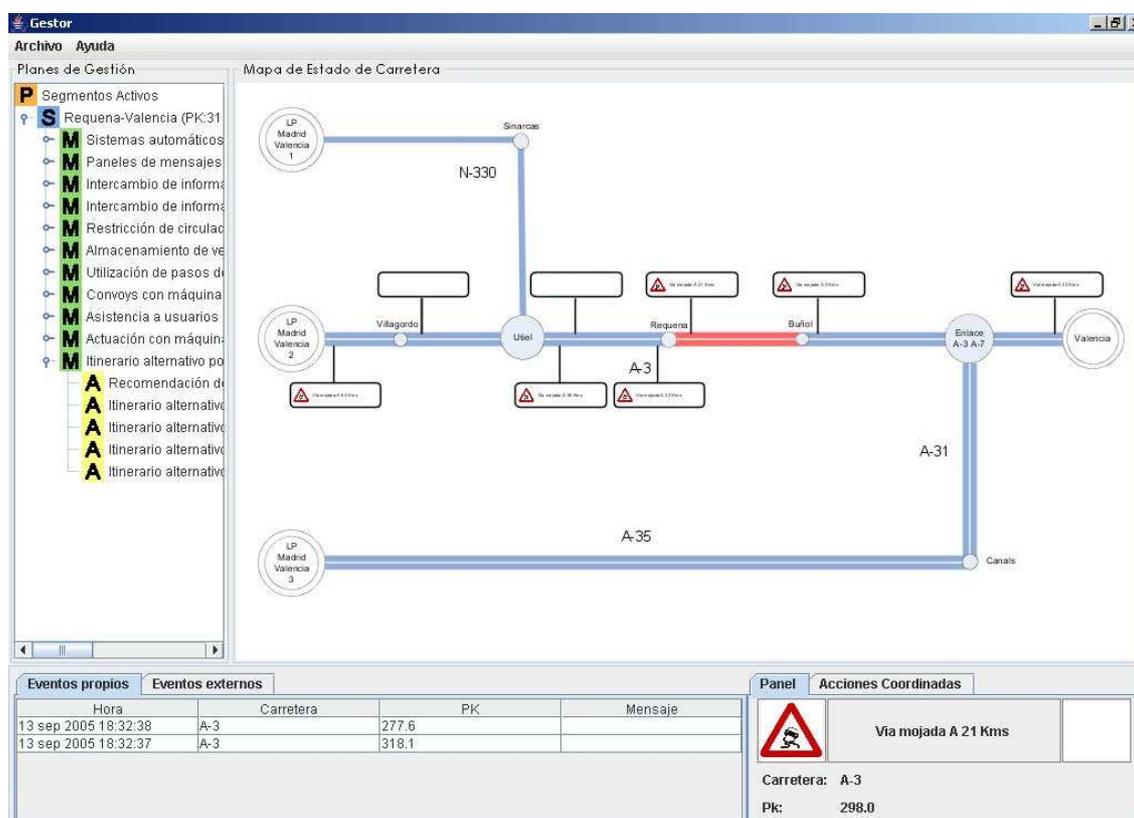


Figura 7.12: Vista del interfaz gráfico del CGT de Valencia.

en la parte inferior izquierda tenemos un lista dinámica con los incidentes, tanto en nuestra red de carreteras cómo en la red de carreteras de otros agentes.

Para poder evaluar el funcionamiento del sistema se ha modelado un entorno real. En concreto, se ha modelado una parte de la red viaria entre Madrid y Valencia (representada en la figura 6.1 del capítulo anterior). Este modelo se compone de:

- 2 centros de gestión de tráfico.
- 4 carreteras. A-3, A-31, A-35, N-400. Las carreteras están formadas por 16 segmentos y 22 enlaces.
- 2 itinerarios alternativos.
- 13 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de la carretera A-3.
- 22 paneles de mensaje variable.

- Un PGT para la gestión de incidentes meteorológicos en la A-3.

La información provista por las estaciones meteorológicas ha sido reproducida mediante archivos XML, uno para cada una de ellas. Utilizando estos ficheros se han podido simular diferentes problemas, tanto de carácter independiente como combinado.

7.6. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un sistema multiagente para la gestión del tráfico frente a incidentes meteorológicos. El desarrollo se ha estructurado en tres fases:

1. El análisis y modelado del conocimiento del sistema. Para realizar este modelo se ha subclasificado el conocimiento del sistema en dos grupos: a) el dominio del tráfico interurbano identificando los elementos que componen las redes viarias, los parámetros que definen el estado del tráfico, el equipamiento existente y los planes de gestión de tráfico, y b) el dominio interno del sistema, que identifica el conocimiento del sistema y especifica el posible vocabulario a utilizar por cualquier agente del sistema y que incluye el modelo de conocimiento del protocolo de negociación para el desarrollo de itinerarios alternativos.

Como se ha presentado a lo largo del capítulo, el dominio del tráfico interurbano está compuesto por objetos (carreteras, segmentos, señales, etc.) que a pesar de compartir el mismo nombre, identifican elementos distintos dependiendo del ingeniero del tráfico o incluso del diseñador del sistemas. Así pues, la representación del conocimiento, desarrollada mediante una ontología pública, ha permitido especificar todos los elementos del dominio para permitir el intercambio de información y del conocimiento acerca del tráfico. Esta ontología sirve de base de conocimiento para la representación del tráfico interurbano, ya que incluye los elementos básicos que caracterizan el dominio. Utilizando esta ontología como base, se puede crear y extender ontologías de tráfico que permitan modelar más detalladamente aspectos concretos del dominio para su uso en otras aplicaciones.

2. El diseño del sistema. La aplicación de la metodología *Ingenias* en esta fase ha facilitado la identificación de todos los elementos que intervienen en el sistema a implementar. Siguiendo esta metodología se ha determinado la organización y arquitectura del sistema, se han identificado los agentes, con sus objetivos y

tareas, se han definido las interacciones de todos los elementos y se han identificado los recursos del entorno necesarios para que el sistema pueda interactuar con el mundo real.

3. La implementación del sistema se ha desarrollado utilizando la plataforma JADE, y siguiendo las especificaciones del estándar FIPA. La plataforma JADE simplifica la comunicación y la cooperación entre los agentes, lo que ha facilitado el desarrollo del modelo de interacciones basado en el estándar FIPA-ACL. Por otra parte, JADE ha facilitado la creación del sistema, ya que la plataforma de desarrollo proporciona toda la infraestructura de agentes (comunicaciones, movilidad, gestión de agentes y localización de agentes), a los que añade utilidades gráficas que facilitan la administración de las plataformas y la depuración de los mensajes intercambiados por agentes en tiempo de ejecución. Otro punto a destacar de JADE es su implementación en JAVA, que facilita la portabilidad y la movilidad de los agentes entre distintas plataformas, independientemente del sitio de destino.

Por otra parte, es importante destacar las propuestas de mejora que aporta al desarrollo de planes de gestión de tráfico. El sistema integra la información proporcionada por las estaciones meteorológicas lo que permite monitorizar los parámetros que éstas proporcionan. A partir de esta información el sistema es capaz de detectar automáticamente los incidentes meteorológicos producidos, identificando sus características y el segmento donde se produce. Una vez identificado el incidente y el segmento, el sistema determina cuál es el escenario de activación del PGT y muestra, al operador, las medidas a desarrollar para resolver el incidente y los problemas que ocasiona.

El sistema presta soporte a los operadores en el desarrollo de medidas dinámicas imposibles de realizar en los anteriores sistemas. Estas medidas son:

- Desarrollo de itinerarios alternativos. Los PGTs definen los itinerarios alternativos que deben ser utilizados, pero el volumen de tráfico a redireccionar por cada uno sólo puede ser determinado cuando se ha producido el incidente. Esta tarea, en la que intervienen dos centros de gestión, se automatiza mediante la aplicación del protocolo de negociación automática, sobre los itinerarios que identifica el PGT, y que permite a los centros determinar los volúmenes óptimos a redireccionar por cada itinerario.
- Difusión de información mediante la señalización variable. Los PGTs determinan, para cada incidente y escenario, cual es la señalización variable que debe activarse y que información debe ponerse en cada uno de los paneles de

mensaje variable. Ahora bien, al igual que ocurre con la medida anterior, una vez se ha producido el incidente hay que analizar si las medidas de señalización propuestas por el plan son compatibles con las existentes. Así pues, el sistema proporciona, al operador, los mensajes que debe poner en cada uno de los paneles de mensaje variable. Para ello, el sistema determina si el panel está, o no, encendido (esto es, si está difundiendo algún mensaje) y si lo estuviera, identifica que mensaje debe difundirse: el existente o el generado por nuevo incidente.

- El sistema traduce automáticamente la información del incidente al standard DATEX, evitando la intervención del operador y agilizando la difusión de la información del incidente.

La evaluación de los resultados producidos por el sistema es positiva, si bien hay que tener en cuenta que el sistema sólo ha sido probado en un entorno de laboratorio, por lo que debería ser evaluado en un entorno con condiciones reales, que permita comprobar su comportamiento y su integración con el resto de sistemas instalados en un CGT.

Parte III

Conclusiones

Capítulo 8

Conclusiones

Este último capítulo recoge las principales conclusiones de la memoria, analizando las aportaciones realizadas y planteando nuevas líneas de investigación a partir de los resultados obtenidos.

8.1. Aportaciones

Las contribuciones principales que se derivan del presente trabajo se pueden clasificar en dos áreas:

- La negociación estratégica y el desarrollo de protocolos de negociación.
- Los sistemas avanzados para la resolución de problemas de gestión de tráfico.

En el área de la negociación estratégica se ha realizado un estudio de los protocolos de negociación existentes y, como resultado, se ha propuesto un nuevo protocolo de negociación con implementación secuencial que permite a dos agentes negociar sobre múltiples servicios en una única negociación, en el que cada servicio puede estar compuesto por múltiples recursos.

En este protocolo, a diferencia de otros protocolos desarrollados previamente [Kra01], [FWJ04a], [Ind00], los diferentes servicios que se negocian, pueden combinarse para obtener una posible solución a la negociación. La solución obtenida tras el proceso de negociación puede resolver el problema de forma parcial o total (es decir, éxito parcial o éxito completo) en función de los servicios disponibles y acordados.

Cada agente en la negociación, como en el resto de protocolos estudiados, representa dos roles diferentes. El agente *manager* que detecta un problema en un recurso propio y para solucionarlo debe implementar servicios, que además de recursos propios, necesiten recursos de otro agente, que juega el rol de *cooperador*.

La relación existente entre los servicios disponibles en la negociación (y que se encuentran almacenadas en la denominada 'agenda de negociación') ha hecho necesario analizar los diferentes tipos de tácticas que los agentes pueden desarrollar para la generación de ofertas y contraofertas. Así pues, se han estudiado los tres tipos tradicionales de tácticas [FSJ98]: basadas en la imitación, las restricciones temporales y en los servicios que hay que negociar.

El resultado del análisis ha determinado que:

1. Las tácticas basadas en la imitación no son adecuadas en este tipo de protocolos de negociación. Esto es debido a que la evolución del tiempo sobre los beneficios puede afectar de forma diferente a cada uno de los agentes que participan en la negociación. Por lo tanto, imitar el comportamiento de un agente para generar las contraofertas pueda no resultar conveniente.
2. Las tácticas basadas en restricciones temporales intentan alcanzar acuerdos sobre los servicios antes de que se cumplan los tiempos límite. Sin embargo, cuando los servicios están relacionados, las tácticas temporales no garantizan que estos acuerdos sean los óptimos, ya que no se consideran la importancia de los servicios de la agenda ni las relaciones que cada agente puede establecer entre los servicios que requiere u ofrece.
3. Las tácticas basadas en los servicios que intervienen en la negociación permiten generar ofertas dependiendo del número de servicios acordados, de los servicios pendientes por acordar y de la importancia de cada uno de ellos. Sin embargo, no tienen en cuenta los tiempos límites de la negociación. Por lo tanto, el proceso de negociación puede acabar antes de que se haya alcanzado el acuerdo.

Las debilidades identificadas en las tácticas tradicionalmente utilizadas junto con la consideración de un entorno dinámico, en el que la implementación de los acuerdos parciales se realice de forma secuencial, ha permitido estudiar la posibilidad de combinar las tácticas temporales con las tácticas basadas en los servicios para generar las ofertas como alternativa de trabajo. Con el objeto de poder estudiar el comportamiento de esta combinación de tácticas, se ha realizado un clasificación de los posibles servicios que componen la agenda y del servicio que presenta problemas.

La elección del parámetro calidad de servicio (que mide lo 'bien' que un servicio resuelve un determinado problema) para cada servicio del sistema ha permitido

establecer esta clasificación de forma clara y concisa. En esta clasificación se definen tres tipos de servicios:

- *Óptimos*, que con su acuerdo permiten alcanzar la misma calidad que el servicio que presenta problemas.
- *Básicos*, cuya combinación permite alcanzar la calidad de servicio del servicio que presenta problemas, pero no de forma individual.
- *Normales*, cuya calidad de servicio no es significativa para resolver el problema.

No obstante, al considerar la evolución dinámica de la negociación también ha resultado necesario plantearse cuáles pueden ser los distintos escenarios que pudieran aparecer y, asociados a estos, cómo los servicios pueden cambiar, o no, de categoría (por ejemplo, un servicio normal puede convertirse en un servicio básico). Para ello se han identificado y utilizado los instantes temporales significativos que intervienen en la negociación y que hacen que ésta evolucione: tiempo de negociación de cada servicio ($T_{negociacion}^i$), tiempo máximo de la negociación (T_{max}) y tiempo de frontera en el cual los problemas detectados por el agente manager afectarán al agente cooperador ($T_{frontera}$).

En particular, el empleo del $T_{frontera}$ ha permitido clasificar el tipo de cooperación entre los agentes como *ciega* o *conocida*. Esta nueva clasificación junto con los análisis anteriores ha llevado a la conclusión de que sólo son posibles 4 escenarios significativos (y este reducido número de escenarios ha simplificado la búsqueda de las mejores estrategias que los agentes pueden ejecutar):

- **E1:** En este escenario, el agente coopera de forma conocida, y además, los servicios que componen la agenda permiten alcanzar un éxito completo.
- **E2:** En este escenario, el agente coopera de forma conocida, y además, los servicios que componen la agenda no permiten alcanzar un éxito completo.
- **E3:** En este escenario, el agente coopera de forma ciega, y además, los servicios que componen la agenda permiten alcanzar un éxito completo.
- **E4:** En este escenario, el agente coopera de forma ciega, y además, los servicios que componen la agenda no permiten alcanzar un éxito completo.

Además, los escenarios en que ambos agentes se encuentran sólo pueden combinarse de una cierta forma, limitando y facilitando, más aún, el análisis a realizar

para identificar las estrategias óptimas que cada agente puede desarrollar. El agente *manager* sólo puede encontrarse en los escenarios E1 y E2 ya que, como él detecta el problema, su cooperación siempre es conocida. En cambio, el agente *cooperador* puede encontrarse en cualquiera de los 4 escenarios. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si el agente *manager* se encuentra en E1, el agente *cooperador* sólo podrá estar en E1 y E3. Si el agente *manager* se encuentra en el estado E2 el agente *cooperador* sólo podrá estar en E2 y E4.

Ahora bien, al ser el entorno con información incompleta, donde los agentes tienen un conocimiento parcial del entorno, ha sido necesario la inclusión de elementos que permitan desarrollar las estrategias óptimas sin que los agentes proporcionen información privada al oponente, ya que sino se le estaría proporcionando ventaja en la negociación. Para ello, se ha clasificado la información del entorno del protocolo para cada agente en pública y privada.

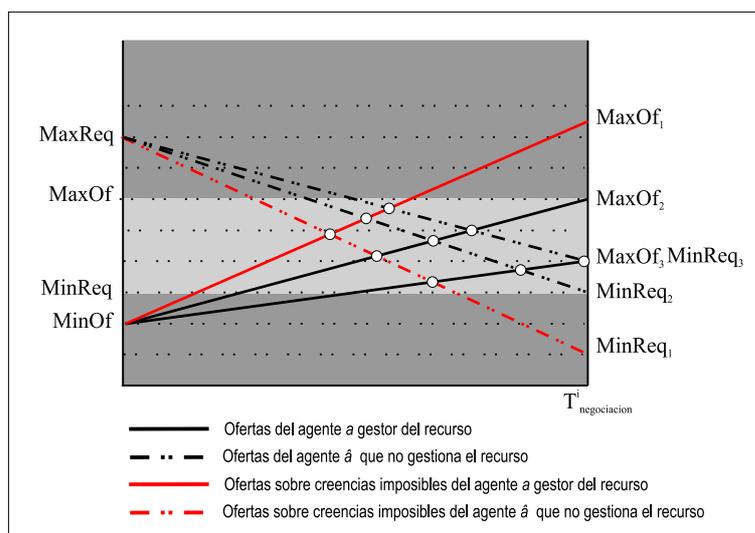


Figura 8.1: Conjunto de posibles estrategias sobre un recurso. Las creencias MaxOf_i representan las creencias que el agente a posee sobre las creencias que el agente \hat{a} tiene sobre sus valores tope de negociación. Análogamente, las creencias MinReq_j representan las creencias que el agente \hat{a} posee sobre las creencias que el agente a tiene sobre sus valores tope de negociación. En la figura se observan 9 posibles puntos de acuerdo entre los agentes.

La información pública se compone de aquella información del entorno de negociación que es conocida por ambos agentes a lo largo de la negociación y que resulta imprescindible para que ésta pueda realizarse. En cambio, la información privada es particular para cada agente. Esto incluye: los valores máximos y mínimos para cada uno de los recursos de cada servicio de la agenda que el agente es capaz de requerir u ofrecer, y las creencias, expresadas mediante probabilidades, que un agente tiene sobre las creencias de su oponente. Esto es, los valores tope de negociación que un

agente cree que el agente opuesto espera que él desarrolle.

Ahora bien, ¿porqué elegir este tipo de creencias, basado en las creencias que el agente a tiene sobre las creencias que el agente \hat{a} tiene sobre los valores tope del agente a y no utilizar una aproximación aparentemente más sencilla, basada en las creencias que un agente tiene sobre los valores tope del otro agente?

Si un agente utiliza las creencias sobre los valores tope del otro agente, éste obtendrá muchos beneficios cuando se alcance el acuerdo, pero estará arriesgando en exceso la posibilidad de alcanzarlo. En la figura 8.2 se observa que al utilizar este tipo de creencias sólo hay un punto de acuerdo posible que, además, no está garantizado que se alcance, puesto que dependerá de las probabilidades de cada creencia y del beneficio que se espere alcanzar en cada estrategia.

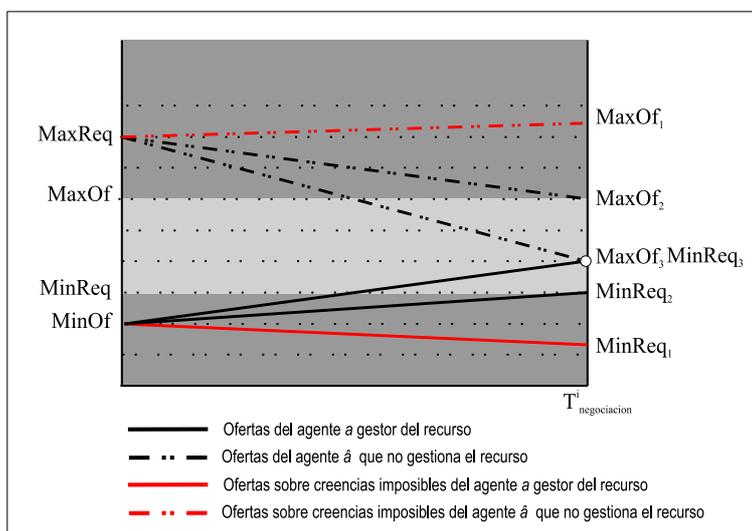


Figura 8.2: Conjunto de posibles estrategias sobre un recurso. Las creencias $MinReq_i$ representan las creencias que el agente a posee sobre los valores tope de negociación del agente \hat{a} . Análogamente, las creencias $MaxOf_j$ representan las creencias que el agente \hat{a} tiene sobre los valores tope de negociación del agente a . En la figura se observa un único posible punto de acuerdo entre los agentes.

En cambio, al utilizar las creencias tal y como se han utilizado, el acuerdo se garantiza (lógicamente, siempre que el área de acuerdo no sea nula). En la figura 8.1 se muestra la misma situación de valores tope que en la figura anterior, y se observa que al utilizar las creencias propuestas en el protocolo se alcanzará un acuerdo.

A partir de la información pública y privada los agentes tienen un conjunto posible de estrategias que pueden aplicar. De ellas, la estrategia óptima es aquella que le proporciona mayor beneficio esperado. Sin embargo, existe el riesgo de que la estrategia óptima esté basada en una creencia que no se corresponda con el valor

tope real, por lo que un agente podría estar utilizando una estrategia que, a pesar de que él cree que es la mejor, le llevaría a obtener un beneficio real menor.

Este protocolo ha sido analizado en función de si presenta o no equilibrio y de si garantiza la convergencia (ya que estos son los criterios tradicionales en los que se analizan los protocolos de negociación). El análisis realizado de estas características en el protocolo propuesto muestra que cumple con el equilibrio secuencial. Además, los resultados de la negociación obtenida del protocolo convergen siempre que las áreas de acuerdo en la negociación de los recursos que pertenecen a un servicio no sean nulas.

Las características del entorno y del protocolo hacen que sea adaptable a un amplio elenco de ámbitos en el que la negociación sea fundamental para el desarrollo de tareas. En particular, el protocolo se ha adaptado al dominio del tráfico interurbano. Éste es un dominio caracterizado por estar altamente distribuido, tanto geográfica como funcionalmente, ya que está compuesto por extensas redes viarias que son gestionadas por diferentes centros de tráfico, cada uno de los cuales tiene sus propios objetivos operacionales y sus recursos para alcanzarlos.

Así pues, el protocolo propuesto ha sido modificado para poder implementar un mecanismo de interacción que permita, a dos centros de gestión de tráfico, acordar el desarrollo de itinerarios alternativos cuando la circulación por una red de carreteras sea problemática. Para ello, una vez analizado el entorno del tráfico interurbano, y estudiado sus elementos y características, se ha realizado una definición y caracterización del problema que ha permitido la adaptación del protocolo a este dominio.

Los resultados de este estudio han determinado que el protocolo multiservicio puede adaptarse perfectamente a la negociación de itinerarios alternativos, si bien hay que modificar: 1) la agenda de negociación, 2) el contenido de las ofertas y contraofertas, 3) las posibles situaciones de conflicto y sus consecuencias, y 4) las funciones de utilidad que permiten valorar las ofertas recibidas. Además, el conjunto de escenarios que definen todas las posibles situaciones en las que se puede encontrar un agente durante el proceso de negociación se mantienen iguales.

Este protocolo ha sido implementado en un entorno multiagente cuya finalidad es gestionar el tráfico frente a incidentes meteorológicos. Este sistema parte de los sistemas desarrollados anteriormente, con PGTs, mediante HTML y XML [TGSC02],[JTCS03] y presenta propuestas de mejoras sobre algunos de los aspectos que presentaban deficiencias:

- Integra la información proporcionada por las estaciones meteorológicas distri-

buidas a lo largo de la red de carreteras y monitoriza automáticamente los parámetros climatológicos. Esta situación, imposible de realizar en los sistemas anteriores, permite determinar automáticamente los segmentos donde se producen los incidentes y cuál es el escenario en el que el plan debe activarse.

- Desarrolla estrategias de gestión coordinadas. Concretamente, la activación de itinerarios alternativos. Estos itinerarios están previamente determinados, como una medida a implementar en el marco de los PGTs. Sin embargo, no es hasta que ocurre un incidente y el itinerario debe activarse, hasta que se decide cómo debe realizarse esta activación.

Esta situación se produce debido al elevado dinamismo del entorno del tráfico, lo que implica que la forma de activar los itinerarios alternativos dependan de la situación del estado del tráfico en ese instante. Así pues, una vez producido el accidente, los centros de gestión deben determinar cuál es el volumen de tráfico que se redirecciona por cada uno los itinerarios alternativos, tarea que se automatiza mediante la aplicación del protocolo y que no era contemplada en los sistemas anteriores.

- Implementa estrategias de gestión de tráfico dinámicas como la difusión de información mediante la utilización de los paneles de señalización variable. Esta estrategia proporciona al operador, los mensajes que debe poner en cada uno de los paneles de mensaje variable. Para ello, el sistema determina si el panel está, o no, activado e identifica, si fuera necesario, la prioridad del mensaje que debe difundirse: el existente o el generado por nuevo incidente.
- Permite la comunicación automática con otras organizaciones encargadas de la gestión de tráfico y proveedores de servicios de tráfico mediante el intercambio de información en formato DATEX. El sistema, al contrario que en los sistemas anteriores, donde el operador traducía e insertaba el incidente manualmente, traduce automáticamente la información del incidente al standard DATEX, lo que no sólo facilita la tarea del operador sino que también agiliza la difusión del problema.

El diseño del sistema se ha desarrollado siguiendo la metodología *Ingenias* [PS03]. Esta metodología ha permitido el análisis y diseño del sistema desde diferentes modelos y ha permitido definir sus diferentes elementos: 1) *organización*, que captura la estructura global del sistema y las tareas que determinan qué hace el sistema y cada uno de sus agentes; 2) *agente*, que contiene una descripción detallada y extensa de cada uno de los agentes que pertenecen al sistema; 3) *entorno* que modela las relaciones con el entorno del sistema; y 4) *interacción*, que trata las interacciones de los agentes a distintos niveles de abstracción.

La utilización de *Ingenias* como metodología de diseño ha facilitado el diseño del sistema multiagente como un conjunto y no como el diseño de agentes aislados que interactúan entre si. Además, los meta-modelos que proporciona sirven de guía para definir y detallar los diferentes aspectos del sistema. Otro aspecto a destacar de *Ingenias*, es que dispone de herramientas software de soporte [IDK04] para la generación de los diferentes modelos.

Para poder completar el diseño del sistema, ha sido necesario definir un modelo capaz de representar el conocimiento común de los agentes. El modelo de representación del conocimiento propuesto, basado en ontologías, se divide en dos partes: 1) el modelo de conocimiento genérico del dominio del tráfico interurbano, identificando los elementos que componen las redes viarias, los parámetros que definen el estado del tráfico, el equipamiento existente y los planes de gestión de tráfico y 2) el dominio de conocimiento interno del sistema, que especifica el vocabulario común de los agentes que forman el sistema.

El modelo de conocimiento de tráfico permite al sistema interactuar con otros sistemas externos, que se encuentran en el mismo entorno. No obstante, para poder servir como soporte para diferentes aplicaciones en el marco del tráfico interurbano (como entornos de simulación, diseño de interfaces gráficos, sistemas de difusión de información, etc.) esta ontología debería ser ampliada.

Por último, la implementación del sistema se ha realizado mediante la plataforma JADE. La utilización de JADE, basada en el estándar FIPA, ha permitido desarrollar un modelo de interacciones basado en el estándar FIPA-ACL y los protocolos FIPA. Ambos permiten la comunicación no sólo entre los agentes del sistema, sino también la comunicación con otras plataformas externas que cumplan las especificaciones FIPA. JADE ha facilitado la creación del sistema ya que proporciona todos los servicios básicos de infraestructura de agentes (comunicaciones, movilidad, gestión de agentes y localización de agentes), a los que añade utilidades gráficas para facilitar la administración de las plataformas y la depuración de los mensajes intercambiados por agentes en tiempo de ejecución.

Para poder evaluar el funcionamiento del sistema se ha modelado un entorno real y se ha simulado su comportamiento. En concreto, se ha modelado una parte de la red viaria entre Madrid y Valencia, que incluye dos centros de gestión de tráfico distintos, 4 carreteras compuestas por 16 segmentos y 22 enlaces. En estos segmentos se encuentran situados 22 Paneles de Mensaje Variable y 13 estaciones meteorológicas. Además, se ha utilizado un PGT real, que incluye entre sus medidas la activación de dos itinerarios alternativos.

La información provista por las estaciones meteorológicas ha sido simulada mediante archivos XML, uno para cada una de ellas. Utilizando estos ficheros se han podido simular diferentes incidentes meteorológicos. Asimismo, los resultados que un posible nivel de servicio en un enlace de frontera pueden producir en el itinerario asociado, y que sirven al agente para determinar la utilidad de la oferta, han sido simulados mediante ficheros de texto plano (uno para cada centro de gestión).

La evaluación de los resultados producidos por el sistema es positiva. El sistema es capaz de monitorizar todos los eventos producidos, tanto cuando son independientes como cuando se combinan diferentes problemas meteorológicos en diferentes segmentos. Sin embargo, todas las pruebas y evaluaciones realizadas han sido en laboratorio, por lo que queda por realizar una evaluación en un entorno con condiciones reales (tiempos de integración de información, el acceso a la base de datos del CGT, etc.) que permita contemplar el comportamiento del mismo y su integración con el resto de sistemas instalados en un CGT.

8.2. Líneas de Investigación y Trabajos Abiertos

El trabajo desarrollado y expuesto en esta memoria de tesis ha dejado algunos aspectos en los que cabe realizar una investigación más profunda:

- Particularización de las tácticas temporales óptimas por recurso en lugar de por servicio, lo que debe permitir ajustar los valores de las ofertas y contraofertas realizadas, mejorando de esta forma la utilidad de los participantes en la negociación. Es decir, la táctica temporal sobre un recurso que pertenece a un servicio, del cuál ya se han acordado más recursos, puede conceder más valor del inicialmente previsto, ya que el acuerdo está cercano. Por ejemplo, si en la agenda existieran varios servicios básicos, y sobre uno de ellos se hubiera alcanzado el acuerdo sobre 3 de los 4 recursos que lo componen, la táctica temporal original que estaría aplicando, es decir *Lineal*, podría modificarse a *Conceder*, para poder alcanzar un acuerdo sobre el servicio y pasar a implementarlo cuanto antes.
- La extensión del protocolo de negociación a un entorno de negociación como el presentado pero en el que intervengan más de dos agentes está siendo estudiada. La utilización del protocolo de ofertas alternativas, donde un agente realiza una oferta que debe ser aceptada por el resto de $n-1$ agentes, presenta una serie de limitaciones que debe ser analizada con detalle:

- Se necesitan n instantes de tiempo (siendo n el número de agentes que participan en la negociación) para que todos los agentes hagan una oferta. Esto implica mucho tiempo para que un agente pueda realizar una oferta y conozca la valoración de la misma por parte del resto de agentes.
- La respuesta de un agente a la oferta realizada por otro agente es conocida por el resto de agentes, luego éstos obtienen ventaja en la negociación.
- La elección del orden de negociación es un factor importante y significativo. El protocolo es siempre iniciado por el agente manager, que detecta el problema y envía la primera oferta, pero si ésta es rechazada ¿que agente cooperador debe realizar la siguiente oferta? Esta elección puede determinar que el protocolo de negociación acabe con éxito o, por el contrario, acabe en una situación de conflicto.
- Si dos agentes llegan a un acuerdo sobre una oferta y el resto de agentes la rechazan, al menos uno de estos agentes se verá perjudicado, (es decir perderá utilidad) con la siguiente oferta. Por lo tanto, las estrategias temporales utilizadas, por servicios, no son adecuadas, ni óptimas, si se ha logrado un acuerdo entre dos agentes.

Por ejemplo, supongamos un entorno de negociación con tres agentes (manager, coop1 y coop2) que negocian sobre un servicio S^i que está formado por 3 recursos, cada uno de los cuales pertenece a un agente diferente: $r_{manager}^1$, r_{coop1}^2 y r_{coop2}^3 . Una de las posibles situaciones de la negociación se muestra en la figura 8.3, en la que se negocia sobre el recurso r^1 que pertenece al agente manager.

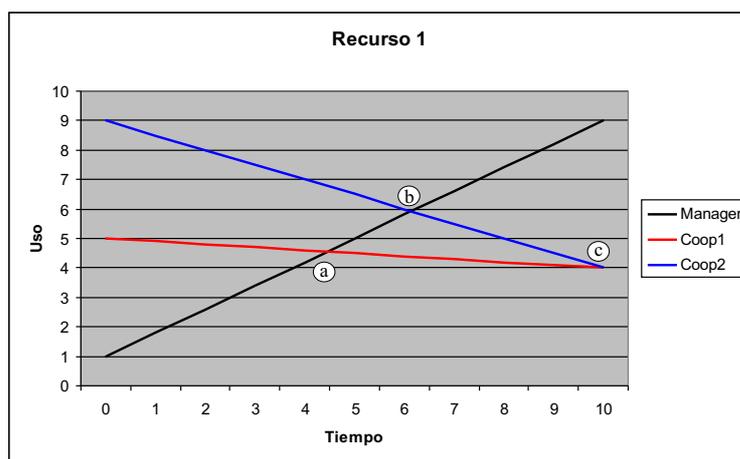


Figura 8.3: Negociación de tres agentes sobre el recurso r^1 que es gestionado por el agente manager. Los tres instantes temporales identifican los tres posibles instantes de acuerdo entre pares de agentes.

En la figura se aprecian los tres instantes temporales donde se alcanzarían los acuerdos entre dos agentes: 1) en el instante a los agentes manager y coop1 alcanzan un acuerdo que, sin embargo, no es aceptado por coop2; 2) en el instante b el agente manager alcanza un acuerdo con el coop2 pero este punto de acuerdo está fuera del rango posible de valores permitido por el agente coop1; y 3) en el instante c son los dos agentes cooperadores, coop1 y coop2 los que alcanzan un acuerdo. En esta última situación, cercana a $T_{negociacion}^i$, el agente manager estaría dispuesto a conceder prácticamente su máximo valor posible, pero el valor donde se produce el acuerdo mejora incluso el beneficio que hubiera alcanzado en el instante a ¹.

Otra posible situación se plantea en la figura 8.4. En esta situación cualquier par de agentes que alcanza un acuerdo en los 3 posibles instantes temporales, pasa a perder utilidad en la siguiente contraoferta.

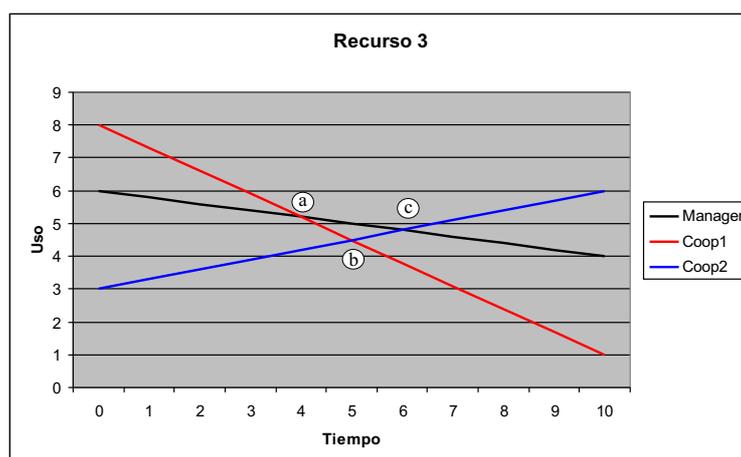


Figura 8.4: Negociación de tres agentes sobre el recurso r^3 que es gestionado por el agente coop2. Los tres instantes temporales identifican los tres posibles instantes de acuerdo entre pares de agentes.

Por último, en la figura 8.5 se muestra la negociación sobre el recurso r^2 , en la que se existe un área de acuerdo entre todos los agentes (valores de uso entre 5 y 6). Sin embargo, la evolución de las tácticas temporales hacen que los posibles acuerdos, instantes a y b siempre se alcancen fuera de este rango.

- Al trabajar en un entorno de información incompleta un agente puede tener diferentes conjuntos de creencias, para distintos agentes, sobre los valores topes de negociación para un mismo recurso. Esto dificulta la

¹Sin tener en cuenta las pérdidas producidas por el paso del tiempo.

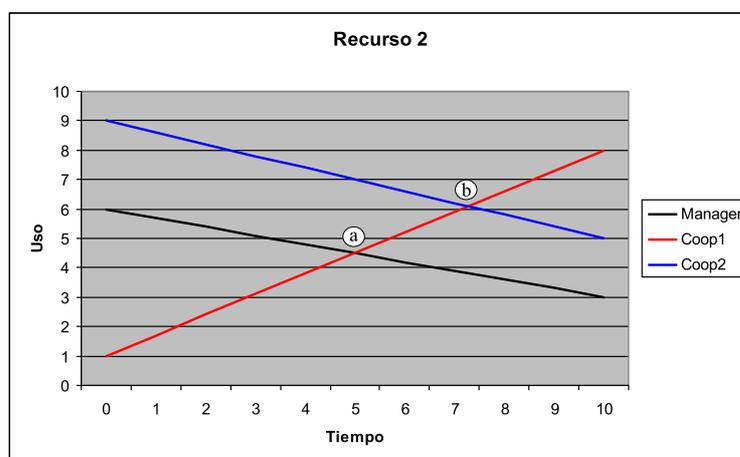


Figura 8.5: Negociación de tres agentes sobre el recurso r^3 que es gestionado por el agente coop2. A pesar de que existe un área de acuerdo no nula entre los 3 agentes, la evolución de las tácticas temporales imposibilita que éste se alcance

elección de la estrategia óptima y, por lo tanto, el cálculo de la utilidad esperada y la determinación de la siguiente acción a realizar.

- La aparición de problemas no previstos tanto en el desarrollo de servicios como en la activación de itinerarios alternativos (como, por ejemplo, congestiones debidas al incremento del nivel de servicio) pueden suponer que los acuerdos alcanzados no sean válidos y se deban suspender los acuerdos. Por lo tanto, es necesario la extensión del protocolo para poder renegociar los acuerdos en estas situaciones, evitando alcanzar situaciones de conflicto.
- La adaptación del protocolo a otras estrategias de gestión y control del tráfico, como el almacenamiento de vehículos cuando existen cortes totales en la red viaria o la coordinación de equipos para el mantenimiento de la red viaria.
- El fomento de la cooperación para obtener acuerdos con éxito en futuras negociaciones. Este fomento se puede realizar mediante el beneficio o perjuicio de los futuros acuerdos en función de los resultados obtenidos en el pasado. El trabajo a realizar debe consistir en determinar cuál es la estrategia que un agente puede seguir para beneficiar o perjudicar la negociación. Para ello, se propone estudiarlo mediante la adaptación de la táctica *tit-for-tat* [Hof83] (en esta táctica, un agente a realiza la acción que el agente \hat{a} le realizó en la negociación inmediatamente anterior). En esta versión del *tit-for-tat* un agente a incrementará su área de acuerdo en una negociación con el agente \hat{a} si en la última negociación con este agente se ha alcanzado un acuerdo y se decrementará en caso contrario. Para ello, debería modificarse el rango de valores tope

para cada uno de los recursos que el agente posee. Por ejemplo, estableciendo 2 valores tope para cada recurso: el mínimo posible y el mínimo tope (mínimo posible $<$ mínimo tope) si el agente no gestiona el recurso y el máximo posible y el máximo tope (máximo posible $>$ máximo tope) si lo gestiona.

Bibliografía

- [AGE05a] Agentcities. <http://www.agentcities.org>, 2005.
- [AGE05b] Agentlink. <http://www.agentlink.org>, 2005.
- [AGE06] Agencities.es. <http://grusma2.etse.urv.es/AgCitES/>, 2006.
- [ART05] Arts project. <http://www.arts-mip.com>, 2005.
- [BAT04] Batik SVG Toolkit. <http://xml.apache.org/batik/>, September 2004.
- [BBCM00] G. Baümer, M. Breugst, S. Choy, and T. Magedanz. Grasshopper: a universal agent platform based on OMG MASIF and FIPA standards. IKV ++ Technologies, 2000.
- [Bea98] S. Bussman and et al. *MultiAgent Systems for Manufacturing Control*, chapter 2. Springer, 1998.
- [Bea04] D. Booth and et al. Web Services Architecture. W3C Working Group, Feb 2004. 11.
- [BEA05] Beangenerator. <http://hcs.science.uva.nl/usr/aart/beangenerator/>, 2005.
- [BH99] L. Busch and I. Horstmann. Signaling via an Agenda in Multi-Issue Bargaining with Incomplete Information. *Economic Theory*, 13(3), April 1999.
- [BLHL01] Tim Berners-Lee, James Hendler, and Ora Lassila. The Semantic Web: A new form of Web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities. *Scientific American*, 2001.
- [BM98] M. Breugst and T. Magedanz. On the Usage of Standard Mobile Agent Platforms in Telecommunication Environments. In Springer Verlag, editor, *5th Int. Conference on Intelligence in Services and Networks*, volume 1430 of *LNCS*, pages 275–286, 1998.

- [Boa00] Transportaion Research Board. *Highway Capacity Manual*. Transportaion Research Board, 2000.
- [BPR01] F. Bellifemine, A. Poggi, and G. Rimassa. Fipa 2000 compliant agent development environment. In ACM, editor, *Fifth international conference on Autonomous agents*, 2001.
- [Bro91] Brooks,R. A. Intelligence without reason. In *Proceedings of the Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91), Sydney, Australia*, pages 569–595, 1991.
- [BT05] Enrique Belda and Vicente R. Tomás. The intelligent transport systems to automatize traffic management. In *XII World Congress on Intelligent Transport System*, San Francisco, EE.UU., 2005.
- [Cea01] G. Caire and et al. Agent Oriented Analysis using MESSAGE/UML. volume 2222 of *LNCS*, pages 119–135, 2001.
- [CIT05] City traffic system, an integrated system for traffic planning, management, and information in high-density urban areas. http://www.citytraffic.de/ct_eng.html, 2005.
- [CON05] Surface transport technologies for sustainable development. conclusions. <http://europa.eu.int/comm/research/growth/valencia/press-transport-es.html>, 2005.
- [DBS03] J. M. Doblado, C. Bieto, and J. Santos. *Juegos de Estrategia*. UNED, 2003.
- [DeL01] S. DeLoach. Analysis and Design using MaSE and agentTool. In *12th Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conferece (MAICS)*, 2001.
- [dOBL05] Denise de Oliveira, Ana L. C. Bazzan, and Victor Lesser. Using cooperative mediation to coordinate traffic lights: a case study. In *AAMAS '05: Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 463–470, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
- [DR94] E. H. Durfee and J. Rosenschein. Distributed problem solving and multiagent systems: Comparisons and examples. In M. Klein, editor, *Proceedings of the 13th International Workshop on DAI*, pages 94–104, Lake Quinalt, WA, USA, 1994.

- [Dur01] Edmund H. Durfee. Distributed problem solving and planning. *Lecture Notes in Computer Science*, 2086, 2001.
- [EUR02] <http://europe.eu.int/comm/transport/themes/network/english/its/html/index.html>, 2002.
- [Fer99] Jacques Ferber. *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Boston, MA, USA, 1999.
- [FIP98] FIPA. Fipa ontology service specification. Experimental XC00086D, FIPA, Geneva, Switzerland, Mar 1998.
- [FIP02] FIPA. Foundation for Intelligent Physical Agents, Abstract Architecture Specification. 2002.
- [FIP04] FIPA. Foundation for intelligent physical agents Agent Management Specification. Standard SC00023K, FIPA, Geneva, Switzerland, Mar 2004.
- [FK04] I. Foster and C. Kesselman, editors. *The Grid 2: Blueprint for a New Computing Infrastructure*. Morgan Kaufmann, 2004.
- [FL01] Luis Amable García Fernández and Francisco Toledo Lobo. A multiagent system ofr helping urban traffic management. In *Proc. of International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-2001.*, Seattle,USA, 2001.
- [FLT85] D. Fudenberg, D. Levine, and J. Tirole. *Infinite horizon models of bargaining with one sided incomplete information*. Game Theoretic Models of Bargaining. University of Cambridge Press, 1985.
- [FRE] Freeway system. <http://www.freeway2000.com>, Apr.
- [FSJ98] P. Faratin, C. Sierra, and R. Jennings. Negotiation decision functions for autonomous agents. *Robotics and Autonomous Systems*, 3-4(24):159–182, 1998.
- [FWJ02a] S. Fatima, M. Wooldridge, and R. Jennings. The Influence of Information on Negotiation Equilibrium. In *Lecture Notes in Artificial Intelligence, Agent-Mediated Electronic Commerce IV*, chapter Designing mechanisms and systems, pages 180–193. Springer-Verlag, 2002.

- [FWJ02b] S. Fatima, M. Wooldridge, and R. Jennings. Optimal negotiation strategies for agents with incomplete information. In J.J. Meyer and M. Tambe, editors, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 2333 of *Intelligent Agents VIII*, chapter Agent Theories. Architectures and Languages. Springer, Berlin, 2002.
- [FWJ04a] S. Fatima, M. Wooldridge, and R. Jennings. An Agenda-based framework for multi issue negotiation. *Artificial Intelligence*, 1(152):1–45, January 2004.
- [FWJ04b] S. Fatima, M. Wooldridge, and R. Jennings. Optimal Negotiation of Multiple Issues in Incomplete Information Settings. In *Third International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, New York, July 2004. AAMAS.
- [Gar02] F. J. Garijo. Tecnología de agentes: Experiencias y perspectivas para el desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones. 2002.
- [GL77] J. Green and I. Laffont. Characterization of satisfactory mechanism for the revelation of preferences. *Econometrica*, 427(45):238, 1977.
- [Góm02] J. J. Gómez. *Modelado de Sistemas Multi-Agente*. PhD thesis, Universidad Complutense Madrid - Departamento de Sistemas Informáticos y Programación, 2002.
- [GPG02] J. J. Gómez, J. Pavón, and F. Garijo. Meta-modelling of Multi-Agent Systems. pages 37–41. ACM, 2002.
- [Gro98] Object Management Group. MASIF-RTF Results, 1998.
- [Gro02] Advisory Group. Software technologies, embedded systems and distributed systems: A European strategy towards an Ambient Intelligence environment. European Commission, 2002.
- [Gru] T.R. Gruber. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. In *Proc. Of International Workshop on Formal Ontology*, Padova, Italy.
- [GTCM03] Ana. M. Garcia, D. Teruel, F. Carbone, and V. Méndez. FIPA-compliant MAS development for road traffic management with knowledge-based approach: the TRACK-R agents. In *Agentcities-Agentlink Agent for Industrial Applications Conference*, España, 2003.

- [GY04] Martin Griss and Min Yin. SCATE Agent: Context-Aware Software Agents for Multi-Modal Travel. Workshop on Agents in Traffic and Transportation, Jul 2004. New York.
- [HCM96] Josefa Z. Hernández, José Cuenca, and Martín Molina. Knowledge oriented design of an application for real time traffic management: The trys system. In Wolfgang Wahlster, editor, *ECAI*, pages 308–312. John Wiley and Sons, Chichester, 1996.
- [Hof83] Douglas R Hofstadter. Temas metamágicos. *Investigación y ciencia*, 1983.
- [HOS01] Josefa Z. Hernández, Sascha Ossowski, and Ana García Serrano. On multiagent co-ordination architectures: A traffic management case study. In IEEE Computer Society, editor, *International Conference on System Sciences, HICSS-34*, pages 17–35, Hawai, USA, 2001.
- [HS72] J.C. Harsanyi and R. Selten. Organisational Rules as an Abstraction for the Analysis and Design of Multi-Agent Systems. *Management Science*, 18(5):80–106, 1972.
- [IBM02] Agent Building and Learning Environment (ABLE). <http://www.alphaworks.ibm.com/tech/able>, 2002.
- [IDK04] Idk (ingenias development kit). <http://grasia.fdi.ucm.es/ingenias>, 2004.
- [Ind00] R. Inderst. Multi-issue Bargaining with Endogenous Agenda. *Games and Economic Behavior*, (30), 2000.
- [ISI06] Isi web of knowledge. <http://portal.isiknowledge.com>, 2006.
- [ISO00] Iso04 iso tc 204/sc n. ISO04 ISO TC 204/SC N, ISO/WD 14813-1 Intelligent Transport Systems – Reference Model Architecture(s) for the ITS sector – Part 1: ITS Fundamental Services., 200.
- [ITS05] ITS España. <http://www.itsspain.com>, 2005.
- [Jad04] Application Defined Content Languages and Ontologies. JADE 3.2. <http://jade.tilab.com/>, November 2004.
- [Jad05] Guia de Programación. JADE 3.2. <http://jade.tilab.com/>, July 2005.
- [JBR00] I. Jacobson, G. Booch, and J. Rumbaugh. *El proceso unificado de desarrollo de software*. 2000.

- [JSTF02] Ana Luz Jiménez, F. Soriano, Vicente R. Tomás, and F. Fernández. Aproximación a los planes de gestión de tráfico: proyectos arts y serti. In *CIT2002 Congreso de Ingeniería del Transporte*, Spain, 2002.
- [JTCS03] Ana Luz Jiménez, Vicente R. Tomás, C. Cambres, and F. Soriano. New technologies to work with traffic management plans. *Traffic technology International*, Annual review:182–184, 2003.
- [KHB00] Heribert Kirschfink, Josefa Hernández, and Marco Boero. Intelligent traffic management models. In *ESIT*, pages 36–45, 2000.
- [KR84] J. Kahan and A. Rapoport. *Theories of coalition formations*. Hillsdale, New Jersey, 1984.
- [Kra01] S. Kraus. Strategic Negotiation in Multiagent environments. *MIT Press*, 2001.
- [KWZ95] S. Kraus, J. Wilkenfeld, and G. Zlotkin. Multiagent Negotiation under time constraints. *Artificial Intelligence*, 2(75):297–345, 1995.
- [Lea05] M. Luck and et al. *Agent technology roadmap*. M. Luck, P. McBurney, O. Sherhory, S. Willmott, 2005.
- [LMP03] M. Luck, P. McBurney, and C. Preist. *Agent Technology: Enabling Next Generation Computing (A Roadmap for Agent Based Computing)*. AgentLink, 2003.
- [Mal88] T. W. Malone. What is coordantion theory? In *National Science Foundation Coordination Theory Workshop*. MIP, EE.UU., 1988.
- [Mas04] Ana Mas. *Agentes Software y Sistemas Multiagente: Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*. Pearson-PrenticeHall, 2004.
- [McQ99] McQueen. *Intelligent transportation systems architecture*, pages 201–258. Artech House Books, 1999.
- [Mea02] D. S. Milojevic and et al. Peer-to-Peer Computing. Technical Report HPL-2002-57, HP, 2002.
- [Mul96] H. J. Muller. Negotiation principles. In John Wiley & Sons, editor, *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, pages 211–230, Norway, 1996.
- [Nas53] J. F. Nash. Two person cooperative games. *Econometrica*, (21):128–140, 1953.

- [OMG01] OMG: CORBA 2.4.2 Specification. <http://www.omg.org>, 2001.
- [OR94] M. J. Osborne and A. Rubinstein. *A course in Game Theory*. MIT Press, 1994.
- [OR05] M. J. Osborne and A. Rubinstein. *Bargaining and Markets*. UCLA Department of Economics, upgrade version 2005 edition, 2005.
- [PRO05] The protégé ontology editor and knowledge acquisition system. <http://protege.stanford.edu/>, 2005.
- [PS03] Juan Pavón and Jorge Gómez Sanz. Agent Oriented Software Engineering with INGENIAS. In J. Müller V. Marik and M. Pechoucek, editors, *3rd International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems (CEEMAS 2003)*, volume 2691 of *LNAI*, pages 394–403. Springer-Verlag, 2003. Multi-Agent Systems and Applications II.
- [Rea94] J. S. Rosenschein and et al. *Rules of encounters*. MIT Press, 1994.
- [Rim03] Giovanni Rimassa. *Runtime Support for Distributed Multi-Agent Systems*. In ph. d. thesis, University of Parma, Jan 2003.
- [RSN95] Russell, J. Stuart, and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Englewood Cliffs, 1995.
- [Rub52] A. Rubinstein. Perfect equilibrium in a bargaining model. *Econometrica*, 50:97–109, 1952.
- [Sam05] J. J. Samper. *Ontologías para servicios web semánticos de información de tráfico: descripción y herramientas de explotación*. PhD thesis, Universidad de Valencia - Departamento de Informática, 2005.
- [San99] T. Sandholm. *Distributed Rational Decision Making*, chapter A Modern Introduction to Distributed Artificial Intelligence, pages 201–258. Multiagent Systems. Weiß, G., 1999.
- [Sch01] Herbert Schilt. *Manual de Referencia*. 4 edition, Aug 2001.
- [Sea69] J. R. Searle. *Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge University Press, 1969.
- [SER05] Serti project. <http://www.serti-mip.com>, 2005.
- [SFJ97] C. Sierra, P. Faratin, and R. Jennings. A service-oriented negotiation model between autonomous agents. In Ronneby, editor, *8th European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, pages 17–35, Sweden, 1997. MAAMAW.

- [SP04] J. Gómez Sanz and J. Pavón. Methodologies for Developing Multi-Agent Systems. *Journal of Universal Computer Science*, 10(4):359–374, April 2004.
- [TAP00] Telematics applications programme. 4th framework programme for rtd&d. Telematics applications for transport. Project Final Reports, 2000.
- [TDO04] Traffic dodger. <http://www.trafficdodger.com>, 2004.
- [Tea05] V. R. Tomás and et al. An eXtensible Graphic Container with integrated ontological layer for Transportation systems. The Netherlands, June, 2005 2005.
- [TEL] Telcontar traffic manager. <http://www.telcontar.com/products/tm/>.
- [TF05] V. R. Tomás and L. A. García Fernández. A cooperative multiagent system for traffic management and control. In AAMAS, editor, *Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems*, Industrial Track, 2005.
- [TGSC02] Vicente R. Tomás, J. F. Garcia, J. J. Samper, and E. Carrillo. Improving traffic management plans using html and xml. In *International conference on Electronics and Hardware Systems (IEHS2002)*, Spain, 2002.
- [TH93] D.S.W. Tansley and C.C. Hayball. *Knowledge Based systems Analysis and Design a KADS developer's handbook*. 1993.
- [Tir88] J. Tirole. The theory of industrial organization. *MIT Press*, 1988.
- [UNI05] An introduccion to ITS. <http://www.civil.engineering.utoronto.ca/English/ITS.html>, 2005.
- [vNM44] John von Neumann and Oskar Morgenstern, editors. *The Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1944.
- [VS99] N. Vulkan and T. Sandholm. Bargaining with deadlines. In *Proceedings AAAI-99*, pages 44–51, Orlando, 1999.
- [vvdH05] R.T. van Katwijk, P. van Koningsbruggen, B. De Schutter, and J. Hellendoorn. A test bed for multi-agent control systems in road traffic management. In *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, January 2005. Paper 05-0774.

- [Wei99] Gerhard Weiss, editor. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. the MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1999.
- [WJK00] M. Wooldridge, N. R. Jennings, and D. Kinny. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 15, 2000.
- [Woo97] M. Wooldridge. Agent-based Software Engineering. In *Software Engineering*, volume 1, pages 26–37. IEE, Feb 1997.
- [Woo02] Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley and Sons, Chichester, England, 2002.
- [XAL04] Xalan Java. <http://xml.apache.org/xalan-j/>, September 2004.
- [ZWJ00] F. Zambonelly, M. Wooldridge, and N. R. Jennings. Organisational Rules as an Abstraction for the Analysis and Design of Multi-Agent Systems. *International Software Engineering and knowledge Engineering*, 2000.

Parte IV

Anexos

Glosario

ACC	Agent Communication Channel.
ACL	Agent Communication Language.
AMS	Agent Manager System.
ANS	Agent Name Service.
ATMS	Advanced Traffic Management Systems.
BDI	Belief Desire Intentions.
CCTV	Circuito Cerrado de TeleVisión.
CGT	Centro de Gestión de Tráfico.
CIT	Concentrador de Información de Tráfico.
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency.
DATEX	DATA EXchange.
DF	Directory Facilitator (Facilitador de directorio).
DGT	Dirección General de Tráfico.
ebXML	Electronic Business eXtensible Markup Language.
ETD	Estación de Toma de Datos.
FIPA	Foundation Intelligent Physical Agent.
HTML	Hyper Text Markup Language.
IDK	Ingenias Development Kit.
ITS	Intelligent Transport System.
J2ME-CLDC	Java 2 Micro Edition-Connected Limited Device Configuration.
JAS	Java Agent Services.
JADE	Java Agent DEvelopment framework.
JADE-LEAP	Java Agent DEvelopment framework-Light Extensible Agent Plat- form.
JVM	Java virtual Machine.
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language.
KSE	Knowledge Sharing effort.
LoS	Level of Service.
MASIF	Mobile Agent System Interoperabilities facility.
OMG	Object management Group.
PGT	Plan de Gestión de Tráfico.

PMV	Panel de Mensaje Variable.
RDF	Resource Description Framework.
RDP	Resolución Distribuida de Problemas.
RDS-TMC	Radio Data System - Traffic Message Channel.
SL	Semantic Language.
SMA	Sistema MultiAgente.
SMS	Short Message Service.
SOAP	Simple Object Access Protocol.
SVG	Scalable vector Graphics.
STM	Servicio de Transporte de Mensajes.
UDDI	Universal Description, Discovery and Integration.
UML	Unified Model Language.
UPnP	Universal Plug & Play.
WAP	Wireless Application Protocol.
WSDL	Web Services Description Language.
XGC	eXtensible Graphic Container.
XML	eXtensible Markup Language.

Notación Matemática Capítulo 5

δ^a	Función del agente a que penaliza la utilidad según avanza el tiempo.
$\phi_r^a(t)$	Función que permite al agente a implementar la táctica temporal (Boulware, Lineal o Conceder) sobre el recurso r .
$\Phi_a(r^j, S^i)$	Función que indica si un recurso r^j , gestionado por el agente a , interviene en el servicio S^i .
a	Agente.
\hat{a}	Agente opuesto a a .
A	Agenda de negociación.
$Acc(S^i, t)$	Función que determina la acción a realizar en el instante $t + 1$, para el servicio S^i .
c	Agente cooperador.
E_j	Escenario j .
$Est_i^a(r)$	Estrategia i del agente a sobre el recurso r .
$Est_o^a(r)$	Estrategia <i>óptima</i> del agente a sobre el recurso r .
$Est_o^a(S^i)$	Estrategia <i>óptima</i> del agente a sobre el servicio S^i .
$f^t(r)$	Función que proporciona el valor temporal de una oferta sobre el recurso r .
m	Agente manager.
$MaxOf(r)$	Máximo valor ofrecido de un agente para el recurso r que gestiona.
$MinOf(r)$	Mínimo valor ofrecido de un agente para el recurso r que gestiona.
$MaxReq(r)$	Máximo valor requerido de un agente para el recurso r que no gestiona.
$MinReq(r)$	Mínimo valor requerido de un agente para el recurso r que no gestiona.
$Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t$	Conjunto de ofertas individuales sobre los servicios que componen la agenda, realizada por el agente a al agente \hat{a} en el instante t .
$Oferta_{a \rightarrow \hat{a}}^t(S^i)$	Oferta individual, realizada por el agente a al agente \hat{a} en el instante t , sobre el servicio (S^i).
opt	Identificador que determina el abandono de la negociación sobre un servicio.
$opt\ out$	Identificador que determina que un agente abandona la negociación.

$Possible_{\hat{a}}(r)$	Lista de creencias del agente a sobre lo que el agente \hat{a} supone que puede ser el valor máximo que el agente a puede llegar a ofrecer.
$Q(A)$	Calidad de servicio de la agenda de negociación A .
$Q(S^i)$	Calidad de servicio de S^i .
r_a^i	Recurso i gestionado por el agente a .
$R_a^i(r)$	Función que proporciona, al agente a , el valor de una oferta sobre el recurso r , en función de la importancia del servicio i , al que pertenece.
Res	Tupla de valores que especifica el resultado de la negociación.
$ROffer_a^{t,i}(r)$	Función combinada de $f^t(r)$ y $R_a^i(r)$.
SB	Servicio básico.
S^i	Servicio i .
SO	Servicio óptimo.
SN	Servicio Normal.
S^p	Servicio que presenta problemas.
t	Instante temporal.
$T_{desarrollo}^i$	Tiempo necesario para poder desarrollar el servicio S^i una vez acordada su implementación.
$T_{frontera}$	Tiempo en el que los problemas producidos por S^p alcanzan al agente cooperador.
T_{max}	Tiempo máximo de la negociación del protocolo.
$T_{negociacion}^i$	Tiempo máximo de la negociación del servicio S^i .
$T_{resolucion}$	Tiempo estimado para que la negociación con otros servicios permita ayudar a resolver los problemas de S^p .
$U_a(r)$	Utilidad del recurso r para el agente a .
$U_a(S^i)$	Utilidad del servicio S^i para el agente a .
$U_a^{esp}(Est_i^a(r))$	Utilidad esperada de aplicar la estrategia $Est_i^a(r)$.
$Use(r)$	Uso actual del recurso r .
w_a^i	Valor de la importancia del servicio S^i para el agente a .
w_a^o	Valor de la importancia del servicio <i>óptimo</i> para el agente a .
w_a^b	Valor de la importancia del servicio <i>básico</i> para el agente a .

Notación Matemática Capítulo 6

$\phi_{comb}^a(t)$	Función que permite al agente a implementar las tácticas temporales (Boulware, Lineal o Conceder) sobre los itinerarios que pertenecen a I^{comb} .
A	Agenda de negociación.
a	Agente.
\hat{a}	Agente opuesto a a .
ActLos	Nivel de servicio actual en un segmento o enlace.
c	Agente cooperador.
d	Agente demandante.
$Est_i^a(I^{alt})$	Estrategia del agente a , que ofrece el i elemento del conjunto $Posibles_{\hat{a}}(I^{alt})$ para el itinerario alternativo I^{alt} .
$Est_o^a(I^i)$	Estrategia óptima, del agente a , para el itinerario I^i .
$f_a^t(I^i)$	Función, del agente a , que devuelve el valor de la oferta temporal del itinerario I^i para el agente a .
I^{alt}	Itinerario alternativo.
I^{comb}	Itinerario combinado, formado por el itinerario principal y un itinerario alternativo.
I^i	Itinerario i .
I^p	Itinerario donde ocurre el incidente.
$It_a^{comb}(I^k)$	Función que devuelve el valor de la oferta en función de la importancia del itinerario combinado al que pertenece I^k .
Inc	Información del Incidente.
$Los(Seg_a^i)$	Nivel de servicio del segmento i que gestiona el agente a .
MaxLos	Máximo nivel de servicio en un segmento o enlace.
MinLos	Mínimo nivel de servicio en un segmento o enlace.
$Oferta_a^{t,comb}(I^i)$	Función combinada de $f_a^t(I^i)$ y $It_a^{comb}(I^i)$.
$Posibles_{\hat{a}}(I^i)$	Lista de creencias del agente a sobre lo que el agente supone que el agente \hat{a} cree que puede ser el nivel de servicio tope que el agente a puede llegar a ofrecer para el itinerario I^i .
$Q(I^i)$	Calidad de servicio del itinerario i .

RQI	Relación entre las calidades de servicio de un itinerario con respecto a I^p .
Seg_a^i	Segmento i que es gestionado por el agente a .
$T_{desarrollo}^{comb}$	Tiempo que ambos agentes tardarán en desarrollar el itinerario combinado I^{comb} una vez acordado.
$T_{frontera}$	Instante temporal en el que los problemas afectarán al agente opuesto.
T_{max}	Tiempo máximo de la negociación.
$T_{negociacion}^{comb}$	Tiempo máximo de la negociación del itinerario combinado I^{comb} . ($T_{negociacion} - T_{desarrollo}^{comb}$).
$T_{resolucion}$	Tiempo que el agente prevé que mediante la negociación sobre itinerarios alternativos se puede solucionar el incidente.
$U_a(oferta)$	Utilidad de la oferta para el agente a .
$U_a^{esp}(Est)$	Utilidad esperada de la estrategia Est .
w_a^{comb}	Importancia del itinerario combinado I^{comb} para el agente a .
w_a^{combo}	Importancia del itinerario <i>óptimo</i> para el agente a .
w_a^{combb}	Importancia del itinerario <i>básico</i> para el agente a .

Proyectos Internacionales

En este anexo se exponen y describen los proyectos internacionales más relevantes que se están desarrollando en la Unión Europea, en el marco de los Sistemas Inteligentes de Transporte.

Introducción

La importancia del dominio del transporte y de sus problemas ha promovido la investigación y desarrollo en materia de ITS auspiciada por una fuerte inversión de la Unión Europea.

Entre los años 1989 y 1991 se llevó a cabo el primer programa de desarrollo en investigación telemática en el área de transportes, *DRIVE I (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe)*, compuesto por 72 proyectos cuyos objetivos fueron aumentar la seguridad vial y los flujos de tráfico. En estos proyectos se invirtieron 120 millones de euros, de los cuales un 50% fueron subvencionados por la Unión Europea. Las actividades de desarrollo e investigación continuaron con el programa específico sobre servicios telemáticos en las áreas de interés general del 3^{er} programa marco *DRIVE II*, entre los años 1992 y 1994, en el que enmarcaban los proyectos de Aplicaciones Telemáticas en el transporte conocidas como ATT (*Applications of Telematics in Transport*) [TAP00].

Paralelamente a los programas marco, en el año 1995, la Comisión Europea financia, con 125 millones de Euros, distintos proyectos, de carácter anual, con el objeto de desarrollar la Red Transeuropea del Transporte (TENT-T). Estos proyectos se clasifican en tres tipos, atendiendo al área de cobertura del proyecto:

- *Generales*, en los que participan todo los países miembros la UE. En ellos se realizan acciones generales y consensuadas para el desarrollo y provisión de servicios pan-europeos.

- *Eurorregionales*, en los que participan varios países o regiones con redes de carreteras adyacentes.
- *Nacionales*, desarrollados por un único país pero con importancia europea.

Los proyectos Eurorregionales

El objetivo de los proyectos Eurorregionales es mejorar las condiciones del tráfico y el servicio a los usuarios en zonas o regiones concretas de la Unión Europea que, por sus características geográficas unidas a las características del tráfico, presentan una problemática común y necesitan de actuaciones coordinadas a nivel europeo.

En el año 2001, la Comisión Europea lanza el programa TEMPO (Trans-European intelligent transport systems PrOjects) con el que se logra realizar un despliegue armonizado y sincronizado de los sistemas y servicios ITS en la red europea de transporte por carretera. El programa anual de financiamiento de TEN-T fue sustituido por uno plurianual, el MIP (Multi-Annual Indicative Programme) que permite, a la Comisión Europea, tomar decisiones indicativas sobre los presupuestos de ITS para los siguientes años, permitiendo realizar una planificación más amplia para así poder dar soporte a proyectos a medio y largo plazo. Este programa está financiado en parte por la Dirección General para la Energía y el Transporte de la Comisión Europea y en parte por los Estados miembros [EUR02].

Las proyectos Eurorregionales creados cubren toda la red Trans Europea de carreteras TERN¹ y son :

- CENTRICO (Central European Region Transport Telematics Implementation Project) del que forman parte: Bélgica, Luxemburgo y algunas regiones de Francia, Alemania y Holanda.
- CORVETTE (Co-ordination and Validation of the Deployment of Advanced Transport Telematics in the Alpine Area) en el que participan: Austria, la región de Baviera en Alemania y la región norte de Italia.
- ARTS (Advanced Road Traffic in South-west), del que forman parte: Portugal, la zona SurOeste de Francia y la zona Oeste de España.
- SERTI (Southern European Road Telematics Implementation), del que forman parte: el área Este de España y Francia, la zona SurOeste de Alemania, la zona Norte de Italia, Suiza y Andorra.

¹La TERN incluye las carreteras de primer orden de los países miembros de la Unión Europea.

- STREETWISE (Seamless TRavel Environment for Efficient Transport in the Western ISles of Europe) en la que participan: Inglaterra, Escocia y la región francesa del Canal de la Mancha.
- VIKING en el que participan: Dinamarca y algunas regiones de Finlandia, norte de Alemania, Suecia y Noruega.
- A estos proyectos se unió en 2004, con la ampliación de países de la unión Europea, CONNECT (Co-ordination and stimulation of innovative ITS activities in Central and Eastern European countries) en el que participan: Austria, la República Checa, Alemania, Hungría, Italia, Polonia, Eslovaquia y Eslovenia.

En la figura 1 se puede observar las distintas áreas de cobertura de los proyectos.



Figura 1: Áreas de cobertura de los proyectos Euroregionales.

Las actividades que se realizan en los distintos proyectos Euroregionales, comunes a todos, se clasifican en 5 dominios de los cuales, los 4 primeros están enfocados

a los sistemas ITS:

Dominio 1 *Infraestructuras de monitorización en carretera* que engloba todas las actividades relacionadas con el desarrollo de planes de monitorización de la red, el equipamiento de estaciones fijas y móviles de captura de datos y los sistemas de control.

Dominio 2 *Red Europea de Centros de Tráfico* donde se enmarcan las actividades de mejora y actualización de los CGTs o los sistemas de integración e intercambio de información de tráfico como el Nodo DATEX ².

Dominio 3 *Gestión y Control de Tráfico* que se encarga de todas las actividades concernientes a la gestión y control del tráfico tanto a nivel regional como nacional e internacional. Una de las actividades principales en este dominio es el desarrollo de planes de gestión de tráfico, tanto nacionales como transfronterizos, frente a incidencias.

Dominio 4 *Servicios de Información al Viajero* donde se engloban todas las actividades relacionadas con los sistemas de difusión de información al usuario final, tanto sistemas On-trip (RDS-TMC, cálculo de tiempos de viaje, servicios WAP, etc.) como Pre-trip (calculadores de itinerarios, sistemas de información vía WEB, etc).

El último dominio, *gestión del proyecto*, se encarga de las tareas de dirección y gestión del proyecto y de las relaciones y actividades que se realizan coordinadamente con el resto de proyectos Eurorregionales. De estas actividades es importante destacar:

- *Expert groups*, donde se reúnen los responsables de todos los proyectos para presentar la evolución y compartir las experiencias obtenidas en los dominios de cada uno de los proyectos. En la actualidad existen 5 grupos: 1) *Road Monitoring* relacionado con la captación de información del tráfico, 2) *Traffic Management*, de reciente creación, encargado de las actividades de gestión y control del tráfico, 3) *Information Exchange* donde se trabaja en el desarrollo de sistemas y modelos de información para el intercambio de datos, 4) *Traveller Information Services* que se encarga de los sistemas de información de tráfico al usuario, y 5) *Evaluation expert Group* encargado de evaluar los resultados proporcionados por los diferentes sistemas ITS.

²DATEX es un preestándar Europeo para el intercambio de información entre centros de gestión de tráfico.

- *Joint ARTS-SERTI-CORVETTE Traffic Management Plans Ativity*. Actividad desarrollada por los tres proyectos con el objeto de homogeneizar el desarrollo de planes de gestión de tráfico en especial aquellos que se enmarcan en zonas transfronterizas.
- *Long Distance Corridor Demonstration project*. Proyecto desarrollado entre STREETWISE, CENTRICO y CORVETTE cuyo objetivo es desarrollar estrategias compartidas y coordinadas en corredores internacionales de larga distancia.
- *Mare Nostrum VMS* es un proyecto desarrollado por ARTS, SERTI y CORVETTE con el objetivo de establecer un conjunto común de prácticas de señalización en Paneles de Mensaje Variable (PMV) a lo largo de un corredor de tráfico de larga distancia que se extiende desde Sevilla (España) hasta Trieste (Italia).

DATEX

Introducción

DATEX es una metodología para el intercambio electrónico de información de tráfico entre centros de control de tráfico (CGTs) y centros de información de tráfico (CITs). Esta metodología fue desarrollada en el marco del proyecto de investigación DRIVE subvencionado por la Comisión europea. El trabajo realizado en el proyecto consistió en la creación de dos documentos: el diccionario de datos DATEX (DATEX Data Dictionary CEN ENV13106:2000) y la especificación de red DATEX (DATEX NET Specification CEN ENV13777:2000), que fueron enviados al Comité Europeo de Estandarización (CEN) donde se definieron como pre-estándar.

El diccionario de datos DATEX define los términos usados para identificar la información relacionada con el tráfico. En general, el diccionario es aplicable a la ingeniería de tráfico y transporte. En particular, el diccionario se utiliza para el intercambio de información entre organizaciones.

La especificación DATEX net define la metodología, funciones y estructura de los mensajes para el intercambio de la información entre los centros de gestión de tráfico. DATEX net permite a diferentes sistemas el intercambio de información de tráfico entre diferentes organizaciones. La peculiaridad de DATEX es que cada sistema es libre de adoptar la implementación de la especificación adaptándola a sus propias funcionalidades.

Definiciones de los tipos de datos

A continuación se describen los diferentes tipos de datos que pueden ser utilizados en un mensaje DATEX descritos en la norma *ENV 13777:2000 - DATEX specifications for data exchange between traffic and travel information centres* (ver-

sion 1.2a):

- *Situación* (SITUATION): es un conjunto de circunstancias de tráfico con una causa común que es aplicable a un área particular de una red viaria. Una situación puede ser un evento o un informe del estado de la red viaria. Cada situación debe estar compuesta por uno o más elementos de situación.
- Un *elemento* de situación (ELEMENT) es una circunstancia relacionada con un objeto de datos y una posición. Cada elemento de situación podría tener:
 - *Objeto de datos* (DATA_OBJECT): es un conjunto de situaciones de tráfico relacionadas lógicamente. Por ejemplo, un “nivel de servicio” en el conjunto de objetos “Condiciones de Tráfico”.
 - *Frase* (PHRASE): Una descripción parcial de una situación de tráfico o de datos de tráfico. Puede ser considerado como un dato específico de situación que detalla el estado del objeto de datos al que se refiere (p.ej. “Tráfico estacionario” para el objeto de datos “nivel de servicio”).
 - *Localización* (LOCATION): que identifica la posición concreta o tramo donde ocurre el incidente.
Si la localización no esta relacionada con un desvío, el elemento de situación debe tener una localización primaria (ELT_PRIM_LOC) y si fuera necesario una localización secundaria (ELC_SEC_LOC). Si por el contrario, la situación está relacionada con un desvío, el elemento de situación debe contener al menos un punto de elemento de decisión (ELT_DEC_PT).
 - *Atributo* (ATTRIBUTES): Información básica que puede caracterizar entidades o mensajes. Ejemplos: la precisión puede utilizarse como un atributo del objeto de datos “velocidad media”, una clase de vehículos puede usarse como un atributo del objeto de datos “datos sobre un vehículo individual”. El Diccionario define tres tipos de atributos. Los atributos pueden ser:
 - Cantidades numéricas (“Longitud de la Cola” por ejemplo) y en este caso se ha de definir su unidad de medida (“Kilómetros” en el caso de “Longitud de la cola”).
 - Valores codificados (“Clase de eje” puede tener valores codificados como “1” para un único eje, “2” para un eje doble y “3” para un eje triple). Algunos atributos utilizan tanto valores numéricos como codificados.
 - Por último, el atributo *frase* se define explícitamente en el Diccionario.

La figura 1 muestra la relación entre los diferentes tipos de datos que forman parte de un mensaje DATEX.

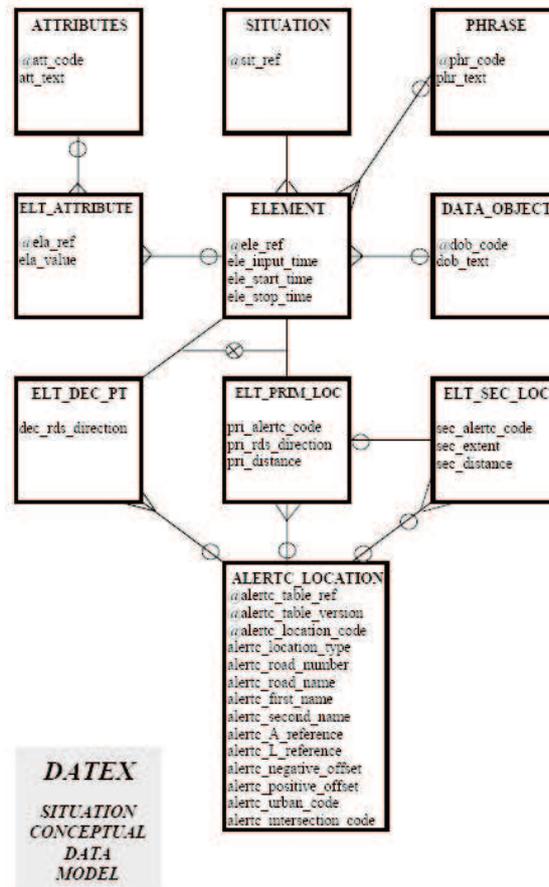


Figura 1: Modelo de datos DATEX

La tabla 1 muestra un extracto de códigos DATEX para eventos meteorológicos. A continuación, en la tabla 2, se muestra la codificación de un mensaje DATEX para un evento de viento fuerte (50 km de fuerza) en la carretera A-3, punto kilométrico 255.

Extracto Códigos DATEX de meteorología	
FLD	Inundación
FOD	Niebla densa
FOG	Niebla, visibilidad mayor de 50 m
GAL	Vendaval
HAI	Está cayendo lluvia helada o piedras de granizo
HUR	Vientos huracanados
ICP	Placas de hielo
RAI	Lluvia, visibilidad mayor de 50 m.
RIC	Riesgo de deslizamiento debido a hielo
SFL	Nevada, visibilidad mayor de 50 m
SM	Obligatorio el uso de cadenas
VIR	Visibilidad reducida
WIS	Vientos entre 40 y 60 km/h

Tabla 1: Extracto Códigos DATEX de meteorología.

Inicio mensaje	UNA:+.?
Cabecera mensaje EDIFACT	'UNB+UNOC:3+es001+es002+200404:1156+7293
Cabecera mensaje TRAVIN	'UNH+7292+TRAVIN:14:97B:DX
Identificación de la situación y del elemento	'BGM+1:1::LE404200001+LE404200001.2M+1
Hora del sistema	'DTM+MST:200404200956P02:303
Hora de inicio	'DTM+STA:200404200956P02:303
Hora de inserción	'DTM+INP:200404200956P02:303
Hora de la versión	'DTM+VET:200404200956P02:303
Hora de finalización	'DTM+STO:200404201003P02:303 'GIS+END:::Y
Localización (primaria <8905> y secundaria <8906>)	'LOC+LOC+8905:4:E17+8906+B
Información fuente <es001>	'NAD+MSE+es001
Versión tabla de localización <1.6>	'RFF+LTV:1.6
Versión de la incidencia <1>	'RFF+VNM:1
Objeto de datos <WIN>	'STS+DOB+WIN
Frase <WIS>	'STS+PHR+WIS
Desplazamiento de la localización primaria <1400>	'QTY+DPL:1400
Desplazamiento de la localización secundaria <6800>	'QTY+DSL:6800
Texto libre <VILLAR>	'FTX+SUR+++ %%VILLAR%%:::
Código control 2	'UNT+18+7292
Código control 1	'UNZ+1+7293'

Tabla 2: Codificación de un mensaje DATEX para un evento de viento fuerte (50 km de fuerza) en la carretera A-3 punto kilométrico 255.

Publicaciones

Derivadas de la tesis

1. *A cooperative multiagent system for traffic management and control*. Vicente R. Tomás and L. A. García Fernández. In AAMAS05, Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems, Industrial Track, 2005.

En el presente artículo se presenta el sistema multiagente desarrollado para la activación de PGTs. En él se describe tanto la ontología de tráfico, como la arquitectura del sistema.

2. *Agent-Based Management of Non Urban Road Meteorological Incidents*. Vicente R. Tomás and Luis A. García. Multiagents systems an applications IV. Lecture Notes in Artificial Intelligence. 3690 pag. 213-222. Springer-Verlag. 2005.

En este artículo se presenta el sistema multiagente para la gestión de incidentes meteorológico diseñado en la tesis. En él se introduce la ontología que permite modelar los planes de gestión de tráfico y el modelo de interacciones que los agentes que representan a centros de gestión de tráfico, deben seguir para poder desarrollar medidas de gestión de tráfico coordinadas.

3. *Using MAS in automated Traffic Management Plans*. Vicente R. Tomás, Jose Fco. García, Luis A. García , Juan J. Martínez. Journal of Advanced Technology on Automation, Control and Instrumentation. Volume 1. Year 2005.

En este artículo se analizan los prototipos desarrollados en el marco de los planes de gestión de tráfico. En él se presentan las deficiencias detectadas en los primeros modelos, basados en HTML y XML y como éstas pueden ser subsanadas mediante la utilización de la tecnología de agentes.

4. *An eXtensible Graphic Container with integrated Ontological Layer for Transportation Systems*. Vicente R. Tomas, L. Van Den Berg, J.J. Samper, E. Ca-

rillo. 6th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. CAID & CD 2005 Delft, The Netherlands, June, 2005.

En este artículo se presenta un contenedor basado en JAVA para el desarrollo de interfaces gráficas en el dominio del tráfico. La ontología de tráfico desarrollada en esta tesis, junto al desarrollo del agente interfaz ha servido para desarrollar los sistemas objeto y para proporcionar el conocimiento semántico.

5. *New technologies to work with traffic management plans.* Vicente R. Tomás, Ana Luz Jiménez, C. Cambres, and F. Soriano. Traffic technology International journal, Annual review:182-184, 2003.

Este artículo se analiza la necesidad de incorporar los avances de los sistemas de información y la utilización de las nuevas tecnologías aplicadas a la gestión del tráfico. En concreto, define cuales son los nuevos pasos a seguir para poder mejorar la informatización de los planes de gestión de tráfico.

6. *A system to automate traffic management plans* Vicente R. Tomás, J. García, L.A. García J.J. Samper. International conference on Automation, Control & Instrumentation. Bilbao 2005.

En este artículo se presentan los planes de gestión de tráfico y se describe como la tecnología de agentes permite integrar la información necesaria para desarrollar los planes.

7. *The importance of information exchange in traffic management plans.* Ana Luz Jiménez, Vicente R. Tomás. 11th World Congress on Intelligent Transport Systems. Nagoya. Japan 2005.

Es este artículo se identifica la importancia de la información y la necesidad de la utilización de un vocabulario común para poder intercambiar información entre diferentes sistemas.

8. *Knowledge representation system.* Vicente R. Tomas, J. J. Martínez, A. Sáez, J.F: Garcia. Euro American conference on telematics and Information Systems - EATIS2006. Santa Marta. Colombia February 2006.

En este artículo se presenta el agente interfaz desarrollado en la tesis y la importancia que los sistemas de representación de conocimiento tienen en el soporte a los usuarios.

Relacionadas con la tesis

1. *A Web Tool to use traffic Management Plans.* Vicente R. Tomás, J.F. Garcia, J.J. Samper, E. Carrillo WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS Issue 1,

Volume 2, January 2003. ISSN:1109-2734

2. *Improving Traffic Management Plans using HTML and XML*. Vicente R. Tomás, J. F. García, J. J. Samper, E. Carrillo, C. Cambres. International Conference on Electronics & Hardware Systems ISBN 960-8052-65-3, 2002 by WSEAS, 2002.
3. *Aproximación a los planes de gestión de tráfico: proyectos ARTS y SERTI*. Ana Luz Jiménez, F. Soriano, Vicente R. Tomás, and F. Fernández. CIT2002 Congreso de Ingeniería del Transporte, Spain, 2002.
4. Vicente R. Tomás and Garcia Luis A. "Freeway Traffic Qualitative Simulation" 18th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA-AIE) Italy. June 2005.
5. Vicente R. Tomás and Garcia Luis A. "Qualitative simulator for traffic monitoring". 7th international conference on control and applications. Cancún. Mexico May 2005.

