



Universidad de Murcia

Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones

Arquitectura de una Plataforma Telemática Integral
para el Despliegue de Servicios Ubicuos en el
Ámbito de los Sistemas Inteligentes de Transporte

José Santa Lozano

2009



Universidad de Murcia

D. Luis Daniel Hernández Molinero, Profesor Titular de Universidad del Área de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial y director del Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones de la Universidad de Murcia,

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “Arquitectura de una Plataforma Telemática Integral para el Despliegue de Servicios Ubicuos en el Ámbito de los Sistemas Inteligentes de Transporte”, ha sido realizada por D. José Santa Lozano, bajo la inmediata dirección y supervisión de D. Antonio Fernando Gómez Skarmeta, y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Murcia, a 15 de Enero de 2009.

D. Luis Daniel Hernández Molinero



Universidad de Murcia

D. Antonio Fernando Gómez Skarmeta, Profesor Titular de Universidad del Área de Ingeniería Telemática en el Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones de la Universidad de Murcia,

AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “Arquitectura de una Plataforma Telemática Integral para el Despliegue de Servicios Ubicuos en el Ámbito de los Sistemas Inteligentes de Transporte”, realizada por D. José Santa Lozano, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 15 de Enero de 2009.

D. Antonio Fernando Gómez Skarmeta

Resumen

La carrera por dotar a los vehículos de mayor seguridad y de comodidades hasta hace poco inimaginables, ha espoleado los avances en novedosos sistemas inteligentes de transporte, o intelligent transportation systems (ITS). De hecho, tal es la cantidad de líneas de trabajo y ámbitos de la ciencia que conforman los ITS, que la investigación se ha visto diversificada en gran medida en el último lustro. Uno de los campos que más interés procesa (si no el que más) es el de la telemática vehicular. Los nuevos servicios de a bordo englobados por la informática y las telecomunicaciones no paran de crecer en el ámbito científico, e incluso los modelos comerciales empiezan a incorporarlos en forma de sistemas de navegación integrados o mecanismos de tele-asistencia, por ejemplo.

No obstante, el área de los servicios telemáticos ya es de por sí un campo muy amplio y son muchos los subsistemas que deben adecuarse para el desarrollo y despliegue de éstos. En el lado del vehículo, la unidad de a bordo y el sistema de navegación, se identifican como elementos clave en todas las plataformas actuales. El equipamiento del lado de la carretera y la disposición de un sistema de información remoto localizado en la infraestructura, también son fundamentales en plataformas con capacidades de procesamiento global de información. Sin embargo, son la redes de comunicación vehicular las que conforman el punto de mira de buena parte de la comunidad investigadora en estos momentos. En un desarrollo abierto, una red vehicular involucra tanto al equipamiento de a bordo como a la infraestructura, ya sea mediante un soporte físico o lógico.

Los trabajos relativos a la unidad de a bordo han sido considerados, hasta la fecha, como avances colaterales derivados de la investigación en alguno de los subsistemas del vehículo, como por ejemplo el de comunicaciones, el de navegación o el de visión. Sin embargo, la adecuación de un computador embarcado de propósito general, en contraposición con los dedicados, es vital en una plataforma telemática flexible. El sistema de navegación es también esencial para estas aplicaciones, ya que la posición es fundamental para soportar servicios basados en la localización. Los sistemas de navegación por satélite son actualmente la referencia, sin embargo, su rendimiento es muchas veces obviado, incluso cuando pueden ser un factor clave para otros subsistemas. Estas implicaciones de rendimiento fundamentadas en la precisión, cobertura y continuidad, se han visto recientemente ampliadas por las necesidades de monitorización de la integridad (o fiabilidad) del sistema. Finalmente, el tercer componente principal en una plataforma telemática de a bordo es la red

de comunicación. Las soluciones comerciales del momento se basan en una simple recolección de datos mediante una red celular, en aplicaciones de monitorización y control de flotas. Sin embargo, el interés en las redes sin infraestructura ha sido exponencial en los últimos años, mediante propuestas de redes *ad-hoc* vehiculares, o *vehicular ad-hoc networks* (VANET).

Si la investigación en estos tres pilares de los servicios telemáticos (unidad de a bordo, sistema de navegación y red vehicular) presenta ya un reto de forma individual, la integración de éstos en una plataforma común, en conjunción con otros componentes, es todavía más compleja. Este tipo de plataformas integrales o verticales son únicamente abordadas en la actualidad en algunos proyectos de investigación, aunque alcanzando, frecuentemente, soluciones desacopladas e incoherentes. Sin embargo, la consideración de plataformas globales comprende la base común para la definición de servicios ITS de nueva generación. El mundo tecnológico actual presenta, hoy día, una tendencia hacia los servicios y aplicaciones pervasivas, y el ámbito del vehículo está siendo poco a poco invadido por esta idea. Los servicios basados en la localización son sólo la punta del iceberg y la adecuación de estas plataformas telemáticas genéricas para ITS es cada vez más necesaria. En ellas, la posición es sólo parte de la información que determina el contexto del vehículo y, en un futuro, la oferta de servicios ubicuos fácilmente accesibles y adaptados a las necesidades de los usuarios, estará a la orden del día.

La tesis doctoral se encuadra dentro de este ámbito, mediante la definición de una plataforma integral para la provisión de servicios telemáticos tradicionales y de carácter ubicuo. La investigación puntual en los principales subsistemas de a bordo y del lado de la infraestructura, completa las piezas del puzzle que comprende un sistema de carácter genérico de despliegue de servicios ITS. La adecuación de un vehículo prototipo de referencia se ha enriquecido con una unidad de a bordo basada en un computador de propósito general, que incluye una propuesta de plataforma software modular basada en pasarela de servicios. El sistema de navegación toma como referencia a GPS, y explota las capacidades de los sistemas de aumento de señal, o *satellite based augmentation systems* (SBAS). De esta manera, se mejora la precisión y la disponibilidad, pero, sobre todo, se añade la funcionalidad necesaria para la monitorización de la integridad del sistema. La red vehicular cubre el hueco existente entre las soluciones poco flexibles basadas en redes de infraestructura, y las demasiado localizadas y distribuidas (VANET), mediante una arquitectura de comunicación *overlay* que funciona sobre unas resurgidas redes celulares. Finalmente, la plataforma se completa con un soporte remoto adicional de la infraestructura, para la definición de servicios pervasivos con capacidades de monitorización de la red viaria, procesamiento global, e inferencia descentralizada de información contextual adaptada a las preferencias de los usuarios.

Agradecimientos

A diferencia de lo que se suele pensar cuando se lee la sección de agradecimientos de una tesis doctoral, el tono desenfadado y la aparente comodidad con la que se redacta su texto en muchos casos, oculta la complejidad que el autor encuentra a la hora de recoger íntegramente a todas las personas de su entorno que le han ayudado a hacer la carga más liviana. En mi caso, espero que mi propuesta de agradecimientos se acerque en gran medida a la realidad, a la vez que pido disculpas por dejar en el tintero, seguramente por mi conocido despiste, a todas aquellas personas que deberían estar nombradas aquí.

En primer lugar, no puedo sino rendirme ante el apoyo incondicional, la paciencia, la comprensión, el interés, e incluso la ayuda técnica relativa a la redacción en español, de mi Angel-es. La escritura de esta tesis no ha hecho sino acentuar mi dedicación desmesurada al trabajo, lo cual ha terminado siendo injusto para ti. Si embargo, si en muchos momentos he podido seguir aporreando las teclas no ha sido gracias a otra persona.

Mi padre, mi madre y mi hermana. Desde que tengo conciencia están ahí para todo. Para ellos siempre he sido el mejor, a la misma vez el hijo y el hermano mayor. Sinceramente, creo que sigo siendo el mismo *ñaco* que suspendía lengua e inglés, al que le gustaba montar en bici los domingos con su padre, y el más cabezón de la casa.

No me puedo olvidar de los amigos en mi querida Yecla, y de todos aquellos compañeros de la universidad que han terminado siendo amigos. Dentro de este último grupo aparecen nombres como Manolo o Dani. Con éstos, junto con Juanjo (P), empezaron mis andadas en el departamento, en aquel *kiosco* del Camino Verde. Antonio (M), Andrés y Alberto forman parte de un grupo especial. Ellos ya eran amigos tiempo atrás, aunque el día a día no ha hecho sino aumentar esta idea. Ha sido un placer trabajar con los dos primeros en diversos aspectos tratados en la tesis. También Juanjo (G) y Fran, han estado dispuestos a echar una mano cuando fuera necesario.

Benito y Miki, los dos han sido hermanos mayores en distintos momentos y ámbitos en mis hasta ahora cinco años en el departamento. Igualmente, los dos Rafas (T y M) han sido bancos de consejos en diversos momentos, quizá debido a que camino detrás de ellos. Pedro y Gregorio también han estado ahí para lo que hiciera falta.

Ahora tengo que agradecer el estupendo trato que recibí durante mi estancia en París. *Many thanks to the whole IMARA Team, at INRIA Rocquencourt, for your kind attention during my stay, and specially to Thierry and Manabu. I've learned a lot working with you these four months.*

Finalmente, gracias a Antonio (S), y no sólo por permitirme trabajar con él, sino también por confiar en mí y por guiarme en este tan especial mundo de la universidad.

Índice general

Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas	xix
Acrónimos	xxiii
0. Summary	1
0.1. Context	1
0.2. Objectives	4
0.3. Related Work	4
0.4. On-Board Unit Architecture	7
0.4.1. OBU Design	7
0.4.2. Flexible Architecture Based on OSGi for Service Development	8
0.4.3. Prototype Vehicle	11
0.5. Advanced SBAS-Based Navigation System	15
0.5.1. Extended SBAS Support through Internet	16
0.5.2. Integrity Subsystem Based on GNSS	17
0.5.3. Experimental Evaluation of the Navigation System	21
0.6. Integral Networking Platform for ITS	27
0.6.1. Towards a Multi-Purpose Network Approach	27
0.6.2. Communication Architecture and Information Processing System	29
0.6.3. System Operation from the Vehicle Point of View	31
0.6.4. Reference Prototype	33
0.6.5. Network Performance Analysis	35
0.7. Thesis Conclusions	42
0.8. Relevant Publications	46
1. Introducción	51
1.1. Los Sistemas Inteligentes de Transporte	51
1.2. Elementos Arquitectónicos de los ITS en Carretera	53
1.3. Servicios Telemáticos en el Entorno Vehicular	55
1.4. ITS en el Contexto Internacional y su Regulación	58
1.4.1. El Mercado Actual	58
1.4.2. El I+D en ITS	59

1.4.3.	Organizaciones de Estandarización en Transporte	62
1.5.	Objetivos y Aportaciones de la Tesis Doctoral	63
1.5.1.	Unidad de a Bordo Multi-Servicio para Vehículos	64
1.5.2.	Sistema de Navegación y Monitorización de Integridad Basado en GNSS/SBAS e Internet	66
1.5.3.	Arquitectura de Comunicación Overlay con Soporte Unificado V2V, I2V y V2I	66
1.5.4.	Plataforma Ubicua de Provisión de Servicios e Información Contextual	67
1.6.	Organización del Documento	68
1.7.	Publicaciones Derivadas de la Tesis Doctoral	70
1.7.1.	Publicaciones Más Relevantes	70
1.7.2.	Resto de Publicaciones	72
2.	El Estado de las Tecnologías Involucradas en el Desarrollo de Servicios Telemáticos en ITS	75
2.1.	Equipamiento Hardware y Software de a Bordo en Vehículos	76
2.1.1.	Los Avances en Microelectrónica y Sistemas Embebidos	76
2.1.2.	Los Sensores de a Bordo	76
2.1.3.	La Unidad de a Bordo u OBU	77
2.1.4.	Software Embarcado en Vehículos y el Papel de OSGi	79
2.2.	Sistemas de Navegación por Satélite	80
2.2.1.	La Referencia: GPS	82
2.2.2.	Rendimiento de los Sistemas de Navegación por Satélite	84
2.2.3.	GNSS Diferencial	87
2.2.4.	La Apuesta Europea EGNOS y el Servicio SISNeT	88
2.2.5.	Monitorización de la Integridad	91
2.3.	Tecnologías de Comunicación Inter-Vehicular y con la Infraestructura	93
2.3.1.	Las Redes de Comunicación Vehicular y Ámbitos de Estudio	93
2.3.2.	Tecnologías de Comunicación Vehicular y su Aplicación Actual	95
2.3.3.	VANET	102
2.3.4.	Movilidad de la Red Intra-Vehículo en Internet	105
2.3.5.	Combinación de VANET y Movilidad IP	108
2.3.6.	Integración de Tecnologías de Red en CALM	109
2.3.7.	Redes Overlay P2P, JXTA	110
2.4.	Tecnologías Complementarias para Soporte Ubicuo en ITS	116
2.4.1.	Computación Ubicua	116
2.4.2.	Radio-Identificación, RFID	118
2.4.3.	Modelado del Entorno Mediante Ontologías	120
2.4.4.	Computación Distribuida	123
2.5.	Conclusiones	125

3. Plataforma Multi-Servicio de a Bordo para Vehículos Terrestres	127
3.1. La Informática y las Telecomunicaciones en el Vehículo del Futuro	128
3.2. Trabajo Relacionado con Plataformas Telemáticas en Vehículos	130
3.3. Plataforma Hardware del Vehículo Referencia	132
3.3.1. Arquitectura de la Unidad de a Bordo	133
3.3.2. Sensores GNSS	135
3.3.3. Módems de Conexión a la Red Celular	137
3.4. Arquitectura Software de a Bordo Basada en Pasarela de Servicios . . .	139
3.4.1. Diseño de una Arquitectura de Abstracción en Capas	139
3.4.2. Middleware de Gestión Interna del Sistema	142
3.4.3. Implementación de la Plataforma	143
3.4.4. Implementación de Servicios de Referencia	145
3.4.5. Desarrollo Orientado a la Composición	147
3.5. Conclusiones	148
4. Sistema de Navegación y Monitorización de Integridad Basado en GNSS/SBAS e Internet	151
4.1. La Navegación Terrestre y el Rol de la Integridad de la Posición	153
4.2. Antecedentes en el Uso de SBAS y el Cálculo de Factores de Integridad en ITS	154
4.3. Sistema Avanzado de Soporte SBAS	156
4.3.1. Estación de Monitorización y Gestión de Mensajes SBAS	157
4.3.2. Cliente WAAS/EGNOS	158
4.3.3. Comunicación con SISNeT	160
4.3.4. Conversión de Mensajes RTCA/DO-229C a RTCM SC-104	160
4.4. Cálculo de un Factor de Integridad Basado en GNSS	161
4.4.1. Subsistema de Cálculo de Integridad	162
4.4.2. Cómputo del Factor de Integridad HPL_{SBAS}	164
4.5. Evaluación del Sistema de Navegación sobre Entornos Reales	167
4.5.1. Software de a Bordo de Soporte SBAS Desarrollado	167
4.5.2. Rendimiento General del Sistema de Navegación	168
4.5.3. Resultados Obtenidos en la Monitorización de la Integridad . . .	171
4.5.4. Impacto de las Comunicaciones en el Uso de SISNeT	173
4.6. Conclusiones	177
5. Arquitectura de Comunicación Overlay con Soporte Unificado V2V, I2V y V2I	179
5.1. Comunicaciones en Vehículos y Redes Celulares	181
5.2. Trabajos Previos en Redes Overlay y Sistemas de Comunicación Celular Aplicados a ITS	182
5.3. Factores de Rendimiento en Redes Vehiculares Basadas en VANET y Comunicación Celular	185
5.3.1. Tecnología de Comunicación	185
5.3.2. Disponibilidad de la Red	186

5.3.3.	Movilidad del Vehículo	186
5.3.4.	Protocolos de Enrutamiento en VANET	187
5.3.5.	Ratio de Penetración	188
5.3.6.	Velocidad de Circulación	188
5.4.	Arquitectura de Comunicación Overlay para ITS	189
5.4.1.	Visión General de la Arquitectura	189
5.4.2.	Detalles de los Protocolos	191
5.4.3.	Escenarios Representativos	194
5.5.	Evaluación Experimental del Sistema	195
5.5.1.	Desarrollo y Puesta en Funcionamiento de la Arquitectura de Comunicación	196
5.5.2.	Entorno Considerado en las Pruebas de Campo	197
5.5.3.	Descripción de las Pruebas	198
5.5.4.	Resultados y Análisis	200
5.6.	Conclusiones	207
6.	Plataforma Ubicua de Provisión de Servicios e Información	
	Contextual	209
6.1.	Integración del Vehículo en el Contexto de Circulación	211
6.1.1.	Primera Aproximación al Problema con la Arquitectura de Red Diseñada	212
6.1.2.	La Importancia de la Infraestructura en la Gestión de Información Contextual	212
6.2.	Trabajos Relacionados con la Provisión de Información Dependiente del Contexto en ITS	214
6.3.	Arquitectura Telemática de Gestión y Provisión de Información Contextual	216
6.3.1.	Soporte Extendido de la Infraestructura en el Procesamiento de Información	217
6.3.2.	Nuevos Escenarios de Funcionamiento	219
6.3.3.	Técnicas de Notificación de Eventos a Diferente Nivel	219
6.4.	Sistema de Gestión de Información Contextual Mediante Modelado Ontológico	220
6.4.1.	Modelado e Inferencia Mediante Ontologías	220
6.4.2.	Determinación del Contexto del Vehículo	221
6.4.3.	Aplicación del Modelado Ontológico para la Gestión de Información en ITS	222
6.5.	Desarrollo y Validación de la Arquitectura Telemática Global	225
6.5.1.	Ampliación de las Capacidades Software de la OBU	225
6.5.2.	Plataforma Distribuida de Gestión de Información	226
6.5.3.	Provisión de Información Contextual Mediante la Detección de Vehículos con RFID	227
6.5.4.	Rendimiento del Proceso de Inferencia de Información Contextual	229
6.5.5.	Software de Gestión de Incidencias de Tráfico y Perfiles de Usuario	231
6.6.	Conclusiones	231

7. Conclusiones y Trabajos Futuros	235
7.1. Conclusiones Generales	235
7.2. Vias Futuras	240
7.2.1. Mejoras y Ampliaciones de la Plataforma	241
7.2.2. Nuevos Ámbitos de Investigación	242
Bibliografía	245
A. Cálculo de los Factores de Integridad SBAS	263
A.1. Obtención de HPL_{SBAS} y VPL_{SBAS}	263
A.2. Cálculo de la Varianza del Error Debido a las Correcciones Lentas y Rápidas	265
A.3. Cálculo de la Varianza del Error Ocasionado por las Correcciones en la Ionosfera	268
A.4. Cálculo de la Varianza del Error Ocasionado por la Troposfera	271
A.5. Cálculo de la Varianza del Error Ocasionado por el Receptor	272
B. Funcionamiento del Software de Soporte Extendido SBAS	273
B.1. Receptores Soportados	273
B.2. Requerimientos para el Uso del Software	274
B.3. Modos de Ejecución del Programa	274
B.4. Fichero de Configuración Básica	277
C. Formato de los Mensajes Usados en la Arquitectura de Comunicación	281
C.1. Generalidades en la Estructura de los Paquetes	281
C.2. Mensajes Utilizados entre el Vehículo y Group Server	282
C.3. Mensajes Utilizados entre Environment Server y Group Server	283
C.4. Mensajes Utilizados en la Notificación de Eventos	286
C.5. Mensajes Utilizados entre el Vehículo e Internet Traffic Operation Server	288

Índice de figuras

0.1. OBU architecture	8
0.2. Layer-based OSGi service architecture of the OBU	10
0.3. Service execution control based on policies	11
0.4. Prototype vehicle used in the work	12
0.5. Application to manage the platform services	14
0.6. Reference services implemented over the software platform	15
0.7. Extended SBAS architecture through Internet	17
0.8. Conversion of SBAS differential corrections to RTCM SC-104	18
0.9. HPL concept	19
0.10. SBAS integrity subsystem diagram	20
0.11. Navigation system performance in a semi-rural environment	23
0.12. Navigation system performance under low coverage conditions	24
0.13. Circuits followed during integrity trials	25
0.14. Dinamic monitoring of HPL_{SBAS}	26
0.15. HPL_{SBAS} values calculated through the GEO and SISNeT	27
0.16. Advantages of a CN and P2P-based communication system with extended infrastructure capabilities	28
0.17. Overlay network integrated in the global telematic architecture	30
0.18. Operation scenarios and vehicle interaction with the system	32
0.19. Hardware set-up of the RFID identification prototype	34
0.20. On-board software with traffic and POI notification services	35
0.21. Road incidences monitoring at the ITOS Web application	36
0.22. Edition of user profiles using the Web front-end	37
0.23. Circuits followed during communication performance tests	38
0.24. I2V communication performance in test T3	41
0.25. V2I communication performance in test T7	42
0.26. V2V communication performance in test T11	43
0.27. V2V communication performance at higher speed (test T13)	44
1.1. Diagrama general de los sistemas ITS en carretera	54
1.2. Diagrama de la arquitectura integral propuesta a diferentes niveles	65
2.1. Principales constituyentes e interfaces de comunicación de una OBU	78
2.2. Arquitectura de OSGi	80

2.3.	Arquitectura de GPS	84
2.4.	Geometría de los satélites en el cálculo de la posición y DOP	86
2.5.	Arquitectura de EGNOS y la incorporación de SISNeT	90
2.6.	Aplicación de NEMO sobre el entorno vehicular	107
2.7.	Vista general de CALM	110
2.8.	Modelo de red lógico de JXTA	114
3.1.	Aportación del capítulo 3 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral	128
3.2.	Vehículo prototipo de referencia en el trabajo	133
3.3.	Arquitectura de la OBU	134
3.4.	Sensores GNSS utilizados	136
3.5.	Modems UMTS considerados en la plataforma	138
3.6.	Arquitectura de definición de servicios OSGi basada en capas	140
3.7.	Subsistema de políticas de ejecución de aplicaciones	143
3.8.	Aplicación de gestión de servicios de la plataforma	144
3.9.	Servicios de referencia implementados sobre la plataforma software . . .	147
3.10.	Composición de servicios en la plataforma software	148
4.1.	Aportación del capítulo 4 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral	152
4.2.	Sistema de ampliación SBAS a través de un canal alternativo por Internet	156
4.3.	Estación de monitorización de la señal GPS/EGNOS	158
4.4.	Esquema del sistema de conversión SBAS a RTCM SC-104	161
4.5.	Concepto de HPL	162
4.6.	Esquema del sistema de cálculo de integridad SBAS	163
4.7.	Funcionamiento del sistema de navegación en un entorno semi-rural . .	169
4.8.	Funcionamiento del sistema de navegación en condiciones de baja cobertura	170
4.9.	Gráfica de Stanford de monitorización del factor HPL_{SBAS} durante 24 horas	172
4.10.	Recorridos realizados en las pruebas de integridad	173
4.11.	Monitorización dinámica de HPL_{SBAS}	174
4.12.	Valores obtenidos de HPL_{SBAS} usando el satélite geostacionario y SISNeT	175
4.13.	Monitorización dinámica de HPL_{SBAS} con el satélite geostacionario y SISNeT	176
5.1.	Aportación del capítulo 5 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral	180
5.2.	Diseño del sistema de comunicación <i>overlay</i>	190
5.3.	Escenarios de funcionamiento del sistema de comunicación	195
5.4.	Aplicación de envío y recepción de eventos de tráfico	197
5.5.	Entorno de las pruebas generales de funcionamiento del sistema de comunicación	198
5.6.	Circuito utilizado en las pruebas de rendimiento de la red	199
5.7.	Rendimiento del sistema en transmisión I2V en el test T3	203

5.8. Rendimiento del sistema en transmisión V2I en el test T7	204
5.9. Rendimiento del sistema en transmisión V2V en el test T11	205
5.10. Rendimiento del sistema en transmisión V2V a mayor velocidad (test T13)	206
6.1. Aportación del capítulo 6 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral	210
6.2. Ventajas de una arquitectura basada en red celular/P2P con soporte de la infraestructura	213
6.3. Arquitectura global de acceso a servicios telemáticos	217
6.4. Ampliación de los escenarios de funcionamiento de la plataforma	219
6.5. Notificación de eventos mediante dos técnicas complementarias	220
6.6. Representación jerárquica de la ontología Environment	223
6.7. Diagrama de secuencia del proceso de adaptación de información	224
6.8. Software de a bordo con servicios de referencia de tráfico y notificación de puntos de interés	226
6.9. Despliegue hardware del prototipo de identificación RFID	228
6.10. Monitorización de incidencias en la aplicación Web remota	232
6.11. Edición del perfil del usuario en la aplicación Web remota	233
C.1. Formato de mensajes en la comunicación Vehículo-Group Server	282
C.2. Formato de mensajes en la comunicación Environment Server-Group Server	284
C.3. Formato de mensajes en la notificación de eventos	286
C.4. Formato de mensajes en la comunicación Vehículo-Internet Traffic Operation Server	289

Índice de tablas

0.1. Collected positions over an urban circuit in autonomous, EGNOS and RTCM modes	24
0.2. Summary of communication tests and main features	39
2.1. Tecnologías de comunicación inalámbrica usadas en redes vehiculares y su aplicabilidad	97
3.1. Características del vehículo Comarth S1-50	132
4.1. Posiciones recogidas en Murcia en modos autónomo, EGNOS y RTCM	171
5.1. Mensajes en el enlace Vehículo-Group Server de la arquitectura de red .	192
5.2. Mensajes en el enlace Environment Server-Group Server de la arquitectura de red	193
5.3. Mensajes en el enlace Vehicle-Vehicle/Environment Server de la arquitectura de red	194
5.4. Resumen de pruebas realizadas con la red y principales características .	201
6.1. Mensajes en el enlace Vehículo-Internet Traffic Operation Server en la plataforma telemática	218
6.2. Rendimiento del sistema en el proceso de inferencia	230

Acrónimos

3GPP 3rd Generation Partnership Project

ABS Antilock Brake System

ACC Adaptive Cruise Control

AMPS Advanced Mobile Phone System

AODV Ad-hoc On-Demand Distance Vector

API Application Programming Interface

ASCII American Standard Code for Information Interchange

BMW Bayerische Motoren Werke

C2C Car to Car

C2C Car to Car Communication Consortium

C/A Coarse/Acquisition

CALM Communications Access for Land Mobiles

CAN Controller Area Network

CDMA Code Division Multiple Access

CD Compact Disk

CEN Comité Européen de Normalisation

CENELEC Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

CEN/TC CEN Technical Committee

CMOS Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

CN Cellular Network

CoA Care of Address

COM Component Object Model

CORBA Common Object Requesting Broker Architecture

CV Chevaux Vapeur

DAML DARPA Agent Markup Language

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency

DCOM Distributed Component Object Model

DGPS Differential GPS

DHT Distributed Hash Table

DL Description Logic

DOP Dilution of Precision

DSDV Destination-Sequenced Distance Vector

DSP Digital Signal Processing

DSR Dynamic Source Routing

DSRC Dedicated Short Range Communications

EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service

EKF Extended Kalman Filter

EPC Electronic Product Code

ES Environment Server

E/S Entrada/Salida

ESA European Space Agency

ESP Electronic Stability Control

ETSI European Telecommunications Standards Institute

EUROCONTROL European Organisation for the Safety of Air Navigation

FM Frequency Modulation

GA Ground Antennas

GBAS Ground-Based Augmentation System

-
- GDOP** Geometric Dilution of Precision
- GEO** Geostationary satellite
- GIS** Geographic Information System
- GIVE** Grid Ionospheric Vertical Error
- GLONASS** Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
- GNSS** Global Navigation Satellite System
- GNSS/DR** GNSS/Dead Reckoning
- GPRS** General Packet Radio Service
- GPS** Global Positioning System
- GS** Group Server
- GSM** Global System for Mobile Communications
- GUI** Graphical User Interface
- HA** Home Agent
- HAL** Horizontal Alert Limit
- HARQ** Hybrid Automatic Repeat Request
- HDOP** Horizontal Dilution of Precision
- HMI** Human-Machine Interface
- HoA** Home Address
- HPE** Horizontal Position Error
- HPL** Horizontal Protection Level
- HPL_{SBAS}* HPL calculated through SBAS
- HPL_{WAAS}* HPL calculated through the WAAS SBAS platform
- HSDPA** High-Speed Downlink Packet Access
- HSPA** High-Speed Packet Access
- HSUPA** High-Speed Uplink Packet Access
- HTTP** Hypertext Transfer Protocol

I2V Infrastructure to Vehicle

ID Identifier

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IETF Internet Engineering Task Force

INS Inertial Navigation System

IODF Issue of Data (Fast)

IP Internet Protocol

IPP Ionospheric Pierce Point

IPsec Internet Protocol security

IPv6 Internet Protocol version 6

IR Infrared

ISO International Organization for Standardization

ITOS Internet Traffic Operation Server

ITS Intelligent Transportation System

IVC Inter-Vehicle Communications

J2EE Java 2 Enterprise Edition

JAR Java Archive

JMS Java Message Service

JRMP Java Remote Method Protocol

JSP Java Server Pages

JVM Java Virtual Machine

JXTA Juxtapose

KAON Karlsruhe Ontology

LADGPS Local Area DGPS

LAN Local Area Network

LAR Location Aided Routing

- LBS** Location Based Services
- LCD** Liquid Crystal Display
- LIN** Local Interconnect Network
- LLC** Logical Link Control
- LTE** Long Term Evolution
- MAC** Media Access Control
- MAN** Metropolitan Area Network
- MANEMO** MANET and NEMO
- MANET** Mobile Ad-hoc Networks
- MBMS** Multimedia Broadcast Multicast Service
- MCC** Mission Control Centre
- MCS** Master Control Station
- MEMS** Microelectromechanical Systems
- MI** Misleading Information
- MM** CALM Millimetre
- MNN** Mobile Network Node
- MNP** Mobile Network Prefix
- MOPS** Minimum Operational Performance Standards
- MP3** MPEG-1 Audio Layer 3
- MR** Mobile Router
- MS** Monitor Station
- NATs** Network Address Translation
- N/D** No disponible
- NEMO** Network Mobility
- NFC** Near Field Communication
- NLES** Navigation Land Earth Station

NPA Non Precision Approach

OBE On-Board Equipment

OBU On-Board Unit

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OIL Ontology Interchange Language

OLSR Optimized Link State Routing

OSD Office of the Secretary of Defense

OSEK Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik in Kraftfahrzeugen

OSGi Open Services Gateway initiative

OSI Open Systems Interconnection

OSPF Open Shortest Path First

OWL Web Ontology Language

P2P Peer to Peer

PA Precision Approach

PAN Personal Area Network

PC Personal Computer

PCMCIA Personal Computer Memory Card International Association

PDA Personal Digital Assistant

PDOP Position Dilution of Precision

PPS Pulse per Second

PVT Position, Velocity, Time

R2V Roadside to Vehicle

RAIM Receiver Autonomous Integrity Monitoring

RATP Régie Autonome des Transports Parisiens

RBDS Radio Broadcast Data System

RDF Resource Description Framework

RDFS RDF Schema

RDS Radio Data System

RFID Radio-Frequency Identification

RIMS Reference and Integrity Monitoring Stations

RMI Remote Method Invocation

ROWL Rule OWL

RPC Remote Procedure Call

RS-232 Recommended Standard 232

RTCA Radio Technical Commission for Aeronautics

RTCM Radio Technical Commission for Maritime Services

RTT Round-Trip Delay Time

RVC Road Side to Vehicle Communications

SA Selective Availability

SBAS Satellite Based Augmentation System

SBC Single Board Computer

SC Special Committee

SI Service Interface

SISNeT Signal in Space through the Internet

SLP Service Location Protocol

SMS Short Message Service

SOA Service-Oriented Architecture

SPARQL SPARQL Protocol and RDF Query Language

SPS Standard Positioning Service

SSL Secure Sockets Layer

STD Standard Deviation

TC Technical Committee

TCP Transmission Control Protocol

TDOP Time Dilution of Precision

TLS Transport Layer Security

TMC Traffic Message Channel

TOA Time of Arrival

UDLR Unidirectional Link Routing

UDP User Datagram Protocol

UDRE User Differential Range Error

UDREI UDRE Index

UIRE User Ionospheric Range Error

UIVE User Ionospheric Vertical Error

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

UPnP Universal Plug and Play

USB Universal Serial Bus

UTC Universal Time (Coordinated)

UWB Ultra Wide Band

V2I Vehicle to Infrastructure

V2R Vehicle to Roadside

V2V Vehicle to Vehicle

VAL Vertical Alert Limit

VANET Vehicular Ad-hoc Networks

VDOP Vertical Dilution of Precision

VHF Very High Frequency

VPL Vertical Protection Level

VPL_{SBAS} VPL calculated through SBAS

VPL_{WAAS} VPL calculated through the WAAS SBAS platform

VRC Vehicle to Roadside Communications

VVC Vehicle to Vehicle Communications

W3C World Wide Web Consortium

WAAS Wide Area Augmentation System

WADGPS Wide Area DGPS

WAN Wide Area Network

WG Work Group

WiFi Wireless Fidelity

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN Wireless LAN

WMAN Wireless MAN

WWAN Wireless WAN

WWW World Wide Web

XML Extensible Markup Language

ZRP Zone Routing Protocol



University of Murcia

Department of Information and Communication Engineering

Vertical Telematic Architecture
for Service Deployment in
Intelligent Transportation Systems

José Santa Lozano

2009

Chapter 0

Summary

This initial chapter summarises the main contributions of the telematic architecture presented in the thesis, paying attention to on-board subsystems and infrastructure developments. The proposed navigation and networking architectures are of special relevance in the thesis and, as it is explained, both of them imply novel designs not only in the vehicle, but also in the remote and road side support. In addition to the system design, a real vehicle prototype and the whole implementation of the system are presented. This test-bed has been also used to perform multitude of experimental evaluations, which demonstrate the suitability of the whole proposed platform.

After an introductory start of the chapter in sections 0.1 and 0.2, with a contextualisation of the thesis and fixing main objectives, section 0.3 places the work into the related research areas of ITS (Intelligent Transportation Systems). Section 0.4 describes the on-board hardware and software architecture of the vehicle side. The two main subsystems of this platform, navigation and communications, are then described and evaluated in sections 0.5 and 0.6, although, as it is remarked, the infrastructure support in both cases is essential. Finally, section 0.7 summarises the main conclusions of the thesis, and section 0.8 lists the most relevant publications related to the work.

0.1. Context

Due to the growing interest that current society has in new technologies, new products in the fields of information and communication technologies are emerging in new environments still unexploited. In this way, vehicles are a perfect frame for installing a lot of useful functionalities traditionally available at work or home environments. However, this expansion needs a suitable hardware and software support adapted for the market and user demands.

Up to now, the amount of services that passengers can use in a vehicle have required a large hardware deployment. Each new functionality is implemented in a new device which has to be installed in the vehicle. So far, this procedure has been feasible because the amount of on-board services has been limited to a radio, a CD player and, sometimes, a GPS navigator. However, nowadays the new location based services

(LBS), just as the ones emplaced in other fields, make this production method a non scalable model. At this point, general purpose computers begin to be considered as a better option than the dedicated ones, and telematic services implemented as executable software over a common on-board and networking platform show several advantages. First, the business model suffers a radical change because service updates do not imply new hardware costs, and a new network infrastructure do not have to be designed for each new ITS application. Moreover, user interfaces can be integrated into a common device, specially adapted to the vehicular domain.

There are a lot of factors which must be taken into account in the introduction of such a generic telematic platform in the vehicle. On one hand, a vehicle involves a peculiar place full of questions relative to the interaction of services with the user. Because of this, we have to consider not only hardware requirements, but also user restrictions. As [1] shows, physical features of vehicles make the installation of new devices (in this case an on-board computer) a delicate matter where both vehicle and computer implications have to be considered. On the other hand, the user interface is subjected to legal considerations. In [2] some issues about the use of electronic devices are described. As it is stated in that work, although the legislation is recently concerned about the use of mobile phones, there is not a clear agreement about how to deal with new in-vehicle systems. However, the driver is considered as a person who must be able to control his vehicle anytime, in order to assure the safety of passengers and pedestrians. As a conclusion, it is important to improve the driver and passengers comfort with new services, but considering safety implications as well.

If we want to introduce a service architecture really integrated in the vehicle, an appropriate hardware support is necessary. In other words, several subsystems are essential if we are interested in providing context-aware services, such as an efficient navigation unit and a networking platform adapted to the communication requirements. In addition to the suited hardware, a proper software platform to deploy all the services must be also designed. This platform will be located in the on-board computer, and should take into account next requirements:

- Modularity. New services are implemented as a composition of modules previously created.
- Portability. The services, and the underlying platform if possible, are not restricted to a particular operating system.
- Easiness of deployment. The installation and updating of services must be an easy and efficient process.

Positioning requirements of this new generation of ITS services are continuously growing. New applications in the vehicular domain require positioning sensors with a high level of accuracy, availability, continuity and integrity. Collision avoidance solutions are a clear example of this necessity [3,4]. Moreover, cost considerations must be considered if a mass market implementation is pretended. After selective availability (SA) was disabled in the year 2000, and the satellite based augmentation systems

(SBAS) were operative, most of the GNSS (Global Navigation Satellite System) sensors in the market offer a good accuracy in locations where there is a good visibility to GPS and GEO (geostationary) satellites. However, the lack of coverage, specially in urban areas, is a known problem of GNSS/SBAS. Moreover, there are multitude of inherited and low-cost receivers which do not support SBAS. In addition to the slight improvement of the calculated position, SBAS systems, such as EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), allow the calculation of a crucial parameter for several road applications; this is the integrity of the position. Monitoring the integrity of the navigation system means that the goodness of the positions obtained from the GNSS sensor (receiver) can be known anytime. In several current road applications such as road pricing systems, or intelligent pay-per-use insurances, this issue becomes critical.

In addition to a suitable navigation unit, the other key subsystem of an ITS telematic platform is the networking architecture. The usefulness of wireless data communications in the vehicle field is noticeable in current monitoring solutions, which help companies to manage their transport fleets. These systems are mainly based on a navigation unit and a communication channel, which is usually established through the cellular network (CN). These first systems have been, however, the starting point of vehicular communications. New generation services conceived for future cars need a suitable communication platform to connect the vehicle with the environment [5]. Researches of all around the world are currently working on such vehicular networks which, however, are too particular solutions in most of the cases. Ideally, a network would be used to connect vehicles among them and with the infrastructure, and it would cover all communication necessities of all possible services aimed at the vehicle or the road side [6].

According to current state of vehicular networks, connectivity requirements can be divided into vehicle to vehicle communications (V2V), which are the most popular architectures in the research world, and communications with the infrastructure, which are currently receiving a great attention. Attending to the data flow direction, the connection in this last case can be established following a vehicle to infrastructure (V2I) or infrastructure to vehicle (I2V) pattern. Examples of V2I and I2V technologies can be found in monitoring systems (V2I); traffic information systems such as RDS or TMC (I2V); or electronic fee collection systems, which imply eventual traffic in both directions. The most extended technologies in commercial products which follow these communication patterns are CN, FM radio and Dedicated Short Range Communications (DSRC). The research community is not as focused in communications with the infrastructure as in the V2V case. However, providing Internet connectivity to vehicles using road side hardware is a hot issue [7,8]. Regarding V2V solutions, vehicular ad-hoc networks (VANETs) using wireless LAN and DSRC are the most considered technologies, and they are mainly used in safety applications. These services use V2V communications to propagate messages over a network created by vehicles. VANET solutions fit very well in services which require a low latency to communicate with surrounding vehicles, but they suffer from routing problems in long transmission ranges, where multi-hop techniques must be used [9]. In such situations

an infrastructure access could improve the performance.

0.2. Objectives

The final aim of the thesis is to cover the gap of vertical telematic solutions in the ITS research world. To reach this goal, several parts of the on-board equipment (OBE) and a suited infrastructure support must be covered. Taking into account the motivation given in the previous section, several partial objectives related to these subsystems and the final solution integration, can be identified:

- Set-up a prototype vehicle suitable to analyse navigation and communication architectures, and valid for deploying ITS services.
- Create an on-board architecture based on a general purpose computer and a modular software architecture, to cope with most of vehicular services requirements.
- Develop and set-up a monitoring GPS/EGNOS station which provides an additional SBAS support to mobile vehicles.
- Create and evaluate a navigation system with an extended support of SBAS features via software: differential corrections translation, reception and processing of EGNOS messages via Internet, and monitoring the system integrity through an adapted HPL (Horizontal Protection Level) calculation.
- Design and implement a generic network platform to cover V2V, I2V and V2I communication requirements, considering realistic performance and deployment issues.
- Develop an infrastructure-based system to collect, process, and adapt contextual traffic information.
- Implement a reference set of ITS services to prove the platform potential.

0.3. Related Work

There are no many works related to the creation of a complete vehicle prototype for deploying advanced ITS services, mainly due to the great initial investment which is necessary. In [10, 11] authors show two architectures of cars widely sensorised and adapted to autonomous control; hence they offer a lot of capabilities for implementing ITS services. INS (Inertial Navigation System) sensors, odometry captors, and satellite navigation sensors are key factors in both architectures, where the embedded autonomous control software merges all the information which comes from them in order to make a decision about the vehicle movement. Nevertheless, most of these sensors can be obviated if we are interested in the field of vehicle telematics. In this

case, a suited (embedded) computer complemented with an efficient navigation system and the necessary communication transceivers, can be enough for most of current ITS telematic services. In [12], an OBU (on-board unit) with these features is used to evaluate the performance of a VANET system. The work presented in [13] is even more related to the purpose of the OBU presented in this thesis. The on-board computer is similar to the one used in the thesis, including several network technologies for intra and inter-vehicle communications. The final solution is, however, less integrated in the vehicle than the presented work, and the software architecture is not specially oriented to ITS.

The thesis work related to the OBU software architecture is focused on the design and development of an extensible architecture for services based on a general purpose computer, where OSGi (Open Services Gateway initiative) is situated. There are some works related to similar concepts. In [14] a framework to develop vehicle on-board software oriented to the user is shown. The work included in the thesis, in contrast to the approach given here, does not present an architecture focused on programming APIs for final applications, but a general module-based architecture is defended instead. In [15], another solution for on-board service development is given, oriented to the communication between local services inside the vehicle, and between the local and external ones, located in other cars or at the road edge. Jini and JXTA are used for this purpose, however, the final solution is too ad-hoc. In [16], a framework really integrated in the on-board computer, through a .NET class hierarchy, is given. Although the idea of building software components in that work is also followed in the thesis, the flexibility provided by a programming technology (.NET) is not comparable with the one given by OSGi. The works presented in [17–19] comprise a more generic software platform than the previous cases. The OSEK/VDX¹ specifications are used in a platform specially centered on the low level software of vehicle electronics, but this is not suited enough to create telematic services. This idea is better taken into account in [20]. Here, there are several concepts also applied in the OBU presented in the thesis, such as a policy subsystem to control the operation of some services, or a OSGi software platform designed for ITS purposes.

Regarding the navigation subsystem, the use of SBAS is a key factor to improve the accuracy, availability and, overall, to monitor the integrity of the calculated position. SISNeT (Signal in Space through the Internet) is used to receive SBAS messages from EGNOS through Internet when the GEO visibility is low. In [21], this technology is used in the vehicle domain, where signal blockage due to urban settings is common. Some preliminary tests give here promising results of SISNeT under these conditions. However, the software developed for a portable device is highly coupled to the GPS receiver. The navigation system presented in the thesis gives a more flexible solution for ITS, supporting several receivers and also allowing the conversion of differential corrections into RTCM messages, a more common format. The work described in [22] gives a first approximation to this conversion algorithm, with a partial implementation analytically checked in post-process. The navigation system proposed in the thesis

¹<http://www.osek-vdx.org/>

further exploits this concept, and it has been evaluated in real-time over several traffic scenarios. Some other navigation solutions bet on inertial sensors [23], in order to provide positioning information when GPS coverage is low. However, the final cost of these systems is still too high. In some of these approaches the calculation of an integrity factor is specially treated, where the whole multi-sensor system must be considered [24]. In [25], a combined GNSS/DR (Dead Reckoning) navigation system offers an integrity estimation adapted to terrestrial navigation. A similar solution is given in [26], however, the authors are specially interested in isolating spurious positions to improve the navigation system performance. In [27], the authors use SBAS information to monitor the integrity, as it is proposed in the thesis. A similar software is given in the simulator presented in [28]. However, these two works are only useful in post-process. The solution described in [29] copes with real-time and terrestrial navigation conditions, like the navigation system of the thesis. This work also shows the relevance of the GNSS-based integrity in the special case of future road tolling deployments.

Because the aim of the thesis is designing a telematic platform for ITS, a suited networking architecture is needed. The suggested proposal is based on an overlay network which works over the UMTS cellular network. Neither the use of overlay nor cellular networks in a general ITS communication platform are broadly treated in the literature. In [30] the use of overlay networks over the CN basis for ITS is defended, to solve deployment limitations which can be found in VANET solutions. In [31] a P2P (Peer to Peer) approach is used in a vehicular network; hence vehicles are organised in dynamic communication groups to exchange PVT (Position Velocity Time) information. However, a method to interconnect these groups and provide a link with the infrastructure is not given. UMTS is considered as an appropriated network technology for P2P in [32], but the adaptation of underlying protocols to mobility conditions is identified as a key issue. The JXTA technology, used in the communication platform of the thesis, is considered in a sensor network over GPRS in [33]. However, a special rendezvous node must be installed inside the operator's network, because GPRS does not support multicast. The communication architecture included in the thesis is evaluated using the HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) technology, what improves the overlay network performance. In [34], authors describe the implementation of a GPRS-based network to disseminate traffic information. These services are of special relevance in the thesis; even, the reference implementation of the platform includes some of them. The way in which traffic events are disseminated in that work is similar to the group-based approach used in the thesis; however, in contrast to that case, it is not necessary to continuously track the position of vehicles in order to determine the ones to be notified about incidences. An evolved development of this concept is given in [35], where the MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) is used to propagate traffic events inside service areas. The same idea is considered in the platform presented in the thesis, but at logical level through the overlay network.

The integration of the vehicle in the traffic context is a new concept which has recently appeared in ITS. This requires a suited networking architecture, which allows

V2I and I2V communications, but also a proper support of the remote infrastructure. In [36] a global architecture for processing vehicle information and disseminate traffic events is given. The system implementation is not included, but it considers the GSM network as a good candidate to develop a primitive SMS-based mechanism to exchange information. A platform with an extended ubiquitous nature is presented in [37]. Here, high level protocols used in Internet, such as HTTP, are used to provide ITS Web services. Nevertheless, it considers puntual WLAN connections as Internet access, what limits the availability of the platform. In [6] a multi-purpose system to provide contextual information to vehicles, such as the current state of a specific road, offers extended navigation capabilities to users. The telematic architecture described in the thesis uses ontologies to model the traffic environment and user's profiles in order to offer similar capabilities. In [38], ontologies are used to implement a common interface for road operators. This allows the implementation of semi-automatic monitoring tasks. In [39] the ITS platform where ontologies are used is more general, and they are considered to exchange information among different components of the architecture. This comprises an homogeneous way of sharing data. In [40] an ontology for modeling the vehicle concept is formally created, although the application field is quite specific. The work included in [41] describes the idea of modelling user's preferences by means of profile ontologies, procedure followed in the thesis as well to adapt contextual information to user needs.

0.4. On-Board Unit Architecture

The on-board unit designed is based on a general purpose computer, and is installed in the vehicle together with the necessary communication devices. GNSS sensors are of special relevance in the OBU, and can be considered inside this set of transceivers. Many times, GNSS sensors are also included inside the most general term of OBE, out of the OBU scope.

The final purpose of the designed OBU is supporting on-board services implemented as software. This way, it is possible to face extensibility problems in the provision of ITS telematic services, decreasing maintenance costs. This kind of services have been offered in the market through new hardware which is usually installed in the passenger compartment; however, a generic software architecture is much more versatile. The proposed OBU is focused on an OSGi service gateway, with an extended logical support through a layer-based platform for deploying ITS services.

0.4.1. OBU Design

The designed OBU considers the deployment of services which can operate as autonomous or cooperative applications, thanks to the generic features included in the system. Fig. 0.1 shows an overall general scheme of the OBU architecture. The central processing unit (CPU) performs computation tasks, and coordinates I/O through several functional units inside the on-board computer. Moreover, it is in charge of

managing the access to volatile and persistent storage. The sound system is used to process output audio and input analog signals from the microphone. This system is useful, as it is later explained, to emit warning sounds and even spoken alerts. The human-machine interface (HMI) is represented by input peripherals, as a keyboard or a trackball, and output devices, such as a display. A key part of the OBU is the communication subsystem. As can be seen in the figure, several ports are used to offer a wide range of communication channels. The Ethernet connection provides LAN communications, which can be useful in a wired in-vehicle network, for instance. Through serial connections (mainly RS-232), the OBU is connected to several sensors and electronic devices, such as the GNSS receiver and INS sensors. USB and PCMCIA are used to install complementary networking devices, such as a Bluetooth transceiver and a UMTS modem. The first one can be used to create a personal area network, and the second one offers a direct Internet connectivity. A UMTS modem with HSDPA support is used to improve the performance of the CN link.

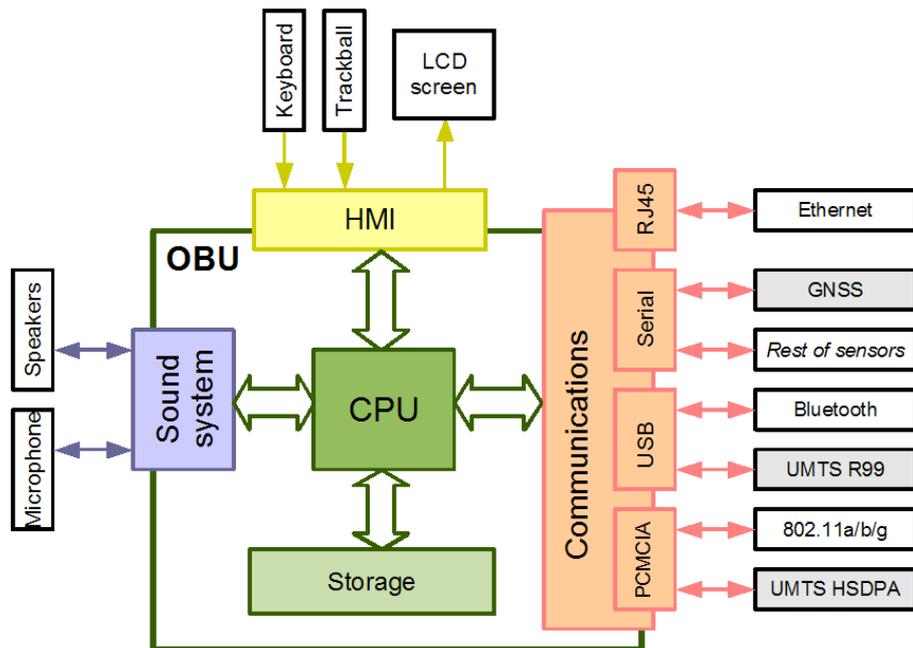


Figure 0.1: OBU architecture

0.4.2. Flexible Architecture Based on OSGi for Service Development

As it has been stated, OSGi is presented as the suitable container for a set of services implemented as PC software. At first, the OSGi conception was based on the creation of residential gateways, in which the software that makes the house “intelligent” was installed. In [42] it can be found a good example where OSGi is used as the basis

for the development of an intelligent house prototype oriented to the localization of inhabitants. However, the OSGi advantages have extended to some other fields. The vehicle environment is one of these new applications, where the on-board computer can be considered as a service gateway as well.

OSGi is the frame where the proposed software architecture is situated. Fig. 0.2 shows the system designed to create on-board services. All the sensors included in the vehicle are connected to the on-board computer. This one can be an ordinary PC, with an interchangeable operating system and a Java Virtual Machine (JVM). Several programming APIs are situated over it. The most important ones are *Java Comm*, *Java Media Framework* and *Java Speech*. Java Comm is used in communications via serial port, such as the connection with the GNSS and odometry sensors; the Java Media Framework is useful in the multimedia software development; and Java Speech provides a speech synthesizer to Java programs. Other APIs are used in the Java programming for graphical and mathematical purposes. OSGi is located over the Java basis, making the computer able to contain several services. Specifically, as it is summarised in [43], the software entities installed over OSGi are called *bundles*, which can offer services. Back to the diagram, the set of elements visible over the OSGi layer are the services implemented in the platform. These are classified according to its abstraction level. So they are divided into low, medium and high level services. Low level services have the necessary software for a direct access to several devices in the vehicle. They could be considered as drivers to access the vehicle hardware. Medium level services act as middleware between low and high level software. In this sense, this layer performs transformation and adaptation tasks, improving the functionality offered by low level services. Finally, high level services are applications with a user interface. This hierarchical structure of services has a double purpose. Firstly, the creation of new services is easier because of the modular programming. If any functionality is used, or is expected to be used, by several applications, this can be encapsulated as a service. On the other hand, the problems of accessing to real devices when several services require the use of a specific one are solved. That is, not only the software used as driver is reused, but also the implementation of a low level service allows to avoid synchronization problems in the access to the device. This issue is really important for widely used sensors, as the GNSS one. Due to a large amount of services may need positioning information, the access to this service must be coordinated. Indeed, services situated in the medium and low level layers of the architecture are able to perform buffering tasks, hence it is possible to serve some requests without doing a new petition to a sensor, for instance.

Communication between layers is carried out by service interfaces (SI). Each layer defines a set of service interfaces which indicate the available functionalities. A SI is a Java interface which may be implemented by one or more OSGi bundles. If a bundle situated in the upper layers needs a feature provided by one of the SI, a query to the OSGi core infrastructure with the SI as a parameter is launched, in order to receive the set of available services which implement the functionality.

There are two bundles implemented inside the architecture which perform a well defined task in the proposed system. These are *Policy Manager* and *Service Manager*,

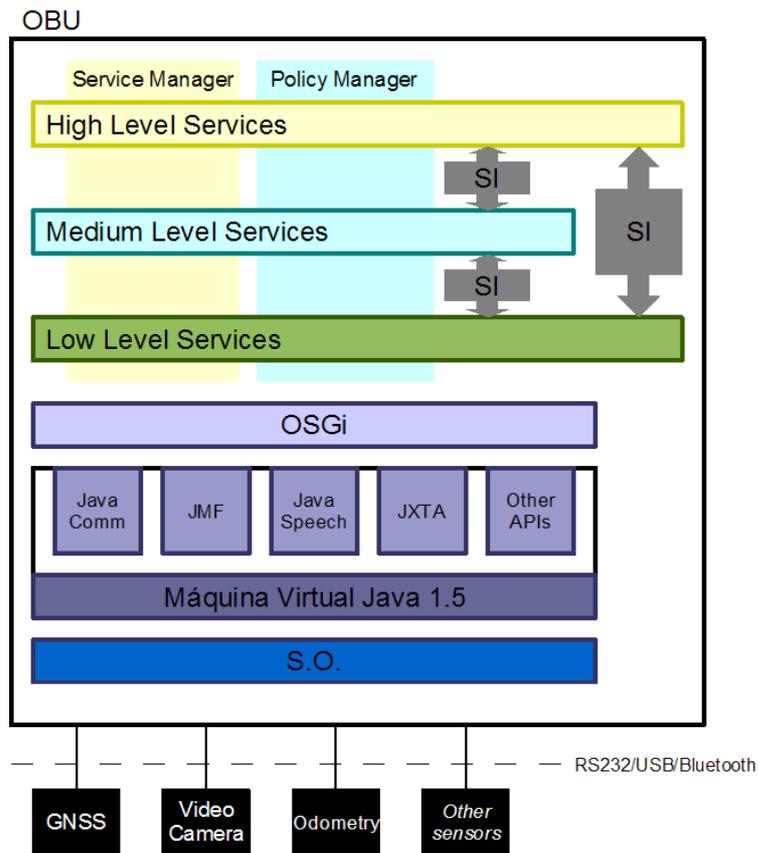


Figure 0.2: Layer-based OSGi service architecture of the OBU

and they cannot be handled directly by the user. Service Manager has been developed as a high level bundle, as can be observed in the color used in Fig. 0.2. Its graphic interface shows the set of services which are installed in the system, arranged by their abstraction level. Here, the user can enable, disable or update them easily.

Policy Manager has been created as a medium level service, since it contains a group of functionalities transparently used by high level services. Thanks to Policy Manager, user level services are not allowed to be executed when any of the configured constraints is satisfied. For instance, we can implement graphical interfaces to keep the user attention on the road when the vehicle is moving. Fig. 0.3 shows an abstract diagram of classes which explains the mechanism. User level services, implemented as OSGi services or bundles, inherit from a class which includes all the necessary functionalities to make these services be constrained by fixed policies. These policies mark the operation of services, by means of the concrete treatment implemented in each service when a constraint is satisfied. At runtime, an uninterrupted service, *PolicyManager*, is in charge of periodically checking the constraints associated to the registered services. This entity obtains all the necessary services (by OSGi queries) to check the constraints. These ones allow the access, for example, to the odometers

installed in the wheels, for monitoring the car speed, or a weight sensor in the co-driver seat, to disable a specific service if there is not a person travelling with the driver when the vehicle is moving.

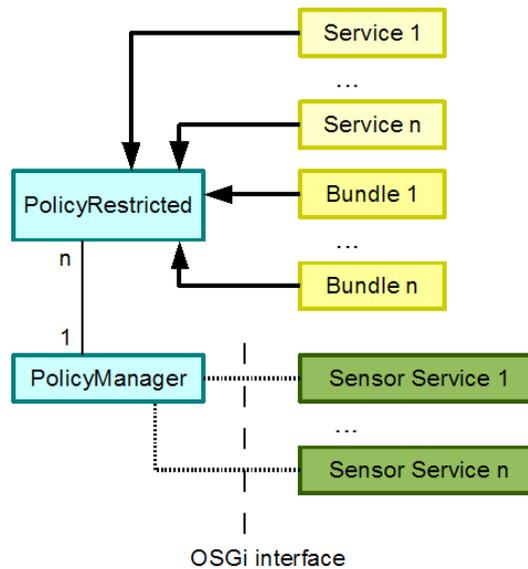


Figure 0.3: Service execution control based on policies

0.4.3. Prototype Vehicle

The prototype vehicle considered in the thesis is based on the architecture presented in [10]. Initially, this vehicle were conceived in the frame of several projects related to autonomous navigation, and this is the reason why it includes control hardware for accelerating, braking, and steering. The model comprises a Comarth S1-50, showed in Fig. 0.4. As can be seen, this is a two-seater sports car, modified with regard to the commercialised model through an agreement with the manufacturer. A great part of automation and sensor hardware is not used in the thesis, because the work is focused on setting-up a suited OBU for providing telematic services.

In the photo, it can be seen that the LCD screen connected with the OBU is integrated in the dashboard, whereas common peripherals, like a keyboard and a trackball, are hidden under this one. The on-board computer is installed behind the copilot seat, and it is connected through a serial interface with the CAN bus and the rest of sensors. Most of the inertial sensors, and the GNSS receiver, are installed under the bonnet, because the vehicle is rear-wheel driven. The odometry is distributed among the wheels, by means of individual captors.



Figure 0.4: Prototype vehicle used in the work

OBU Set-Up

The on-board computer, showed in Fig. 0.4, is an embedded PC platform based on an SBC (Single Board Computer) main board. The model is a VIA EPIA CN-1300 mini-ITX, which includes a low-power VIA C7 processor. The volatile memory included comprises 1 GB of DDR2 RAM, whereas the secondary storage is given by a hard disk of 80 GB. The photo shows the aspect of the external casing, with the suited dimensions to be hidden under the passenger's seat. The same SBC board integrates audio capabilities, basic I/O features and an Ethernet connection. The operating system used is Linux Fedora, with kernel 2.6. A USB connection of the front part of the computer is used to connect a Bluetooth 3COM Wireless USB Adapter. A WLAN interface is given by a PCMCIA 3COM OfficeConnect Wireless 11g. The UMTS model finally used in the OBU is a Huawei E220, connected to a rear USB connector, which supports HSDPA data traffic. The GNSS sensor considered for the final telematic platform is a San Jose Navigation FV-21, but a Novatel OEM3 device has been used in several tests of the navigation system.

Software Platform Implementation

The designed software architecture has been developed over the on-board computer previously described, using two implementations of the OSGi framework: Knopflerfish [44] and Oscar [45]. Both of them are open source projects which develop the Release

3 of OSGi. The Service Manager module has been developed with a friendly interface, as can be seen in Fig. 0.5. This application manages all the services installed in the OSGi framework which belong to the proposed architecture. The user can start, stop or update them in a easy way. The JAR files which comprise the bundles included in the platform contain special features in the Manifest file, in order to be distinguished from the rest of modules. The screenshot of Service Manager also shows all the services implemented up to now, which are arranged according to their abstraction level. Policy Manager has been implemented as a common OSGi bundle, hence it does not appear in the Service Manager interface, since it should not be accesible by the user. All the implemented high level services inherit from the abstract class PolicyRestricted, and include specific code to treat restriction events. The common procedure in this case is to stop the service execution and hide the graphic interface. At the moment, Policy Manager uses the Odometer service to check if the vehicle speed is greater than a threshold. Under this condition, all high level services are notified with a constraint event.

Implemented Reference Services

Several services for each of the three abstractions layers of the architecture have been developed. So far, the services implemented for the low level layer are:

- GNSS Positioning. It is a generic service to access the positioning sensor. Several GPS receivers are supported, and the service is designed through an extensible architecture which accepts new sensors without a great effort.
- Video Camera. This is a service to connect with a camera situated on the rear part of the vehicle. The logic of the service uses Java Media Framework (JMF) to obtain the image received from the camera.
- Speech Module. This encapsulates a voice synthesizer available for the rest of services, which offers the capability of emitting spoken events. This way, the user do not have to avert his sight from the road to see the screen. This software has been developed using FreeTTS [46], a partial implementation of the Java Speech API.
- Odometer. This service provides information from the odometry sensors, such as the speed of the vehicle.

The SBAS Processor Utility is included as a middleware service (layer two). This contains several tools concerning the Satellite Based Augmentation Systems (SBAS), which are explained in section 0.5. The other layer-two service included is JXTA Communications, which offer P2P communication primitives useful in the communication architecture presented in section 0.6.

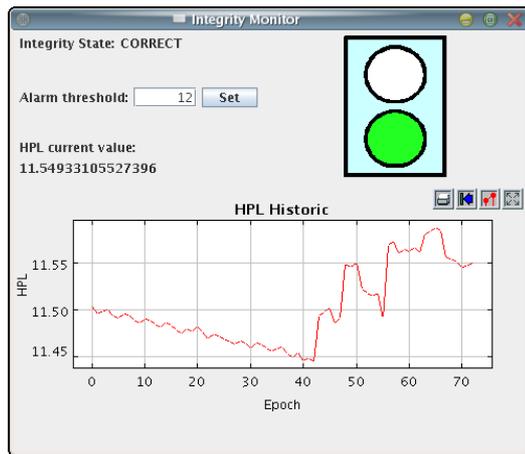
Finally, the set of high level services implemented is:



Figure 0.5: Application to manage the platform services

- Integrity Monitor (Fig. 6(a)). This is an application used to monitor the integrity of the navigation system. For this purpose, it uses the SBAS Processor Utility service, but the Speech Module service is necessary as well to warn the user with a spoken alert if the integrity factor exceeds a fixed limit.
- Media Player (Fig. 6(b)). It is a multimedia player which can open several video and audio formats. Since multimedia contents can be played in the OBU, we can see how DVD or CD/Radio devices can be replaced with software installed in the onboard computer.
- Rear Visor (Fig. 6(c)). With this service, the user can see the rear part of the vehicle, thanks to the Video Camera service. This application can be used to improve the sight of the driver in parking tasks, for example.
- Navigator (Fig. 6(d)). This program offers some navigation and electronic fee

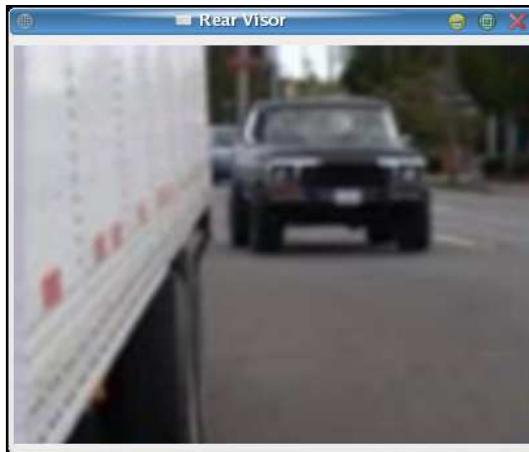
collection (EFC) capabilities, thanks to the use of digital cartography. The application depends on the GNSS Positioning service, since the vehicle position is needed. The SBAS Processor Utility service is used to obtain the position integrity, and the Speech Module service is useful to warn the user about important events.



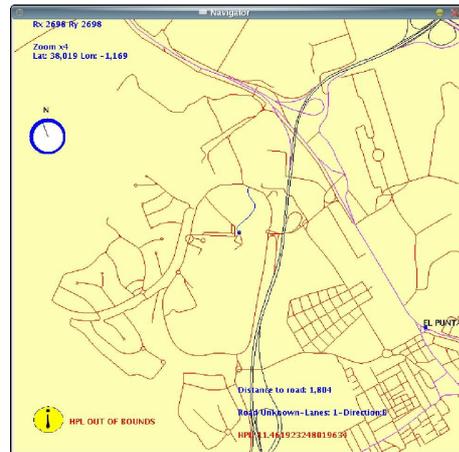
(a) Integrity monitor of the navigation system



(b) Multimedia player



(c) Rear visor of the vehicle



(d) Navigation service

Figure 0.6: Reference services implemented over the software platform

0.5. Advanced SBAS-Based Navigation System

The OBU architecture is used as the basis to develop the necessary software in the on-board part of the navigation architecture presented in this section. This is focused on exploiting the SBAS capabilities in the ITS field. Specifically, EGNOS is

used as the source of SBAS messages, which are used in a complementary monitoring station and, mainly, in the navigation subsystem of the vehicle. SISNeT, and a developed SISNeT-equivalent server, have been useful to receive EGNOS messages through Internet when the GEO signal is blocked. At the vehicle side, EGNOS information is processed to provide adapted differential corrections and, overall, to calculate the integrity of the navigation system in real-time.

0.5.1. Extended SBAS Support through Internet

The designed system offers a complete solution to exploit SBAS capabilities in rover stations installed in vehicles. Fig. 0.7 shows the general architecture of the proposal. Here, there are two differentiated entities: the monitoring station, and the remote equipment, represented by the OBU. The monitoring station offers a real-time view of the GPS/EGNOS state, using a high-end equipment. This system also contains a SISNeT server, equivalent to the ESA's one, in order to solve service availability problems and reduce the network delay. The ESA SISNeT server is also considered, and both servers are accessible through a public IP address. On the right part of Fig. 0.7 it is represented the on-board unit. As can be seen, a GPS/EGNOS sensor of low/medium quality is connected with the remote (on-board) computer. An Internet access through the UMTS network enables the OBU to receive SBAS messages from one the two message servers, in case the GEO is not used. The on-board computer includes a software with an SBAS client, and the necessary logic to process differential corrections and calculate integrity factors. The rest of the OBU components are omitted, since they have been presented in the previous section.

The implementation of an SBAS client in the OBU requires the development of a software compliant with the RTCA/DO-229C specifications [47]. This document describes the necessary algorithms to process SBAS messages and finally obtain correction and integrity information. The amount of messages which have to be processed, the complexity of the algorithms, and the memory requirements of this process imply new hardware necessities. This is the reason why many receivers are not SBAS-compatible. SBAS messages can be divided into three main groups: fast corrections, long-term corrections and ionospheric corrections. The messages used to decode these three types of corrections also include information about error estimations, which is used to compute integrity factors. Some SBAS messages have to be received before the rest can be processed, and this is the reason why a differential position cannot be calculated for a while after starting an SBAS-capable receiver. SISNeT v3 [48] solves this problem, because these initial messages can be explicitly requested to the server.

This SBAS client, and part of the on-board navigation intelligence, is showed in Fig. 0.8. Here, the RTCA to RTCM SC-104 message conversion mechanism is illustrated. RTCM SC-104 messages comprise an efficient way to provide differential corrections, although only suited for a local scope. Because this standard is very extended among receiver manufacturers, the conversion mechanism offers SBAS corrections through a more common interface. Messages RTCM Type 9 are mainly

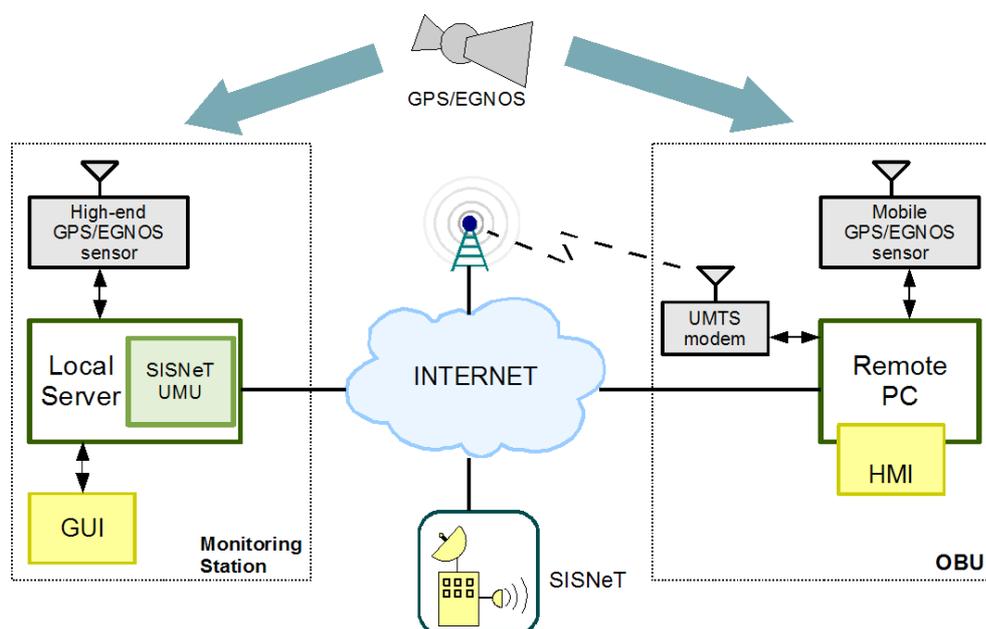


Figure 0.7: Extended SBAS architecture through Internet

used to provide corrections about range deviations for each satellite. As can be seen in the figure, EGNOS messages from SISNeT are decoded in the SBAS client in the first stage. Then, the conversion algorithm translate SBAS fast, long-term and ionospheric corrections into simple range corrections for each satellite. General navigation data, such as the position of the GPS satellites, is needed from the GNSS sensor in the process. Finally, in the RTCM generation stage, final RTCM messages are created and sent to the receiver.

0.5.2. Integrity Subsystem Based on GNSS

SBAS deployments allow the calculation of useful integrity factors, such as the HPL (*Horizontal Protection Level*) and VPL (*Vertical Protection Level*) parameters, as described in the RTCA DO-229 specifications [47]. In Fig. 0.9 the usefulness of the position integrity is shown. Here a typical mobile case is illustrated. The user terminal follows the true path (slim marks), but the navigation system estimates that the trajectory is another slightly deviated (bold marks). The difference between the erroneous and real locations is the horizontal position error (HPE). Here the HPL parameter is vital in order to bound the confidence area of the GNSS sensor, providing a good estimation ($1 - 10^{-7}$ probability) of the system reliability on the fact that the true position is within a circle around the computed position. The horizontal alert limit (HAL) can be defined as a proper upper bound for the HPL value. If $HPL > HAL$, the integrity alarm is triggered, and the navigation system should warn users or applications. These HPL and VPL parameters are commonly called HPL_{SBAS}

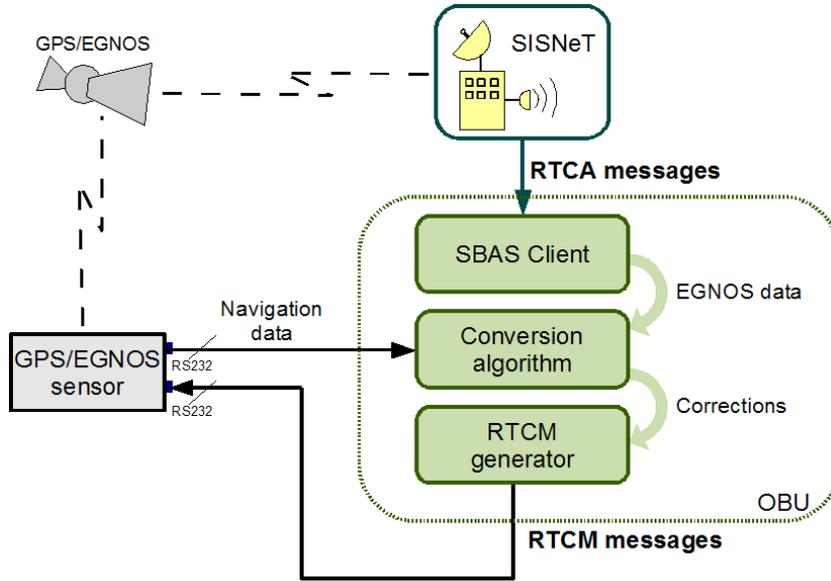


Figure 0.8: Conversion of SBAS differential corrections to RTCM SC-104

and VPL_{SBAS} , in order to distinguish between the SBAS-based computations and the receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) algorithm factors.

Proposed Architecture

The on-board unit comprises the same architecture previously described. A GNSS/EGNOS sensor, a suited on-board computer, and a cellular network connection through UTMIS are the main components. Fig. 0.10 shows a block diagram of the proposed integrity system, which is integrated in the same software than the RTCM conversion algorithm. The OBU software needs again navigation data from the GNSS sensor about the satellites used in the solution. To calculate the integrity factors, the SBAS/EGNOS messages come via two alternative ways: the GEO satellite and Internet. In the first case, an SBAS-capable GPS sensor provides the EGNOS messages via serial port to the on-board computer. When the line of sight between the geostationary satellite and the receiver is blocked by obstacles such as buildings, bridges or other vehicles, the platform switches to the second option automatically, where the SBAS/EGNOS messages broadcasted via Internet by SISNeT are received by the vehicle through the UMTS link.

For each EGNOS message received, the SBAS client is in charge of processing the data fields and then pass to the integrity calculation algorithm the necessary raw error estimations. These values, are used by the integrity algorithm to update the error estimations about range measurements. Finally, the processed error estimations, together with the geometry information about the GPS solution (received from the GNSS sensor), are used to calculate the integrity factors HPL_{SBAS} and VPL_{SBAS} . Only

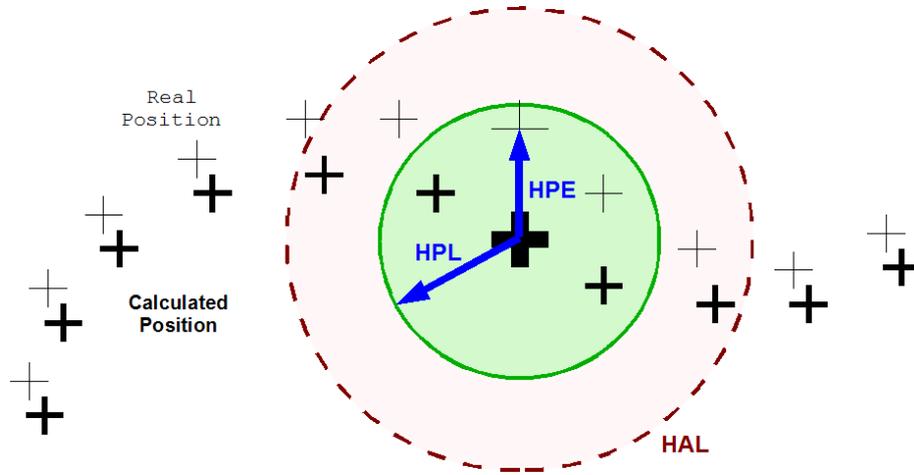


Figure 0.9: HPL concept

the first one is used by ITS applications, due to the horizontal plane is the most interesting one in terrestrial navigation.

HPL Calculation

The calculation of the integrity parameters is based on the real time processing of EGNOS messages, considering the three described sets of corrections. These data arrive to the user position by many types of messages coordinated through Issues of Data (IOD). Messages Type 1, 2 to 5, 6, 7, 9, 12, 24 and 25, provide the fast and long-term corrections, and UDRE (User Differential Range Error). These corrections model ephemeris and clock errors. Messages Type 18 and 26 contain ionospheric corrections and GIVE (Grid Ionospheric Vertical Error). Finally, message Type 10 contains degradation parameters. Once these values are available, the integrity algorithm can proceed to evaluate the mathematical expressions described in [47], adapted in the thesis to the road domain.

The final expression used to compute the HPL value is (1). For the choice of the K_H constant, the RTCA standard differentiates between the *non precision approach* (NPA) and the *precision approach* (PA) modes of operation. In the present work, the mathematical expressions for NPA mode have been chosen, due to the fact that the road environment does not require the high reliability levels needed in the aviation field. Moreover, the final EGNOS service has not been available during part of the thesis work, and the delay requirements associated to the precise mode might be counterproductive for the integrity calculations.

$$HPL_{SBAS} = K_H \cdot d_{major} = 6.18 \cdot d_{major} \quad (1)$$

Expression (2) is used to obtain the final estimation of the error variance regarding each pseudo-range measurement (σ_i^2). Here, σ_{flt}^2 is the error variance caused by

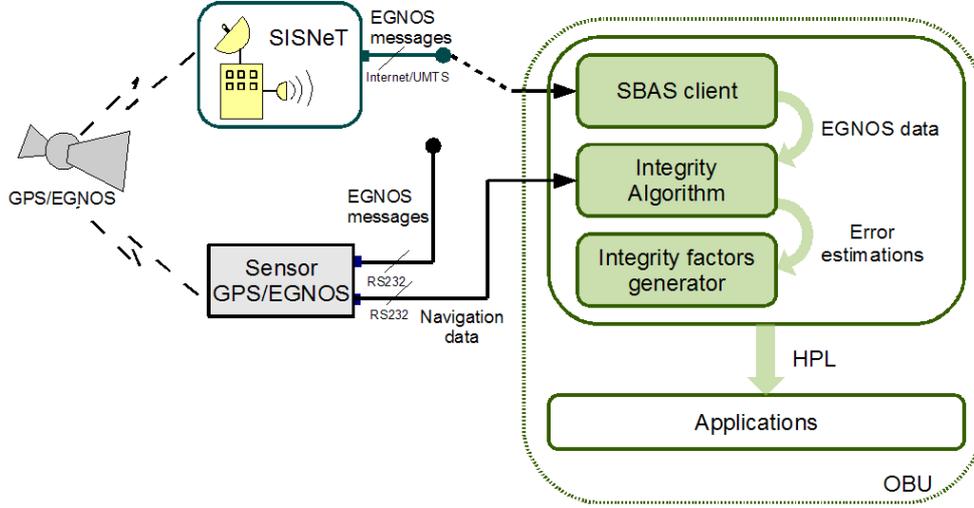


Figure 0.10: SBAS integrity subsystem diagram

the imprecisions in slow and fast corrections, σ_{UIRE}^2 is the error variance caused by ionospheric effects in the transmission of the satellite signals, $\sigma_{i,tropo}^2$ is the error variance caused in a similar way by the troposphere, and $\sigma_{i,air}^2$ is the error variance caused by the user receiver. In [47] it is explained the process to obtain all these values in the implementation of an SBAS client. However, some extra considerations about the temporisation of EGNOS messages must be considered [49]. The last of these parameters, $\sigma_{i,air}^2$ requires a special mention.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,air}^2 \quad (2)$$

The GNSS sensor contributes with the term $\sigma_{i,air}$ to the global error information. The RTCA standard differentiates among four classes of equipment to calculate this parameter. In our case, we assume the class two for our OBU, hence (3) must be considered in order to obtain $\sigma_{i,air}$.

$$\sigma_{i,air}^2 = \sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,multipath}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \quad (3)$$

$$\sigma_{i,multipath} = 0.13 + 0.53 \cdot e^{-El_i/10} \quad (4)$$

The errors caused by multipath phenomena in the transmission of the satellite signals ($\sigma_{i,multipath}$) are estimated by (4), where El_i is the elevation angle of the line of sight between satellite i and the user antenna. However, there is not a fixed model for estimating σ_{noise} and σ_{divg} . The first of these values considers the errors caused in numerical operations performed by the receiver and in the transmission of the signals, due to thermal noise and interferences. σ_{divg} estimates the errors occasioned in the receiver filter, which generate an estimation divergence. The standard establishes a

feasible range for the sum of these two values, based on the elevation of the satellite. (5) and (6) indicate the value to be considered at both edges of elevation for conventional and SBAS satellites, respectively. Because a value of this sum is needed according to the real satellite elevation, a linear interpolation has been assumed, considering the minimum level of signal at 5 degrees of elevation and the maximum at 90 degrees.

$$\sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \leq \begin{cases} 0.0225 & \text{For min elevation} \\ 0.0121 & \text{For max elevation} \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \leq \begin{cases} 1.8 & \text{For min elevation} \\ 1.0 & \text{For max elevation} \end{cases} \quad (6)$$

0.5.3. Experimental Evaluation of the Navigation System

The navigation system described in previous sections has been evaluated over real environments, with the aim of analysing the final performance. A software module has been implemented with extended SBAS capabilities, hence the availability and accuracy of the system have been evaluated through several configurations, and the integrity monitoring algorithm has been analysed using both the GEO and SISNeT.

Implementation of the SBAS Software Module

The SBAS client, and the algorithms to convert corrections and computing integrity factors, are integrated in the software architecture of the OBU by means of the SBAS Processor Utility module. The implemented software can also be used independently, and executed on the command line. The software behaviour can be modified through multitude of arguments, hence it is possible to consider several configurations². The most important ones are:

- Autonomous mode (single). The GNSS sensor operates without any augmentation system.
- EGNOS mode. The GNSS sensor is set-up to receive EGNOS messages from the GEO. The OBU software, however, uses SISNeT to receive EGNOS messages and calculate the integrity factors.
- SISNeT mode. EGNOS messages are received from SISNeT and forwarded to the receiver. The integrity factors are calculated using these messages.
- RTCM mode. The OBU software receives EGNOS messages from Internet, as in the previous case, but differential corrections are converted to RTCM messages, which are then sent to the receiver.

²Some of these operation parameters rely on the receiver support.

- EGNOS Input from Receiver mode. The GNSS sensor uses SBAS directly from the GEO, and forwards the received EGNOS messages through a serial interface. The on-board software uses these messages to calculate the integrity factors.
- EGNOS and EGNOS Input from Receiver mode. This configuration combines these two modes, hence two processing engines are executed in parallel in the OBU, to calculate integrity factors using both EGNOS sources: SISNeT and the GEO.

General System Performance

In order to check the performance of the navigation system, in terms of availability and accuracy, multitude of field trials have been carried out under environments with different levels of coverage. The most relevant tests are analysed in this section. The receiver used in the prototype vehicle has been the FV-21 model. This is SBAS-compatible and can process RTCM SC-104 messages through a serial port. Since this GNSS sensor cannot process SBAS messages through a local port, the RTCM conversion mechanism has been activated to use the EGNOS corrections from SISNeT when the GEO signal is not available.

In Fig. 0.11, the positions collected setting-up the navigation system in autonomous, EGNOS and RTCM modes, are plotted over a satellite photo. The circuit belongs to a part of the Espinardo Campus, at the University of Murcia. In the EGNOS case, all positions were logged as differential fixes. However, in the left lower part of the path, a noticeable deviation can be seen. In this zone, the vehicle, which drives in the counter-clockwise direction, faces a small hill which momentarily hides the GEO signal reception. Since EGNOS messages are not received for a while, corrections start to degrade, and the final position suffers a slight deviation. The normal operation is again recovered after this stretch. In the RTCM path, this effect is not visible, because EGNOS messages are received without discontinuity from SISNeT. The differential correction which EGNOS provides is evident if the path carried out in single mode is compared with the EGNOS and RTCM cases. These last paths are almost equivalent along the circuit, but single fixes are deviated to the south, what is specially noticeable in stretches with a great horizontal component.

The urban stretch showed in Fig. 0.12 belongs to the Murcia city. Here, the coverage is low due to near buildings on both sides of the road. The vehicle drives in this case from the upper to the lower part of the image. When it reaches the most problematic area, a great deviation in the EGNOS case can be seen. In the autonomous and RTCM configurations, this effect is lower because the GEO satellite is not used and the EGNOS mode is not lost. The strange effect noticeable at this point of numerous fixes is due to the presence of a semaphore, which was taken in red light in the three paths. This effect is usual in GNSS sensors, because their algorithms to estimate the position suppose an inertial mobility pattern. The lack of SBAS coverage is evident when the positions collected from this location in the EGNOS configuration start to not to be differential. This is represented by non-filled circles. After passing this zone, and

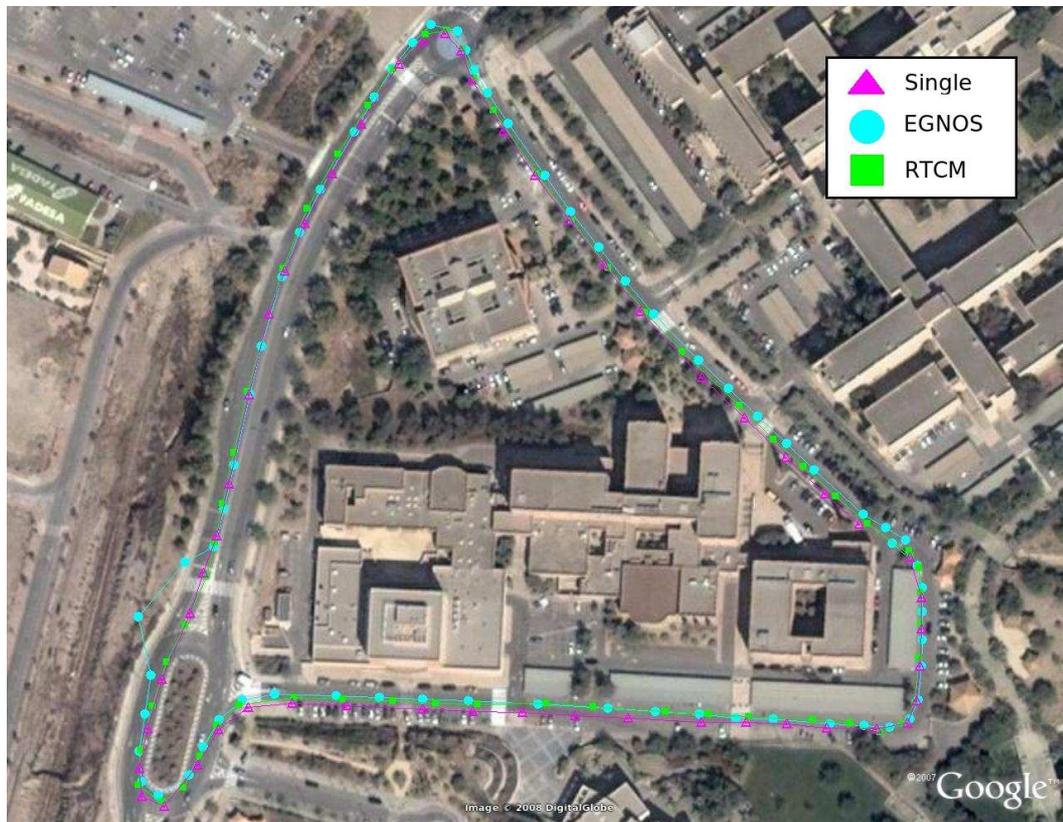


Figure 0.11: Navigation system performance in a semi-rural environment

reach a green area, differential positions are again obtained. In the RTCM configuration this problem is avoided, assuring the EGNOS availability along this stretch. A route guidance system could have understood in the EGNOS mode that the vehicle stayed in the square just on the left of the semaphore location, because the map-matching algorithm could detect this street as the nearest one.

All the fixes collected during the three complete paths in Murcia are summarised in Table 0.1. The whole circuit comprises a five-kilometre path along main streets of the city, including the old quarter, and performed at the night to avoid traffic jams. The results show how the RTCM conversion algorithm assures differential positions in all the path. Coverage problems of the EGNOS signal are evident, with a total of 39.22% of non differential fixes in the EGNOS configuration. The good operation of the GNSS sensor in urban settings is also relevant, due to its capability to track satellites under extreme conditions.

The performed tests validate the navigation system architecture, which takes advantage of the SBAS capabilities in an extended number of cases, including relaxed unfriendly environments, and with low/medium range or inherited receivers.

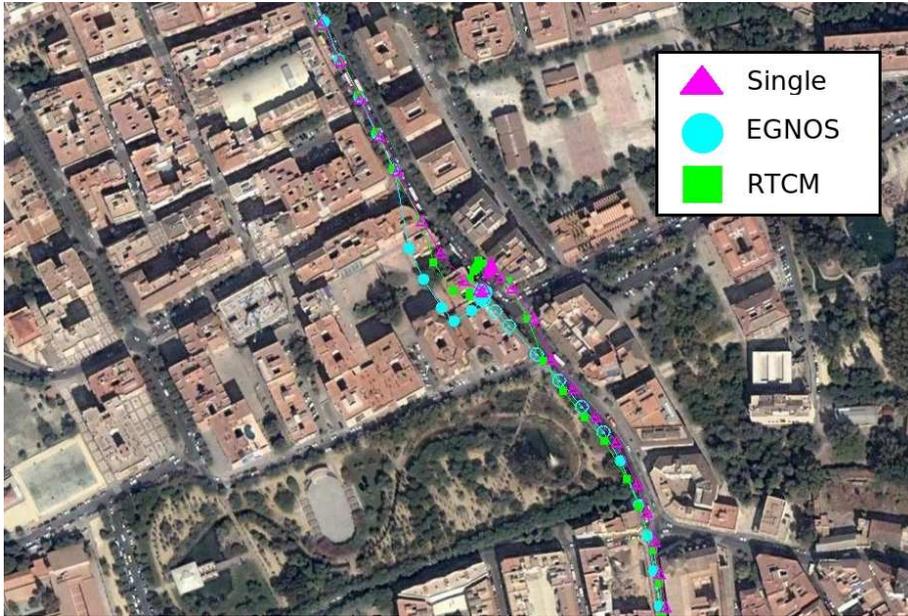


Figure 0.12: Navigation system performance under low coverage conditions

Table 0.1: Collected positions over an urban circuit in autonomous, EGNOS and RTCM modes

	Single		EGNOS		RTCM	
N/D	0	0%	0	0%	0	0%
GPS	380	100%	160	39.22%	0	0%
DGPS	0	0%	248	60.78%	397	100%

Integrity Monitoring Tests

Although several static tests have been performed to check the operation of the integrity system, only the most important dynamic trials have been summarised in this part, due to mobile scenarios are the most relevant in ITS. The GNSS sensor used in these tests is the Novatel OEM3, since this can forward the EGNOS messages received from the GEO to the on-board computer. The two circuits considered at the Campus of Espinardo (University of Murcia) are illustrated in Fig. 0.13. It is important to take into account that no satellite malfunctions were detected during the integrity tests, hence error estimations considered for each satellite pseudo-range were quite low. This fact enables the evaluation of external factors which affect integrity calculation.

The first of the trials is drawn in green color over the satellite photo included in Fig. 0.13. The configuration used in the system is the EGNOS Input from Receiver mode, hence the EGNOS messages used to calculate integrity factors come from

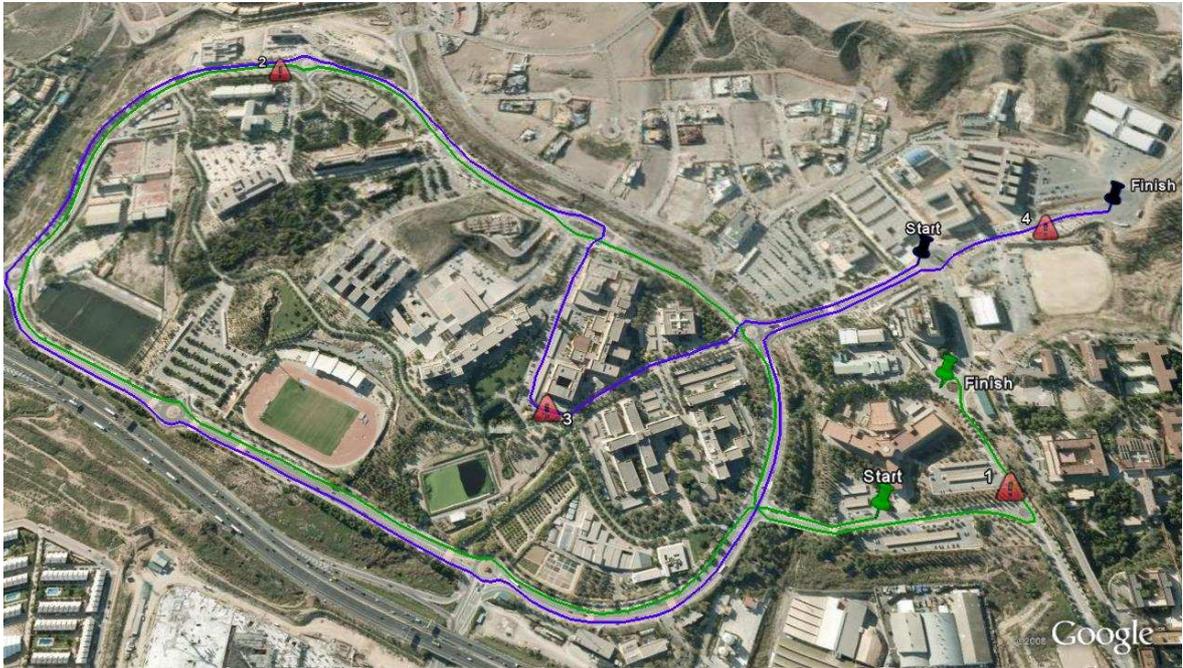


Figure 0.13: Circuits followed during integrity trials

the GEO. Fig. 0.14 shows the results obtained during the path. The great steps of HPL_{SBAS} at times 120 s and 310 s are due to changes in error estimations calculated using the EGNOS messages. If the lower graph is also considered, it is easy to deduce that peaks observed in the integrity factor are related to changes in the number of satellites used to calculate the position. Instants around times 400 s and 730 s belong to the problematic areas “1” and “2” of Fig. 0.13, respectively. At these locations, the coverage is low due to near buildings and orography conditions. From instant 400 s to 700 s some EGNOS messages were not received, hence some error estimations start to degrade, and this is the reason why a slight linear increase of HPL_{SBAS} is noticeable during this period.

With the aim of analysing the impact of SISNeT through a cellular connection, a second circuit were considered at the university campus. Hence, the SISNeT mode configuration was used. In this case, the path is the one drawn in blue in Fig. 0.13. The results of HPL_{SBAS} are plotted in a three-dimension graph in Fig. 0.15. Here it is possible to compare the system operation using the GEO or SISNeT as EGNOS source. As can be seen, great changes of HPL_{SBAS} in the area marked as “2” in Fig. 0.13 are again noticeable. Moreover, a new problematic zone also due to coverage problems is evident at the central part of the graph. This is marked as “3” in Fig. 0.13. The vehicle drives near high buildings in this stretch and then crosses a parking area covered with a metallic roof.

Because satellite coverage is equivalent in both the GEO and SISNeT cases, great differences in HPL_{SBAS} values in Fig. 0.15 are due to communications problems with

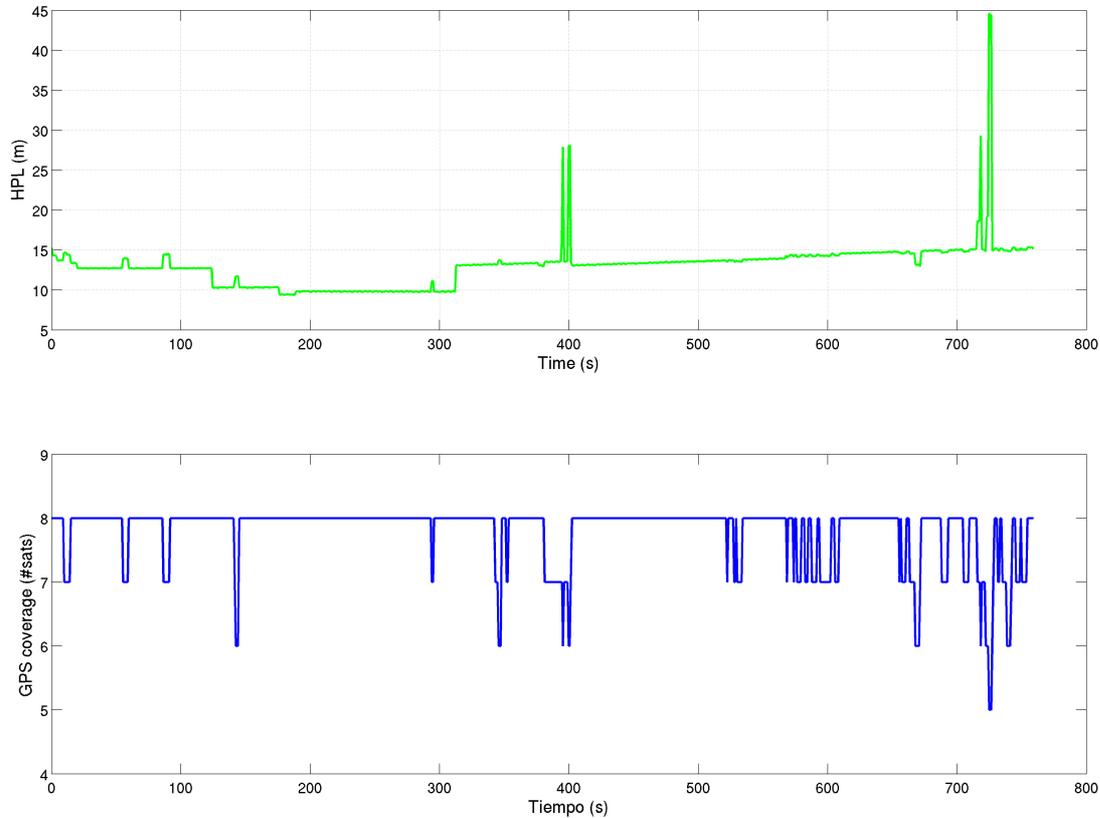


Figure 0.14: Dinamic monitoring of HPL_{SBAS}

the SISNeT server. In area “3”, in addition to the coverage problems, the cellular network adds an extra error factor in the integrity calculation. Here, the line of sight with the base station is blocked, and communication problems impact on the SISNeT channel. In the last part of the path, communication problems are even more noteworthy. A temporal disconnection avoids the reception of EGNOS messages, hence error estimations degrade and the calculated HPL_{SBAS} reaches the highest levels.

Considering the previous results, the GPS coverage and the quality of the communication channel, in the case of using SISNeT, are key factors when an GNSS-based integrity system is used. Coming back to the results, it is noticeable how integrity values calculated directly from GEO messages give more realistic information about the navigation system state. However, it is important to take into account that these tests have been carried out in an open environment with some stretches of low UMTS penetration, and only some areas of bad GNSS coverage. At urban canyons, for example, the only way to guarantee the calculation of the GNSS integrity, in most of the cases, is considering SISNeT. Moreover, the CN coverage in cities is excellent, and its usage is only limited by the capacity of the network, as it is discussed in next section.

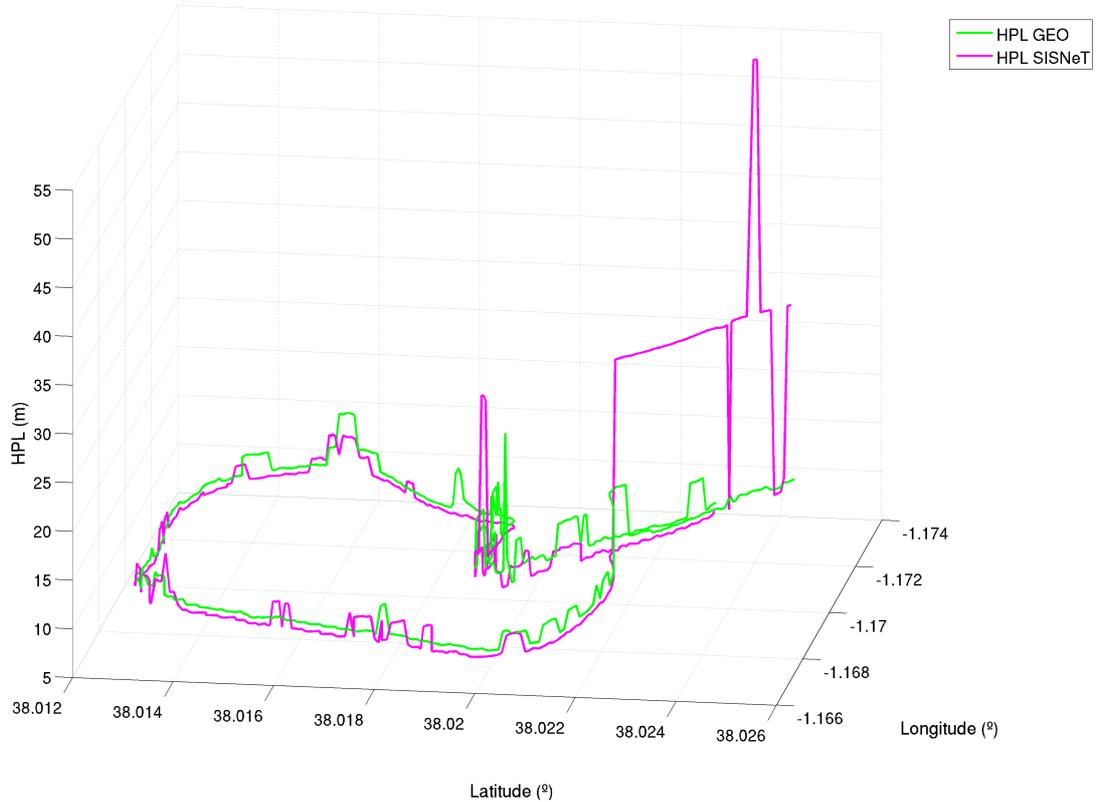


Figure 0.15: HPL_{SBAS} values calculated through the GEO and SISNeT

0.6. Integral Networking Platform for ITS

To cope with communication necessities of ITS telematic services, a networking architecture has been designed and integrated not only in the OBU, but also in the infrastructure side. On the basis of new UMTS improvements, an overlay network has been designed to allow vehicles to communicate through V2V, V2I and I2V patterns. In addition, the infrastructure side has been equipped with novel processing and monitoring capabilities, which integrate the vehicle in the traffic context.

0.6.1. Towards a Multi-Purpose Network Approach

Both VANET and CN have good features for vehicular communications. VANET solutions offer good connectivity among close vehicles, because the decentralised architecture uses cars to create a scalable and cooperative mesh where every vehicle acts as a router. CN, on the other hand, offer long range communications thanks to a direct connectivity to Internet through the operator's network. This communication paradigm has two extra advantages: a high ratio of equipped vehicles is not necessary

to assure connectivity, and the use of a proven deployed technology. The approach followed in the thesis combines the advantages of both VANET and CN, and mixes them to establish a starting point from which to embrace all the services they offer individually. Fig. 0.16 illustrates the idea of merging the main advantages of these technologies in a decentralised CN-based solution. Using a P2P paradigm over the cellular network, we obtain an architecture which takes advantage of the benefits we have in both approaches. P2P networks create a virtual decentralised architecture where individual nodes can communicate without knowing physical details about the underlying network. Latency limitations for close V2V communications are initially inherited from CN. Nowadays, a CN connection cannot match the latency times of VANET systems between nearby cars. However, new improvements point to CN technology as a valid carrier of vehicular transmissions for more and more services, and it can now be considered as a suitable complement to VANET approaches [50]. The cost of the communication channel is also an important issue in CN. Thanks to special agreements between operators and service providers, the cost of CN data connections is gradually decreasing.

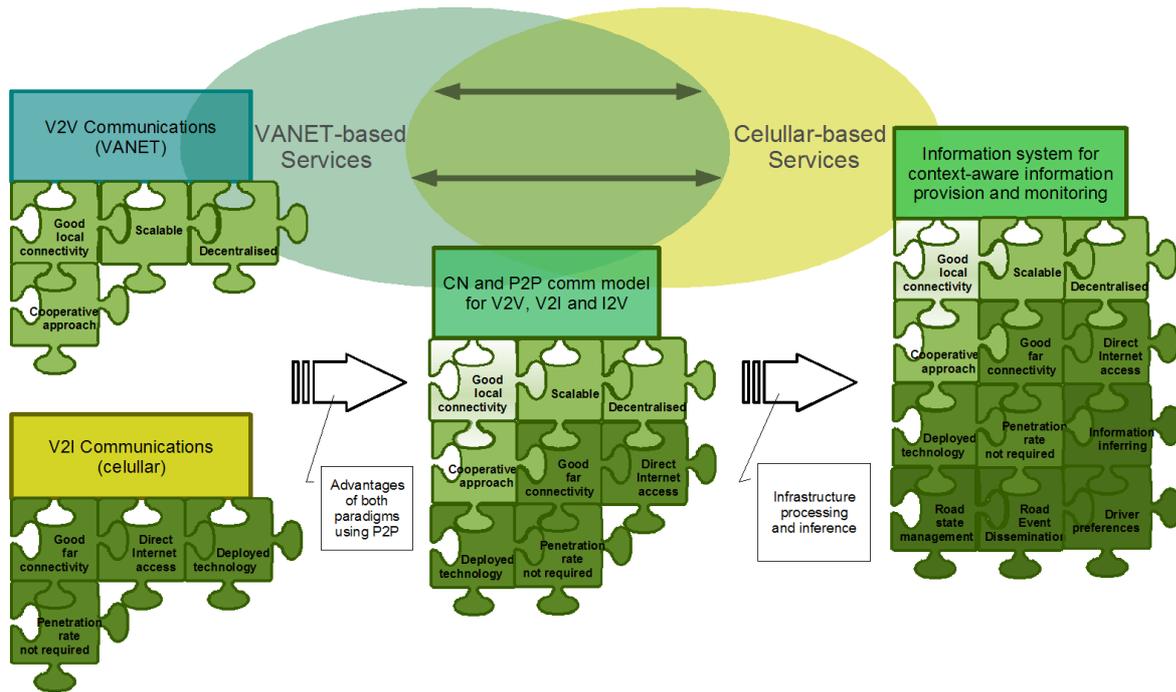


Figure 0.16: Advantages of a CN and P2P-based communication system with extended infrastructure capabilities

A V2V network allows vehicles to communicate and propagate information over a limited area. Such a strategy is useful to notify nearby vehicles about traffic hazards, road conditions, traffic jams, and other local events. However, a V2I link offers extra benefits. In this line, the thesis proposal goes a step further, using an infrastructure

system to provide context-aware information to drivers depending on their preferences and, in general, take advantage of a global system capable of processing all the events received from the roadside. Fig. 0.16 shows the new capabilities of the network model when communications with the infrastructure are added. The core system can give a global vision of the road network state, processing information from vehicles and roadside hardware, and performing monitorization tasks. Thus, it would be possible to notify vehicles about traffic problems which affect a long highway, or send a warning message about a forecast of congestion, thanks to traffic jam messages received from vehicles or information feedback from loop detectors at the roadside, or report any pollution problems in an area. These examples are only some of the possibilities such a system offers by means of traffic data analysis and a combination of V2V and V2I communications, hence overcoming limitations of current traffic information systems such as TMC. As is further explained, our design proposes a local entity to collect roadside information. This is in charge of a particular traffic area, and “sniff” local events from vehicles and roadside hardware.

Information provided to users (or drivers) can also be adapted using such a system. The architecture described in the next sections includes an inferring technique which adapts information provided to vehicles according to the user’s preferences. Users and road operators can modify the system behaviour, and relevant points of interest (POI) can be notified to the vehicle, according to custom inferring rules. This service exemplifies the potential of the infrastructure-based services, and the usefulness of the infrastructure to vehicle communication link, as a complement to V2V possibilities.

0.6.2. Communication Architecture and Information Processing System

The main goal of this part of the work is the development of a platform which provides ubiquitous services to vehicles, enabling a suitable networking platform for implementing services which span V2V, V2I and I2V communications. Fig. 0.17 shows the overall architecture of the thesis proposal in this frame. The vehicular network mainly involves the entities located at the roadside (grey zone) and the Group Server. Every vehicle drives along roads with service provision capabilities; and each coverage area and its associated services are registered in a global entity called Group Server (GS). The services considered in the system have an informative nature, and exploit V2V, V2I and I2V capabilities, hence they include safety services such as breakdown or repairs notification services, or tourism and travel information about the current place. The methodology carried out follows a publish/subscribe scheme, where vehicles subscribe to some services and receive asynchronous notifications.

Using a P2P network with JXTA technology, vehicles communicate between themselves and with the infrastructure. The geometrical information about every coverage area and its P2P communication groups are stored in GS. Thus, every service available in each area uses a P2P group which limits the propagation of messages and changes when the vehicle enters a new area. Vehicles pass from one coverage area to

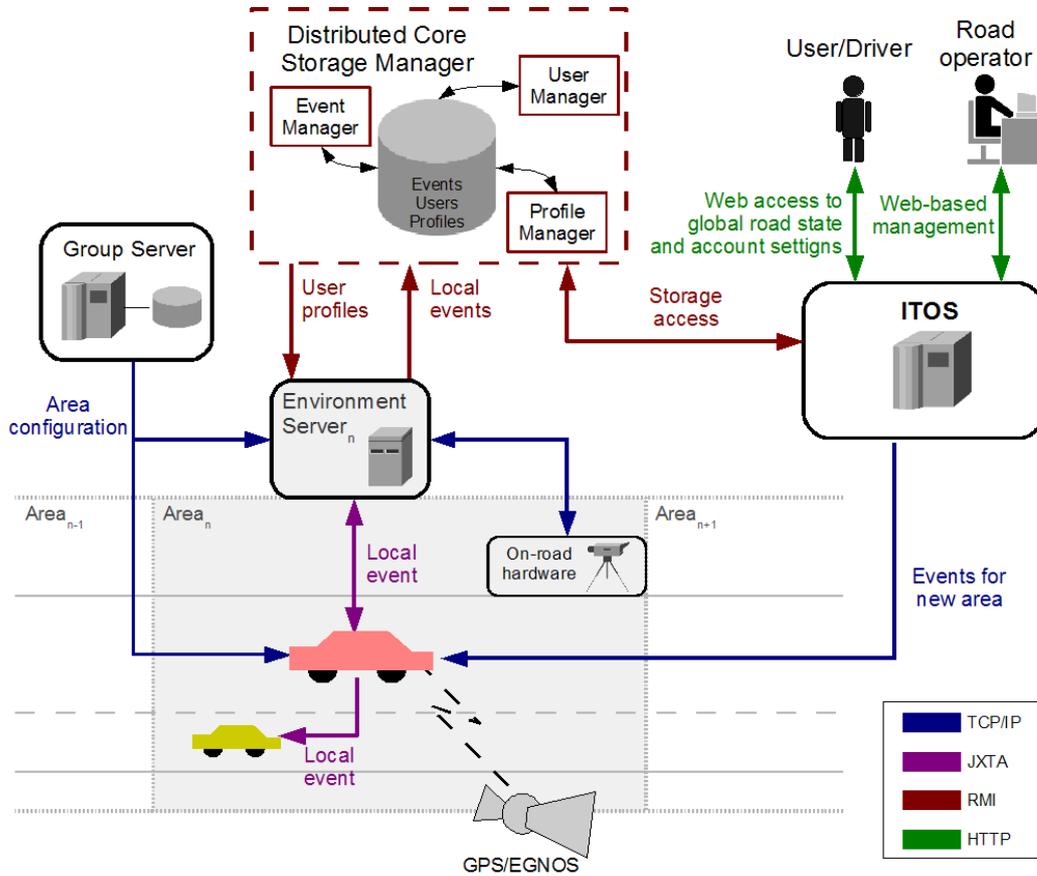


Figure 0.17: Overlay network integrated in the global telematic architecture

another through a hand-off process aided by the navigation system described in the previous section. The vehicle uses a TCP/IP-based protocol to send a hand-off request to GS, which replies with the P2P connection details and the geometry of the new area.

Messages transmitted over the JXTA overlay network are routed through logical pipes, and contain information about the source of the message, the type of event and the payload. If a message is sent by a vehicle, the packet includes the current position and an integrity factor to bound the goodness of the fix. When a vehicle which is subscribed to a service sends a message in this communication system, it is received by all the vehicles in the area which are subscribed too. This mechanism offers a V2V communication paradigm. However, it must be noted in Fig. 0.17 how an infrastructure entity, placed in every coverage area, listens to all events notified in the zone; this is the Environment Server (ES). ES is thus in charge of processing all the events sent in a V2V scheme, but it also plays a forwarding role between vehicles and the infrastructure in a V2I communication scheme. Because ES is connected to the rest of the roadside hardware, it is able to send certain notifications to vehicles, such

as “your speed is over the limit”, using a unicast mechanism. Environment Servers are logical entities and, therefore, they can be installed on physical computers located at the roadside, or executed in a remote server at the core infrastructure. The last choice offers more flexibility, avoiding scalability and maintenance drawbacks. The communication between the roadside hardware and ES can be physical, by means of a serial connection, or remote, using a wired or wireless network.

A complete information system at the infrastructure side has been developed as well. The distributed core storage manager system, represented by a dashed line in Fig. 0.17, is implemented by means of remote objects which are used by the rest of the infrastructure entities through Remote Method Invocation (RMI). ES forwards new events from vehicles and road hardware to the core storage manager. The Internet Traffic Operation Server (ITOS) provides a web access with a complete view of road events. To do this, ITOS analyses the roadside information accessible via the core storage manager. This web application offers a differentiated access to users and operators. Operators, unlike clients of the system, have an administration account with management capabilities. The end user of the web front-end is able to check the state of the roads, at home or even using the on-board computer, via the Internet connection.

In order for certain services to offer context-aware information in the current traffic area, the environment has been modeled through ontologies, whose instances represent relevant places in the coverage areas. This information is distributed among the Environment Servers, in charge of maintaining the local data base. The user’s preferences are modeled as profile ontologies located in the core storage manager. Users can modify their profile through the web application located at ITOS. The devised information provision technique works as follows. Vehicle presence is detected in the hand-off or by a specialised device (such as the RFID reader used in the prototype). When the vehicle is detected, ES request the user’s profile to the core storage manager, as can be seen in Fig. 0.17. Using this profile and the available contextual data base, ES performs an inference process and notifies the adapted information to the driver, following a I2V communication pattern.

From the previous explanation it can be seen that information from subscribed services is sent or received by means of events. These come directly from other vehicles or from the infrastructure, via ES entities. Events from the roadside have a local meaning, because they comprise context-aware information exchanged in a V2V pattern. Due to hand-offs between coverage areas, it is necessary for vehicles to receive important events of the new area they enter, which were previously collected from the roadside. ITOS carries out this task through a TCP/IP-based protocol, as Fig. 0.17 shows.

0.6.3. System Operation from the Vehicle Point of View

The five most representative scenarios are illustrated in Fig. 0.18. In the first one the driver subscribes to the services he is interested in. To do so, the on-board software sends a subscription to GS, in order to receive or be allowed to send notifications

from/to the network. Once the vehicle is connected to the system, or when the car enters a new coverage area, a hand-off occurs (second scenario). Because the vehicle receives the geometry of service areas from GS, the OBU detects the need to perform a hand-off. In this process, it asks for the P2P connection parameters and the geometry of the new area. The on-board software also asks for traffic incidences in the new zone, in order to update its local navigation information.

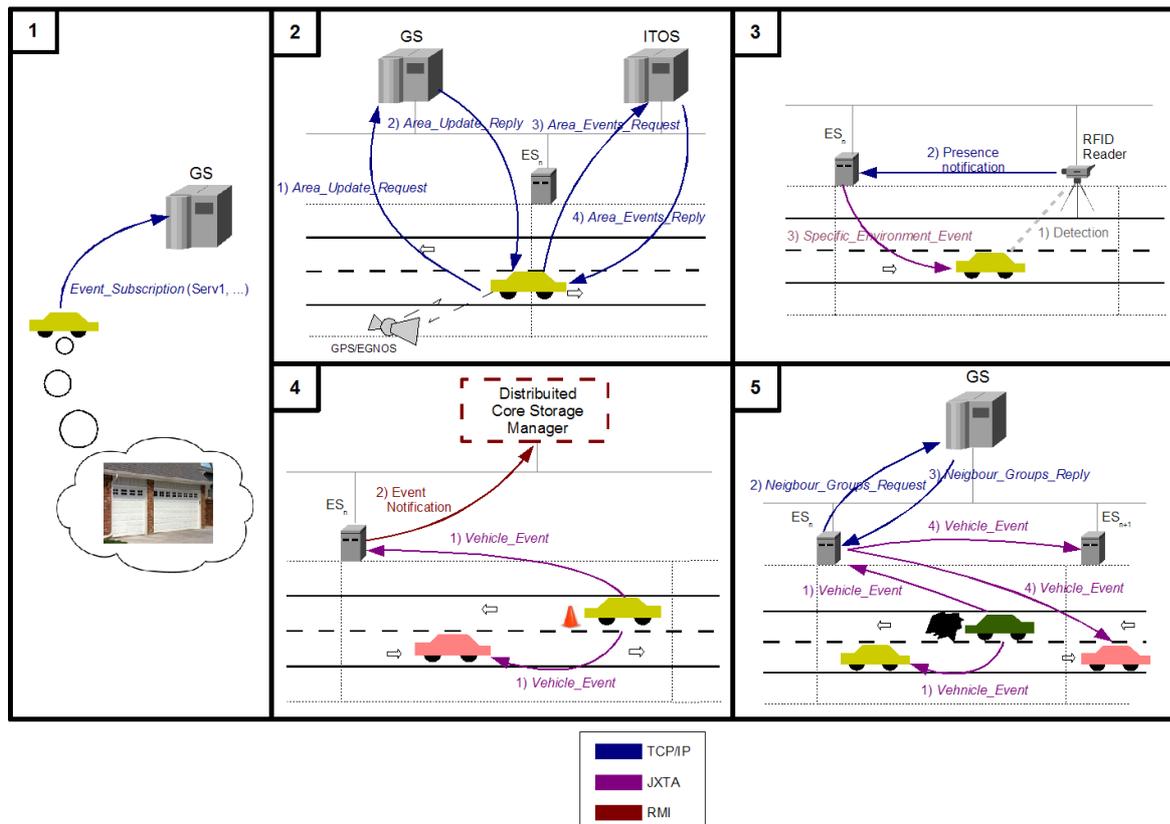


Figure 0.18: Operation scenarios and vehicle interaction with the system

The third scenario of Fig. 0.18 exemplifies the connection ES maintains with the roadside hardware. Following the design explained in the previous section, a prototype where a vehicle is detected using an RFID system has been implemented, and ES provides contextual information to the driver. In addition to this I2V message passing, in the fourth scenario we can see a V2V communication example. Here, the yellow car notifies a repairs event to the rest of the vehicles in the area. This event is also heard by ES, so it is sent to the core storage platform following a V2I paradigm. Finally, in the last case, it is illustrated the forwarding mechanism ES carries out when an important event is received. When a notification from a critical service, such as “Collision”, reaches the correspondent ES, this asks for the P2P parameters of the same service in adjacent areas and then forwards the message. The vehicle which initially generated

the event, sent the message to all vehicles in the area, but the forwarding strategy assures that vehicles in adjacent areas receive the information too.

0.6.4. Reference Prototype

The prototype vehicle with the FV-21 GNSS sensor and the UMTS Huawei E220 modem, which support HSDPA, has been used in the operation tests of the complete telematic platform. We have implemented the Environment Server and run several instances over common Linux-based PCs. To test the connection between an ES and the rest of road side hardware, an RFID reader has been set-up to detect the presence of vehicles through a tag affixed to the windscreen. The photographs included in Fig. 0.19 show this set-up. The RFID reader was installed at the test place using an ad-hoc gantry. A laptop was connected via serial port to the reader, to send presence notifications to the corresponding ES. The Group Server and the Internet Traffic Operation Server have been developed and then installed over a high performance server, in order to cover high rates of queries. The distributed core storage manager is composed of a set of RMI entities which perform information management tasks (Profile Manager, User Manager and Road Event Manager), and a remote MySQL data base which physically stores all data. The RMI entities work as independent applications, and each one publishes a remote object which is used by ITOS and ES. In our prototype, the RMI applications and the MySQL server run on the high-end computer, but they could have been installed on different hosts.

A new module has been included in the software platform, to offer JXTA communications through multicast pipes. This module makes P2P programming tasks easier to the developer. A high level service has also been implemented to access the networking architecture through several reference services. This is Message Console, which appears in Fig. 0.20. The user connects to the services he is interested in by pressing the buttons available on the right part of the window. When the activated services appear in the current coverage zone, their corresponding images appear below, and it is possible to receive events from outside or send a new one by clicking over them. The central part of the window shows all the received messages about all active services (road incidences, weather, tourist information, etc.). In this example, the vehicle has received information about hotels and cinemas. The service which provides such information is called “On Road Information”, and uses the RFID system to locate the vehicle at a specific place. When ES receives the presence notification, it asks the core infrastructure for the user’s profile, and then infers interesting information for the driver, via its local database about the environment. Finally, ES sends this information to the vehicle, including the matching rate for every point of interest notified. In the example, the hotels which best suit the user’s preferences are “AC Elche”, “NH Amistad” and “NH Rincon de Pepe”, with a matching rate of 43%. This suitability rate is calculated considering the number of matching features between the user’s profile and the POI element.

The navigation capabilities of the on-board software are also showed in Fig. 0.20. This feature is currently implemented to support both Google Maps (in the image) and



Figure 0.19: Hardware set-up of the RFID identification prototype

digital cartography. The software draws both previous road problems, received during the hand-off, and the new ones, by means of icons over the road. The polygon which covers the current coverage area is also depicted using a light red line. When the vehicle is close to a road event (initially sent by a vehicle, a roadside sensor or manually fixed by an operator), the application shows a warning about it and the remaining distance to reach the incidence. Further details about the incidence are also given through a spoken alert. In the example, a warning about the proximity of a breakdown on the road has been raised. This event is represented as a yellow mark on the map. As can be seen, the user is always informed of a road incidence by means of the warning icon, the spoken alert and the navigation map. The central text panel also notifies traffic incidences from other vehicles (V2V) or roadside sensors (I2V).

In Fig. 0.21 and 0.22 there are two screenshots of the web application located at ITOS, implemented using JSP. In the map view provided in Fig. 0.21, a road operator has logged in and is currently reading information about a meteorology event reported by a vehicle in the surroundings of Madrid. Road incidences are depicted over a Google

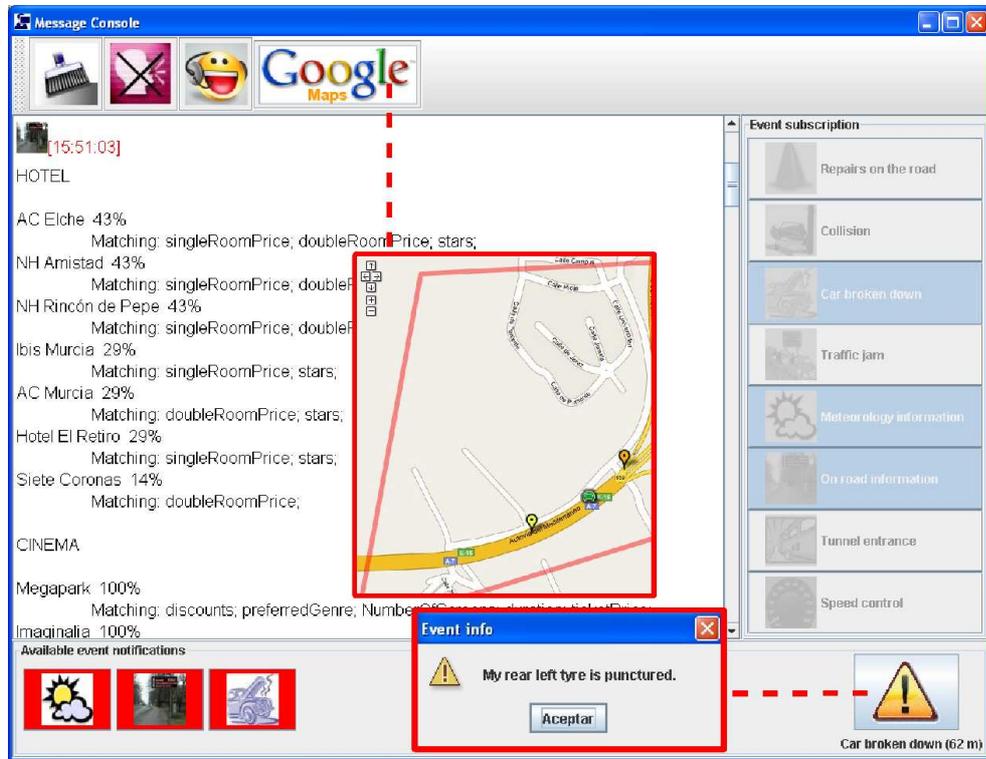


Figure 0.20: On-board software with traffic and POI notification services

Maps interface using different marks for each incidence type. All road event types can be seen on the left part of the window. Further information about incidences can be accessed by clicking on the icon. A common user is only allowed to see information about the road network, but the operator can also insert, delete or modify events, and manage the users registered in the system. Each user can, nevertheless, change his own profile via this application. As can be seen in Fig. 0.22, the user can change his preferences in order to vary the information received from the infrastructure. To date, several features can be selected about several kinds of POI, such as cinemas, restaurants, petrol stations, service areas and so on.

0.6.5. Network Performance Analysis

The part of the networking platform in charge of route messages among vehicles, and between the vehicle and the infrastructure, based on the overlay JXTA network over the CN basis, has been evaluated in real environments. Multitude of field tests have been carried out, to analyse the communication performance in I2V, V2I and V2V data transmissions.

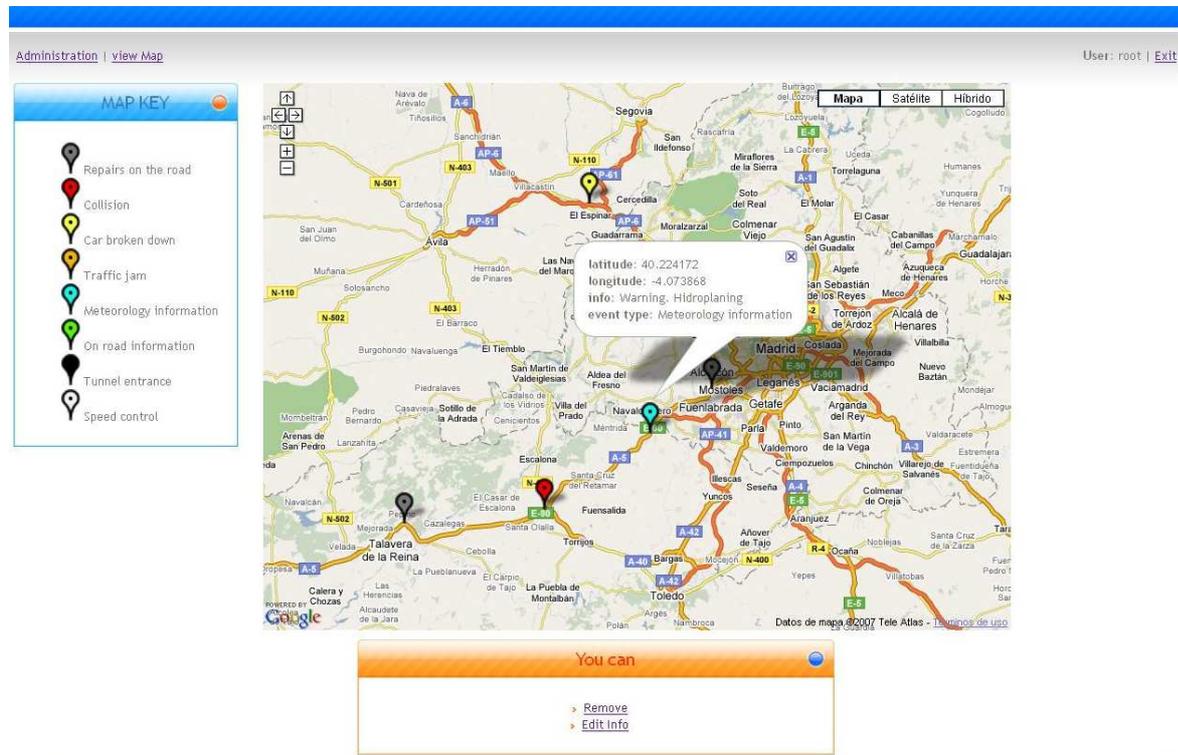


Figure 0.21: Road incidences monitoring at the ITOS Web application

Description of Tests

In addition to the configuration previously described of the prototype vehicle, a second vehicle was used in V2V tests. This is a common car equipped with a laptop, the OEM3 GNSS sensor, and a ZTE MF620 UMTS modem. Both, the UMTS modem of the prototype vehicle and this one, support HSDPA, what improves the communication performance with regard to the UMTS R99 release. The laptop comprises a common computer, with a Pentium M 1.5 Ghz, 512 MB of RAM, Windows XP, Java Virtual Machine 1.5, and with the same software platform than the OBU.

Several tests have been performed to check the proper operation of the roaming system, hence communication channels were correctly maintained through changes of P2P communication groups. This section, however, is focused on analysing the performance of the overlay network when messages are propagated in the CN operator's infrastructure. The latency has been found as the main metric to be studied, due to this is the main requirement of many ITS applications. Current bandwidth of CN are enough for most of ITS services, hence it is not a key issue. Next tests also study the network availability, although the packet drops are not quantified due to the special features of the designed communication platform. By means of several initial tests using UMTS R99, a ratio of packet losses around 4% was obtained. HSDPA improves the network performance in these terms, due to recent advances in the communication

The screenshot displays the 'Edit Profile' interface for a user named 'antonio'. It is divided into six main sections, each with a title and a set of configuration options:

- Cinema Profile:** Includes fields for 'Max. film duration' (140), 'Min. film duration' (120), 'Max. number of screens' (12), 'Min. number of screens' (8), 'Max. ticket price' (6.0), and 'Min. ticket price' (5.5). It also has a 'Discount required' dropdown set to 'true' and a 'Preferred genre' dropdown with options like 'Animación', 'Comedia', and 'Histórica'.
- Restaurant Profile:** Includes 'Max. menu price' (35.0), 'Min. menu price' (20.0), 'Max. stars' (4), and 'Min. stars' (3). It features 'Credit card payment' and 'Desired menu' dropdowns set to 'true', and a 'Choose specialties' dropdown with options like 'Carnes', 'Platos de la tierra', and 'Arroces'.
- Petrol Station Profile:** Includes 'Max. petrol price' (0.988) and 'Min. petrol price' (0.932). It has a 'Desired petrol' dropdown with options like 'Super 95 octanos', 'Diesel', and 'Super 98 octanos'.
- Service Area Profile:** Includes 'Hotel required' (false), 'Petrol station required' (true), 'Picnic area required' (false), 'Restaurant required' (true), and 'Toilets required' (true) dropdowns.
- Points of Interest:** Includes 'Church Religion' (Católica), 'Church Style' (Moderno), 'Museum Artist' (Juan Baretta), and 'Style' (Surrealismo). It also has a 'Scenery type' dropdown (Cordillerano) and 'Max. number of cinemas' (10) and 'Min. number of cinemas' (9) fields.
- Hotel Profile:** Includes 'Max. double room price' (100.0), 'Min. double room price' (50.0), 'Max. single room price' (60.0), and 'Min. single room price' (30.0). It also has 'Max. stars' (4) and 'Min. stars' (3) fields, and dropdowns for 'Gym required' (false), 'Internet required' (true), 'Sauna required' (false), and 'Swimming Pool required' (false).

Figure 0.22: Edition of user profiles using the Web front-end

channel management, and the new forward correction and retransmission system, called HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) [51]. In next tests no packet drops were detected, although it is important to take into account that, whereas in the uplink channel the JXTA messages were transmitted over UDP packets, the downlink one works over the TCP basis. This fact was checked by means of a network analyser installed in both the sender and receiver terminals.

The circuit used in the performance tests comprises a service area configured for the whole Espinardo Campus (University of Murcia). A satellite photo of this zone, together with the followed circuit, is showed in Fig. 0.23. The trials have been performed in the counter-clockwise direction, starting at the right upper corner, and finishing at the same place. The B-Nodes used as base station are located on a hill at the center part of the campus.

For I2V tests, in addition to the mobile vehicle, a set-up terminal connected to the wired network has been used, with the same software platform than the prototype car. The vehicle, connected to the UMTS network, receives a periodic transmission of one JXTA message of 38 bytes per second. This contains a timestamp set by the sender, in order to compute the propagation delay in post-process. The final message length is 1927 bytes, due to the JXTA control overload. This packet is transmitted through two TCP datagrams which require an acknowledgement from the vehicle. In the V2I case, the source of messages is the OBU. The final JXTA message length is now 1498 bytes,

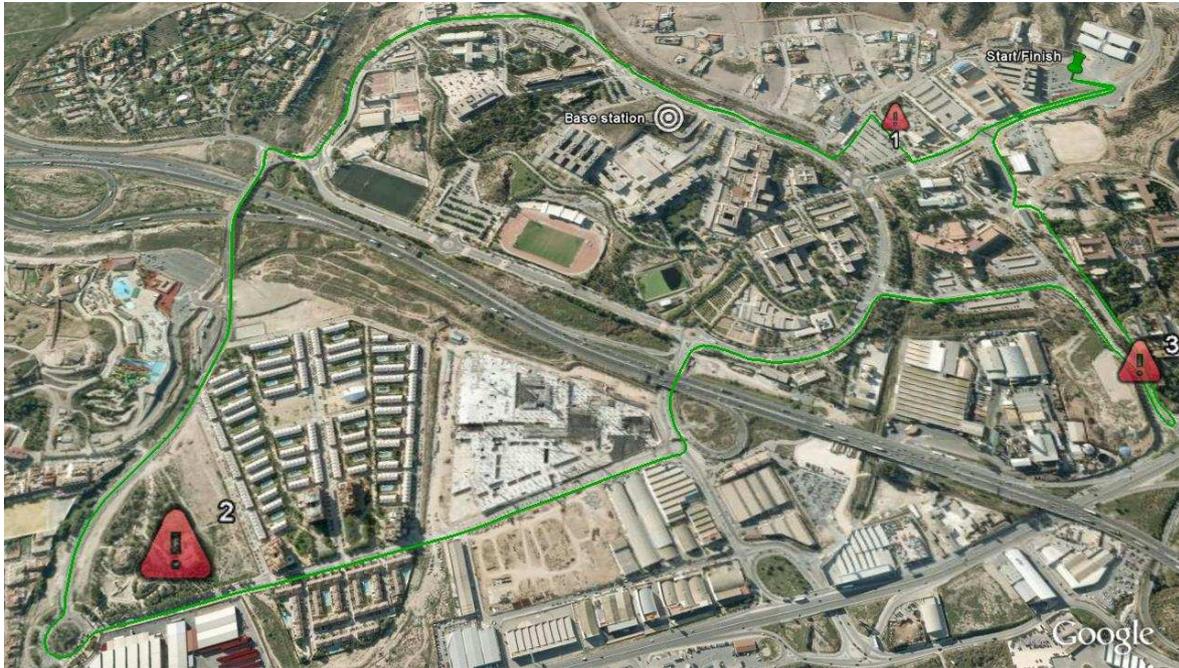


Figure 0.23: Circuits followed during communication performance tests

which is inserted in a UDP packet, fragmented in two IP packets. Finally, in V2V tests the two vehicles have been used, and UDP and TCP packets are sent in the uplink and downlink channels, respectively. During these tests the two cars were driven closely, in order to maintain the same external conditions. Local clocks of both the OBU and the laptop were synchronised with the GNSS sensor, hence the same time has been used in both computers.

Analysis of Results

Many tests have been carried out in the previous circuit. Table 0.2 includes information about some of these trials. As can be seen, three types of tests have been made, considering I2V, V2I and V2V communication patterns. These have been performed at different times, and the speed has been maintained between 17 and 25 Km/h in most of the cases, except in the last three tests, which evaluate the impact of speed on the network performance.

The mean delay times of Table 0.2 give similar results for I2V and V2I tests. In the general case, the downlink channel should give, however, a better performance than the uplink one, due to the asymmetric nature of CN and, in this case, because the HSDPA technology is also used. Two main reasons explain the obtained results. On one hand, TCP is used in the downlink channel. As it is later showed, TCP increases delay problems under low coverage conditions, due to it is not adapted to wireless communication problems. Packet losses and high latency values are taken by TCP

Table 0.2: Summary of communication tests and main features

Test	Type	Speed (Km/h)	Time	Latency mean (ms)	STD (ms)
T1	I2V	17-25	27/11/07 13:11-13:30	227.62	566.78
T2	I2V	17-25	30/11/07 12:43-13:07	295.86	1242.86
T3	I2V	17-25	05/12/07 11:14-11:39	244.98	561.63
T4	I2V	17-25	05/12/07 11:51-12:14	247.72	558.16
T5	V2I	17-25	28/11/07 10:23-10:44	248.06	129.96
T6	V2I	17-25	28/11/07 10:53-11:16	266.28	231.71
T7	V2I	17-25	12/12/07 11:37-11:58	242.91	239.07
T9	V2I	17-25	12/12/07 12:04-12:26	236.96	147.46
T9	V2V	17-25	30/11/07 11:22-11:43	464.33	903.09
T10	V2V	17-25	30/11/07 11:48-12:09	489.62	814.31
T11	V2V	17-25	30/11/07 15:43-16:04	378.93	475.92
T12	V2V	17-60	11/12/07 15:59-16:12	400.37	357.28
T13	V2V	17-60	11/12/07 16:13-16:26	412.55	375.44
T14	V2V	17-60	11/12/07 16:32-16:45	415.7	339.45

as network congestion problems. On the other hand, the dynamic management of the HSDPA downlink channel, which adapts the communication link according to real-time conditions, can degrade the network performance when vehicles drive across unstable environments. Also, since the terminal in the I2V case do not receive a continuous traffic flow, sometimes it is necessary to exchange some signaling traffic to receive a new packet, due to the terminal pass to low-power mode sometimes [52]. These previous effects provoke a higher jitter which increases the mean delay, as can be observed in the standard deviation (STD) values of Table 0.2. The results obtained in V2V tests give numerical values around the sum of the I2V and V2I cases. This is normal, since CN communication problems are present in both the downlink and uplink channels. Increasing the driving speed from 17-25 Km/h to 17-60 Km/h, does not apparently affect neither mean delay nor STD.

The time in which the tests were made is considered as an important factor in the interpretation of the results. Observing the mean delay of each test, it is noticeable a latency increase at times around midday, until one o'clock. All the tests were made on working (and school) days. At midday, the lunch time at the university, and a higher traffic around the highway and the residential area marked as "2" in Fig. 0.23, imply a higher CN usage which decrease the communication performance. As can be seen in V2V trials, the network performance is better after this time, although it starts to get worse at the end of the working day.

The graphs included in Fig. 0.24 analyse the results obtained in one of the I2V tests, concretely the T3 one³. The first graph shows the delay values for each message sent

³Although all the tests are not analysed in detail, the results are similar for each type of

from the terminal connected to the wired network. At a first glance, it is noticeable how mobility conditions provoke continuous delay peaks. There are three main problematic zones, marked in Fig. 0.23. The first one, called “1”, is noticeable in the peaks observed between times 400 s and 500 s. This stretch belongs to the initial part of the circuit, where there is a near parking area covered with a metallic roof. The second problematic area (“2”) is more evident, between times 670 s and 830 s. The vehicle reaches the farthest position from the base station, but several buildings also block the line of sight with the B-Node. After leaving this area, the vehicle comes back to the university campus, where the network performance is better. However, new problems arise when the car goes across the third problematic area (“3”). At this location, a small hill between the vehicle and the base station decreases the channel quality. The graph which illustrates the cumulative distribution function (CDF) of the delay results, shows that values between 100 and 140 ms comprise around 85% of the messages. The rest of latency values are distributed in a quasi-logarithmic trend, although a small fluctuation appear between 400 and 500 ms. These values match with the frequent small peaks noticeable in the upper graph, which are due to signaling traffic when the terminal comes from low-power mode. The last graph clearly illustrates this distribution of values, showing a histogram plot of the latency values. Containers are situated in a logarithmic scale on the axis of abscissas.

The results of the V2I test T7 are showed in Fig. 0.25. Taking into account the previous I2V case, it is clear that jitter is now less noticeable. As it has been said, this is due to the transport channel used, UDP instead of TCP, and the lack of HSDPA dynamic modulation. Since latency peaks are lower and rare, the mean delay is similar to the I2V test. However, attending to the distribution and frequency of values, it can be checked that, in most of the cases, the latency is between 180 and 240 ms (instead of 100-140 ms in the I2V case). This demonstrates the better performance of the downlink channel under good coverage conditions. The problematic zones noticeable in the I2V case are again present, as can be seen in the upper graph of Fig. 0.25. The peaks localised within time intervals 150-200 s, 540-700 s, and 900-950 s, represent zones “1”, “2” and “3” of Fig. 0.23, respectively. Looking at the CDF graph, there is no any discontinuity in the inflexion point around 250 ms. This is due to the HSDPA signaling is lower, hence the small delay peaks observed in the I2V case have not been collected this time.

At first glance, the V2V results of test T11, plotted in Fig. 0.26, are almost a convolution of the ones collected in the I2V and V2I cases. External factors which affect the communication link, are now present in both the downlink and uplink channels, hence performance problems in the areas “1”, “2” and “3” are magnified during time intervals 300-330 s, 440-640 s and 800-850 s. The cumulative distribution shows a hybrid curve between previous cases, and the histogram shows a shift of frequent delays to the right, now situated between 200 and 300 ms. Delay values now obtained are also more varied. Moreover, in the first 120 seconds of the test, a continuous jitter is observed. This is due to the trial started at a parking area near a building which

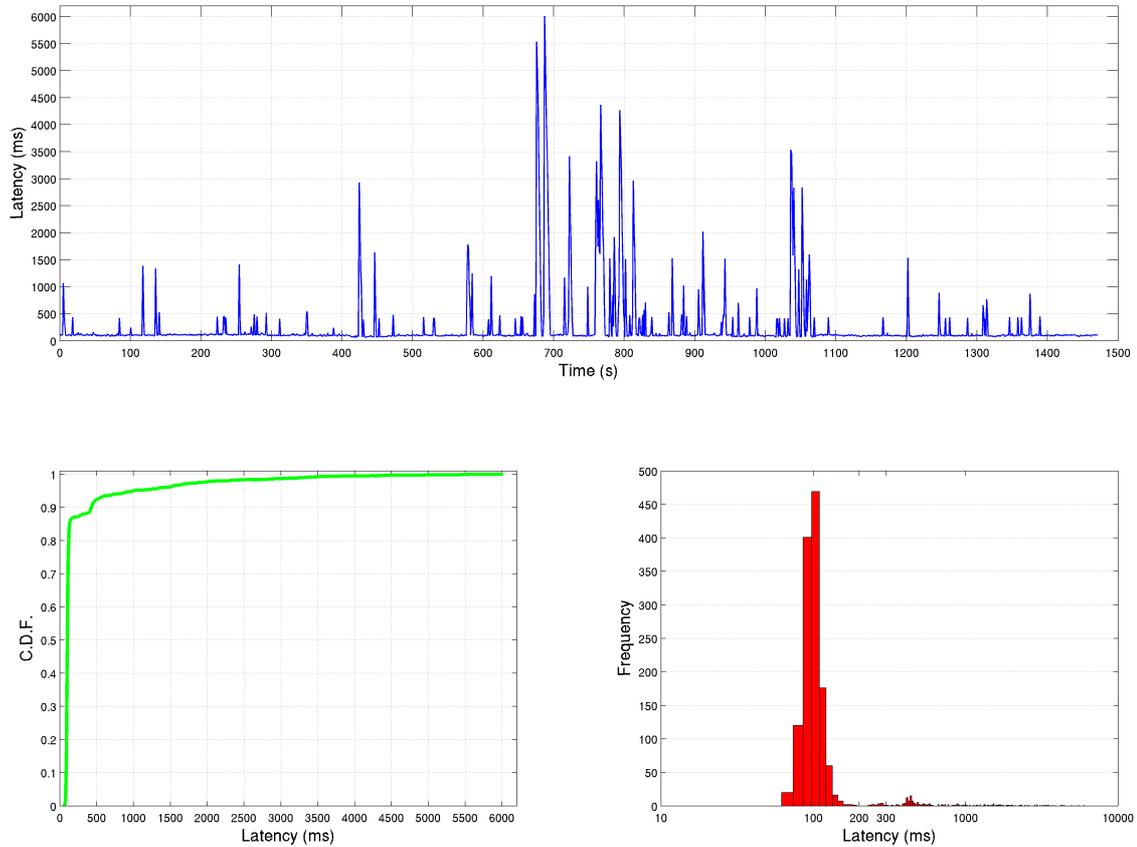


Figure 0.24: I2V communication performance in test T3

blocked the signal of the base station. Until both vehicles began moving, and they reached an open area, the network operation did not stabilise.

The test T13 is one of the three trials carried out to check the network performance at a higher speed. Fig. 0.27 illustrates the obtained results. First, it is worth noting how the impact of the problematic areas in the communication performance is lower. In the previous V2V case, high delay values are maintained within zone “2” of Fig. 0.23. In this case, low coverage areas are quickly crossed, hence network problems are less noticeable. The CDF plot has a similar shape, but it is slightly shifted to the right. This fact can be better seen in the histogram. In contrast to the previous V2V test, most of the collected delay values are now between 300 and 400 ms (and not between 200 and 300 ms). As can be seen, a greater speed allows to pass problematic zones quickly, but the reference delay under good coverage conditions is higher, due to stressing mobility conditions. The HSDPA link cannot efficiently stabilise when coverage conditions vary continuously. Furthermore, signal propagation problems increase, due to Doppler effect, multi-path, etc. However, it is important to remark that, in the selected circuit, handovers between different base stations have not been detected. A higher speed helps to quickly pass areas without coverage when a handover is done; however, if the density

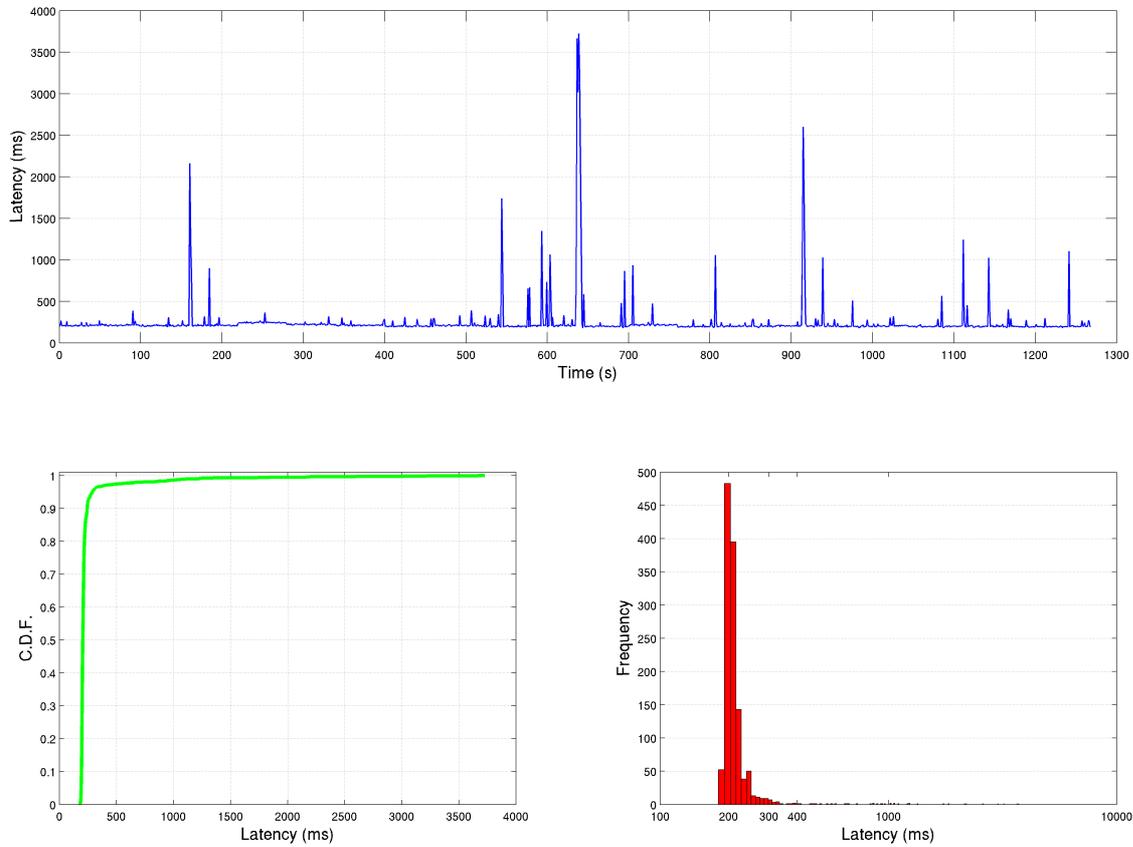


Figure 0.25: V2I communication performance in test T7

of base stations is high, continuous handoffs can affect the network performance.

0.7. Thesis Conclusions

The work presented in the thesis covers the vertical design of a telematic infrastructure for ITS service deployment. The software architecture developed has been the frame used to implement several networking and navigation capabilities as software executable in the OBU. The final vehicle prototype has been a suitable test-bed to evaluate the performance of both the navigation and communication subsystems.

A proposal of a software architecture for the on-board unit, based on a general purpose computer, has been designed over the OSGi basis. By means of a layer-based architecture, OSGi services can be organised according to their abstraction level, and the modular approach enables the deployment of new functionalities as a composition of services. Several reference services have been implemented, and a broad support of GNSS sensors has been added in the system. This software platform together with the set-up prototype vehicle, have been the basis for the rest of the thesis works. In

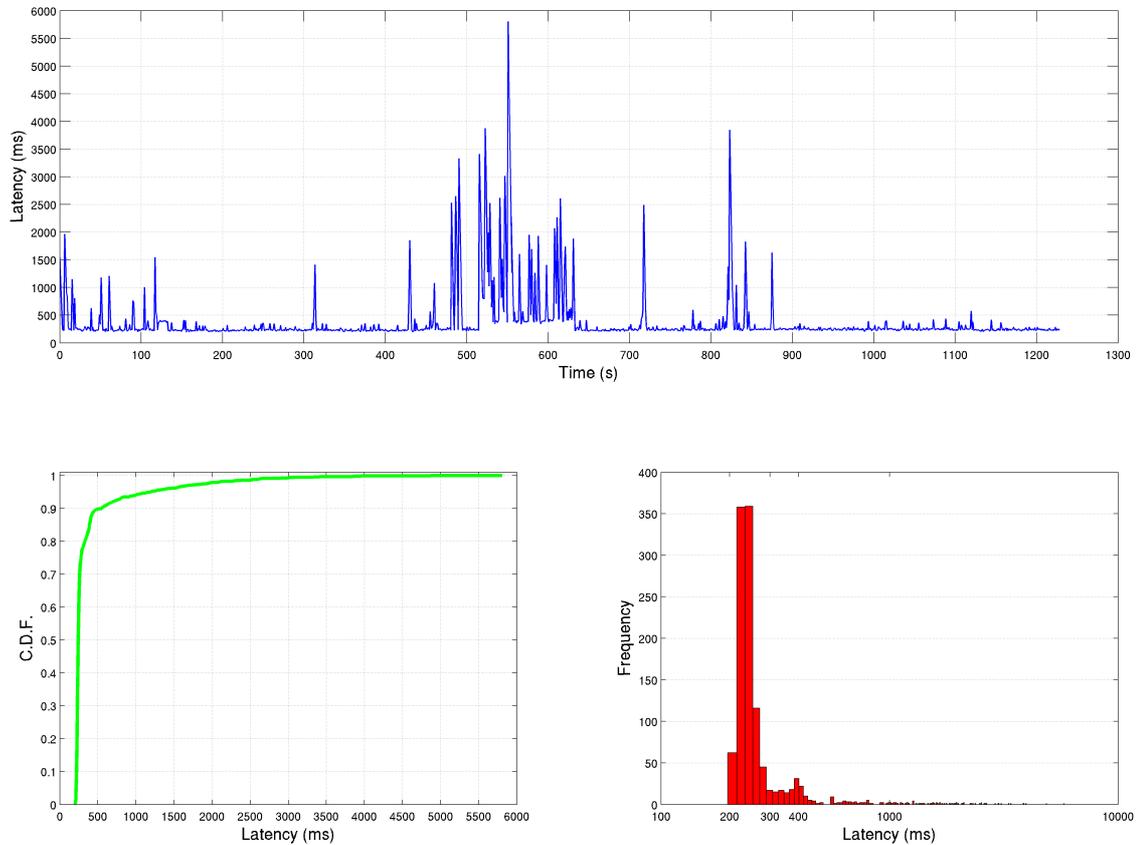


Figure 0.26: V2V communication performance in test T11

this first part of the thesis, in addition to the on-board computer, two main units are identified as key components of the vehicle equipment. These are the navigation and the communication systems. Commercial ITS applications and, overall, the future ones proposed by the scientific community, are specially aware of the necessity of efficient navigation and communication systems.

The navigation system integrated in the proposed on-board architecture takes advantage of the EGNOS capabilities. As the rest of SBAS implementations, like the American WAAS and the Japanese MSAS, in the EGNOS system, some geostationary satellites broadcast complementary information to improve the GPS service. However, this capability is not available for many inherited or low/medium cost GNSS sensors, or its support is partially offered, even in medium/high cost receivers. To cope with these problems, the developed navigation system involves a set of proposals which enable the OBU to use differential corrections and monitor the position integrity over an extended operation range, even if a low cost GNSS sensor is used. The SISNeT service is used to receive EGNOS messages from Internet, but an equivalent server has been also developed to solve availability problems and decrease network latency. An SBAS client, implemented as a module in the software platform of the OBU, is able to process

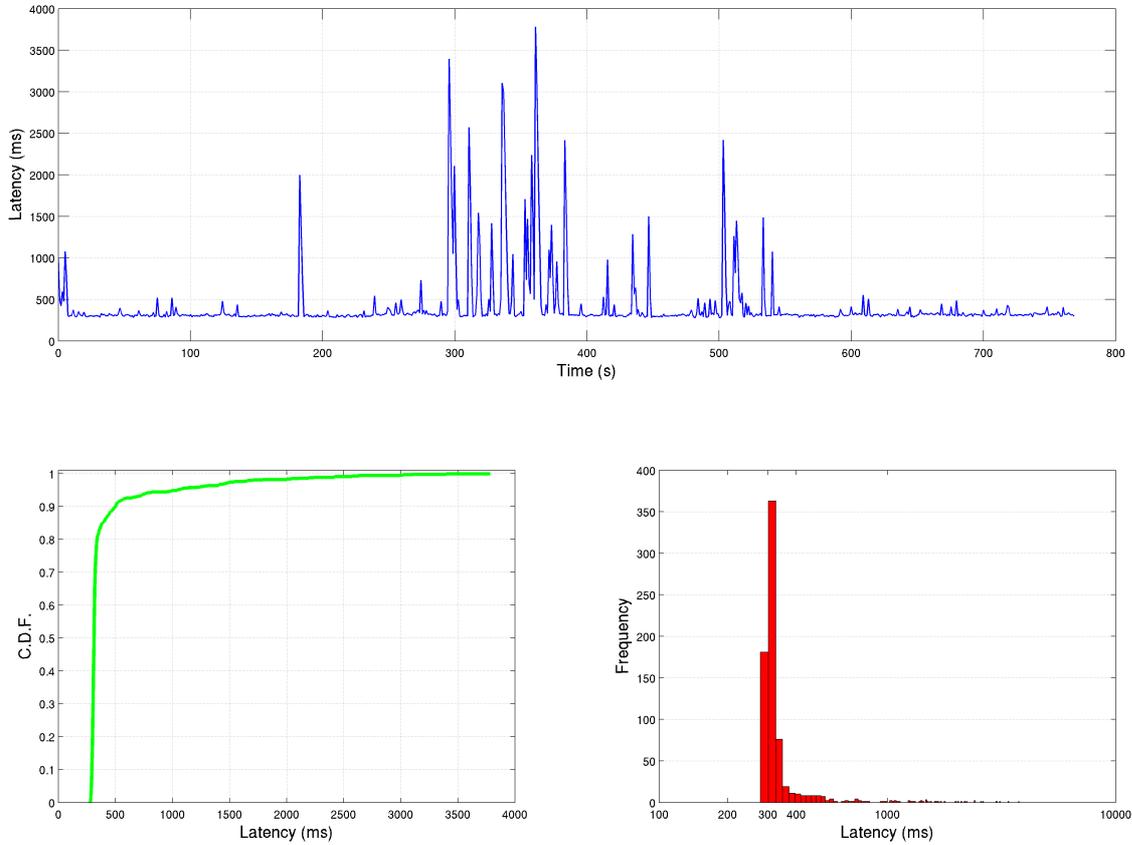


Figure 0.27: V2V communication performance at higher speed (test T13)

EGNOS messages from the GEO, through the receiver, or from a SISNeT server. Then, all corrections and error estimations are processed, and a conversion algorithm to a more common differential correction format (RTCM) is included, in case the receiver cannot process SBAS information. Moreover, an application of the HPL integrity concept of RTCA/DO-229C to the terrestrial navigation has been developed. All these extended SBAS features have been experimentally evaluated using a final prototype of the navigation subsystem, integrated in the OBU platform designed. Multitude of field tests prove the system feasibility, and the carried out analysis identifies the main performance factors. The RTCM conversion extends the EGNOS corrections availability, and the GNSS integrity algorithm is able to detect bad operation periods of the navigation system, although the quality of the CN communication channel is a key issue for the system performance.

Together with the navigation system, a communication architecture has also been designed, developed, and extensively evaluated. As in the navigation system case, the additional support of the infrastructure side is a key factor to offer global processing and contextual integration. The overlay network designed is based on the concept of P2P communication groups, used to bound the propagation of messages generated by

vehicles and the ones received from the infrastructure, in defined service areas. Vehicles perform a handover process through these areas in order to maintain a communication channel with a concrete service. This idea has been exploited through a network platform which comprises both the OBU and several entities located at the road side and the core infrastructure. The UMTS cellular network is used as communication technology, since continuous improvements in operator's infrastructures encourage its use in many ITS services. The performance of the system has been evaluated through multitude of field trials, which prove the system usefulness. Hence, two new software modules have been added to the OBU, with the networking capabilities of the system. The performed tests reflect the impact of mobility in the network operation, and identify the CN coverage and capacity as the main limitations. These results reveal how stressing mobility environments affect the HSDPA downlink channel, presenting mean delay values similar to the uplink one. The vehicle speed has also been analysed, and it has been deduced that delay peaks due to coverage problems are less frequent when the speed is higher, but the reference latency under good conditions increase, due to HSDPA channel management difficulties and signal propagation problems.

Vehicle integration in the traffic context has been another key work in the thesis. In addition to the event-based communication channel, which enable vehicles and road-side units to exchange local information, a complementary support at the infrastructure side offers global processing capabilities and information adapted according to the user's preferences. A web-based system integrates digital cartography functionalities to allow users and road operators to monitor the road network state. Moreover, an information inferring subsystem, based on ontology modeling, adapts contextual information according to the user's profiles. This part of the work has been extended with an RFID-based identification platform, in order to detect the vehicle presence at specific locations and send adapted POI notifications. One of the two new software modules added in the OBU to access the network, presents a user interface able to warn the user about traffic incidences and show POI notifications received from the infrastructure.

As can be seen, the whole telematic platform, composed of all the previous subsystems, is able to support a wide range of current and future ITS services. In fact, several reference services have been included in the implementation, covering both autonomous and cooperative scopes. In next steps, this platform will be updated according to some ongoing and future research lines. The software architecture of the OBU would be further flexible if module updates could be made remotely, but also the HMI is subject of future works, as technologies like speech recognition advance. The so expected GALILEO will imply new GNSS capabilities, and it will include the current SBAS ones; hence the navigation system will evolve according to this fact. The integrity algorithm is now subject of research, and current works, together with parallel research lines at the University of Murcia, are evaluating the integration of SBAS integrity information into an integral INS/GNSS navigation solution. New advances in cellular communications have recently appeared (such as HSUPA), and some others are going to do so in next months, hence new experimental tests and platform upgrades will be done regarding the communication architecture. The MBMS

technology is expected to present a great technological advance for traffic information provision, and its study is a pending task. WiMAX evaluation is an ongoing work at the University of Murcia and, since the proposed network architecture is independent on the communication technology, the integration of both concepts is an interesting future line. At the service level, current works are directed to take advantage of digital cartography to provide extended services at both the vehicle and infrastructure sides.

0.8. Relevant Publications

The main papers published as a consequence of the thesis work, together with a brief description of each one, are enumerated in next lines:

- J. Santa, B. Úbeda, R. Toledo and C. Sotomayor. **A Facility for GPS/EGNOS Signal Monitoring**. Proceedings of *Workshop on EGNOS Performance and Applications*, pp. 183-188, Gdynia, Poland, Oct. 2005.

In this article [53], the monitoring station with extended capabilities to provide SBAS messages is presented. This station has been set-up in an external laboratory, and allows the user to study the GPS/EGNOS operation. A first version of the integrity calculation algorithm is also included in the implemented software.

- C. Sotomayor, R. Toledo, B. Úbeda and J. Santa. **AVANT: A Wide Range Utility for GPS/EGNOS Navigation System Users**. Proceedings of *Workshop on EGNOS Performance and Applications*, pp. 195-200, Gdynia, Poland, Oct. 2005.

Some functionalities of the ITS platform presented in the thesis, are included in the software described in this paper [54]. This utility comprises a monitoring application for an inertial navigation system, hence it is possible to check the state of different on-board sensors. Among them, the GNSS one is of special relevance.

- R. Toledo, B. Úbeda, J. Santa, M.A. Zamora and A.F. Skarmeta. **A High Integrity Low Cost Positioning System for Location Based Services**. *Monograph of Transport System Telematics 2005*, pp. 469-475, Nov. 2005.

The work presented in this article [55] establishes main navigation requirements of location based services. To cover these necessities, a low-cost navigation system supported by several inertial sensors, the GNSS one, and including SBAS functionalities, is described and briefly evaluated. Integrity monitoring capabilities are specially treated in the system design.

- J. Santa, B. Úbeda, R. Toledo and A.F.G. Skarmeta. **Monitoring the position integrity in road transport localization based services**. Proceedings of *IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC-Fall 2006)*, pp. 1-5, Montréal, Canada, Sep. 2006.

The algorithm used in the computation of SBAS-based integrity factors is described in more detail in this publication [56]. The operation of the integrity subsystem is evaluated in terms of the communication channel performance, due to SISNeT usage is highly recommended in the ITS field.

- J. Santa, B. Úbeda and A.F.G. Skarmeta. **A Multiplatform OSGi Based Architecture for Developing Road Vehicle Services.** Proceedings of *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2007)*, pp. 706-710, Las Vegas, USA, Jan. 2007.

The software architecture of the OBU platform is presented in this paper [57]. Over a service gateway platform, a modular architecture focused on a layer-based approach, is given as a suitable solution to develop on-board software using a composition scheme. The prototype vehicle used in the thesis is also briefly described, emphasising main hardware components.

- J. Santa, B. Úbeda and A.F.G. Skarmeta. **Monitoring the Position Integrity in Road Transport Using SBAS/EGNOS and Communication Issues.** *Location Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 38-42, Jan./Feb. 2007.

An extension of the work presented in VTC-Fall 2006 is given in this work. Now the usefulness of the position integrity in terrestrial navigation is defended, arguing for the integrity application in new generation ITS services.

- J. Santa, A.F.G. Skarmeta and B. Úbeda. **An Embedded Service Platform for the Vehicle Domain.** Proceedings of *IEEE International Conference on Portable Information Devices (PORTABLE 2007)*, pp. 1-5, Orlando, USA, May 2007.

The on-board software platform presented in CCNC 2007 is taken as the basis in this work [58], to include new telematic capabilities in the OBU. This is carried out by integrating PAN, WLAN and WAN transceivers in the OBU platform. This way, Bluetooth, 802.11 a/b/g and, overall, cellular networks, are found useful for many ITS services. A first design of the overlay communication architecture included in the thesis is also described.

- J. Santa, A. Muñoz and A.F.G. Skarmeta. **A Novel Architecture for Retrieving Context Aware Information in a P2P Based Vehicle Communications Paradigm.** Proceedings of the *1st IEEE International Workshop on ITS for Ubiquitous Roads (UBIROADS 2007)*, Marrakech, Morocco, Jun. 2007.

This article [59] describes in more detail the first version of the P2P overlay network, and integrates an information provision system which adapts POI notifications according to the user's preferences. The traffic environment and user's profiles are modeled through ontologies, and an inference technique has been developed to carry out this adaptation.

- J. Santa, A. Muñoz and A.F.G. Skarmeta. **A Context-Aware Solution for Personalized En-route Information Through a P2P Agent-Based Architecture.** *Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS)*, vol. 4707, no. 1, pp. 710-723, Aug. 2007.

The work presented in UBIROADS 2007 is further detailed in this paper [60]. The performance of the inference process is also analysed, due to the relevance of this issue when POI notifications are sent to a moving vehicle.

- R. Sánchez, J. Paniagua, S. Gutiérrez, J.G. Jordán, J. Santa, I. Fernández and P. Gomez. **Proyecto GIROADS: Sistema de Peaje Basado en GNSS sobre una Plataforma Multiservicio LBS.** Proceedings of *VII Congreso Español sobre ITS*, Valencia, Spain, Sep. 2007.

Several works carried out in the European project GIROADS, related to GNSS-based road tolling and integrity monitoring, are presented in this article [61]. A general purpose computer, equivalent to the one included in the thesis, is designed. The calculation of the position integrity is evaluated to design a fair road tolling system.

- J. Santa, R. Toledo-Moreo, A.F. Gómez-Skarmeta. **A Novel Vehicle Communication Paradigm Based on Cellular Networks for Improving the Safety in Roads.** *Intelligent Journal of Intelligent Information and Databases Systems (IJIIDS)*, vol. 2, no. 2, pp. 240-257, May 2008.

In this article [62], it is described the integration of the overlay communication platform and the navigation system into a telematic platform for ITS. This way, messages sent by vehicles in the network include reliable positioning information, hence not only the coordinates of the vehicle location are included, but also the integrity of the position is added in messages. The integrity algorithm is also analysed on the basis of the GPS coverage.

- J. Santa, A. Moragón and A.F. Gómez-Skarmeta. **Ubiquitous Information Provision in the Vehicle Domain.** Proceedings of *IEEE Internacional Symposium on Wireless Pervasive Computing 2008 (ISWPC 2008)*, pp. 485-489, Santorini, Greece, May 2008.

The whole networking and service provision platform described in the thesis, is presented in this paper [63]. Through the overlay communication architecture and the extended infrastructure support, it is possible to exchange local information in traffic areas, and monitor the whole road network state.

- J. Santa, A. Moragón and A.F. Gómez-Skarmeta. **Experimental Evaluation of a Novel Vehicular Communication Paradigm Based on Cellular Networks.** Proceedings of *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2008 (IV 2008)*, pp. 198-203, Eindhoven, The Netherlands, Jun. 2008.

The performance of the communication architecture presented in the thesis is analysed in this work [64]. This study is focused on the overlay network delay

when vehicle to vehicle, vehicle to infrastructure, and infrastructure to vehicle data transmissions are considered. The prototype vehicle designed in the thesis is presented as a suited testbed to perform networking experimental evaluations.

- J. Santa, A.F. Gómez-Skarmeta and M. Sanchez-Artigas. **Architecture and Evaluation of a Unified V2V and V2I Communication System Based on Cellular Networks.** *Computer Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 2850-2861, Jul. 2008.

A wide description of the overlay communication architecture is included in this work [65]. Main protocols are described, and some initial performance tests are added. The integration of the communication platform in the vehicle terminal is given by an upgrade of the on-board software modules. Moreover, the car prototype described in the thesis, together with a common vehicle, are used in the network evaluation.

- R. Toledo-Moreo, J. Santa, M.A. Zamora-Izquierdo, B. Úbeda, A.F. Gómez-Skarmeta. **A Study of Integrity Indicators in Outdoor Navigation Systems for Modern Road Vehicle Applications.** Proceedings of *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008)*, pp. 2-7, Nice, France, Sep. 2008.

The work presented in this paper evaluates the efficiency of an SBAS-based integrity factor against the one calculated through an inertial navigation system. The integrity factor calculated in the sensor fusion algorithm of the inertial navigation system, can measure in a better way the reliability of the system. However, the high costs of this kind of systems limit its deployment.

- J. Santa and A.F. Gómez-Skarmeta. **Potential of Cellular Networks in Vehicular Communications.** Proceedings of the *15th World Congress on ITS*, New York, USA, Nov. 2008.

This paper analyses the potential of cellular networks in the ITS field, taking into account the overlay communication platform. Main performance factors of cellular networks in vehicular communications are studied, and then experimentally evaluated through a wide range of field tests. Recent advances of UMTS networks are used in these trials, and performance improvements are evident if previous results included in *Computer Communications* and *IV 2008* publications are considered.

In addition to the previous publications, the content of the thesis is also present in two more papers presented in the national conferences *VI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2007)* [66] and *VII Congreso Español sobre Sistemas Inteligentes de Transporte* [67].

Capítulo 1

Introducción

El presente capítulo servirá para introducir al lector, primeramente, en los conceptos más generales sobre los sistemas inteligentes de transporte (ITS). A medida que avance el capítulo, la explicación irá dirigida a mostrar el marco en donde se encuadra la presente tesis doctoral. Las tecnologías telemáticas, como una simbiosis entre los avances en telecomunicaciones e informática, se mostrarán como un interesante campo de estudio para el caso de los vehículos. Es en ellos en donde la proliferación de un nuevo conjunto de funcionalidades y servicios ligados a las nuevas tecnologías está suponiendo un importante cambio en el modelo de negocio, tanto desde el punto de vista de los fabricantes de nuevos modelos, como desde los proveedores de servicios.

Las principales aportaciones dadas por la tesis doctoral quedan también fijadas en este capítulo, incluyendo además, de forma introductoria, el contenido del resto del documento. El lector podrá escoger, a partir de este momento, entre ampliar los conceptos iniciales dados en este capítulo mediante la lectura del siguiente, acerca de las tecnologías de base consideradas, o pasar directamente a la explicación del trabajo realizado. Finalmente, las publicaciones más relevantes derivadas del trabajo del doctorando serán brevemente reseñadas.

1.1. Los Sistemas Inteligentes de Transporte

Los Sistemas Inteligentes de Transporte, o *Intelligent Transportation Systems* (ITS), conforman un esfuerzo común entre gobiernos, industria privada y centros de investigación, para aplicar las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones en los problemas actuales del transporte mundial [68]. Los objetivos actuales de tales desarrollos son muy diversos, aunque los incluidos de raíz en la concepción inicial de ITS son los siguientes [69]:

- Como máxima prioridad, mejorar la **seguridad** de todos los medios de transporte actuales. El vehículo es la principal preocupación, debido a que supone la mayoría de las muertes y lesiones que se producen en el transporte mundial.

- Mejorar la **eficiencia** de los sistemas de transporte, reduciendo los tiempos de viaje y las congestiones.
- Incentivar la **intermodalidad**, mediante la combinación de varios medios de transporte para completar un viaje.
- Integrar el transporte dentro de las políticas de **desarrollo sostenible**; en particular, reduciendo las emisiones de gases de los turismos y vehículos pesados, y optimizando el uso de las infraestructuras.
- Mejorar el **confort** de los pasajeros, con un gran número de servicios de información, servicios de ayuda a la decisión, sistemas de guiado y navegación, etc.

La preocupación actual de ITS trata problemas relativos al transporte marítimo, aéreo y por carretera. El despliegue tecnológico en el transporte marítimo y aéreo se encuentra considerado en gran medida en la actualidad. En este sentido, diversas tecnologías dentro de las radio-comunicaciones y la electrónica se encuentran incorporadas en completos sistemas de información en uso actualmente para incrementar su rendimiento. De esta manera, si bien es necesario realizar un amplio estudio sobre cómo ofrecer servicios añadidos para la seguridad y la intermodalidad, es sin embargo el transporte por carretera el que aglutina la mayoría de las preocupaciones de la comunidad ITS. Aquí es precisamente donde se centra la presente tesis doctoral.

La actual demanda de movilidad terrestre ha excedido la capacidad del sistema de carreteras y, debido a que éste no puede ser expandido al mismo ritmo, la infraestructura actual debe ser usada de una manera mucho más eficiente para manejar el aumento de la demanda. La congestión en las zonas urbanas y en las vías de comunicación principales continua creciendo rápidamente, a la misma velocidad que las pérdidas económicas por el descenso de la productividad en la actividad laboral. Los enormes costes en combustible y el daño medioambiental no se han considerado hasta hace muy poco tiempo. Además, y lo que es más importante, los accidentes de tráfico producen más de 1.2 millones de muertes cada año, y alrededor de cuatro veces esta cantidad de heridos [70].

Con la intención de soslayar los crecientes problemas en el transporte por carretera, los ITS pretenden mejorar la eficiencia de la red viaria, usando información tanto histórica como en tiempo real sobre el estado del tráfico y de las infraestructuras, para detectar necesidades en los distintos componentes del sistema [71]. Integrando nuevas funcionalidades en el ámbito de ITS, tanto en el lado de la infraestructura como en el vehículo, es posible reducir los tiempos de viaje, disminuir la frecuencia y severidad de los accidentes, reducir costes colaterales, y mejorar la satisfacción de los usuarios.

Los ITS aplican sistemas de procesamiento de información avanzada, comunicaciones, sensorización, y tecnologías de control por ordenador para intentar solventar los problemas del transporte terrestre. Sin embargo, es necesario mantener, e incluso aumentar, los recursos invertidos en la investigación y desarrollo para estas tecnologías, y para incentivar programas de aplicación real de los nuevos avances.

1.2. Elementos Arquitectónicos de los ITS en Carretera

Tal y como se ha adelantado antes, la tesis doctoral se centra en los ITS por carretera. Algunos autores tienden a llamar a este subconjunto de ITS como *ITS-Road* (ITS-R) [72]. En realidad, muchos de los problemas y arquitecturas que se tratan para el caso de la carretera son extensibles para el resto de los medios de transporte. Sin embargo, las tecnologías involucradas y el conjunto de servicios y aplicaciones en los que se centra la investigación varían, obviamente.

Los principales elementos que podemos distinguir en los sistemas ITS desarrollados hasta la fecha, en el entorno del transporte por carretera, se pueden resumir en los mostrados en la Fig. 1.1. Aquí se observan los tres principales elementos constituyentes:

Vehículo El vehículo conforma la parte principal dentro de la arquitectura ITS, ya que toda la funcionalidad desplegada se centra en la mejora de la circulación de éstos. Los vehículos circulan por diferentes entornos, generalmente resumidos en urbanos e interurbanos, y hacen uso de un conjunto de servicios ITS que están destinados a mejorar su seguridad, hacer más eficiente su circulación y ofrecer un confort mejorado.

Infraestructura La infraestructura está formada tanto por el hardware distribuido a lo largo de las carreteras, como por diverso equipamiento centralizado en nudos de comunicación y *backbones*. En el lado de la carretera se sitúa la mayor parte del despliegue de la infraestructura y, principalmente, está formado por sensores de diversa índole, como detectores de paso de vehículos, de temperatura, sistemas de reconocimiento de matrículas, radares de velocidad, sistema de pesado de ejes, radares de detección de las dimensiones de los vehículos, etc. No obstante, el hardware instalado en la carretera que más está ganando en interés los últimos años es el relacionado con las comunicaciones.

Central de servicios La finalidad de la central de servicios es disponer de la implementación de la/s aplicación/es finales. Los servicios que se encuentran en este nivel pueden estar orientados a la gestión centralizada, como es el caso de los sistemas de monitorización y seguimiento, o destinados a la provisión de funcionalidades a los vehículos finales, como serían los servicios de información de tráfico o de gestión de reservas de aparcamientos.

Aparte de la típica estructura cliente/servidor que se puede desprender a partir de la arquitectura descrita en la Fig. 1.1, los vehículos pueden no ser simples terminales de acceso a servicios ofrecidos desde el lado de la central de servicios, e implementar aplicaciones sin la intervención incluso de la infraestructura. En los últimos años, las tecnologías de comunicación inalámbricas han permitido el despliegue de una mayor cantidad de servicios. Los dispositivos de comunicación forman una parte importante del despliegue actual de la infraestructura de la carretera. Los operadores

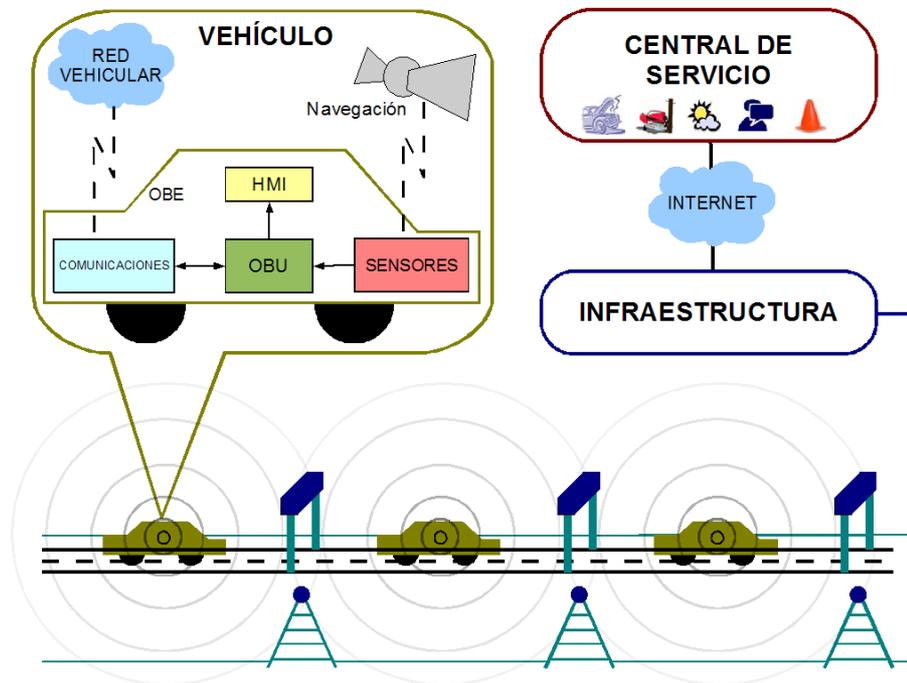


Figura 1.1: Diagrama general de los sistemas ITS en carretera

de telefonía móvil han realizado una gran inversión en los últimos años, y tecnologías de comunicación de corto alcance se están implantando en gran medida en sistemas de peaje electrónico [73], por ejemplo. Sin embargo, en la línea de lo comentado anteriormente, estas comunicaciones inalámbricas de corto alcance, entre las que habría que considerar a las tradicionales WiFi también, han alentado a la comunidad científica a ofrecer sistemas de comunicación directa entre vehículos en los últimos años.

La presente tesis doctoral ofrece un marco de definición de servicios a partir de tecnologías y arquitecturas centradas en los tres elementos principales de los ITS en carretera: vehículo, infraestructura y central de servicios. Sin embargo, considerando estos tres elementos, es el vehículo el que presenta un mayor interés de cara a la comunidad ITS, ya que presenta el elemento fundamental alrededor del cual giran el resto de sistemas. Los vehículos presentan, además, un volumen en despliegue mayor si se comparan con las instalaciones físicas en las infraestructuras. La definición de su arquitectura de cara a afrontar los nuevos servicios ITS es mucho más importante que las implementaciones en las centrales de servicios. Debido a esto, es importante considerar los principales elementos que constituyen el **equipamiento de a bordo**, u *on-board equipment* (OBE), de los vehículos “inteligentes” de hoy día.

De cara a disponer de información sobre el estado del vehículo y del entorno circundante, una gran cantidad de **sensores** se han considerado en diversos ámbitos de ITS para el caso del vehículo. Los típicos sensores en vehículos, como los tacómetros,

sensores de temperatura, de presión en los asientos, de puertas abiertas, de cinturón abrochado, etc., están dejando paso a otro conjunto de sensores de nueva generación. Sistemas de seguridad como el ABS (*Anti-lock Braking System*) o el ESP (*Electronic Stability Control*) ya implican un nuevo conjunto de sensores que monitorizan la dinamicidad del vehículo. Sin embargo, los sensores que más interés han despertado en los últimos años en ITS han sido los de navegación [74]. Los tradicionales receptores GPS son solamente la punta del iceberg de un gran compendio de sistemas de radio-navegación basada fundamentalmente en tecnologías satélite. Además, los sistemas de navegación inercial consideran otros sensores adicionales, tales como giróscopos o acelerómetros.

Los transceivers de **comunicación** inalámbrica, tal y como se ha dicho, son unos de los principales componentes hardware de los vehículos del futuro, de cara a ampliar la percepción del conductor y la información ofrecida por la sensorización de a bordo con nuevos servicios, mediante el uso de las redes de comunicación de datos [75]. Como se observa en el diagrama de la Fig. 1.1, el hardware de comunicación permite conectar al vehículo a la red vehicular, la cual puede entablarse bien a través de una conexión fija o esporádica con la infraestructura, o bien entre los propios vehículos directamente.

Obviamente, todos los datos recibidos desde los sensores o desde los interfaces de comunicación del vehículo deben ser procesados. La **unidad de a bordo**, u *on-board unit* (OBU), es la encargada de tal tarea, además de otras muchas. Generalmente, se considera a un computador embebido para realizar la tarea de gestionar la información de los sensores, y actuar en consecuencia a ello. Sin embargo, cada vez más se están considerando computadores de propósito general que complementan a las soluciones fuertemente acopladas. De esta manera, las arquitecturas PC de propósito general se están extendiendo en gran medida en el campo de ITS [1]. En dichos sistemas, es posible desplegar el software necesario para ofrecer una arquitectura escalable de funcionalidades de a bordo, así como para ofrecer servicios que requieran de la comunicación con el exterior. Dicho computador de a bordo suele estar ligado a un componente hardware/software de **interfaz con el usuario**, o *human machine interface* (HMI), de forma que el usuario pueda interactuar debidamente con las aplicaciones de la OBU.

La navegación mediante sensores de posicionamiento satelital, las comunicaciones vehiculares, y la arquitectura hardware/software de la OBU, son elementos fundamentales de la tesis doctoral. Éstos son explotados con el objetivo en mente de ofrecer una plataforma de servicios telemáticos como los que se describen en la siguiente sección.

1.3. Servicios Telemáticos en el Entorno Vehicular

El conjunto de servicios y aplicaciones considerados en los ITS en carretera es actualmente muy extenso. Algunos autores, por ejemplo, dirigen una clasificación de estas funcionalidades mediante la diferenciación entre servicio y aplicación [71]. De esta manera, los **servicios ITS** conforman el conjunto de facilidades ITS destinadas

al conductor o, más generalmente, al lado del vehículo; mientras que las **aplicaciones ITS** se centran fundamentalmente en sistemas de gestión orientados a los operadores¹. Otra clasificación más concreta que se basa en el ámbito de aplicación de la tecnología ITS, es la dada en [76]. Los autores, en este caso, dividen las posibles aplicaciones dependiendo de la entidad ITS objeto de estudio, y considerando, de esta manera, al autobús, los vehículos comunes, las autopistas, los vehículos pesados y los propios viajeros.

Disponer de una clasificación de los servicios ITS por carretera es de suma importancia, de cara a afrontar los problemas concretos disponiendo de información del contexto de trabajo. Por esta razón, una de las primeras cuestiones tratadas por el Comité Técnico 204 de la ISO (International Organization for Standardization), fue definir el conjunto de aplicaciones y servicios de más relevancia en ITS, y crear un grupo de trabajo (WG) específico para los más importantes²:

- Identificación Automática de Vehículos y Equipamiento (WG 04).
- Peaje Electrónico (WG 05).
- Gestión General de Flotas y Transporte de Mercancías (WG 07).
- Transporte Público y Emergencias (WG 08).
- Control, Gestión, e Información de Transporte Integrados (WG 09).
- Sistemas de Información para los Viajeros (WG 10).
- Sistemas de Navegación y de Guiado (WG 11).
- Sistemas de Control y Alerta Vehículo-Carretera (WG 12).

Tal y como se puede observar en la anterior clasificación, la mayoría de los servicios que podrían ser considerados en cada uno de los apartados necesitan de las nuevas tecnologías en las telecomunicaciones y la informática. Gracias a esta última es posible la implementación de una gran cantidad de funcionalidades mediante sistemas software locales o remotos. Las telecomunicaciones permiten “conectar” al vehículo con el entorno, de forma que las capacidades del vehículo pasen de tener un carácter autónomo a uno cooperativo [77]. La integración de la informática y las telecomunicaciones en la creación de nuevas funcionalidades ITS permite hablar de **servicios telemáticos**.

Este carácter telemático de los servicios ITS se ha extendido en los últimos años, al mismo ritmo que las tecnologías de comunicación orientadas a vehículos han despegado. En [75] se da un gran énfasis a las comunicaciones, y se revisan los servicios ITS actuales considerando la dirección del flujo de información entre el vehículo y el entorno. De esta manera, se describen aplicaciones en donde el vehículo se toma como fuente

¹En el resto de la tesis doctoral se usan los términos *servicio* y *aplicación* indistintamente, si bien es importante considerar esta diferenciación.

²<http://www.iso.org>

de información (un sensor más) de un sistema centralizado, aplicaciones en donde el vehículo es el que recibe información de interés, y sistemas híbridos. En [78] se expone una clasificación menos general, y se agrupan los desarrollos ITS en aplicaciones de seguridad pública, aplicaciones de gestión de tráfico, aplicaciones de asistencia y coordinación de tráfico, información al viajero, y aplicaciones de confort. En [79] se dividen los servicios en aquellos desplegados mediante sistemas de comunicación basados en infraestructura y sin ella (*ad-hoc*). Otra clasificación similar está disponible en [6], donde se agrupan las aplicaciones en sistemas de seguridad y cooperativos, sistemas de información al conductor, acceso a Internet, y aplicaciones P2P (*Peer to Peer*).

Considerando tanto las clasificaciones más generales en ITS, como las realizadas desde el punto de vista telemático, es posible crear una distinción global de los servicios y aplicaciones considerados hasta la fecha:

Aplicaciones de seguridad Los sistemas de seguridad activa conforman el principal campo de investigación en ITS, ya que disminuir la siniestralidad y los efectos de ésta son objetivos primordiales. Los sistemas autónomos de prevención de colisiones, mediante sensores de a bordo, o cooperativos, mediante la incorporación de comunicaciones con otros vehículos o con la infraestructura, son los más estudiados. La gestión y tratamiento de los accidentes que se producen, y la transmisión de vídeo *streaming* de escenarios críticos son también considerados dentro de este grupo.

Gestión del tráfico, monitorización y seguimiento Dentro de este grupo se consideran especialmente aplicaciones de utilidad para autoridades y empresas, interesadas en disponer de información en tiempo real sobre el estado de las carreteras y en gestionar las flotas de transporte, respectivamente. No obstante, otras aplicaciones no centralizadas en un soporte de la infraestructura también entran dentro de este grupo, tal como el *platooning*, centrado en la circulación automática de vehículos en convoyes.

Sistemas de navegación Los sistemas de navegación y guiado son de especial relevancia hoy en día, significando una de las aplicaciones ITS más extendidas. Aunque su funcionamiento es autónomo en la mayoría de los casos, la actualización remota de la cartografía y la recepción de problemas de tráfico en tiempo real, son ejemplos de cómo las redes de comunicación se están adentrando en los sistemas ITS comerciales.

Entretenimiento y confort Como sistemas de entretenimiento y confort se entienden tanto los típicos útiles provistos en los vehículos actuales, como reproductores de sonido/vídeo y manos libres, así como nuevos sistemas que hacen uso de las redes de comunicación y de la inteligencia ambiental. Dentro de éstos se pueden destacar, por ejemplo, los juegos distribuidos, aplicaciones de chat, intercambio de ficheros, sistemas de reserva de aparcamiento, o recepción de información turística del lugar.

Sistemas de información al viajero La mayor parte de los servicios considerados en el entorno telemático para este grupo están dentro de los sistemas de alerta sobre el tráfico. Sin embargo, considerando los ITS en general, se pueden incluir dentro de este conjunto los sistemas de reserva y de planificación de viajes, e incluso aquellos que facilitan la intermodalidad.

Peaje electrónico Junto con los sistemas de seguridad, la investigación y evaluación de alternativas para el peaje electrónico recibe actualmente las mayores inversiones por parte de entidades públicas. El cobro eficiente del uso de las infraestructuras viarias presenta un importante reto para muchas administraciones de todo el mundo. Para ello se han considerado dos alternativas fundamentales: una basada en la detección del vehículo por ciertos puntos de control, y otra centrada en el uso de tecnologías de posicionamiento global, en donde el vehículo notifica cada cierto periodo de tiempo el trayecto realizado.

La tesis doctoral aborda el desarrollo de un entorno integrado para la definición e integración de estos servicios y aplicaciones ITS, considerando tanto los que funcionan de forma autónoma como los que necesitan del uso de las redes de comunicación. Tal y como se explica en el resto del documento, la arquitectura integral que se presenta está acompañada de implementaciones de referencia de diversos servicios, las cuales ejemplifican la utilidad del sistema.

1.4. ITS en el Contexto Internacional y su Regulación

El despliegue de ITS en soluciones comerciales se ha puesto de manifiesto de forma paulatina en los últimos años, fruto de diversos programas de investigación públicos y privados que comenzaron fundamentalmente en los noventa. Al mismo tiempo, los mecanismos de estandarización han comenzado a erigirse para regular el despliegue de las actuales y futuras aplicaciones ITS.

1.4.1. El Mercado Actual

Actualmente, el calado de los nuevos conceptos de ITS en productos comerciales está principalmente centrado en sistemas de funcionamiento autónomo en vehículos. Los grandes grupos automovilísticos, entre los que cabe destacar Volkswagen, BMW, Ford, Daimler Chrysler y, sobre todo, Toyota y Honda, se encuentran en estos momentos incluyendo gradualmente novedosos sistemas de soporte a la conducción. Los sistemas de control de velocidad de cruce, o *Adaptive Cruise Control (ACC)*, están disponibles en diversos modelos, y permiten variar la velocidad programada cuando se detecta un vehículo delante. El seguimiento de carriles está también considerado en el mercado actual. Los sistemas más avanzados disponen de control sobre la dirección del vehículo, mientras que otros alertan al conductor cuando el vehículo se encuentra fuera de las

dimensiones del carril. Algunos sistemas de prevención de colisiones y de atropellos están también implantándose en algunos vehículos de gama alta. La asistencia al aparcamiento también ha recibido una especial atención, e incluso existen modelos no necesariamente de lujo que incluyen sistemas de aparcamiento automático. No obstante, y a pesar de estos otros esfuerzos iniciales, los sistemas de navegación suponen hoy día el mercado más importante dentro de las soluciones ITS en vehículos.

La implantación de las nuevas tecnologías no se ha realizado solamente a nivel de vehículo, y las propias administraciones de distintos países disponen ya de avanzados sistemas de monitorización de la red de carreteras. Éstos, en algunos casos, son capaces de informar en tiempo real al conductor sobre determinadas incidencias, mediante RDS (*Radio Data System*), por ejemplo. Algunas entidades privadas, como por ejemplo la francesa RATP³, ofrecen sistemas de información integrados para favorecer la intermodalidad mediante distintos medios de transporte públicos.

Las tecnologías de comunicación se encuentran actualmente en pleno proceso de explotación sobre diversos campos. Aparte del citado RDS, las redes celulares se han usado ampliamente en los últimos años para ofrecer sistemas de seguimiento y control de flotas. En algunos países, las tecnologías de comunicación de corto alcance están espoleando el despliegue del peaje electrónico, gracias a la comunicación entre el vehículo y los puntos de control situados en la carretera. Todavía con un menor rango de comunicación, la integración de Bluetooth se ofrece de serie en muchos vehículos, y la tecnología RFID (*Radio Frequency Identification*) es utilizada en otros tantos para la apertura automática de puertas o el arranque sin el uso de llave.

1.4.2. El I+D en ITS

La mayoría de los avances en los sistemas de a bordo actuales son fruto de la investigación privada a lo largo de muchos años. No obstante, cuando la finalidad de un conjunto de aplicaciones implica una preocupación general (como es el caso de la seguridad), cuando el sistema a desplegar presenta una interdependencia con las infraestructuras públicas, o cuando se encuentra necesario establecer mecanismos reguladores, la financiación pública en programas de investigación y desarrollo se hace especialmente necesaria.

Existen multitud de programas I+D de financiación pública alrededor del mundo, aunque las grandes potencias están representadas por Estados Unidos, Europa y Japón. El Departamento de Transportes de Estados Unidos está actualmente involucrado en diversos proyectos de mejora generalizada de la calidad y de la seguridad en el transporte por carretera. Sin embargo, existen programas ITS específicos de gran importancia. En California, el programa **PATH** [80] involucra un tremendo grupo multidisciplinar que trabaja para mejorar la seguridad y la eficiencia del transporte, considerando las nuevas tecnologías y las implicaciones políticas y económicas. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para Defensa (DARPA)⁴ incluye también diversos proyectos

³<http://www.ratp.com/>

⁴<http://www.darpa.mil/>

relacionadas con el transporte. El proyecto **DARPA Grand Challenge**, por ejemplo, involucra diversas competiciones de vehículos no tripulados. En el caso de Japón, al igual que en el de Estados Unidos, existe una sección gubernamental involucrada en la investigación en ITS, denominada **Japanese ITS R&D Division**, que ha realizado diversos avances dentro de la prevención de colisiones mediante tecnologías de comunicación DSRC (*Dedicated Short Range Communications*).

El contexto europeo, más próximo al caso que nos ocupa, se encuentra repleto de iniciativas gubernamentales de cara a la investigación en ITS. Los Programas Marco de la Comisión Europea han incluido en los últimos años una gran cantidad de proyectos relacionados con los vehículos. Dentro del Quinto Programa Marco (1998-2002), el proyecto **CARTALK2000**⁵ sentó las bases futuras en los sistemas de comunicación vehículo a vehículo para mejorar la seguridad. En el Sexto Programa Marco (2002-2006) el número de proyectos que se han desarrollado, o están en proceso, en el ámbito ITS ha crecido sustancialmente, pudiéndose resaltar los siguientes:

PReVENT El proyecto PReVENT [81] ha considerado la conjunción de varios sistemas de a bordo, junto con las comunicaciones vehiculares, para prevenir colisiones. El estado del conductor forma parte de los sistemas de entrada para detectar potenciales accidentes.

GIROADS El objetivo de proyecto GIROADS [82] ha sido la creación de una arquitectura abierta de provisión de servicios ITS alrededor de los sistemas de navegación satelital. Se realiza un especial hincapié en el uso de una unidad de a bordo de bajo coste, moviendo la complejidad de las aplicaciones al lado de la infraestructura. Los resultados extraídos de proyecto *ADVANTIS* sobre medidas de integridad de la posición en la navegación terrestre son de suma importancia para GIROADS.

WATCHOVER En el proyecto WATCHOVER [83] se presta una especial atención a la prevención de los accidentes en los que los viandantes están involucrados.

CVIS Con la intención de ahondar en las principales tecnologías de comunicación vehicular, el proyecto CVIS [84] considera una plataforma integrada de red para conectar vehículos y elementos de la infraestructura. Adicionalmente, se considera la cartografía digital como un elemento más del sistema de navegación, con tal de mejorar el posicionamiento en diversos entornos de circulación.

APROSYS En el proyecto APROSYS [85] se investiga en los sistemas de seguridad pasiva de los vehículos, tomando como principal fuente de información las lesiones que se producen en los accidentes.

SAFESPOT Con un objetivo más general que CVIS, el proyecto SAFESPOT [86] investiga cómo vehículos y carreteras inteligentes pueden formar un sistema cooperativo para mejorar la seguridad vial.

⁵El sitio Web del proyecto CARTALK2000 ha dejado de estar disponible

COOPERS El principal objetivo del proyecto COOPERS [87] es investigar en tecnologías de red y aplicaciones, considerando la comunicación entre el vehículo y la infraestructura.

COMeSafety El proyecto COMeSafety [88] tiene como principales vías de trabajo la coordinación e integración de los resultados obtenidos en otros proyectos europeos sobre comunicaciones vehiculares, y la colaboración en labores de estandarización en los protocolos usados.

SEVECOM En el proyecto SEVECOM [89] se tratan los problemas de seguridad en las comunicaciones vehiculares. Se considera la creación de un entorno de comunicación seguro.

En el Séptimo Programa Marco (2007-2013) la financiación dedicada a investigación en ITS ha continuado en aumento. Algunos de los proyectos destacables dentro de este grupo, que han comenzado recientemente su actividad, son los siguientes:

i-Travel El proyecto i-Travel [90] comprende la investigación en una plataforma de servicios de asistencia al viajero basados en Internet, útiles tanto en la planificación del trayecto, como durante el mismo.

EuroFOT En el proyecto EuroFOT [91] el interés se centra en analizar la utilidad de los nuevos avances en ITS, con tal de evaluar su utilidad a través de la toma de datos reales mediante pruebas de campo.

Smart-Vei Los trabajos que se llevan a cabo en el proyecto Smart-Vei [92] se concentran en el diseño de un sistema de a bordo inteligente capaz predecir situaciones de peligro para el conductor. Para ello, se incorporan algoritmos de aprendizaje que modelan el perfil del conductor, el cual es usado junto con las condiciones externas para inferir posibles accidentes.

ROSATTE El proyecto ROSATTE [93] apuesta por mejorar las tecnologías y técnicas usadas en el intercambio de información relativa a eventos de seguridad en carretera, con tal de ofrecer un sistema de alto rendimiento en el trasiego de estos datos entre diferentes entidades.

GEONET Las redes de comunicación basadas en disseminación geográfica son explotadas en el proyecto GEONET [94]. Mediante técnicas de enrutamiento y disseminación de información entre vehículos, y entre estos y la infraestructura, es posible notificar eventos de seguridad sobre las zonas de interés de la red viaria.

HAVE-IT El proyecto HAVE-IT [95] se adentra en los servicios de asistencia a la conducción, mediante sistemas de aviso, e incluso aquellos que hacen uso de vehículos parcialmente automatizados, en los que se realizan maniobras de control.

ADOSE Dentro del proyecto ADOSE [96] se investiga en diversas tecnologías de integración sensorial para identificar situaciones de peligro en carretera, lo cual es de suma importancia en los servicios de asistencia a la conducción.

OFAV En el proyecto OFAV⁶ se aborda el diseño de un sistema de a bordo dotado de un conjunto de sensores que cubren la percepción total del vehículo, y de un sistema software apropiado para la integración de todas estas medidas y la detección de potenciales incidencias.

EVITA En trabajos previos dentro de la investigación en ITS se vienen identificando desde hace algunos años los problemas de seguridad en el tratamiento y transporte de la información relativa a soluciones cooperativas ITS. El proyecto EVITA [97] trata estos problemas, proponiendo una plataforma segura de comunicaciones vehiculares.

ITETRIS El proyecto ITETRIS [98] trabaja en la dirección de crear un entorno de simulación realista, que refleje a gran escala las ventajas de los nuevos avances de las redes vehiculares.

Aparte de los Programas Marco, la Comisión Europea mantiene una iniciativa conjunta entre la industria y el sector público, para acelerar el despliegue de las tecnologías de la información y las comunicaciones en los vehículos; ésta es llamada **Intelligent Car Initiative**. Como uno de los pilares fundamentales de esta iniciativa, la propuesta **eSafety** [99] se encarga de la parte que concierne al despliegue del ITS relacionado con la seguridad vial. Otra organización europea, pero en este caso independiente, es la que compone el *Car to Car Communication Consortium (C2C-CC)* [100], que aglutina a diversos fabricantes europeos, y se centra en la mejora de las tecnologías de comunicación entre vehículos.

Tal y como se puede observar en la anterior descripción de programas y proyectos, la inversión pública en ITS está especialmente centrada hoy día en la telemática en vehículos. A diferencia de otros campos en ITS, en los que la investigación está privatizada y diversas soluciones comerciales ya se pueden ver en el mercado, el campo de la telemática, y el de los servicios y aplicaciones que se desprenden de ésta, se encuentran en plena discusión internacional. La necesidad de interconectar a cada vehículo con los de su entorno, y con diversos elementos de la infraestructura, requiere pues de una intervención centralizada por parte de los gobiernos y de los organismos de regulación.

1.4.3. Organizaciones de Estandarización en Transporte

Para asegurar la regulación y el correcto funcionamiento de los sistemas de tratamiento de la información en ITS, es necesario conformar un conjunto de estándares. Debido al continuo cambio que implican las nuevas tecnologías, estos

⁶El sitio Web del proyecto todavía no se encuentra disponible.

estándares deben estar actualizados, y su número debe incrementarse de acuerdo con las demandas detectadas. Por esta razón, los cuerpos de estandarización deben estar íntimamente ligados tanto con los fabricantes de sistemas como con la comunidad investigadora.

El desarrollo de estándares formales está distribuido actualmente en entidades reconocidas internacionalmente para tal fin. Dichas entidades se pueden distinguir según su ámbito de aplicación, teniendo pues: mundiales, regionales y nacionales. De entre ellas, las más relevantes para ITS son la ISO, la organización mundial de estandarización por excelencia, y la regional europea CEN (*Comité Européen de Normalisation*). La ISO dispone del comité técnico 204 (**ISO TC204**) *Intelligent Transportation Systems* [101], encargado de identificar los requisitos de los ITS, definir los servicios ITS posibles (como se especificó en la sección 1.3), y definir estándares asociados a éstos. El CEN también dispone de un comité encargado de tareas similares, el 278 (**CEN/TC 278**), denominado *Road Transport and Traffic Telematics* [102]. Las organizaciones europeas CENELEC⁷ (*Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*) y ETSI⁸ (*European Telecommunications Standards Institute*) también desarrollan actividades relativas a la estandarización en ITS. En los últimos años se han desarrollado diversos programas de trabajo conjunto entre CEN, ETSI y CENELEC para uniformizar la estandarización europea en ITS.

1.5. Objetivos y Aportaciones de la Tesis Doctoral

A partir de la diversificación que se ha realizado anteriormente de los elementos arquitectónicos de los ITS por carretera, se han identificado los componentes que conforman una plataforma orientada a la provisión de servicios telemáticos. La infraestructura y las tecnologías en el lado de la carretera implican una parte importante en este compendio. Sin embargo, es en el lado del vehículo en donde se encuentran los elementos más críticos de una arquitectura de este calado. El sistema de navegación, el de comunicaciones, y la arquitectura hardware/software del equipamiento de a bordo, y en particular de la OBU, conforman en la literatura actual los elementos más importantes de cara al despliegue de servicios telemáticos, focalizados bien en el propio vehículo o en aplicaciones centralizadas. Sin embargo, no existen en la actualidad plataformas generales de a bordo para diversos tipos de servicios, y menos aún que abarquen de forma vertical los requerimientos de rendimiento de todos estos componentes. Concretando en aplicaciones particulares, algunos autores sí consideran conjuntamente los requisitos necesarios para los subsistemas de comunicación y navegación. Las soluciones en el campo de la prevención de colisiones conforman el principal grupo de servicios telemáticos en donde se han planteado los problemas de rendimiento común de estos dos subsistemas [103–105]. La investigación en protocolos de enrutamiento en redes ad-hoc para vehículos (*Vehicular Ad-hoc Networks* o VANETs) también es un campo en donde la navegación y las comunicaciones deben

⁷<http://www.cenelec.eu/>

⁸<http://www.etsi.org/>

ir de la mano en muchas ocasiones, puesto que diversos algoritmos usan la posición de los vehículos para encaminar paquetes, y la calidad de esta localización puede llegar a influir en el rendimiento final [106].

Si bien el estudio conjunto de algunos de los subsistemas de a bordo está reflejado en estas propuestas previas, la creación de una infraestructura completa con los requerimientos descritos de soporte vertical para servicios telemáticos, no se ha considerado por entero en trabajos previos. Por lo general, soluciones similares a la presentada en la tesis doctoral vienen de la mano de conjunciones de sistemas desarrollados de forma independiente. La integración de soluciones parciales puede derivar en comportamientos incoherentes de la plataforma general, y a la adecuación de sistemas poco flexibles ensamblados a medida para determinados servicios. Para la creación de un entorno general de aplicaciones y servicios ITS, la propia arquitectura de la plataforma de a bordo y la consideración de una infraestructura adecuada son vitales. Investigar en cada uno de los (sub)sistemas involucrados, de cara a obtener un buen funcionamiento individual y de forma conjunta, es un aspecto fundamental en la tesis doctoral.

Tal y como se ha dicho en las anteriores secciones de este primer capítulo introductorio, el objetivo final de la presente tesis radica en la definición de una arquitectura integral para la definición de servicios en un entorno ITS. Los servicios telemáticos conforman el interés principal del trabajo, así como el despliegue de servicios tradicionales en vehículos. En tal arquitectura general se tratan los principales subsistemas de a bordo y la integración del vehículo en el contexto de circulación. De esta forma, se abarca un campo de estudio que engloba tanto al vehículo como la infraestructura, entendiendo por esta última a los sistemas en el lado de la carretera y a los que ofrecen un soporte remoto mediante redes de comunicación de datos. La plataforma final que se pretende presta un especial interés, además, a la consideración de la computación ubicua en el entorno ITS, mediante servicios novedosos en este ámbito. La Fig. 1.2 ilustra los ámbitos en donde se encuadran las principales aportaciones de la tesis doctoral. Como se puede ver, el carácter vertical de la propuesta es claramente apreciable a través de diferentes trabajos centrados en el propio vehículo, el lado de la carretera, y el sistema de información remoto.

Los siguientes apartados resumen las aportaciones más relevantes de la tesis, completando las piezas constituyentes de la Fig. 1.2, e invitan al lector a profundizar en los detalles del trabajo realizado a través del resto de los capítulos del documento.

1.5.1. Unidad de a Bordo Multi-Servicio para Vehículos

El hardware de a bordo, y especialmente la OBU, se consideran la base para la investigación en los principales subsistemas del vehículo, destacando los de navegación y comunicaciones. Además, es necesario disponer de un OBE adecuado para el asentamiento de los servicios y aplicaciones de las que podrán disfrutar tanto el conductor como los pasajeros del vehículo. La plataforma de a bordo que se presenta sirve, por tanto, como punto de partida para el resto de los trabajos presentados en la tesis doctoral.

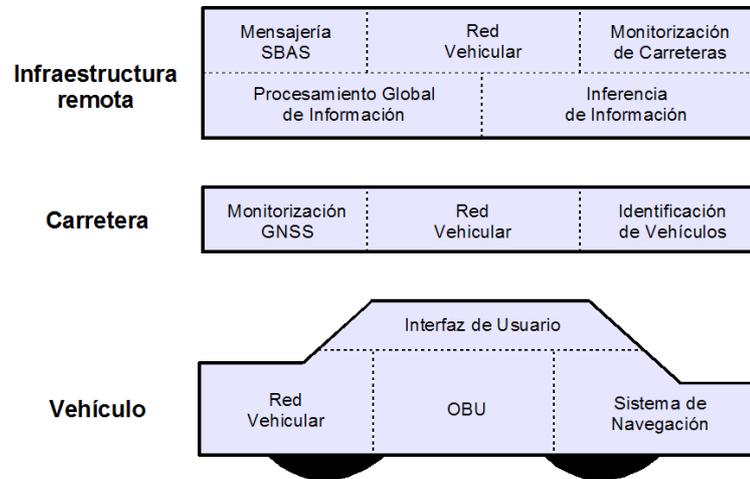


Figura 1.2: Diagrama de la arquitectura integral propuesta a diferentes niveles

Las etapas de análisis y diseño de todos los subsistemas de a bordo, han estado seguidas de las labores de desarrollo e implementación de la solución final. De esta manera, se ha usado un vehículo prototipo real partiendo de anteriores etapas de investigación [10], y se ha alcanzado una arquitectura que sirve de *testbed* para la investigación en sistemas de navegación por satélite, redes de comunicación vehicular, y, en general, para el despliegue de servicios telemáticos. En paralelo, buena parte del diseño hardware y software del vehículo se ha compaginado con líneas de investigación interrelacionadas, orientadas a la navegación inercial [107] y al peaje electrónico [72]. Las principales aportaciones de la arquitectura hardware/software del OBE alcanzado son las siguientes:

- Tratamiento centralizado en la OBU de la información dada por toda la sensorización instalada en el vehículo: odometría, giróscopo, compás, acelerómetro y GPS.
- Sistema OBU de pasarela de comunicaciones intra-vehículo y con el exterior.
- Interfaz de usuario apropiada para el entorno vehicular.
- Arquitectura software modular e independiente del sistema operativo.
- Sistema lógico de tres capas mediante el uso de OSGi (*Open Service Gateway initiative*) como pasarela de módulos software de la OBU.
- Sistema de restricción de ejecución de aplicaciones software en el vehículo, mediante la configuración del comportamiento de las aplicaciones a partir de la información extraída de los sensores de a bordo.

1.5.2. Sistema de Navegación y Monitorización de Integridad Basado en GNSS/SBAS e Internet

El posicionamiento presenta un elemento fundamental en gran cantidad de las aplicaciones ITS, por lo que es necesario disponer de un sistema de navegación fiable, robusto, preciso, y de bajo coste. La conjunción de todas estas características se ve representada en una propuesta de sistema de navegación basado en el posicionamiento GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), actualmente GPS; los sistemas de mejora SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*), representado en Europa por EGNOS; y el uso de Internet como vía complementaria de SBAS. Las principales aportaciones de esta parte del trabajo se listan a continuación:

- Arquitectura desacoplada de navegación independiente del sensor (o receptor) GNSS utilizado. El software desarrollado, ejecutado como módulo de bajo nivel en la arquitectura de la OBU, independiza el sistema de navegación del receptor usado.
- Soporte adicional de información SBAS a través de Internet, con la posibilidad de traducir los mensajes EGNOS a mensajes de navegación diferencial comunes. Esto permite obtener un sistema de navegación con la ventajas de EGNOS, aun disponiendo de un receptor de gama baja o heredado.
- Monitorización de la integridad de la posición. Un algoritmo de procesamiento de mensajes EGNOS, compartido por la anterior funcionalidad, y ejecutado como módulo *middleware* en la OBU, permite calcular la integridad de la posición.
- Desarrollo de una estación de monitorización de la señal GPS/EGNOS y de provisión remota de mensajes EGNOS.
- Evaluación de la información de integridad obtenida en entornos reales de circulación.
- Análisis del impacto de las comunicaciones celulares en el cálculo de la integridad de la posición.

1.5.3. Arquitectura de Comunicación Overlay con Soporte Unificado V2V, I2V y V2I

Las redes vehiculares son requisito indispensable para la provisión de servicios y aplicaciones telemáticas en el ámbito de ITS. Sin embargo, las soluciones actuales VANET, que plagan la literatura relativa a comunicaciones vehiculares, están basadas en propuestas de protocolos vehículo a vehículo (V2V), principalmente ligadas a aplicaciones concretas. Además, las comunicaciones ad-hoc suponen la inclusión del sistema en los vehículos circundantes para su funcionamiento, lo cual no es factible para un futuro cercano. Por otro lado, las comunicaciones con la infraestructura suelen presentarse bajo soluciones basadas en una conexión con elementos situados en el

lado de la carretera. Aunque éstas permiten una comunicación entre el vehículo y la infraestructura en los dos sentidos (I2V y V2I), no presentan un modelo escalable en coste. Al mismo tiempo, las redes de comunicación celular ya se vienen usando desde hace algunos años en soluciones comerciales de gestión y monitorización de flotas bajo un paradigma V2I. Las soluciones VANET han centrado los principales esfuerzos de la comunidad científica durante este tiempo. Sin embargo, las redes celulares han evolucionado en gran medida desde la aparición de UMTS, y hoy día presentan un entorno de comunicación adecuado para los vehículos.

La arquitectura de comunicación propuesta en la tesis doctoral apuesta por las redes de comunicación celular para abarcar el mayor número de servicios y aplicaciones ITS posibles, ofreciendo un entorno unificado de comunicación V2V, I2V y V2I. Las principales aportaciones de tal sistema de comunicación y de su evaluación son las siguientes:

- Análisis del potencial y la aplicabilidad de las redes celulares en el entorno vehicular.
- Arquitectura unificada de comunicación mediante la simbiosis entre las redes de comunicación celular y las redes *overlay* P2P (*peer to peer*).
- Soporte de servicios orientados al vehículo y aplicaciones centralizadas en la infraestructura.
- Protocolo de comunicación base desarrollado sobre la red *overlay*, integrado con información de posicionamiento y de integridad de la posición. Estos datos de valor añadido sobre la localización son de especial relevancia en servicios como el peaje electrónico o la facturación en seguros considerando el uso del vehículo.
- Integración de un sistema de comunicación de alto nivel disponible como *middleware* en la arquitectura de la OBU. De esta forma, las aplicaciones instaladas en el vehículo hacen uso del módulo de comunicaciones para disponer de soporte de red.
- Integración del vehículo, el hardware al lado de la carretera, y los proveedores de servicio dentro de la misma red.
- Evaluación del rendimiento de las redes celulares en entornos de circulación real.

1.5.4. Plataforma Ubicua de Provisión de Servicios e Información Contextual

La incorporación en el vehículo de una plataforma de comunicación como la descrita en el apartado anterior, lo integra dentro de una red compuesta por el resto de vehículos, aunque soportada por la infraestructura del operador de la red celular. Dicho potencial puede explotarse en mayor medida si se incluye en infraestructura la capacidad necesaria para ofrecer información de valor añadido, o de implementar

aplicaciones de gestión y monitorización centralizados. Siguiendo esta idea, se han realizado distintos trabajos con la intención de dotar a la infraestructura de la necesaria “inteligencia” para integrar al vehículo en un entorno ubicuo en donde los propios operadores o proveedores de servicios también se vean beneficiados.

Las aportaciones dentro de esta parte de la tesis doctoral se resumen en los siguientes puntos principales:

- Inclusión de las tecnologías de radio-identificación para detectar la presencia del vehículo en determinados lugares. Con este sistema, se demuestra cómo se puede integrar el hardware del lado de la carretera en la plataforma de red diseñada.
- Ampliación de la arquitectura de red para ofrecer servicios de información de tráfico relativos al entorno de circulación.
- Sistema de gestión de perfiles de usuarios y de información regional a partir de modelado ontológico, con capacidades para la inferencia de información de interés para el conductor relativa al contexto de circulación.
- Aplicación Web de gestión y monitorización de incidencias de tráfico, con doble rol de acceso para usuarios y operadores.
- Implementación de servicios de referencia.

1.6. Organización del Documento

La tesis doctoral se encuentra dividida en un conjunto de capítulos, que dan una visión desde lo general hasta la particularidad de la solución propuesta. De esta forma, y siguiendo un carácter introductorio, el **capítulo 1** (dentro del cual está la presente sección) realiza una contextualización del trabajo presentado dentro del mundo de los sistemas inteligentes de transporte. Se identifican los principales constituyentes de las arquitecturas ITS, con tal de focalizar el interés de la tesis doctoral. Además, se le presta un especial interés a los servicios telemáticos en ITS, para los cuales se diseña la plataforma que se presenta a lo largo de todo el documento. Finalmente, y tras una breve revisión del mercado y la investigación actuales en los ITS por carretera, se listan las principales aportaciones de la tesis doctoral, interrelacionadas con los objetivos propuestos.

El **capítulo 2** está destinado a presentar la base tecnológica necesaria para entender correctamente el grueso de la tesis doctoral. Para tal fin, se realiza una breve descripción de las tecnologías de a bordo en vehículos, seguida de una más extensa introducción a los sistemas de navegación satelital y a las tecnologías de comunicación vehicular, que se presentan como dos elementos fundamentales en todo el trabajo. Finalmente, el capítulo concluye con una explicación adicional de tecnologías encontradas de utilidad para dotar a los servicios ITS de un carácter pervasivo o ubicuo.

Seguido a la explicación de las tecnologías y conceptos generales, se encuentra el primer capítulo concerniente a la arquitectura ITS presentada. El **capítulo 3** sirve para

mostrar la arquitectura hardware del prototipo de vehículo adecuado para la tesis. La unidad de a bordo recibe un especial atención, y se detalla el sistema software modular de tres capas sobre el que se asientan todas las aplicaciones ITS que se ejecutan en el vehículo.

En el **capítulo 4** se describe el subsistema de navegación considerado para el vehículo. En la explicación dada se detalla cómo los comunes sistemas de navegación por satélite se usan en conjunción con los de corrección diferencial, en concreto con los sistemas globales de aumento SBAS. Dicha tecnología es incorporada en una arquitectura en donde la información SBAS es procesada directamente desde el satélite geostacionario (GEO) o desde Internet. Aunque las ventajas de SBAS en la mejora de la posición no es demasiado aparente en la actualidad, se demuestra cómo la información de integridad sí es importante para asegurar que la posición dada por el receptor es fiable. La evaluación de la integridad computada usando el GEO o Internet presenta un interesante análisis para la comunidad científica en navegación.

La red de comunicación vehicular que se ha diseñado se encuentra descrita en el **capítulo 5**. Dicha red presenta un novedoso mecanismo basado en las redes de celulares de última generación y las tecnologías de comunicación P2P. Para defender esta propuesta, se incluye una discusión sobre las principales cuestiones de rendimiento de las redes celulares en el entorno vehicular, comparándolas con las tecnologías VANET, que hoy día son una referencia. Las diversas pruebas realizadas sobre diferentes entornos, prueban que la red desarrollada es válida para la implantación adecuada de una gran cantidad de servicios telemáticos. Además, la incorporación de la integridad de la posición en el protocolo de comunicación de incidencias, introduce una característica de valor añadido para servicios que requieren de información sobre la certeza de la localización del vehículo.

El **capítulo 6** supone la generalización del sistema total de a bordo y de la red vehicular, para adentrar al vehículo en un entorno de servicios ubicuos de información dependiente del contexto. El lado de la infraestructura es adaptado mediante un sistema de detección del vehículo en lugares de interés, que complementa al sistema de navegación embarcado, y sirve para notificar información relativa al lugar de paso. La gestión y monitorización de incidencias, la provisión de información global del estado de la carretera, y el uso de perfiles con preferencias sobre la información en la que está interesado el conductor, son ventajas añadidas del sistema centralizado mediante acceso remoto que se presenta. La adaptación de la información recibida en el sistema de a bordo, de acuerdo con los requisitos establecidos por el conductor, es un elemento fundamental en este capítulo.

Como última parte del cuerpo principal de la tesis doctoral, el **capítulo 7** realiza un análisis de todo el trabajo realizado, expone las principales conclusiones de las aportaciones descritas y, finalmente, enumera las vías de investigación futuras que se derivan de la obra.

Los apéndices situados al final del documento incluyen información detallada sobre aspectos puntuales de los desarrollos realizados. De esta manera, el apéndice A detalla en gran medida el algoritmo implementado para calcular los factores de integridad del sistema de navegación. El apéndice B describe las capacidades y la forma de uso del

software de soporte SBAS integrado en la OBU. Finalmente, el apéndice C detalla el formato de los mensajes intercambiados entre las distintas entidades de la plataforma de comunicación.

1.7. Publicaciones Derivadas de la Tesis Doctoral

Durante el desarrollo de la tesis doctoral se han realizado diversas publicaciones, relacionadas con el trabajo que se ha ido completando en diferentes etapas. Primeramente se listan las pertenecientes a congresos y revistas de alto calado, para incluir en segundo lugar el resto de contribuciones.

1.7.1. Publicaciones Más Relevantes

- J. Santa, B. Úbeda, R. Toledo y A.F.G. Skarmeta. **Monitoring the position integrity in road transport localization based services**. En actas de *IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC-Fall 2006)*, pp. 1-5, Montréal, Canadá, Sep. 2006.

El método de cálculo de la integridad de la posición se ve mejorado en esta publicación [56]. De esta forma, se describe el algoritmo utilizado, y se evalúa su comportamiento realizando un análisis del efecto de las comunicaciones celulares en la obtención de los mensajes de EGNOS.

- J. Santa, A. Muñoz y A.F.G. Skarmeta. **A Context-Aware Solution for Personalized En-route Information Through a P2P Agent-Based Architecture**. *Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS)*, vol. 4707, no. 1, pp. 710-723, Ago. 2007.

La labor documentada en el congreso UBIROADS 2007 es detallada en esta publicación [60], haciendo incidencia, en esta ocasión, al rendimiento del proceso de inferencia. Esta cuestión se debe tener en cuenta en el entorno vehicular, ya que una notificación retrasada puede no ser de interés cuando el vehículo se desplaza a altas velocidades.

- J. Santa, R. Toledo-Moreo, A.F. Gómez-Skarmeta. **A Novel Vehicle Communication Paradigm Based on Cellular Networks for Improving the Safety in Roads**. *Intelligent Journal of Intelligent Information and Databased Systems (IJIIDS)*, vol. 2, no. 2, pp. 240-257, May. 2008.

Este artículo [62] se integra la versión inicial de la arquitectura de comunicación overlay con la información de navegación de la OBU. De esta manera, es posible incluir en los mensajes de notificación del estado del vehículo la información sobre la localización y, lo que es más importante, un factor de integridad de la misma. El algoritmo utilizado para obtener ésta última es analizado mediante pruebas reales, relacionando el factor de integridad obtenido con la cobertura satelital.

- J. Santa, A. Moragón y A.F. Gómez-Skarmeta. **Ubiquitous Information Provision in the Vehicle Domain.** En actas de *IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2008 (ISWPC 2008)*, pp. 485-489, Santorini, Grecia, May. 2008.

La integración de la plataforma completa ITS, considerando un entorno telemático de provisión de servicios, se muestra en este artículo [63]. Mediante el uso de la arquitectura de comunicación overlay y el soporte de la infraestructura, es posible disponer tanto de información local al vehículo (eventos emitidos por los vehículos circundantes), como de información procesada globalmente (como el estado de las carreteras).

- J. Santa, A. Moragón y A.F. Gómez-Skarmeta. **Experimental Evaluation of a Novel Vehicular Communication Paradigm Based on Cellular Networks.** En actas de *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2008 (IV 2008)*, pp. 198-203, Eindhoven, Holanda, Jun. 2008.

En este trabajo [64] se presenta un análisis del rendimiento de la arquitectura de comunicación vehicular incluida en la tesis doctoral. Este estudio se centra en determinar la latencia obtenida en comunicaciones vehículo a vehículo, infraestructura a vehículo, y vehículo a infraestructura. El vehículo prototipo de la tesis se perfila como un *testbed* adecuado para estudiar el funcionamiento de la red.

- J. Santa, A.F. Gómez-Skarmeta y M. Sanchez-Artigas. **Architecture and evaluation of a unified V2V and V2I communication system based on cellular networks.** *Computer Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 2850-2861, Jul. 2008.

La versión final de la arquitectura de comunicación unificada se describe en esta publicación [65]. Esta misma plataforma es la usada en el trabajo de evaluación presentado en el congreso IV 2008. Aquí se detalla enteramente el funcionamiento y los protocolos de comunicación utilizados.

- R. Toledo-Moreo, J. Santa, M.A. Zamora-Izquierdo, B. Úbeda, A.F. Gómez-Skarmeta. **A Study of Integrity Indicators in Outdoor Navigation Systems for Modern Road Vehicle Applications.** En actas de *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008)*, pp. 2-7, Niza, Francia, Sep. 2008.

El trabajo presentado en este artículo [108] realiza un análisis de la información de integridad que puede ofrecer un factor calculado en base un sistema de navegación inercial, frente al que se puede calcular considerando la información proveniente de EGNOS. El factor de integridad calculado mediante fusión sensorial acota de forma más eficiente el rendimiento real del sistema de navegación, no obstante, el coste del hardware limita su aplicación a gran escala.

1.7.2. Resto de Publicaciones

- J. Santa, B. Úbeda, R. Toledo y C. Sotomayor. **A Facility for GPS/EGNOS Signal Monitoring**. En actas de *Workshop on EGNOS Performance and Applications*, pp. 183-188, Gdynia, Polonia, Oct. 2005.

En este artículo [53] se presenta la estación de monitorización y provisión de mensajes SBAS desarrollada. Ésta se instala en un laboratorio externo, y permite analizar el funcionamiento de GPS y EGNOS. Una primera versión del algoritmo de cálculo de integridad es incluida dentro del software implementado.

- C. Sotomayor, R. Toledo, B. Úbeda y J. Santa. **AVANT: A Wide Range Utility for GPS/EGNOS Navigation System Users**. En actas de *Workshop on EGNOS Performance and Applications*, pp. 195-200, Gdynia, Polonia, Oct. 2005.

Diversa funcionalidad incluida en la plataforma ITS presentada en la tesis doctoral, se ve incluida en el software presentado en esta publicación [54]. En esta utilidad se incluyen capacidades de monitorización para un sistema de navegación inercial, con lo que es posible consultar el estado de los diversos sensores. Entre ellos, el receptor GPS junto la integración de EGNOS presenta una especial relevancia.

- R. Toledo, B. Úbeda, J. Santa, M.A. Zamora y A.F. Skarmeta. **A High Integrity Low Cost Positioning System for Location Based Services**. *Monograph of Transport System Telematics 2005*, pp. 469-475, Nov. 2005.

El trabajo presentado en este artículo [55] sienta las bases de los requerimientos de navegación de los servicios basados en localización. Para solventar tales necesidades, se presenta un sistema de navegación de bajo coste apoyado en diversos sensores inerciales, el posicionamiento por satélite, y la integridad de la localización.

- J. Santa, B. Úbeda y A.F.G. Skarmeta. **A Multiplatform OSGi Based Architecture for Developing Road Vehicle Services**. En actas de *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2007)*, pp. 706-710, Las Vegas, USA, Ene. 2007.

La arquitectura software de la OBU se presenta íntegramente en este trabajo [57]. Bajo un *framework* basado en una pasarela de servicios, se sitúa una arquitectura modular basada en capas, sobre las que se distribuyen los servicios software que funcionan de forma cooperativa. El vehículo utilizado en la tesis doctoral también se describe brevemente en base a sus componentes hardware.

- J. Santa, B. Úbeda y A.F.G. Skarmeta. **Monitoring the Position Integrity in Road Transport Using SBAS/EGNOS and Communication Issues**. *Location Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 38-42, Ene./Feb. 2007.

Este artículo [109] presenta una ampliación del trabajo presentado en el congreso VTC-Fall 2006, prestando un especial énfasis a la utilidad de la integridad de la posición en navegación terrestre.

- J. Santa, A.F.G. Skarmeta y B. Úbeda. **An Embedded Service Platform for the Vehicle Domain**. En actas de *IEEE International Conference on Portable Information Devices (PORTABLE 2007)*, pp. 1-5, Orlando, USA, May. 2007.

Tomando como base la arquitectura de la OBU presentada en el congreso CCNC 2007, este trabajo [58] comienza a dotar de capacidades telemáticas a la plataforma de a bordo. Para tal labor, se integran *tranceivers* de comunicación con el objetivo de abarcar la red de área personal (PAN) del vehículo, la comunicación de corto alcance mediante red inalámbrica de área local (WLAN), y el acceso a la red área extensa (WAN) mediante las redes celulares. La primera concepción de la arquitectura overlay de comunicación es presentada también brevemente.

- J. Santa, A. Muñoz y A.F.G. Skarmeta. **A Novel Architecture for Retrieving Context Aware Information in a P2P Based Vehicle Communications Paradigm**. En actas de *1st IEEE International Workshop on ITS for Ubiquitous Roads (UBIROADS 2007)*, Marrakech, Marruecos, Jun. 2007.

En este artículo [59] se describe en mayor detalle la primera aproximación de red overlay P2P, y se integra en una plataforma de provisión de información dependiente del contexto. Para ello, se modela el entorno de circulación del vehículo y el perfil del conductor mediante ontologías, de forma que es posible inferir notificaciones personalizadas para el usuario. Este sistema es posteriormente integrado en la plataforma vertical que se presenta en la tesis doctoral.

- R. Sánchez, J. Paniagua, S. Gutiérrez, J.G. Jordán, J. Santa, I. Fernández y P. Gomez. **Proyecto GIROADS: Sistema de Peaje Basado en GNSS sobre una Plataforma Multiservicio LBS**. En actas de *VII Congreso Español sobre ITS*, Valencia, España, Sep. 2007.

Los trabajos desarrollados dentro del proyecto europeo GIROADS [82] se ven reflejados en la arquitectura desglosada en la tesis doctoral. En este artículo [61] se demuestra la utilidad de los sistemas de posicionamiento por satélite en el peaje electrónico. Para ello, se hace uso de de una OBU de propósito general, equivalente a la considerada en la tesis, y de las redes de comunicación celular. La integridad de la posición se presenta como un factor clave a la hora de asegurar una facturación justa por el uso de la red viaria.

- J. Santa y A.F. Gómez-Skarmeta. **Potential of cellular networks in vehicular communications**. En actas de *15th World Congress on ITS*, pp. , Nueva York, USA, Nov. 2008.

Este artículo [110] toma como base las publicaciones anteriores sobre la red vehicular diseñada, y estudia el potencial de las redes de comunicación celular actuales y futuras en el ámbito ITS terrestre. Se analizan los principales factores de rendimiento, y se enriquece el documento con un exhaustivo número de pruebas de funcionamiento del sistema de comunicación incluido en la tesis doctoral. Estas pruebas se realizan considerando los nuevos avances introducidos en UMTS, y se comparan las mejoras con respecto a las evaluaciones incluidas en *Computer Communications* e IV 2008.

Además de estos trabajos, el contenido en la tesis doctoral se ve reflejado también en la participación en las *VI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2007)* [66], y otra publicación [67] dentro del *VII Congreso Español sobre Sistemas Inteligentes de Transporte*.

Capítulo 2

El Estado de las Tecnologías Involucradas en el Desarrollo de Servicios Telemáticos en ITS

El capítulo introductorio de la tesis doctoral sirvió para dar una visión inicial sobre los sistemas inteligentes de transporte, a la vez que se conformaba el contexto en donde se encuadra el trabajo realizado. Como se comentó, el conjunto de subsistemas que conforman los ITS actuales son variados, pero se distinguían dos entidades fundamentales: el vehículo y la infraestructura. El vehículo y las redes de comunicación para conectar a éste con su entorno conforman la principal preocupación de los ITS actuales y, de la misma manera, reciben una especial atención en esta tesis doctoral. No obstante, el conjunto de tecnologías de a bordo que se encuentran en los vehículos de nueva generación, y en los prototipos considerados en la comunidad científica en ITS, es muy variado. Por esta razón es necesario sentar unos cimientos tecnológicos apropiados, no sólo para conocer los componentes fundamentales de los prototipos actuales, sino también para sentar una base sobre la que describir la arquitectura presentada en el resto del trabajo.

A lo largo del presente capítulo se incluirá una introducción a las principales tecnologías de a bordo en vehículos, haciendo una especial mención a los sistemas de navegación satelital, y se adentrará al lector en las tecnologías que permiten conectar a los vehículos con los de su entorno o con la infraestructura. Así mismo, se tratarán otras tecnologías complementarias que se han considerado de interés para dotar de un carácter ubicuo a la arquitectura ITS diseñada. Éstas tienen una especial repercusión en el lado de la carretera, y en el soporte remoto de centros de servicio y procesamiento de información.

2.1. Equipamiento Hardware y Software de a Bordo en Vehículos

Como se vió en la sección 1.2, el conjunto de subsistemas que componen el equipamiento de a bordo (u OBE) del vehículo es diverso. El conjunto de sensores que proveen de información sobre el estado del vehículo están conectados a una unidad de procesamiento embebido, que no tiene por qué ser la OBU en la que los servicios de valor añadido se ejecutan. Dicha OBU de carácter genérico es, cada vez más, considerada como un ordenador de propósito general, en donde se ejecuta el software de utilidad para el conductor y los pasajeros.

2.1.1. Los Avances en Microelectrónica y Sistemas Embebidos

Los avances en la microelectrónica han permitido el desarrollo de circuitos integrados de pequeñas dimensiones y que realizan funciones muy complejas [72]. Desde los microprocesadores de 32 y 64 bits, hasta los más sofisticados circuitos personalizados de tecnología CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), todos han contribuido al diseño de microcontroladores válidos para procesamiento general pero, sobre todo, para su incorporación en sensores de diversos tipos. Un ejemplo son los modernos sensores GPS, con dimensiones tales que permiten ir alojados en relojes, ordenadores de bolsillo, o teléfonos móviles. La nanotecnología también se perfila como un sector clave en el desarrollo de sensores de tamaño reducido y grandes prestaciones. Los sensores inerciales de tipo MEMS (*Microelectromechanical Systems*) son prueba de ello.

El desarrollo de sistemas basados en microprocesador con el objetivo de insertarlos en plataformas embebidas, como la unidad de a bordo de un vehículo, es otro factor clave en la investigación ITS. Actualmente se dispone de una amplia gama de microprocesadores, microcontroladores y procesadores digitales de señal (DSP), que cubren todas las necesidades de cómputo dentro de un vehículo. Además, las arquitecturas 8086 (el común IBM PC) actuales con procesadores de 32 y 64 bits permiten el desarrollo de aplicaciones software sofisticadas, basadas en los mismos sistemas operativos que los empleados en los ordenadores de sobremesa, con lo que se simplifican las tareas de desarrollo de aplicaciones software.

2.1.2. Los Sensores de a Bordo

Haciendo uso de estas novedades tecnológicas descritas, el despliegue actual de los sensores en vehículos comerciales y prototipos de investigación es inmenso. En una primera aproximación podemos distinguir los sensores que aportan información sobre el funcionamiento interno del vehículo:

- Monitorización del motor. Control de inyección, temperatura interna, limitador de revoluciones, etc.

- Medida de velocidad instantánea.
- Sistemas de seguridad. ABS, ESP, *airbag*, etc.
- Habitabilidad y confort. Control de climatización, elevalunas electricos, iluminado, presencia del conductor, etc.
- Sistema de seguridad adicional. Inmovilizador electrónico, identificación del conductor, etc.
- Asistencia al aparcamiento.

Aparte de este conjunto, los ITS han supuesto una revolución en el conjunto de sensores de a bordo en vehículos. Entre éstos se pueden destacar los siguientes:

- Posicionamiento por satélite. GPS, GLONASS, GALILEO, etc.
- Anti-colisión mediante radar.
- Visión por ordenador.
- Navegación inercial. Acelerómetros, compases electrónicos, giróscopos, etc.

Los sensores de posicionamiento por satélite reciben una especial atención en la tesis doctoral, y el funcionamiento de los sistemas de navegación es tratado especialmente en un apartado posterior de esta sección. Los avances en el hardware de tales sensores en los últimos años se ha encaminado hacia el desarrollo de soluciones de bajo coste, con el objetivo de permitir una penetración masiva en el mercado del automóvil, sobre todo. No obstante, las gamas altas de teléfonos móviles y los PDAs (*Personal Digital Assistant*) comienzan a incluirlos. En los sensores de posicionamiento por satélite, la disponibilidad de una antena externa con buena visibilidad hacia la cobertura satelital es un factor clave para obtener una buena posición, tal y como se verá posteriormente.

2.1.3. La Unidad de a Bordo u OBU

La OBU, unidad de a bordo u ordenador de a bordo, se puede considerar como un sistema electrónico con una **unidad central de proceso** (generalmente un microprocesador), una **unidad de almacenamiento permanente**, una interfaz de usuario, y un conjunto de interfaces de comunicación con el exterior. La Fig. 2.1 muestra un esquema general del concepto de OBU. En muchos casos, la **interfaz de usuario** puede venir dada por un dispositivo integrado en la propia unidad física de la OBU, como un display sencillo, o estar formado por uno o más periféricos conectados, al estilo de un ordenador personal común. Incluso, se puede dar el caso de que la interfaz se encuentre localizada en un dispositivo portátil del usuario.

Las **comunicaciones** presentan un elemento fundamental dentro de la arquitectura de cualquier unidad de a bordo, ya sea una embebida en la electrónica del vehículo, o una destinada a servicios telemáticos. La comunicación con los sensores se suele

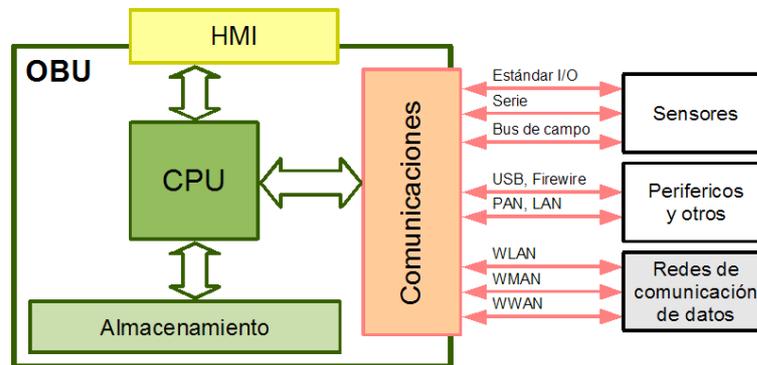


Figura 2.1: Principales constituyentes e interfaces de comunicación de una OBU

dar a partir de cableado común de entrada/salida digital o analógica, o bien usando interfaces de comunicación más elaborados, como los serie (RS-232, RS-485, etc.) o los buses de campo (CAN, Profibus, etc.). La comunicación con el resto de periféricos y dispositivos de a bordo, como cámaras de video o manos libres, se lleva a cabo considerando otros puertos cableados (USB, Firewire) o redes de comunicación de datos de área personal (PAN) o local (LAN). En estos últimos casos, las tecnologías más extendidas son el común Ethernet y el inalámbrico Bluetooth. Finalmente, el interfaz de comunicación del vehículo con el exterior viene dado por transceivers de red inalámbrica de diversa índole. Estos se pueden clasificar en interfaces de red de área local (WLAN), metropolitana (WMAN) y extensa (WWAN). Las redes vehiculares de comunicación de datos presentan un especial interés en la tesis doctoral, y son tratadas en mayor detalle en la sección 2.3.

Actualmente existe una gran controversia sobre la “inteligencia” que debe incorporar la unidad de a bordo. En el proyecto europeo GIROADS [82], por ejemplo, se apuesta por una unidad de a bordo sencilla, provista solamente de la capacidad de usar servicios remotos ofrecidos por la infraestructura. Ésta concepción depende, claro está, del tipo de servicios que se quieran ofrecer. Además, es importante remarcar que en las soluciones actuales ITS se intenta separar por un lado el tratamiento de información crítica para el funcionamiento del vehículo, usando una unidad embebida de propósito específico, y por otro la ejecución de servicios a nivel de usuario mediante una OBU de propósito general. El diagrama dado en la Fig. 2.1 muestra el caso general de una OBU que realiza todas las funciones.

La instalación de un computador de propósito general como OBU implica, además, un conjunto de cuestiones de viabilidad que deben considerarse [1]. Un ordenador PC de a bordo presenta una cuestión delicada donde se deben tener en cuenta las condiciones físicas de colocación y de alimentación. El funcionamiento de dicho tipo de OBU debe asegurar que servicios considerados de vital importancia, como los de seguridad, funcionen eficientemente en todo momento. Por esta razón, el software instalado en la OBU se presenta como un elemento fundamental en este tipo de arquitecturas.

2.1.4. Software Embarcado en Vehículos y el Papel de OSGi

Hasta la fecha, el software considerado en vehículos formaba parte de programas industriales de propósito muy específico, y que se ejecutaban en unidades de a bordo embebidas basadas en microcontroladores. Dichos sistemas se encargaban de procesar toda la información provenientes de sensores internos del vehículo. Con la aparición de los nuevos servicios ITS, estos computadores están empezando a ser complementados con OBUs basadas en arquitecturas PC que ejecutan software mucho más complejo. La interfaz de estas aplicaciones también representa un reto para la comunidad ITS, debido, sobre todo, a las restricciones legales existentes. En [2] se presentan algunas cuestiones sobre el uso de dispositivos electrónicos en vehículos. Como se detalla en este trabajo, aunque la legislación de diversos países está recientemente concienciada sobre los problemas de usar teléfonos móviles, no existe un acuerdo claro sobre cómo tratar el uso de otros muchos sistemas de a bordo.

Los fabricantes de automóviles necesitan diferenciarse de la competencia, ofreciendo nuevas funcionalidades en los vehículos, pero esto ha supuesto hasta el momento hardware adicional de a bordo. Nuevos dispositivos implican un coste añadido en el precio de un vehículo nuevo, pero también complicadas labores de mantenimiento e instalación de nuevas características para los existentes, que repercuten en el usuario final. Por esta razón, la incorporación de funcionalidades software está suponiendo una importante novedad en los últimos modelos de muchas casas. Sin embargo, para poder obtener beneficio de este modelo de negocio, es necesario disponer de una plataforma adecuada que pueda tratar eficientemente el ciclo de vida del software. El uso de diseños software modulares es muy importante de cara a conseguir este objetivo [111].

En este contexto, las **arquitecturas orientadas a servicios** (en inglés *Service Oriented Architectures*, o SOA), y en especial aquellas centradas en la creación de pasarelas de aplicaciones, se han mostrado en los últimos años como adecuadas para el entorno vehicular [15,20]. Los servicios web, principal concepto incluido por SOA, y el uso de servicios distribuidos, tal y como proponen Jini o CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) no ha se han visto especialmente reflejadas en el ámbito del vehículo. No ha sido así, sin embargo, con las pasarelas de servicios a través de la tecnología OSGi. Su aplicación sobre sistemas software de a bordo se ha extendido en los últimos años.

OSGi [112], o *Open Service Gateway initiative*, comprende una especificación para el diseño de plataformas software que pueden proporcionar múltiples funcionalidades. Este sistema sustenta un entorno orientado a servicios, en donde es posible gestionar el ciclo de vida de los componentes software, los cuales pueden ser instalados, actualizados o eliminados sin ningún tipo de interrupción en el funcionamiento del dispositivo. Las especificaciones de OSGi no son propietarias, con lo que cualquiera puede realizar una implementación del *framework*. Disponiendo de este *framework*, es posible utilizar una plataforma Java en la que las aplicaciones conviven bajo la misma máquina virtual y se gestionan de forma modular. OSGi ofrece un entorno seguro de ejecución, en el que las entidades software se comunican a través del *framework* OSGi en el que son instaladas.

En la Fig. 2.2 se distinguen en amarillo los principales elementos de la arquitectura

de OSGi. Sobre un hardware no determinado, pero que usualmente consiste un una arquitectura PC, se sitúa un entorno de ejecución. Éste último determina el framework que podrá ejecutarse. Por lo general, los frameworks disponibles se ejecutan sobre Java, por lo que el entorno de ejecución suele ser una máquina virtual java (JVM). OSGi ofrece entonces un conjunto de funcionalidades para la instalación y gestión del ciclo de vida de módulos software, el registro de servicios ofrecidos por estos módulos al resto, y un conjunto de servicios de base. Los servicios estándar ofrecidos por el framework están continuamente creciendo, y permiten por ejemplo acceder a dispositivos UPnP (*Universal Plug and Play*), crear un servidor HTTP o parsear ficheros XML (*Extensive Markup Language*).

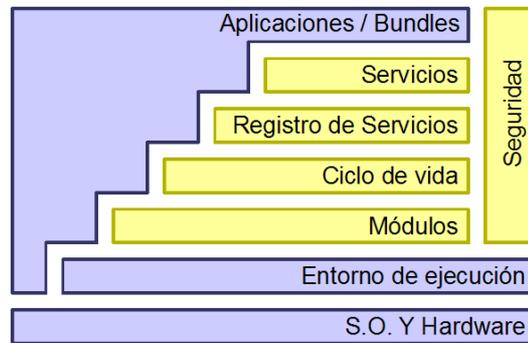


Figura 2.2: Arquitectura de OSGi

Inicialmente, la concepción de OSGi estuvo centrada en la creación de pasarelas residenciales, en las que se instalaba el software que dotaba a la casa de “inteligencia” era instalado [42, 43]. Sin embargo, las ventajas de OSGi se han extendido a otros campos como la telefonía, la automatización industrial o el propio vehículo. La *OSGi Alliance* [113] dispone de un grupo de trabajo dedicado a extender la especificación de OSGi con los requisitos de los fabricantes del automóvil. BMW se encuentra actualmente colaborando de forma activa en este ámbito, e incluso sus vehículos de la gama Serie 5 han considerado un framework OSGi como plataforma software, como parte del trabajo realizado en el proyecto europeo GST [114].

Tal y como describe el capítulo 3, en la tesis doctoral se hace uso de OSGi para crear una arquitectura modular multi-capa en la que instalar los componentes software de a bordo.

2.2. Sistemas de Navegación por Satélite

La navegación se define como la ciencia que se encarga de guiar a una persona o móvil de un sitio a otro [115]. Las personas en su vida cotidiana siguen técnicas de navegación sin pensar siquiera en este concepto. Mediante los sentidos y la memoria, el ser humano es capaz de “navegar” desde un lugar a otro. Sin embargo, existen

situaciones en las que esta capacidad no es de por sí suficiente, y se deben usar técnicas de posicionamiento y orientación adicionales.

Existen cinco técnicas básicas de navegación [74]:

Pilotaje Mediante un conjunto de marcas de referencia es posible conocer la posición actual y la siguiente. El pilotaje ha sido usado desde la prehistoria por los seres humanos.

Navegación celestial Considerando la hora actual y midiendo los ángulos con cuerpos celestes, se puede estimar la orientación, latitud y longitud local.

Dead reckoning Sabiendo la posición inicial, y disponiendo de la orientación y de la velocidad de movimiento, es posible disponer de información de navegación.

Radio-navegación Mediante fuentes de señales radio provenientes de lugares conocidos se puede calcular la posición actual.

Navegación inercial Considerando un concepto similar a *dead reckoning*, la navegación inercial se basa un conocimiento inicial de la posición, velocidad y orientación, para posteriormente inferir posiciones futuras considerando medidas de aceleración.

A partir de las tres primeras técnicas tradicionales, la radio navegación y la más reciente navegación inercial están siendo muy estudiadas en la actualidad, presentando un campo de aplicaciones tremendo. Los casos más comunes son el marítimo y la aviación, aunque el transporte terrestre comprende un campo emergente en los últimos años. Es precisamente en este último caso en donde se encuadra la tesis doctoral. Si bien las técnicas de navegación inercial están avanzando progresivamente hacia soluciones viables en entornos de circulación real [107], el coste y la complejidad de los sistemas son los principales escollos a superar. Los sistemas radio conforman la principal base tecnológica en los sistemas de navegación modernos, e incluso los sistemas inerciales se consideran complementarios a estos, puesto que es necesario un posicionamiento global de referencia.

En navegación por radio, las señales enviadas por una o varias estaciones permiten al equipo del usuario calcular la posición. Dicho equipamiento, comúnmente denominado *receptor*, se encarga de determinar la distancia a dichas estaciones, cuya localización es conocida. Este cálculo suele realizarse en base al tiempo que tardan las señales en llegar hasta el receptor. La localización de las estaciones de referencia diversifica a los sistemas de navegación radio en terrestres y espaciales; y la frecuencia usada en la transmisión de las señales determina tanto su precisión como disponibilidad. Usando altas frecuencias es posible determinar con gran exactitud la posición, pero se requiere de visión directa hacia las estaciones, observándose el resultado contrario a bajas frecuencias. Por esta razón se hace necesario encontrar un compromiso aceptable en soluciones con buena precisión y de alta disponibilidad.

Aunque los sistemas de localización terrestres se siguen usando, por ejemplo, en las radio balizas que marcan los trayectos aéreos, son los sistemas de localización por

satélite los que han presentado en los últimos años un mayor despliegue, pudiendo ofrecer capacidades de navegación con cobertura mundial. Éstos generalmente se denominan *sistemas globales de navegación por satélite* o GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), debido a que las estaciones de referencia que transmiten las señales radio son satélites en órbita alrededor de La Tierra. Actualmente existen dos despliegues GNSS operativos: el ruso GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) [116, 117], actualmente en fase de adecuación de las órbitas tras un periodo de cierta inactividad y, principalmente, el estadounidense GPS, o *Global Positioning System* [118, 119]. Europa se encuentra actualmente en proceso de desarrollo de su apuesta GNSS, mediante el sistema GALILEO [120]. Éste presenta novedosas características con respecto a sus predecesores, gracias al uso de tecnologías más sofisticadas en el diseño de los satélites y de las estaciones terrestres, que redundan en una mayor calidad de servicio para el usuario final.

2.2.1. La Referencia: GPS

En 1969 la Oficina del Secretariado de Defensa (OSD) de Estados Unidos comenzó un programa para la investigación en un sistema de navegación por satélite que unificase anteriores propuestas. Derivado de este propósito, un grupo de expertos comenzó el diseño del que hoy conocemos como NAVSTAR GPS, o simplemente GPS.

Visión General

Actualmente, el sistema cumple con los objetivos propuestos al inicio de su diseño, posicionamiento mundial de gran precisión en las tres coordenadas (principal característica), información de velocidad a los usuarios, e información horaria UTC (*Coordinated Universal Time*). 24 satélites organizados en seis órbitas, con cuatro de ellos cada una, junto con un conjunto de estaciones terrestres de control y monitorización, se encargan de ofrecer esta funcionalidad. El sistema hace uso del tiempo de llegada de las señales desde los satélites (*time of arrival*, o TOA) para que sea el receptor el encargado de calcular la posición final. Dichas señales están sincronizadas mediante relojes de alta precisión de a bordo en los satélites, y se encuentran moduladas mediante CDMA (*Code Division Multiple Access*) usando dos frecuencias L1 (1575.42 Mhz) y L2 (1227.6 Mhz). Cada satélite hace uso de estas frecuencias, pero usando códigos diferentes, según las bases de CDMA. La información que se transmite contiene datos de navegación de los propios satélites, para poder conocer su posición, como estaciones de referencia que son; pero, además, la propia señal modulada sirve para calcular la distancia hasta cada satélite mediante su tiempo de propagación. Para hacer uso de esta técnica, es necesario que el receptor disponga también de un reloj sincronizado con el de los satélites. En términos llanos, el satélite y el receptor disponen de relojes que marcan un instante de tiempo a la misma vez, de forma que, cuando al receptor llega la señal del satélite, es posible saber su tiempo de propagación calculando el desplazamiento entre la información del reloj local y la transmitida por el satélite, retardada por la propagación de la señal. Usando medidas TOA sería posible calcular

la posición con tres satélites, sin embargo, el reloj del receptor no es tan preciso como el de los satélites, por lo que es necesario una media adicional para compensar este error. Un conjunto de errores adicionales de propagación de la señal hacen que la distancia calculada hacia los satélites sea imprecisa, por lo que a estas medidas se las suele denominar *pseudo-distancias*.

Servicios Ofrecidos

A través de las frecuencias L1 y L2 se emiten dos señales moduladas con distintos códigos: C/A (*Coarse/Acquisition*) y P (*Precision*). Actualmente se usan ambos códigos en la frecuencia L1, pero en la L2 solamente el último. La capacidad para interpretar estos códigos determina el servicio del que es capaz de disfrutar el usuario. Mediante el uso del código C/A es posible determinar la posición según el servicio **SPS** (*Standard Positioning Service*), con una precisión asegurada por debajo de los 15 metros en el 95% de los casos. Usando ambos códigos C/A y P se puede hacer uso del servicio **PPS** (*Precise Positioning Service*), con el que se asegura una posición por debajo de los 10 metros en la mayoría de los casos. Sin embargo, el uso de PPS está reservado principalmente para ámbitos militares, mediante la encriptación del código P, lo que da lugar al código Y. Es por esto que generalmente se conoce a este código que aumenta la precisión del sistema como P(Y).

Los dos servicios ofrecidos por el GPS estándar están siendo actualmente ampliados mediante la definición de nuevas señales, siguiendo los mismos conceptos de calidad de servicio del nuevo GALILEO. Éste último divide la funcionalidad ofrecida en cinco servicios base: servicio abierto, servicio comercial, servicio crítico, servicio público regulado, y soporte para búsqueda y rescate. Mediante esta oferta, GALILEO asegura un sistema abierto al gran público y fuera de las restricciones militares, tal y como acarrea GPS; pero, a la misma vez, implementa una estrategia de negocio en la provisión de distintas capacidades en la navegación por satélite.

Arquitectura

El conjunto de entidades que componen GPS se dividen en tres segmentos diferenciados: segmento espacial, segmento de control y segmento de usuario. Dicha organización se puede ver reflejada en la Fig. 2.3. El **segmento espacial** está compuesto por el conjunto de satélites en órbita que proveen al usuario de señales de pseudo-distancia e información de navegación. Puesto que estas señales son unidireccionales, y se transmiten en *broadcast* (para todos los receptores) hacia la superficie terrestre, un gran número de usuarios puede hacer uso de GPS. El **segmento de control** monitoriza y mantiene operativos los satélites en órbita. Un conjunto de estaciones de monitorización, o MS (*Monitor Stations*), se encargan de obtener información sobre el estado de los satélites, como las órbitas seguidas, la información de navegación enviada, o el estado de las baterías y el resto del hardware. La estación de control principal, o MCS (*Master Control Station*), se encarga de procesar esta información y de enviar comandos de control y de modificación de los datos transmitidos

por los satélites. Esta gestión remota se hace a través de las antenas terrestres, o GA (*Ground Antennas*). Finalmente, el **segmento de usuario** comprende al equipo receptor, que se encarga de calcular la posición en base a la información recibida desde los satélites. El receptor procesa la señal L1, y algunos la L2, para determinar la posición de los satélites y la distancia hacia ellos. Las capacidades de estos receptores van desde el simple cálculo de la posición, como muchos de los sistemas de navegación portátiles para vehículos, hasta la provisión de una altitud muy precisa o el uso de complejos filtros de navegación.

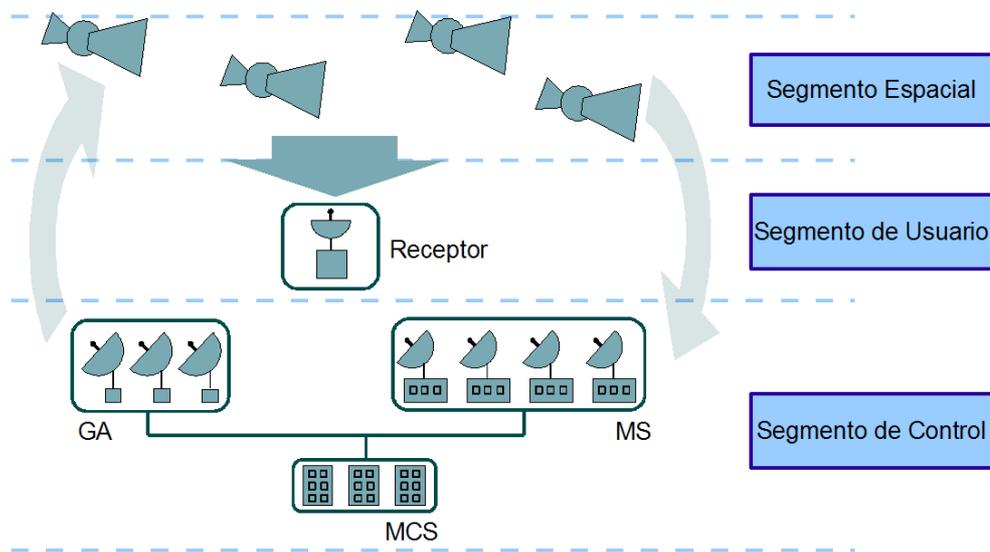


Figura 2.3: Arquitectura de GPS

2.2.2. Rendimiento de los Sistemas de Navegación por Satélite

Estudiar el rendimiento de los sistemas de navegación por satélite es esencial de cara a considerar su aplicación en determinados entornos. Sin embargo, los factores de rendimiento que deben considerarse van más allá de la precisión de la posición obtenida, ya que existen varias métricas que determinan el funcionamiento de un GNSS.

Factores de rendimiento

Los factores de rendimiento más considerados por la comunidad científica en el ámbito GNSS son los listados a continuación [121].

Precisión La precisión de un sistema de navegación viene dada por la diferencia entre la posición real y la calculada por el receptor. Los errores de precisión de GPS se deben fundamentalmente a la mala geometría de los satélites escogidos para calcular la posición, y a errores en las medidas de pseudo-distancia a los satélites. Posteriormente

se entrará en más detalle en estas dos cuestiones. No obstante, es importante remarcar que en aplicaciones en donde el cálculo de la posición implique riesgos humanos, como la detección de una colisión, por ejemplo, la precisión del sistema de navegación es clave [103].

Disponibilidad También podría entenderse como la cobertura que ofrece el sistema. Para poder calcular una posición mediante la triangulación llevada a cabo por el receptor se necesitan al menos cuatro distancias a satélites. La presencia de obstáculos, como árboles, edificios o túneles, provocan la pérdida de la señal y la consecuente degradación de la posición obtenida. La presencia de otros GNSS complementarios mejorará la disponibilidad futura de estos sistemas, tal y como se puede experimentar actualmente con el uso combinado de GPS y GLONASS [122].

Continuidad La continuidad comprende el uso ininterrumpido del sistema. GPS no asegura este requerimiento, y considera que se pueden producir cortes en el servicio debidos a problemas en la constelación de satélites o a cuestiones de seguridad militar. GALILEO está siendo diseñado para soslayar este inconveniente, mediante un servicio asegurado para uso civil.

Integridad La integridad se define como la capacidad del sistema de detectar anomalías en su funcionamiento, con tal de informar al usuario sobre el estado de la posición calculada. Tal y como se verá posteriormente, el receptor es el encargado de calcular la integridad del sistema, y en el cálculo de dicha métrica se puede llegar a usar información sobre el estado de la constelación satelital, emitida mediante sistemas adicionales.

Causas de error más significativas

Tal y como se ha descrito, la precisión de un GNSS se ve sujeta a diversos factores; y estos se dividen en dos principales: la geometría de los satélites usados, y los errores que se producen en la degradación de la señal recibida. La **geometría que forman los satélites** considerados para calcular la posición es un aspecto fundamental, sobre todo cuando los satélites disponibles son escasos. Cuando se dispone de satélites bien distribuidos en el rango de visión del receptor, es posible mitigar de mejor manera los errores que se comenten en las medidas de las pseudo-distancias. En la Fig. 2.4, se puede distinguir en la parte izquierda la intersección de las medidas recibidas por dos satélites bien distribuidos. El punto de color más oscuro corresponde a la posición real del usuario. Teniendo en cuenta que el error cometido en las dos pseudo-distancias determina un área de incertidumbre que se considera igual, cuando las medidas son “perpendiculares” se obtiene un área mucho más pequeña en donde recae la posición calculada. En el caso de la derecha, los satélites usados están relativamente cerca uno de otro, por lo que el área en donde recaerá la posición final es mucho más grande, repercutiendo en una menor precisión.

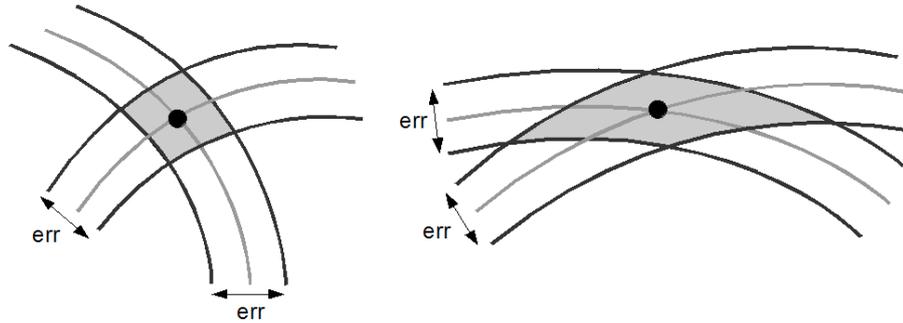


Figura 2.4: Geometría de los satélites en el cálculo de la posición y DOP

En la Fig. 2.4, el área de incertidumbre sobre la posición actual comprende lo que se denomina como pérdida de la precisión o DOP (*Dilution of Precision*). En la práctica, existen diversos valores que sirven como métricas de DOP, tal como el GDOP (*Geometric DOP*), que conforma la medida más general, al considerar los errores cometidos en las tres dimensiones y los debidos al reloj local del receptor; el PDOP (*Position DOP*), utilizando solamente las componentes de posición; el HDOP (*Horizontal DOP*), únicamente para el plano horizontal; el VDOP (*Vertical DOP*), para el vertical; y el TDOP (*Time DOP*), que mide el error cometido por el reloj del receptor. Analíticamente, estos valores se calculan en base a la posición de los satélites con respecto a la localización del usuario [115].

En lo relativo a los **errores en las medidas de pseudo-distancia**, estas se pueden clasificar en dos grupos: *errores comunes y no comunes* [74]. Éstos últimos consisten en errores que se producen en el lado del usuario, altamente variables, cuyo modelado es complicado en la mayoría de los casos. Entre ellos, los más destacables son:

- *Multipath*. El *multipath* (o multi-trayecto) se produce cuando la señal del satélite alcanza la antena del receptor mediante un camino distinto a la línea de visión entre ambos. Este efecto varía en función de la elevación del satélite con respecto a la superficie terrestre, el entorno de circulación, la ganancia de la antena, y las posibilidades del hardware para tratarlo.
- Atenuación. La atenuación se produce cuando la señal atraviesa materiales que debilitan su intensidad. Como resultado, la calidad de recepción se ve afectada. Tal y como ocurre con el *multipath*, las condiciones externas y las características del hardware influyen en el tratamiento de esta fuente de error.
- Ruido y resolución del receptor. El ruido térmico y la interferencia ocasionada por el hardware, hacen que se produzcan errores de medición en las pseudo-distancias. Las capacidades del hardware para llevar un reloj lo más sincrónico posible, y una fina resolución de las pseudo-distancias, también afectan en el cálculo de la posición final.

- Desviación implicada por el resto del hardware. GPS asume que el receptor es capaz de interpretar las señales L1 y L2 para calcular la distancia al satélite. Sin embargo, los receptores de gama media y baja no disponen de esta capacidad, lo cual afecta al cálculo final. Además, los errores relativos a retardos en el procesamiento de las señales, desde que llegan a la antena hasta que son procesadas por la electrónica interna del receptor, también deben considerarse.

A diferencia de estas fuentes anteriores de error, los errores comunes se presentan para todos los usuarios situados en una zona geográfica determinada. Los principales a considerar son los siguientes:

- Disponibilidad Selectiva. La *Selective Availability* (SA) fue un mecanismo aplicado por el Departamento de Defensa estadounidense para controlar la precisión final que se podía obtener con GPS. La SA degradaba la precisión hasta 100 metros en el plano horizontal y 156 en el vertical. La técnica consistía en modificar la percepción que el receptor podía tener sobre la posición de los satélites, para así desviar el cálculo final. Su desactivación en el año 2000 ofreció al gran público el servicio SPS por completo.
- Propagación en la ionosfera. El conjunto de gases que se encuentran en la ionosfera (entre los 50 y 1000 Km por encima de la superficie terrestre) forman una nube de iones que modifican la velocidad de propagación de las señales GPS. Como consecuencia, las medidas de pseudo-distancia se ven afectadas. Su efecto depende de la radiación solar actual y de la posición del satélite con respecto al receptor.
- Propagación en la troposfera. El vapor de agua y los gases de las partes bajas de la atmósfera hacen que la propagación de la señal también se vea afectada en la troposfera. Disponer de mediciones sobre las condiciones locales de temperatura, presión y humedad, permiten en gran medida suavizar este efecto.

Las fuentes de error comunes, a diferencia de las no comunes, pueden tratarse mediante correcciones finales en las medidas de pseudo-distancia. Como se verá a continuación, estas correcciones diferenciales son útiles para los usuarios localizados en las inmediaciones, ya que las condiciones de error se reproducen en grandes áreas.

2.2.3. GNSS Diferencial

Las correcciones diferenciales son aplicadas desde hace años en los GNSS. Generalmente, esta técnica se suele emplear junto con GPS, y es por esto que a las técnicas de corrección diferencial se las suele denominar DGPS (*Differential GPS*). El funcionamiento básico de un sistema de corrección diferencial se centra en la transmisión de desviaciones en las medidas de distancia hacia los satélites. Dicho trabajo es llevado a cabo por una estación de referencia. En el lado del usuario, el equipo receptor de la señal GNSS aplica las correcciones recibidas, con lo que consigue mejorar

la posición final. Existen, sin embargo, diversos métodos para ofrecer correcciones diferenciales.

Si tenemos en cuenta el momento en que se aplican las correcciones, podemos distinguir entre técnicas de corrección diferencial en post-proceso o en tiempo real. En el primero de los casos, la información de navegación recogida durante un periodo de funcionamiento del receptor, es utilizada para aplicar las correcciones diferenciales a posteriori. Dicho procedimiento es especialmente usado en labores de recolección de datos cartográficos, mediciones de terrenos y estudios geográficos. Las correcciones suelen ofrecerse a través de Internet, como es el caso del servicio ofrecido por la Consejería de Industria y Medio Ambiente de la Región de Murcia¹. Por otro lado, en los casos en los que es necesario disponer de buena precisión durante la navegación, es necesario hacer uso de técnicas de corrección en tiempo real. En este caso, los mensajes son recibidos, generalmente, mediante un enlace radio, y aplicados por el propio receptor en el momento de calcular la posición.

Atendiendo al rango de cobertura sobre el que funciona un sistema DGPS, podemos diferenciar entre sistemas locales o LADGPS (*Local Area DGPS*), y sistemas de área extensa o WADGPS (*Wide Area DGPS*). En el caso de las soluciones LADGPS, las estaciones de referencia están situadas en lugares próximos a los usuarios potenciales. En este caso, las desviaciones detectadas por las estaciones de referencia también serán comunes para todos los usuarios situados en los alrededores, puesto que las condiciones atmosféricas y geográficas son similares. La efectividad del sistema se ve degradada, obviamente, por el aumento de la distancia entre el usuario y la estación de referencia. Por otro lado, los sistemas WADGPS ofrecen correcciones sobre grandes zonas geográficas. En este caso, un conjunto de estaciones de monitorización distribuidas por las zonas de cobertura del servicio realizan medidas de rendimiento de GPS. Dichos datos son recogidos por una estación central, la cual se encarga de realizar una distribución global de la información de corrección. Los WADGPS que usan como medio de distribución satélites geoestacionarios son los llamados *Satellite Based Augmentation Systems*, o SBAS. El europeo EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) y el Norteamericano WAAS (*Wide Area Augmentation System*) son ejemplos de dichos sistemas.

Puesto que la tesis doctoral está centrada en navegación terrestre, el interés se centrará en los mecanismos de provisión de correcciones WADGPS y en tiempo real, como es el caso de EGNOS. Puesto que los servicios que ofrece el vehículo dependen de la posición actual del mismo, de nada serviría aplicar correcciones a posteriori; y, de la misma manera, no es factible el despliegue de estaciones de referencia para ofrecer cobertura LADGPS por toda la red de carreteras existente.

2.2.4. La Apuesta Europea EGNOS y el Servicio SISNeT

Como se vio anteriormente, existen diversos parámetros de rendimiento que los GNSS deben afrontar: precisión, disponibilidad, continuidad e integridad. Las

¹<http://gps.medioambiente.carm.es/>

aplicaciones y servicios más avanzados desarrollados en los últimos años se han enfrentado a carencias en cuanto a estos factores en los sistemas de navegación actuales. Por este motivo, diversos gobiernos se embarcaron en el desarrollo de arquitecturas SBAS que pudieran aliviar las necesidades del momento [123]. Mediante un conjunto de estaciones de monitorización avanzadas, los SBAS estudian el comportamiento de la constelación GNSS y envían mensajes de corrección diferencial, vía satélites geoestacionarios, que mejoran sensiblemente la precisión. Además, estos satélites complementarios ofrecen la posibilidad de ser usados dentro del cálculo de la posición, al enviar señales de navegación de igual forma a los GPS o GLONASS convencionales. Esta característica mejora la disponibilidad mediante una cobertura aumentada, e incrementa en cierto grado la continuidad, frente al posible fallo de alguno de los satélites de navegación convencionales.

Si bien el objetivo primordial de los despliegues SBAS se basó en su momento en aumentar la precisión, tras la eliminación de la disponibilidad selectiva la mejora ya no es tan apreciable. Aparte de mejorar también sensiblemente la disponibilidad y continuidad del sistema, la novedad que hoy en día suponen los SBAS se centra en la posibilidad de monitorizar la integridad del sistema de posicionamiento. Tal y como se verá en el capítulo 4, el cálculo de la integridad es un aspecto fundamental en la navegación terrestre.

La arquitectura SBAS EGNOS [124] representa la primera iniciativa europea en el campo de la navegación por satélite. Iniciado en 1994, EGNOS comprende un proyecto sustentado por un acuerdo entre la Agencia Espacial Europea (ESA), EUROCONTROL (*European Organisation for the Safety of Air Navigation*), y la Comisión Europea. La función principal de EGNOS no difiere en demasía con la idea del anterior WAAS, y se centra en cubrir las funcionalidades SBAS anteriormente citadas en el territorio europeo, mediante información complementaria de navegación.

En la Fig. 2.5 se muestra la arquitectura de EGNOS a grandes rasgos. Como se puede observar, un conjunto de estaciones de monitorización, denominadas *Reference and Integrity Monitoring Stations* (RIMS), son las encargadas de recoger datos sobre el funcionamiento de los GNSS desplegados hasta el momento, el americano GPS y el ruso GLONASS. Los centros de control de EGNOS, o *Mission Control Centre* (MCC), realizan un estudio del rendimiento de los sistemas de posicionamiento y, posteriormente, generan información sobre corrección e integridad de la posición. Generalmente, sólo un MCC está activo, quedando los demás a la espera de la ocurrencia de algún fallo de funcionamiento, lo cual ofrece mayor fiabilidad al sistema. La información generada por el MCC es entonces dirigida hacia las estaciones de transmisión o *Navigation Land Earth Station* (NLES), las cuales se encargan de mandar los mensajes EGNOS hacia el satélite geoestacionario, quien, a su vez, retransmite dicha información a los usuarios finales. Es notable cómo la arquitectura de los SBAS, y en este caso la de EGNOS, presenta gran similitud con la de los GNSS convencionales. Esto no es casualidad, ya que se hace uso de la experiencia previa en navegación por satélite para monitorizar y utilizar los satélites como retransmisores de información de navegación. En el futuro, esta convergencia se plasmará en nuevos GNSS como GALILEO o GPS III (la evolución del actual GPS), que ya incorporarán información

de valor añadido de integridad y mejorarán el rendimiento mediante nuevos satélites y estaciones de monitorización. De hecho, EGNOS se considera como un paso intermedio para el despliegue del futuro GALILEO [121].

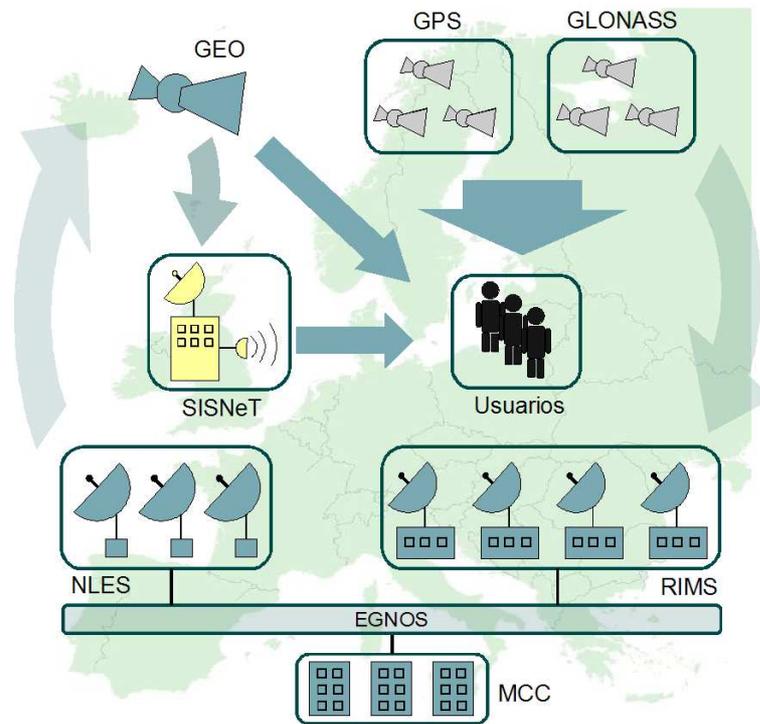


Figura 2.5: Arquitectura de EGNOS y la incorporación de SISNeT

La recepción de los mensajes SBAS desde un vehículo implica, no obstante, diversos requerimientos que en algunos casos son difíciles de solventar:

- Es necesario disponer de un receptor capaz de interpretar los mensajes. Muchos de los receptores actuales de gama baja, tales como los incorporados en navegadores comerciales, los que se integran en dispositivos móviles, o los que se venden con soporte Bluetooth por separado, no disponen de capacidades SBAS, por la complejidad que conlleva.
- Los receptores heredados presentan el mismo problema, por no soportar el sistema.
- Para recibir los mensajes SBAS es necesario disponer de cobertura hacia el satélite geostacionario, lo cual presenta un inconveniente en la circulación terrestre por zonas urbanas y de montaña.
- Según se ha comprobado [125], la discontinuidad en la calidad de la señal SBAS afecta al algoritmo de cálculo de la posición. Esto es debido a la degradación de las correcciones con el paso del tiempo.

En el año 2001 la ESA puso en funcionamiento la tecnología SISNeT (*Signal in Space through the Internet*) [126], con la que los mensajes EGNOS se retransmiten a través de Internet. La Fig. 2.5 ilustra este sistema, en donde una estación de la ESA dotada de un receptor compatible SBAS recibe los mensajes EGNOS y los manda al usuario final, el cual puede optar por usar EGNOS a través del satélite geostacionario o a través de Internet. Mediante un servidor emplazado en las instalaciones de la ESA, los usuarios pueden darse de alta en el servicio para, a partir de este momento, poder enviar solicitudes de mensajes al servidor. Aparte de recibir los mensajes que genera EGNOS en tiempo real, es posible disponer de mensajes enviados con anterioridad, lo cual acelera el proceso de arranque de los receptores. Algunos mensajes que son fundamentales para interpretar la información de corrección e integridad se transmiten con una frecuencia muy baja, con lo que en determinadas ocasiones el arranque del sistema puede demorarse. La integración de SISNeT en un sistema de navegación ofrece, por tanto, disponibilidad de EGNOS en emplazamientos sin cobertura hacia el satélite geostacionario. En la presente tesis doctoral se hace uso de SISNeT y de la emisión convencional del satélite geostacionario para escoger la mejor fuente EGNOS en cada momento y, así, disponer de información de integridad y mejoras en el posicionamiento de forma constante.

2.2.5. Monitorización de la Integridad

Además de ofrecer posicionamiento, navegación y referencia horaria, los GNSS deben ser capaces de informar con un retardo reducido de cuándo el sistema no debe ser usado. Este concepto se conoce como integridad del sistema. En términos globales, la integridad corresponde con una medida de la confianza que se puede tener acerca de la bondad de la información provista por el sistema. Se pueden producir diversas **anomalías en la arquitectura del GNSS** en los segmentos de control y espacial, que pueden redundar en impredecibles errores de posicionamiento no detectables por el equipamiento del usuario. Las fuentes de estas anomalías se pueden resumir en las siguientes:

- Transmisión de las señales de navegación. La transmisión de las señales de navegación desde los satélites puede dejar de estar disponible por problemas hardware en las comunicaciones, o por un desplazamiento inesperado de la órbita o pose del satélite.
- Errores localizados en los satélites. La imprecisión los relojes de los satélites son la principal fuente de anomalías en el segmento espacial de los GNSS, y pueden ocasionar desplazamientos de miles de metros en las medidas de pseudo-distancia hasta que son detectados y corregidos. Otros errores de menor magnitud se deben a pequeños fallos en el hardware de a bordo, que llegan a ser difícilmente detectables.
- Monitorización en el segmento de control. Debido a que todos los satélites de la constelación de un GNSS no están en el rango de las estaciones de monitorización

terrestre las 24 horas del día, un problema en un satélite puede quedar oculto decenas de minutos hasta ser detectado. Además, errores en el software de las estaciones de control, y diversos descuidos humanos, pueden producir datos incorrectos que son mandados hacia la constelación satelital.

Con el objetivo de tratar estas anomalías, en los sistemas de navegación actuales (principalmente GPS) se hace necesario disponer de técnicas que permitan detectar o medir estos errores. Los principales **métodos para cuantificar la integridad** de un GNSS son los tres siguientes:

RAIM El algoritmo RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) [115] es implementado por el propio equipo receptor, y se basa en una solución sobredeterminada en el cálculo de la posición para realizar un estudio de la consistencia de las medidas de cada satélite. Mediante un mínimo de cinco satélites, RAIM alerta al usuario de que el GNSS usado no es adecuado para la navegación, y con un mínimo de seis es capaz de eliminar la pseudo-distancia del satélite afectado para obtener una posición fiable. Como entrada al algoritmo se consideran la desviación estándar del ruido de la medición, la geometría de la pseudo-distancia, y la probabilidad máxima que se considera aceptable de que el algoritmo pueda fallar. Como salida se obtiene el HPL (o *Horizontal Protection Level*), que implica un radio de un círculo centrado en la posición real del móvil en donde se asegura que cae la posición calculada. Dicho área se considera fiable con el margen de error especificado como entrada. Para navegación terrestre y marítima, el HPL es el factor de referencia fundamental, sin embargo, para aviación también se considera de importancia un factor derivado: el VPL (*Vertical Protection Level*).

SBAS Aún considerando un buen receptor, existen ocasiones en las que es imposible disponer de cinco satélites para detectar fallos, y de seis para poder descartar satélites. Por este motivo, los sistemas SBAS comprenden una tecnología alternativa a RAIM. Mediante los satélites geoestacionarios, además de enviar información de corrección diferencial y de proveer una cobertura añadida, se envían mensajes con información sobre la integridad del sistema. Estos datos se consideran como entrada para calcular un factor de integridad similar al considerado en RAIM, y que incluso recibe el mismo nombre: HPL [47]. No obstante, a este factor se le suele denominar también HPL_{WAAS} o HPL_{SBAS} , para diferenciar el resultado obtenido con RAIM. Lo mismo ocurre con VPL_{WAAS} o VPL_{SBAS} .

GBAS Los sistemas de aumento basados en estaciones terrestres, o GBAS (*Ground Based Augmentation System*), no procesan el mismo interés que los comunes SBAS, pero sí son usados en ámbitos muy específicos. Siguiendo una metodología LADGPS, un conjunto de estaciones terrestres analiza la señal recibida de los satélites GNSS, y ofrecen, por ejemplo, información de corrección diferencial e integridad para aviones en las inmediaciones de zonas de interés, como los

aeropuertos. Estos datos son generalmente transmitidos mediante señales radio VHF.

La principal aplicación de éstas técnicas se centra en entornos críticos, como la navegación aérea, sin embargo, conforme los sistemas de posicionamiento por satélite se adentran en la navegación terrestre, su utilidad en el ámbito vehicular aumenta. En el capítulo 4 se tratará el uso de EGNOS como fuente de provisión de integridad para aplicaciones destinadas al transporte por carretera.

2.3. Tecnologías de Comunicación Inter-Vehicular y con la Infraestructura

Las redes de comunicación de datos se han convertido en imprescindibles en la informática actual. Millones de transacciones se efectúan cada hora gracias a las redes de computadores. Obviamente, la expansión de Internet entre la población ha tenido mucho que ver en este despliegue, gracias a las capacidades de interconexión de diferentes tecnologías de red a nivel mundial. El vehículo no ha sido ajeno a este fenómeno, y en los últimos años también ha sido objeto de la aplicación de las redes de comunicación de datos bajo distintos ámbitos. La presente sección aborda el estado actual de las redes vehiculares mediante la revisión de los conceptos tecnológicos más relevantes en la literatura actual, y prestando especial atención a las propuestas respaldadas por ISO e IETF (*Internet Engineering Task Force*) como apuestas reales para un futuro próximo.

2.3.1. Las Redes de Comunicación Vehicular y Ámbitos de Estudio

Cuando se habla de redes de comunicación vehicular, o resumidamente *redes vehiculares*, se trata la aplicación de las redes de comunicación de datos entre ordenadores, para el caso particular del vehículo. No existe una distinción clara en cuanto a los ámbitos de estudio que entrarían dentro de las redes vehiculares, si bien la consideración más general aglutina tanto a las comunicaciones que se producen dentro del vehículo, como a las que se establecen entre el vehículo y otras entidades de su entorno [127]. Por este motivo, es importante remarcar los distintos **paradigmas de comunicación** que se pueden encontrar hoy día en las redes vehiculares:

Intra-vehículo Las redes de comunicación que se establecen en el interior del vehículo comprenden tanto a los buses de comunicación cableados de propósito más específico, como a las redes IP de ámbito local. Como tecnologías más habituales en buses de comunicación entre dispositivos de a bordo, destacan las comunicaciones serie convencionales, mediante RS-232 y RS-485 principalmente, LIN (*Local Interconnect Network*), y CAN (*Controller Area Network*). En cuanto a las tecnologías de comunicación convencionales en redes de ordenadores, cada

vez se están convirtiendo en más habituales en el interior del vehículo. Bluetooth se encuadra perfectamente como tecnología para la formación de redes de área personal (PAN), al admitir comunicación IP en distancias cortas. No obstante, Bluetooth se usa fundamentalmente en sistemas de manos libres. ZigBee, de más reciente aparición, también cubre perfectamente estas necesidades. Además de estas tecnologías inalámbricas, también Ethernet puede aplicarse en el interior del vehículo, aunque no presenta un especial atractivo hoy día.

Vehículo a vehículo Generalmente, estas redes caen dentro del término V2V (*vehicle to vehicle*), aunque algunos autores también se refieren a ellas como comunicaciones inter-vehiculares, *vehicle to vehicle communications* (VVC), o *inter-vehicle communications* (IVC)². Este campo particular de las redes vehiculares es el que ha recibido más atención por parte de la comunidad científica en los últimos años, fundamentada por los avances en las redes sin infraestructura, o *ad-hoc*. Posteriormente se discutirán en más detalle las tecnologías de red V2V.

Vehículo a infraestructura Las comunicaciones vehículo a infraestructura, o *vehicle to infrastructure* (V2I), han sido las responsables de la primera oleada de productos comerciales basados en redes vehiculares de nueva generación en los últimos años. Las aplicaciones de control de flotas y seguimiento de mercancías hacen uso de comunicaciones celulares, principalmente, para notificar de forma periódica el estado del móvil. En este paradigma de comunicación, es el vehículo el que hace uso de un canal de subida para comunicarse con una infraestructura centralizada o con un sistema localizado en el lado de la carretera. Es por esto último por lo que en algunos contextos también es posible leer *vehicle to road side communications* (V2R), o comunicaciones vehículo a carretera. Un ejemplo de esto son los sistemas de peaje electrónico basados en tecnologías inalámbricas de comunicación de corto alcance, en los que los vehículos realizan transacciones en determinados pórticos de control.

Infraestructura a vehículo Las comunicaciones infraestructura a vehículo o, de forma análoga al caso anterior, I2V (*infrastructure to vehicle*) o R2V (*road side to vehicle*), se pueden considerar tan antiguas como la común transmisión radio mediante FM. De hecho, el sistema RDS, ideado a principios de los noventa, permite realizar transmisiones digitales dentro de la banda FM, lo cual ha sido usado en sistemas de información de tráfico durante años. Por estas razones, las comunicaciones infraestructura a vehículo entraron en el ámbito comercial mucho antes que las V2I. Actualmente, las tecnologías satélite de comunicación de datos, incluidos los sistemas de navegación, se pueden considerar I2V, aunque la comunidad investigadora aboga por tecnologías de red similares al caso de V2I a la hora de encuadrar este término.

²En realidad, muchos aglutinan también dentro de las comunicaciones inter-vehiculares a las que involucran a la infraestructura o los dispositivos de la carretera. Para evitar confusión, en el resto del texto se usará V2V para denotar a las comunicaciones vehículo a vehículo.

Los dos últimos grupos se suelen considerar conjuntamente bajo el acrónimo V2I, o también mediante IVC (*infrastructure to vehicle communications*); aunque es importante apreciar que tanto las tecnologías inalámbricas de comunicación, como las tecnologías de red involucradas, difieren en muchos casos. No obstante, también es cierto que sistemas de telecomunicación como las redes celulares permiten la implementación de aplicaciones I2V y V2I.

Como se ha podido apreciar, las tecnologías de comunicación inalámbrica han habilitado el despliegue de las comunicaciones vehiculares. Incluso en las redes intra-vehículo se consideran ya mecanismos de comunicación sin cables. Gracias a las tecnologías inalámbricas, las redes de computadores pueden ofrecer aplicaciones avanzadas dentro de ITS, ampliando las capacidades de percepción del conductor. A pesar de que el entorno de circulación puede ser estudiado mediante sensorización diversa de a bordo, como radares o tecnologías de visión por computador, las **soluciones que adoptan una visión cooperativa**, frente a una autónoma, están ganando terreno en los últimos años desde su concepción a principios de los noventa [77]. Los sistemas autónomos de detección de colisión, por ejemplo, dan conocimiento de los obstáculos que el vehículo puede encontrar en su camino [128, 129], sin embargo, estos sistemas están restringidos por las capacidades de los sensores, además de no presentar soluciones económicamente viables. Mediante una aproximación cooperativa, las redes vehiculares pueden ofrecer un medio propicio para el intercambio de información útil sobre accidentes, problemas meteorológicos, reparaciones en la calzada, o una disminución brusca de la velocidad del vehículo que circula delante, por ejemplo.

2.3.2. Tecnologías de Comunicación Vehicular y su Aplicación Actual

Tal y como se ha dicho, los avances en las tecnologías de comunicación inalámbrica han supuesto el despliegue de redes de computadores hasta hace poco inimaginables. La aplicación de buena parte de éstas en redes vehiculares es obvia, ya que, como es de suponer, el vehículo no puede mantener un canal de comunicación cableado con el exterior. No obstante, como se describe más adelante, el uso de estas tecnologías en el ámbito del vehículo esta suponiendo una reciente revolución, ya que las tradicionalmente utilizadas en el ámbito de la informática domestica, corporativa, o incluso en telefonía, pueden no ser apropiadas para el campo del vehículo. Las redes vehiculares se caracterizan por una alta movilidad de los nodos (vehículos), y por topologías de red específicas que deben considerarse en el diseño de una solución V2V pura³. Estas características implican importantes tasas de error y conexiones de corta duración con el extremo físico de la comunicación, ya sea estación base u otro vehículo.

Las tecnologías de comunicación vehicular (inalámbricas) pueden clasificarse, a grosso modo, atendiendo al uso que se hace del medio de transmisión. De esta manera,

³Es importante aclarar que en una comunicación *V2V pura*, la conexión física se establece entre el equipamiento de los propios vehículos, a diferencia de, como se verá, posibles mecanismos de red *overlay*, en los cuales es posible emular una conexión V2V mediante redes infraestructura.

podemos diferenciar entre aquellas que usan medios de comunicación *unicast*, o 1-a-1, y aquellas que apuestan por un medio *broadcast*, o 1-a-n. En este último caso, una estación base está encargada de repartir el ancho de banda disponible entre los clientes, y de sincronizar su transmisión. Debido a esto, cuando el número de nodos servidos es muy alto, las capacidades de la red pueden ser insuficientes para algunas aplicaciones. En tecnologías de comunicación inalámbrica de corto alcance, el ancho de banda se divide generalmente entre pocos usuarios, por lo que el rendimiento suele ser bastante bueno, como es el caso de WLAN. Sin embargo, en tecnologías de comunicación con rangos de cobertura mayor, como las redes celulares, por ejemplo, la repartición eficiente del ancho de banda es más complicado, y las velocidades de transmisión suelen ser mucho menores, debido al gran número de usuarios que se pueden concentrar en los alrededores de la estación base. Obviamente, las redes de comunicación de corto alcance sufren el problema de ser menos estables, al presentarse frecuentes transiciones entre estaciones base, mecanismo que se conoce como *handover*. Para el caso de las comunicaciones V2V puras, la comunicación suele ser 1-a-1, sin ser necesaria la intervención de una estación base.

En la Tabla 2.1 se encuentran reflejadas las tecnologías de comunicación inalámbrica más usadas en el ámbito del vehículo, que serán descritas en mayor detalle en el resto de la presente sección. Tal y como se puede apreciar, se indica que WLAN, DSRC, WiMAX, las redes celulares y las comunicaciones vía satélite son válidas para comunicaciones con la infraestructura; no obstante, es importante remarcar su diferente aplicación. Para el caso de WLAN y DSRC, los vehículos generalmente establecen un enlace de comunicación local 1-a-1 con *transceivers* de comunicación situados en el lado de la carretera (RVC o VRC). En el caso de WiMAX, y también en el de las redes celulares y satélite, además de usarse un medio físico 1-a-n, la conexión extremo a extremo con la infraestructura suele establecerse con una central remota. Además, las redes celulares, y sobre todo las satélite, implican que el tráfico de la red vehicular debe pasar por las instalaciones del operador, disminuyendo en este sentido la flexibilidad de los posibles diseños.

Tabla 2.1: Tecnologías de comunicación inalámbrica usadas en redes vehiculares y su aplicabilidad

Tecnología	Cobertura	Medio	Tasa de transmisión	Banda de frecuencia	Estándar	Aplicabilidad en redes vehiculares		
						V2V	V2I	I2V
Bluetooth	100 m	1-to-n	1 Mbps	2.4 Ghz	IEEE 802.15.1	*		
WLAN	200 m	1-to-1 1-to-n	10-50 Mbps	2.4,5 Ghz	IEEE 802.11a/b/g	**	*	*
DSRC	1 Km	1-to-1	50 Mbps	5.9 Ghz	IEEE 802.11p	**	**	**
WiMAX	10 Km	1-to-n	~20 Mbps	2.4,5 Ghz	IEEE 802.16e	**	**	**
RDS/TMC	80 Km	1-to-n	1187.5 bps	87.5-108.0 Mhz	CENELEC EN 50067 CEN ENV 12313			**
Satelite	>10.000 Km	1-to-n	300-500 Kbps	950-1450 Mhz	n/a		*	**
Celular	10 Km	1-to-n	~10 Mbps	700-2600 Mhz	n/a		**	**

**-adecuada, *-posible, -no posible

Bluetooth

Bluetooth consiste en un estándar inalámbrico de transmisión de datos, descrito en IEEE 802.15.1, y especialmente ideado para comunicaciones de corto alcance entre dispositivos que generalmente se conectaban mediante puertos cableados. Gracias a Bluetooth es posible, sin embargo, crear redes PAN entre diversos nodos de comunicación. La banda de frecuencia usada se sitúa en los 2.4 Ghz y, debido al bajo consumo de energía que supone, su rango de comunicación está limitado a unas pocas decenas de metros. En la formación de PANs se crean unas pequeñas redes denominadas *piconets*, que pueden interconectarse formando las llamadas *scatternets*.

Las características de Bluetooth se adaptan perfectamente en soluciones de redes intra-vehículo [130]. Algunos investigadores también apuestan por el uso de Bluetooth para comunicaciones V2V [131]; sin embargo, el tiempo necesario para establecer las *piconets* y *scatternets* (en el orden de segundos) [132], y el alcance de la comunicación, limitan el despliegue de Bluetooth en redes vehiculares.

WLAN y DSRC

Las redes inalámbricas de área local, o *wireless local area networks* (WLAN), fueron creadas para cubrir las necesidades de las tecnologías LAN convencionales, como Ethernet, pero sin el uso de cableado. El conjunto de estándares que tratan las tecnologías WLAN caen dentro del grupo IEEE 802.11x, y generalmente describen protocolos de transmisión que conectan a los terminales con una estación base, que los enlaza al resto de la red cableada. Las especificaciones 802.11a/b/g son las más conocidas en WLAN. 802.11a fue la primera tecnología WLAN estandarizada, ofreciendo un máximo de 54 Mbps y radios de cobertura de hasta 100 metros. Sin embargo, la banda de los 5 Ghz no está disponible en muchos países (principalmente europeos), por lo que 802.11b ha sido la especificación más extendida. Ésta implementa los principales protocolos de 802.11a, pero usa la banda situada en 2.4 Ghz, lo cual disminuye también los problemas de atenuación de señal debidos a las paredes y otros obstáculos. El rango de comunicación aumenta así hasta los 140 metros, pero el ancho de banda se mantiene en los 11 Mbps. 802.11g mejora esta tasa de transferencia, usando un esquema de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiple access*).

Aunque el uso más común de las tecnologías 802.11 se centra en la conexión con una estación base, mediante lo que se conoce como *modo infraestructura*, los terminales también pueden configurarse para comunicarse directamente entre ellos, usando el *modo ad-hoc*. Éste último es preferido en aplicaciones V2V, como evitación de colisiones [3, 103], o en el diseño de protocolos de red muti-salto, o *multi-hop*, en las que se encaminan paquetes de datos entre vehículos que no se pueden comunicar directamente, usando otros como intermediarios [9]. No obstante, los estándares WLAN convencionales presentan limitaciones cuando se trata la transmisión de información crítica en el entorno vehicular [133]. Por esta razón, Estados Unidos, Japón y Europa, fundamentalmente, han definido las bandas de 5.8 y 5.9 Ghz para el despliegue de tecnologías de comunicación específicas para el transporte terrestre, conocidas

como comunicaciones dedicadas de corto alcance, o DSRC (*Dedicated Short Range Communications*). Una variación de los protocolos convencionales 802.11, conocido como 802.11p, está siendo usado como base para el despliegue de las tecnologías DSRC. Este estándar cubre los requerimientos de comunicación periódica de información de estado sobre el vehículo (como la posición o la velocidad), y la transmisión de mensajes críticos, tal como accidentes o descensos bruscos de la velocidad. Esto permite el despliegue efectivo de una gran variedad de aplicaciones y servicios vehiculares, usando tanto aproximaciones V2V [134], como comunicaciones con la infraestructura de la carretera [7].

WiMAX

WiMAX, o *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, implica una aplicación real del concepto de red de área metropolitana (MAN o *Metropolitan Area Network*) de forma inalámbrica. De esta manera, WiMAX trata de cubrir el vacío existente entre las redes celulares de tercera generación (3G) y las comunicación WLAN. Los dos estándares actualmente considerados son IEEE 802.16d e IEEE 802.16e. El primero de ellos está pensado para ser usado en estaciones fijas, como solución adecuada para conectar diferentes redes mediante enlaces inalámbricos, tal como edificios de una misma compañía, por ejemplo. 802.16d ofrece hasta 48 Km de alcance, y tasas de transmisión de hasta 70 Mbps. Por otro lado, la especificación 802.16e está pensada para usuarios móviles conectados a una estación base. Para ello se hace uso de modulación OFDM, que presenta un buen comportamiento en entornos de movilidad, en donde es común la presencia de interferencias, *multipath* y retardos considerables. La aplicación de WiMAX para el entorno vehicular se centra en el uso de 802.16e, por tanto. Éste ofrece movilidad de los nodos hasta 100 Km/h, y 10 Km de radio de cobertura hacia la estación base, lo cual lo hace perfecto para escenarios urbanos, donde los vehículos se pueden conectar mediante un amplio ancho de banda usando un despliegue WiMAX.

En este momento es posible obtener algunos dispositivos pre-WiMAX, pero se espera que, tan pronto como las especificaciones finales estén disponibles, el espectro de aplicaciones vehiculares con WiMAX crezca rápidamente. En [135] los autores analizan el rendimiento de WiMAX en el metro, donde la máxima velocidad considerada es 90 Km/h. Los resultados muestran que se pueden obtener resultados reales en el rango de 2 a 5.3 Mbps, con un retardo medio de ida y vuelta entre nodos de comunicación (RTT, o *round-trip delay time*) de 100 ms. Venturi ha diseñado un vehículo eléctrico que usa una interfaz de comunicación pre-WiMAX para ofrecer servicios de monitorización remota⁴, como trabajo conjunto entre el fabricante de vehículos e Intel.

RDS y TMC

El *Radio Data System* (RDS), o sistema de datos radio, fue desarrollado para portar información digital usando la banda FM común. Con RDS es posible multiplexar la emisión de sonido con datos digitales, tal como el nombre de la emisora o de la canción

⁴<http://www.venturi.fr/>

actual. Entre los demás posibles campos de información digital añadida, destaca un flag que indica al equipo receptor que debe prestar atención a un boletín de información de tráfico, cuando el usuario está reproduciendo un disco de música, por ejemplo. RDS ofrece una tasa de transmisión de 1187.5 bps, pero el rango de cobertura es tan grande como la estación FM lo permita (típicamente unos 80 Km). La versión de RDS desplegada en Estados Unidos se denomina RBDS (*Radio Broadcast Data System*), con un funcionamiento análogo a RDS, pero que está menos extendido.

Una solución más adecuada para la transmisión de información de tráfico la ofrece TMC (Traffic Message Channel), o canal de mensajes de tráfico. Con este sistema, los eventos sobre el estado del tráfico se envían digitalmente, por lo que un dispositivo de navegación puede informar al usuario y calcular una ruta alternativa, por ejemplo. Las notificaciones reportadas por TMC incluyen un identificador sobre el evento en cuestión y la localización del problema. Los datos TMC son generalmente transmitidos mediante RDS, y esta es la razón por la que ambas tecnologías suelen aparecer conjuntamente.

Satélite

Las comunicaciones por satélite involucran a tres entidades principales: estación emisora, satélites, y estación receptora. Los datos son enviados por la estación emisora al satélite, que se encarga del reenvío de la información a las estaciones receptoras. Las comunicaciones por satélite ofrecen una cobertura muy extensa, y suelen hacer uso de transmisiones en *broadcast*. Aplicadas al acceso a Internet, permiten interconectar áreas remotas, tales como parajes de alta montaña o islas, e incluso son útiles en países sin infraestructura de red, como los que se encuentran en vías de desarrollo.

Aunque las estaciones emisoras y receptoras están instaladas generalmente en emplazamientos fijos, como es el caso de la televisión digital, el equipo receptor puede ser móvil, y estar instalado en un vehículo. Los sistemas de navegación por satélite son un ejemplo de tal despliegue. En el ámbito de las comunicaciones vehiculares, este tipo de arquitecturas permite el desarrollo de soluciones I2V. Sin embargo, se deben considerar seriamente los problemas de retardo que se pueden dar, debido a la amplia distancia que deben recorrer las señales a través de los satélites. El ancho de banda que se puede obtener mediante este sistema se sitúa ente los 300 y los 500 Kbps. Considerar una estación emisora para el vehículo implicaría un hardware muy voluminoso, con una antena que necesitaría estar orientada hacia el satélite usado. Para los casos en los que se necesita de un enlace bidireccional, UDLR (UniDirectional Link Routing) [136] es una solución apropiada, ya que permite emular el canal de subida mediante otras tecnologías de comunicación alternativas, manteniendo el de bajada con la interfaz satélite.

Redes Celulares

Las redes celulares presentan un especial interés en la tesis doctoral, ya que la arquitectura de comunicación que se propone hace uso de ellas. Desde las iniciales tecnologías analógicas, tales como la estadounidense AMPS (*Advanced Mobile Phone*

System), las redes celulares han ido mejorando gradualmente no sólo en términos de disponibilidad a lo largo del mundo, sino también en la calidad del servicio ofrecido. Como resultado de aplicar las comunicaciones digitales a las redes celulares, el sistema global de comunicaciones móviles GSM (*Global System for Mobile communications*) ha alcanzado el propósito de hacer llegar los teléfonos móviles a la población de a pie. Tras su amplia adopción en Europa en la última década, GSM se está extendiendo en otros mercados emergentes, como el chino. GSM se identifica con la segunda generación de redes celulares (2G), que sustituye a la primera, basada en la tecnología analógica.

Aunque la principal preocupación de las redes celulares hasta hace algunos años estaba centrada en la telefonía, las conexiones de datos son cada vez más populares. GPRS (*General Packet Radio Service*) apareció con el propósito de ofrecer altas tasas de transmisión de datos, por encima de los 9.6 Kbps ofrecidos por GSM estándar. Éste sistema permite un máximo de 177 Kbps en el canal de bajada y 118 Kbps en el de subida, considerándose el paso intermedio entre las tecnologías 2G y 3G, motivo por el que se le denomina 2.5G. En los últimos años, la consideración de la modulación CDMA (*Code Division Multiple Access*) ha supuesto la aparición de las redes celulares de tercera generación (3G). CDMA2000, y UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) como evolución de GSM, son dos de las tecnologías 3G más extendidas. UMTS ofrece un máximo de 384 Kbps en el canal de bajada y 128 Kbps en el de subida, en su primera especificación (R99 o *Release 99*). Sin embargo, las operadoras de telefonía móvil empezaron a desplegar hace unos años la mejora en el canal de bajada que propone HSPA (*High Speed Packet Access*), conocida como HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), que mejora la comunicación entre la estación base (nodo B) y el terminal móvil, incrementando la velocidad de bajada hasta un máximo de 14.4 Mbps. El despliegue de HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) está también extendiéndose en Europa, mejorando la velocidad del canal de subida hasta los 5.76 Mbps en la actualidad. HSPA ha supuesto también una disminución notable en el retardo de la comunicación extremo a extremo, que ahora se sitúa en torno a los 150 ms en condiciones óptimas. En términos comerciales, a HSDPA se le conoce como 3.5G, y a la conjunción de éste con HSUPA como 3.5G+. El cambio hacia 4G vendrá de la mano de LTE (*Long Term Evolution*), que se encuentra actualmente en proceso de definición, y supondrá tasas de transferencia del orden de 100 Mbps en el canal de bajada, y 50 Mbps en el subida, además de retardos situados en decenas de milisegundos.

La introducción de las redes celulares en el entorno del vehículo comenzó hace varios años, cuando GSM y GPRS empezaron a usarse en sistemas de monitorización y seguimiento de vehículos. La aparición de GPRS hizo posible que se empezaran a considerar las redes celulares para proveer información de tráfico o alertas de emergencia en carretera [34]. Sin embargo, hasta la llegada de las tecnologías 3G, las bajas tasas de transmisión y los altos retardos han frenado el despliegue de las redes celulares en ITS [137]. Las ventajas de la interfaz física de comunicación de UMTS es defendida por muchos autores, en propuestas que incluso la consideran adecuada para comunicaciones V2V puras [138]. El uso de las redes UMTS ofrecidas por los operadores se pueden encontrar en propuestas de comunicación bidireccional con la

infraestructura en sistemas de monitorización de tráfico [139], por ejemplo, pero su aplicación en comunicaciones V2V es todavía un reto. El retardo había sido el principal impedimento hasta hace muy poco, pero también la facturación al operador por el uso de la red es un problema. La tendencia actual es pagar una cuota mensual, que se ve incrementada si la información transmitida queda fuera de unos límites prefijados. Se espera, sin embargo, que la amplia adopción de las conexiones de datos en UMTS, y los acuerdos entre proveedores de servicio y operadoras, hagan bajar estos costes [140]. Esto ya ha sucedido, por ejemplo, con el uso de las redes GSM en el sistema de peaje electrónico alemán Toll Collect⁵.

2.3.3. VANET

Las redes *ad-hoc* vehiculares, o VANET (*Vehicular Ad-hoc Network*), han sido en los últimos años el principal campo de investigación dentro de las comunicaciones en el transporte por carretera. VANET trata, no ya cuestiones de tecnologías de comunicación, sino principalmente cómo enrutar tráfico entre vehículos mediante comunicaciones V2V puras. Tal y como se vio en la sección anterior, las principales tecnologías usadas en VANET recaen en WLAN y, más recientemente, en DSRC. Muchas de las propuestas VANET provienen del mundo de MANET (*Mobile Ad-hoc Network*), presentando éste un área de investigación más general en redes sin infraestructura en donde los nodos están en movimiento. VANET se considera, pues, una aplicación específica de MANET para el caso del transporte por carretera, adentrándose en los ITS.

Redes Ad-hoc

Una red *ad-hoc* representa una red que no dispone de infraestructura, y en la que los mismos nodos se encargan de organizarse para formar una topología de comunicación. Cada nodo puede cumplir tres roles diferentes: origen de los datos, destino de los datos, o *router*. De esta forma, dos o más nodos pueden establecerse en red con tal de comunicarse entre ellos directamente, o mediante el reenvío intermedio de mensajes a través de otros nodos.

El campo de MANET es muy amplio, por lo que existen diversos parámetros con los que diferenciar los protocolos de enrutamiento que se usan para formar las redes. A grandes rasgos, un protocolo MANET se puede caracterizar atendiendo a los parámetros listados a continuación [141].

Momento de creación de las rutas En los protocolos proactivos, los nodos intercambian periódicamente información para actualizar sus tablas de rutas, para saber así hacia cuál de ellos redirigir un paquete cuando es necesario comunicarse con otro equipo de la red. En cambio, los protocolos reactivos intentan disminuir la sobrecarga de control que representan los anteriores, y calculan de forma dinámica la

⁵<http://www.toll-collect.com/>

ruta necesaria hacia el destino cuando es necesario establecer la comunicación. Como tercera aproximación, los protocolos híbridos intentan aprovechar las ventajas de los dos tipos anteriores, de manera que se usa enrutamiento proactivo en redes de pequeño tamaño, y reactivo cuando el tamaño de la ésta es demasiado grande. Mediante este sistema se alcanza un equilibrio adaptando el comportamiento del protocolo al entorno de aplicación. Ejemplos de protocolos proactivos son DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*), OSPF (*Open Shortest Path First*) y OLSR (*Optimized Link State Routing*). AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector*) y DSR (*Dinamic Source Routing*) son los protocolos reactivos más significativos; mientras que para el caso de los híbridos, ZRP (*Zone Routing Protocol*) y LAR (*Location Aided Routing*) son los más sonados.

Contenido de la tabla de rutas En los protocolos basados en vector de distancia, como AODV, los nodos comparten con sus vecinos una lista (vector) con las rutas a los destinos conocidos, de forma que cada nodo mantiene en la tabla de enrutamiento los caminos más cortos de los que es consciente hasta el momento. Por el contrario, en los protocolos basados en el estado de los enlaces, los nodos mantienen la topología completa de la red. Cada entrada en la tabla de rutas representa un camino conocido, que es calculado en base al estado del enlace que une al nodo origen con sus vecinos. La medida de la calidad de los enlaces locales con los nodos vecinos es un aspecto fundamental en estos algoritmos, lo cual produce protocolos más robustos, aunque también más costosos en cuanto a mensajes de control y requerimientos del hardware para estimar la calidad de la comunicación con los nodos cercanos. OLSR es un ejemplo de protocolo basado en estado del enlace.

Uso de las rutas para encaminar paquetes Algunos protocolos hacen uso de la información que tienen sobre la topología de la red para incluir desde el origen el conjunto de saltos por los que tiene que pasar el paquete de información, como es el caso del protocolo DSR. Estos se conocen como algoritmos de enrutamiento desde el origen. Por el contrario, en los protocolos *hop-by-hop* los nodos intermedios son los que deciden cuál es el siguiente salto para llegar al destino. Estos protocolos evitan posibles enlaces rotos de los que el nodo origen no se ha percatado todavía, pero tienen el problema de que pueden ocasionar rutas cíclicas. Un ejemplo de esta última metodología de enrutamiento son OLSR y AODV.

MANET vs. VANET

Aunque inicialmente se podría considerar que los protocolos usados en MANET podrían aplicarse directamente para el caso de VANET, existen algunos modelos que no son apropiados cuando los nodos son vehículos. Los aspectos fundamentales que caracterizan a las redes VANET son los siguientes [142]:

- Topología geográficamente restringida. La carretera limita las topologías VANET generalmente a una dimensión, que solamente varía por la presencia de puentes

y cruces de calles en entornos urbanos. Sin embargo, incluso en este último caso la presencia de edificios que apantallan la señal linealiza la topología. El uso de antenas directivas puede ser un aspecto importante a considerar en VANET, por tanto.

- Particionamiento y dimensión de la red. Debido a las grandes distancias que puede cubrir una red vehicular, es normal que una VANET sufra frecuentes particionamientos en grupos de vehículos.
- Movilidad predecible. Teniendo en cuenta que los vehículos siguen siempre la dirección de la carretera, se puede suponer que se mueven de forma lineal. Además, es posible predecir la velocidad a la que los nodos se desplazan si se dispone de información sobre la zona geográfica, ya que en ciudades y carreteras los límites de velocidad suelen estar establecidos.
- Consumo de energía. En el caso de VANET no se consideran restricciones en cuanto a la potencia consumida por los nodos para enrutar tráfico, tal como se estudia en las MANETs.
- Fiabilidad de los nodos. Debido a las altas velocidades que se dan en los nodos VANET, la presencia de un vehículo cercano puede ser un hecho transitorio, por lo que los protocolos no pueden confiar en un único nodo para reenviar paquetes.

Propuestas VANET

Aunque las primeras soluciones VANET estuvieron fuertemente ligadas a la investigación previa en el área de MANET, pronto empezaron a considerarse las características propias de las redes vehiculares descritas antes. Muchas de las soluciones VANET que ha aparecido en la última década hacen uso de *broadcast* directamente para hacer llegar mensajes a los vehículos que se encuentran a su alrededor [3]. Aunque estos desarrollos no consideran una malla de red como las que se forman en las comunes redes MANET, ya que no tratan el *routing multi-hop* a través de nodos intermedios, también se las incluye dentro de las redes VANET en la literatura. La mayoría de las soluciones que han pasado del diseño y la simulación en el campo de VANET, y han realizado un prototipo real, caen dentro de las soluciones *broadcast* [4]. Algunos trabajos intentan disminuir la sobrecarga que supone la emisión de mensajes en *broadcast* en situaciones en las que la densidad de tráfico es importante [143, 144]. Inundar el medio inalámbrico de mensajes, muchas veces replicados, degrada el rendimiento de la red VANET, puesto que se producen continuas colisiones de paquetes a nivel 802.11.

En el ámbito de las soluciones VANET *multi-hop* también se han llevado a cabo diversos trabajos para permitir que vehículos fuera del alcance de transmisión directa puedan comunicarse eficientemente. El uso de información geográfica sobre la posición del vehículo ha supuesto un importante número de propuestas [145]. La proliferación de receptores GPS en los vehículos permite que la posición del móvil pueda usarse para incrementar la eficiencia de los protocolos de enrutamiento. Ligado a esto, la detección

de estructuras estables, o *clusters*, de vehículos también permite enviar mensajes de forma mucho más eficiente [146]. El uso de posicionamiento GPS o de las propias tablas de rutas de los algoritmos usados, permite la detección de grupos de vehículos que circulan conjuntamente en una misma dirección, o que se encuentran próximos en un determinado periodo de tiempo. Cuando es necesario transmitir un mensajes de interés para todo el grupo (que suele ser muy habitual), el mensaje puede enviarse solamente a un representante del mismo, encargado de propagar la información al resto. Otra técnica que favorece la propagación eficiente de mensajes y que aminora los efectos del particionamiento de redes VANET, es el uso de la movilidad de los nodos para transportar mensajes [147]. Los propios vehículos pueden guardar un paquete de información recibido, con tal de llevarlo consigo un tiempo y reenviarlo cuando se cruzan con otros vehículos. En algunas ocasiones, la propagación de mensajes hacia los vehículos que circulan detrás en un entorno interurbano puede realizarse de forma mucho más rápida si se usan los vehículos en sentido contrario para tal fin.

La creación de sistemas reales es uno de los retos que se han heredado de las redes MANET. La complejidad para evaluar diseños de red que implican a muchos nodos bajo muy diversas condiciones de movilidad, hacen que la simulación sea la vía más adecuada en muchos casos. Sin embargo, es en el desarrollo de prototipos y sistemas reales en donde se descubre que las asunciones que en muchos casos se suponen a la hora de evaluar propuestas de protocolos MANET y VANET se desmontan con gran frecuencia [148]. En la literatura se pueden encontrar hasta el momento pocos trabajos en los que se analicen sistemas reales VANET, y los existentes están todavía centrados en pruebas iniciales de viabilidad de tecnologías WLAN y DSRC sobre entornos vehiculares. En [149] se estudia la aplicabilidad de 802.11b para establecer comunicaciones vehículo a vehículo puras en entornos urbanos e interurbanos, y se comprueba cómo la línea de visión directa es un aspecto fundamental en el rendimiento. Un estudio similar considerando diversas métricas de evaluación se puede encontrar en [150]. Usando también 802.11b, en [151] se estudia cómo la movilidad y diversos factores externos pueden afectar seriamente al rendimiento de la red. La comunicación entre el vehículo y una estación estática también presenta especial interés [50], debido a la relevancia de las aplicaciones RVC y VRC. Trabajos recientes incluyen análisis del rendimiento en condiciones *multi-hop* con tres [152] e incluso seis vehículos [153]. El estudio del rendimiento de TCP y UDP en redes VANET es también muy interesante [12, 154]. La mayoría del tráfico de Internet es TCP, pero las comunicaciones inalámbricas no presentan un buen rendimiento usando este protocolo de transporte.

2.3.4. Movilidad de la Red Intra-Vehículo en Internet

Actualmente, la mayoría de los servicios y aplicaciones vehiculares pueden usarse sin la necesidad de un direccionamiento global del ordenador de a bordo en Internet. La OBU puede, por ejemplo, hacer uso de un acceso a la red UMTS y disponer de una dirección IP transitoria, obtenida de forma dinámica. En otras aplicaciones VANET, la identificación de un nodo explícito de la red tampoco se hace necesaria, ya que interesa, por ejemplo, difundir un mensaje a los vehículos que se encuentran en los alrededores,

sobre un incidente de tráfico detectado. No obstante, existen ocasiones en las que es necesario que la dirección IP de los dispositivos de a bordo del vehículo se mantenga de forma global, con tal de que puedan ser accesibles a través de Internet continuamente.

La movilidad de los terminales en Internet puede definirse como el cambio de punto de conexión hacia la red global. Esta noción es, sin embargo, muy genérica, e incluye tanto movimientos geográficos como topológicos. Un movimiento geográfico implica que el terminal móvil se desplaza físicamente y, como consecuencia, cambia de punto de conexión a Internet. Este efecto es conocido como *handover* horizontal. Por el contrario, cuando se produce un movimiento topológico, la configuración cambia a nivel de red (cambio de direccionamiento) o se realiza incluso un cambio en la tecnología de comunicación utilizada. A este proceso se le conoce como *handover* vertical. Debido a la proliferación de tecnologías inalámbricas, este efecto es cada vez más frecuente en dispositivos con múltiples interfaces físicas de comunicación.

La movilidad en Internet ha sido especialmente considerada en los últimos años en el IETF, debido a la popularización de los terminales móviles con capacidades IP. Las primeras aproximaciones estuvieron basadas en tratar la movilidad de los terminales, y se fundamentaron en la propuesta denominada *Mobile IP* [155]. Sin embargo, con el despliegue de la nueva versión del protocolo IP (IP versión 6, o IPv6), esta propuesta derivó en *Mobile IPv6* [156], incluyendo numerosas mejoras respaldadas por IPv6.

NEMO

Si bien el tratamiento de la movilidad de los terminales presenta una solución factible para un sólo equipo, hay ocasiones en las que se desea aportar movilidad a toda una red. En este caso los terminales móviles no tienen porqué ser conscientes de los cambios que se producen en la conexión hacia Internet, puesto que es el *router* el que se encarga de implementar la funcionalidad necesaria. Para estos casos la propuesta presentada en el IETF se basa en el uso de *Network Mobility (NEMO) Basic Support* [157]. La idea subyacente de NEMO es similar a la usada en *Mobile IP(v6)*, y se centra en un servidor situado en Internet que se encarga de mantener la dirección IP actualmente asignada al *router* móvil (*Mobile Router*, o MR). A este servidor localizado en la Internet fija se le denomina *Home Agent (HA)*. NEMO se encarga de mantener un túnel bidireccional entre el MR y el HA. El MR sirve como salida por defecto hacia Internet para todos los terminales situados en la red móvil, denominados *Mobile Network Nodes (MNN)*; mientras que el HA se encarga de recibir el tráfico enviado a la red móvil y reenviarle los paquetes mediante el túnel establecido. La dirección variable que obtiene el MR hacia Internet es registrada en el HA, y se denomina *Care-of Address (CoA)*. El HA mantiene una dirección constante para el MR, conocida como *Home Address (HoA)*. Todos los terminales obtienen una dirección permanente derivada de un prefijo también constante, y registrado en el HA como *Mobile Network Prefix (MNP)*. Todo el tráfico saliente o entrante perteneciente a la red móvil pasa por el túnel establecido por NEMO entre el MR y el HA.

La aplicación de NEMO en el entorno vehicular se considera una aproximación más general que *Mobile IPv6*. Diversos terminales IP pueden estar funcionando en el

interior del habitáculo, por lo que el uso de NEMO se ve justificado para mantener la conectividad global de la red intra-vehículo [158]. La aplicación de IPv6 y NEMO a las redes vehiculares se ha visto reflejada en la arquitectura presentada por el proyecto InternetCAR [159, 160]. En la Fig. 2.6 se puede observar la integración de NEMO en una red vehicular. Un MNN situado en el vehículo de la izquierda (MNN A) es capaz de comunicarse con otro situado en otro vehículo (MNN B). El HA establecido para el primero de los vehículos (HA_1) mantiene un túnel IP sobre IP que permite encapsular paquetes provenientes de la red interna o con destino a la red interna. HA_2 realizada la misma labor para el segundo vehículo. De esta manera, ambos terminales pueden comunicarse a través de Internet en un entorno móvil, a la vez que pueden hacer uso de cualquier servicio de la red fija. La OBU del vehículo podría funcionar como MR, y ofrecer conectividad local a los MNNs mediante LAN común, Bluetooth, o WLAN, por ejemplo. La gestión de varios MRs ofreciendo distintas capacidades de red también supone un concepto interesante en ITS [161].

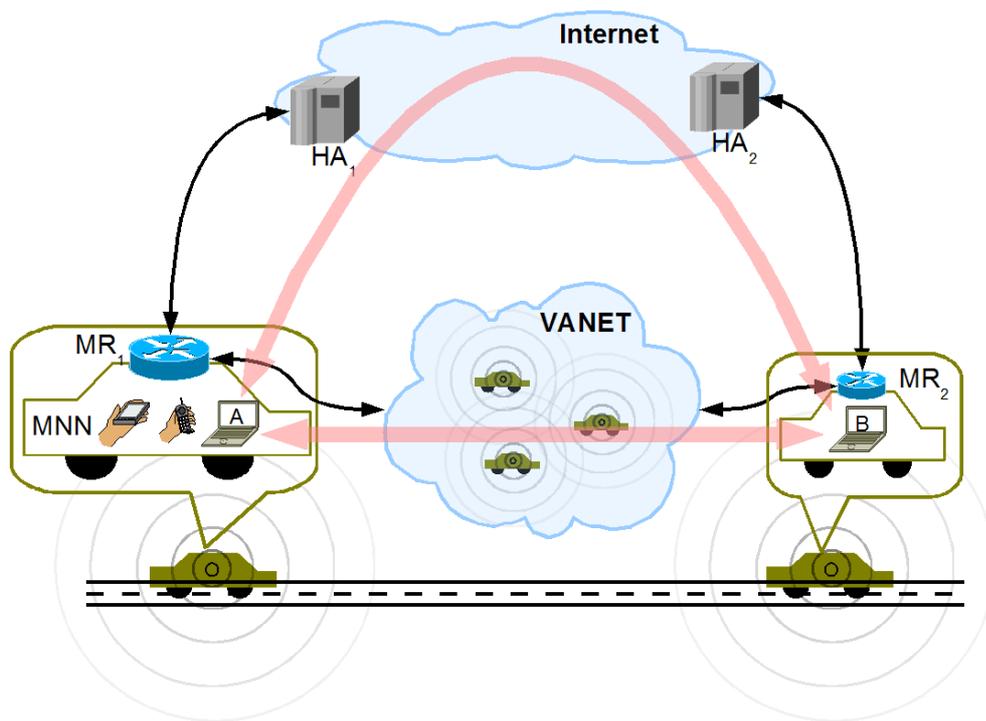


Figura 2.6: Aplicación de NEMO sobre el entorno vehicular

Multihoming

Los MR pueden disponer de varias interfaces de red conectadas a Internet, tal como WLAN, WiMAX, GPRS/UMTS, etc. Cuando un MR mantiene activadas todas las interfaces disponibles de forma simultánea, y dispone de diversos caminos para llegar a Internet, surge el concepto conocido como *multihoming*. En entornos móviles,

los MRs suelen sufrir frecuentes pérdidas de cobertura, variaciones en el retardo, e incluso fallos de conexión. Las condiciones que supone el *multihoming* permiten aliviar estos problemas [162].

En NEMO *Basic Support* se contempla solamente el caso particular de un solo MR, un solo HA, y el uso de un MNP. No obstante, la disposición de múltiples interfaces en el MR podría permitir la creación de varios túneles con el HA, de forma que el rendimiento total de la red se vería mejorado. Esta idea está actualmente discutiéndose en el *Network Working Group* del IETF.

Optimización de rutas

NEMO *Basic Support* presenta actualmente diversos problemas relacionados con los largos caminos que se pueden establecer para comunicar MNNs. Todo el tráfico de red relacionado con los MNNs se concentra por el túnel que mantiene el MR con el HA. La optimización de rutas (o *route optimization*) trata los problemas derivados de este esquema [163]:

- Las rutas por las que viajan los paquetes pueden ser muy largas, en comparación con la distancia real entre los extremos de la comunicación.
- La encapsulación de la información para circular por el túnel incrementa el tamaño de los paquetes, lo cual disminuye el rendimiento.
- El HA se convierte en un punto de fallo común que puede colapsarse cuando éste gestiona la comunicación de varios MRs.
- Cuando varios MR pueden anidarse dentro de la red móvil, los problemas anteriores se incrementan.

Considerando la experiencia de *Mobile IPv6*, se han propuesto diversas soluciones a estos problemas [164]. El *Car to Car Communication Consortium* se encuentra actualmente tratando esta cuestión para el caso particular de las redes vehiculares dentro del IETF.

2.3.5. Combinación de VANET y Movilidad IP

MANET y NEMO han sido diseñados como tecnologías independientes. NEMO se centra en proveer movilidad IP global a una red móvil, mientras que MANET (y por extensión VANET) se encarga de ofrecer enrutamiento entre nodos que no disponen de conexión a la infraestructura. Sin embargo, usando ambas tecnologías conjuntamente se puede obtener lo mejor de cada una sobre un mismo sistema. Esto es lo que se conoce como *MANEMO* (MANET and NEMO)⁶ [165]. Los caminos directos entre nodos, ofrecidos por la red MANET, pueden solucionar los problemas de optimización de rutas de NEMO anteriormente mencionados. Igualmente, aprovechando la doble

⁶MANEMO se encuentra actualmente en definición dentro del IETF

conectividad (*multihoming*) de los MR, es posible mejorar el rendimiento global de la red de comunicaciones, ya que el tráfico destinado a los vehículos circundantes puede dirigirse por la red VANET, mientras que la interfaz conectada a Internet puede usarse para el resto del tráfico.

La Fig. 2.6 ilustra la idea anterior. Tal como se puede observar, el *router* móvil de cada uno de los dos vehículos dispone de conectividad ad-hoc mediante la red VANET, y global mediante el uso de NEMO. La comunicación entre los MNN A y B puede llevarse a cabo mediante cualquiera de estas dos vías. La elección de un camino u otro tendrá que verse priorizada en la tabla de rutas. En [166] se aplica una técnica basada en políticas para la elección de las rutas directas mediante VANET o de la conexión NEMO.

2.3.6. Integración de Tecnologías de Red en CALM

La cantidad de tecnologías de acceso inalámbrico de red es bastante amplia en la actualidad, y se espera que siga creciendo en los próximos años. Además, las tecnologías de nivel de red que intentan dar cabida a soluciones particulares dentro de ITS también son habituales, a pesar de los esfuerzos de muchos investigadores por aplicar las propuestas generales de la IETF para el caso del vehículo. Esta diversidad tecnológica se traduce en la falta de arquitecturas telemáticas globales para ITS. Tal y como se introdujo en el capítulo 1, este es el fundamento la tesis doctoral. La ISO, por su parte, se encuentra desarrollando esta idea, dentro de la propuesta del TC204 denominada *Communications Access for Land Mobiles*, o CALM [167]. La idea principal de esta arquitectura es proveer una solución basada en capas que permita una comunicación continua, o casi continua, entre vehículos y con la infraestructura, usando múltiples tecnologías de comunicación, y seleccionando la más adecuada dependiendo del entorno.

El conjunto de servicios que se consideran en CALM contempla aplicaciones V2V, V2I e I2V, diferenciando así los dos sentidos del tráfico en las comunicaciones con la infraestructura, tal y como se defendió al comienzo de la presente sección. CALM considera también las comunicaciones infraestructura a infraestructura, ya que determinadas instalaciones en el lado de la carretera pueden hacer uso también del resto de tecnologías de comunicación de mayor alcance, para comunicarse con estaciones centrales o entre ellas.

El concepto general de CALM se ve reflejado en la Fig. 2.7. Como se ha dicho, la idea central de CALM es soportar diversas tecnologías mediante un acceso continuado a la red global. Esto significa que si una tecnología deja de estar disponible, u otra más adecuada es detectada, es posible cambiar hacia la nueva de forma transparente para el usuario. Este *handover* vertical puede ocasionar la interrupción de los servicios, pero debe ser posible recuperar la sesión previa de forma rápida. Los *handover* horizontales que se produzcan no ocasionarán problemas significativos. El uso de NEMO e IPv6 es esencial en CALM, de cara a ofrecer movilidad a las redes intra-vehículo y comunicaciones eficientes con los elementos de la infraestructura y el resto de vehículos.

La conectividad permanente es, sin embargo, dependiente de las tecnologías soportadas por los vehículos. Aunque la situación ideal sería disponer de soporte para

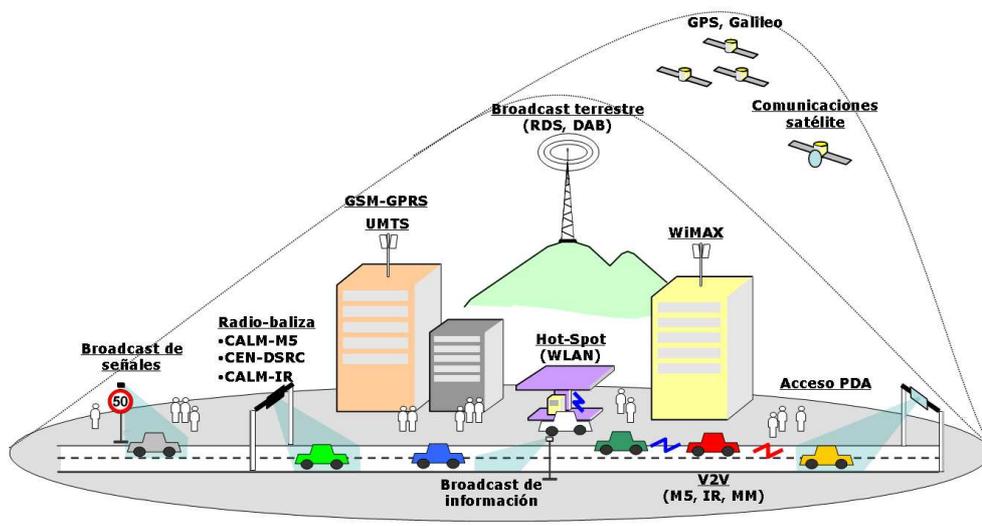


Figura 2.7: Vista general de CALM

todas las tecnologías de comunicación existentes, en la realidad, cada fabricante, cada usuario, y cada país pueden hacer prevalecer unas sobre otras. Esta es la razón por la que CALM abstrae la capa de red de la de nivel físico y enlace. Como se puede ver en la Fig. 2.7, existen multitud de tecnologías soportadas por CALM, aunque estas se pueden dividir entre las que han sido diseñadas especialmente para CALM, y las que no. En este último grupo se pueden ver las redes de comunicación celular basadas en GSM, los diversos estándares WLAN, WiMAX, RDS, e incluso comunicaciones satélite. Además, es relevante el uso de DSRC según normativas europeas, ya que diversos países ya han desplegado esta tecnología para ofrecer peaje electrónico. Las tecnologías propias de CALM han sido especialmente diseñadas para realizar transacciones típicas en ITS, por lo que mejoran el rendimiento con respecto a las de propósito general. Aunque se están barajando más, las principales apuestas son *CALM InfraRed* (IR), *CALM M5* y *CALM Millimetre* (MM), que tratan comunicaciones infrarrojo, DSRC a 5.8 Ghz, y ondas radio en la banda de 62-63 Ghz, respectivamente.

Es importante entender que las especificaciones y estándares involucrados en CALM no están pensados para diseñar un equipamiento físico concreto. CALM es realmente un conjunto de protocolos, procedimientos, y procesos de gestión, conformando una caja negra para soportar el acceso continuo a la red. La implementación se deja pues a manos de la entidad que realice el desarrollo final.

2.3.7. Redes Overlay P2P, JXTA

El gran caos que supone el conjunto de equipos que conforman la Internet actual está provocando que diversas aplicaciones comiencen a hacer uso de *redes overlay*, con el propósito de acceder no a la red IP subyacente, sino a una red lógica centrada en la búsqueda y compartición de contenidos. Muchos de los protocolos de red *peer-to-peer*

(P2P) actuales siguen esta metodología, lo cual lleva a denominarlos *redes overlay P2P*. La descarga de material multimedia centra la atención del gran público en esta clase de redes hoy en día, sin embargo, las aplicaciones potenciales de las redes *overlay P2P* están en ebullición en el trasfondo de la comunidad científica. Las redes vehiculares son uno de los ámbitos donde estas tecnologías están comenzando a abrirse paso en la actualidad. La tesis doctoral sigue esta línea, y muestra cómo una red virtual P2P puede soslayar las limitaciones de la tecnología subyacente⁷, permitiendo en este caso comunicaciones V2V mediante la red celular.

Concepto de Redes P2P y Redes Overlay

P2P comprende el conjunto de aplicaciones que aprovechan un almacenamiento, procesamiento, o contenidos distribuidos, a través de nodos situados en Internet [168]. Debido a las características propias de la Internet actual, el acceso a estos recursos descentralizados implica tratar con un entorno de conectividad inestable y cambios impredecibles de direccionamiento IP. De esta forma, las redes P2P se sitúan como un *middleware* de nivel de aplicación que se encarga de la gestión de la conectividad con otros nodos (*peers*) de igual a igual (*peer to peer*).

Comparándolo con el modelo cliente/servidor tradicional, las redes P2P no concentran el punto de fallo central en el servidor, sino que cada nodo de la red funciona como cliente y como servidor. Como cliente, cada equipo puede buscar y descargar los recursos deseados, pero, como servidor, el mismo nodo puede ofrecer servicios a los demás. Cada nodo ejecuta cuatro **funciones fundamentales** para cumplir estos propósitos en las redes P2P: unión a la red, consulta de recursos, descarga de contenidos, y salida de la red. En la conexión inicial el nodo obtiene información básica para su integración en la red, como sus vecinos inmediatos, a la vez que publica los recursos que él puede ofrecer. A partir de este instante, el nodo puede realizar consultas sobre objetos en los que esté interesado para poder descargarlos. Internamente, las consultas se traducen en un proceso de búsqueda de la dirección IP del equipo que almacena el contenido, seguida de una transmisión de información a partir de TCP o UDP.

Existen dos tipos fundamentales de redes P2P: estructuradas y no estructuradas [169]. Las *redes P2P no estructuradas* se componen de nodos que se unen a la red sin un conocimiento inicial de la topología, y que no publican los recursos disponibles de una forma bien organizada. La forma más habitual de implementar la búsqueda de recursos es mediante inundación. El nodo interesado emite un mensaje de consulta que se propaga hasta un límite de saltos, que es procesado por cada equipo intermedio. Si un nodo dispone de contenido que cumple con la consulta, devuelve al origen el resultado. Este mecanismo sufre de graves problemas de rendimiento cuando la cantidad de nodos y de consultas es elevado, además de presentar inconvenientes cuando se desea encontrar un recurso muy específico. Cuando el contenido buscado está muy distribuido en la red P2P, el rendimiento suele ser, no obstante, bastante bueno en redes P2P no estructuradas. Gnutella significó la primera implementación de una red

⁷En la Tabla 2.1 se resumían las capacidades de las tecnologías de comunicación inalámbrica más utilizadas en redes vehiculares.

P2P no estructurada y, tras él, KaZaA, BitTorrent y eDonkey2000 han sido propuestas que han alcanzado una gran popularidad entre la comunidad internauta.

En las *redes P2P estructuradas* la topología que conforman los nodos está controlada, y el contenido está indexado para ser encontrado de forma eficiente. Las primeras aproximaciones P2P se consideran estructuradas y, a la misma vez, centralizadas. En estos sistemas los contenidos se indexan en un servidor central, en donde es posible encontrar la relación entre el recurso buscado y el nodo que lo ofrece. El ejemplo más famoso dentro de las redes P2P estructuradas y centralizadas es Napster, cuyo sistema inicial terminó por desaparecer por problemas legales de propiedad intelectual, por usar precisamente un servidor como índice de contenidos. En contraposición a estos sistemas, las redes P2P estructuradas y distribuidas ofrecen búsquedas de recursos que se propagan eficientemente a través de los nodos. Para esta tarea se hace uso de tablas *hash* distribuidas (DHT o *Distributed Hash Table*), en las que los recursos pueden indexarse mediante una clave única. Los sistemas basados en DHT asignan igualmente un identificador único a cada nodo de la red P2P, con tal de que la búsqueda mediante una clave de recurso pueda dirigir hacia el equipo contenedor. Cada nodo mantiene una pequeña tabla de rutas formada por varios nodos vecinos, cuyas direcciones IP se conocen, junto con sus identificadores. De esta forma, el proceso de búsqueda se propaga hacia el nodo vecino que más cerca tiene el recurso y, de forma iterativa, se avanza de forma controlada por la red P2P. En general, las redes P2P basadas en DHT ofrecen búsquedas con rendimiento $O(\log N)$, siendo N el número de nodos de la red.

Una **red overlay** se puede definir como una red de ordenadores construida sobre otra, en donde los nodos se conectan a través de enlaces lógicos independientemente de la tecnología usada. Las redes P2P estructuradas y distribuidas reciben también el nombre de redes *overlay* [170], ya que añaden una capa de red por encima del nivel de transporte, que aporta semántica y organiza la topología subyacente de acuerdo con los recursos que ofrecen los nodos. La transmisión de mensajes *multicast* entre los nodos de la red es un aspecto relevante en este tipo de redes [171]. Generalmente, el conjunto de equipos interesados en recibir una transmisión se mantienen suscritos en los equipos que pueden transmitir información de interés, y es en la capa de aplicación en la que se realizan envíos individuales de los mensajes *multicast* para cada uno de los destinos. Aunque este modelo presenta un rendimiento menor que las aproximaciones *multicast* a nivel IP, el despliegue de éstas últimas no está globalmente adoptado en la actualidad, problema que puede ser tratado con las redes *overlay*. En muchas ocasiones, los protocolos P2P estructurados y distribuidos tratan indistintamente los conceptos de grupo *multicast* y grupos de *peers*, puesto que la función de los mismos es esencialmente la misma. Los grupos de comunicación P2P mantienen a un conjunto de nodos con un interés común en contenidos que son transmitidos desde un origen a uno o varios destinos.

JXTA

El proyecto JXTA [172–174] presenta una propuesta de código abierto, en la línea de las redes P2P estructuradas con carácter descentralizado. JXTA fue considerado inicialmente por Sun Microsystems con la intención de estandarizar un conjunto de protocolos en aplicaciones P2P. Muchas de las propuestas P2P están basadas en soluciones específicas para ámbitos de aplicación concretos. JXTA, por el contrario, define una capa *overlay* válida para un gran conjunto de aplicaciones, en donde los nodos pueden conectarse entre sí independientemente de la plataforma hardware y software subyacente. Mediante los protocolos usados, JXTA presenta una red virtual homogénea entre plataformas que implica, al mismo tiempo, una baja sobrecarga y un gran potencial en las primitivas usadas en la provisión de servicios. La Fig. 2.8 ilustra esta idea. El principal propósito de JXTA es ocultar toda la complejidad inherente de la Internet actual, principalmente cortafuegos y NATs (*Network Address Translation*), para ofrecer un direccionamiento uniforme para todos los nodos que pertenezcan a la red P2P. JXTA establece los procedimientos necesarios para que los nodos puedan descubrirse entre ellos, organizarse en grupos, publicar y buscar recursos, comunicarse, e incluso monitorizar su estado.

Transmisión de mensajes entre nodos Todos los nodos de la red JXTA mantienen una dirección lógica denominada *Peer ID*, que aglutina todos los posibles accesos físicos a la red. Internamente, JXTA hace uso de la información sobre las interfaces de red y los protocolos soportados por un nodo mediante lo que se denomina *Peer Endpoint*. Cuando un nodo recibe una notificación de *Peer Endpoint* de otro, se puede seleccionar la manera más eficiente de establecer la comunicación con él. Para soportar la dinamicidad de Internet, JXTA incluye información de enrutamiento en los propios mensajes, que se puede ir actualizando salto a salto. Algunos nodos mantienen información de encaminamiento y pueden modificar las rutas de los mensajes recibidos, ofreciendo soporte a cambios no detectados en la topología. Estos nodos se denominan *Relay Peers*, los cuales también realizan un papel fundamental para conectar diferentes redes físicas. Además de la información de encaminamiento, los mensajes transmitidos mantienen una estructura organizada por la inclusión de un conjunto de *elementos*, que no son más que campos de información que son insertados por los diferentes servicios que se usan en la red P2P. Es por esto que XML se presenta como la notación más adecuado para el intercambio de mensajes.

Peer Groups Los nodos de una red JXTA se organizan en *Peer Groups*, los cuales mantienen a todos aquellos equipos con intereses comunes. Cada uno de estos grupos dispone de un identificador único, y ofrece un mecanismo para definir dominios de comunicación acotados. Cualquier nodo que se conecte a una red P2P JXTA debe pertenecer a un grupo, por lo que, al menos, los nodos se encuentran dentro del más general, denominado *NetPeerGroup*.

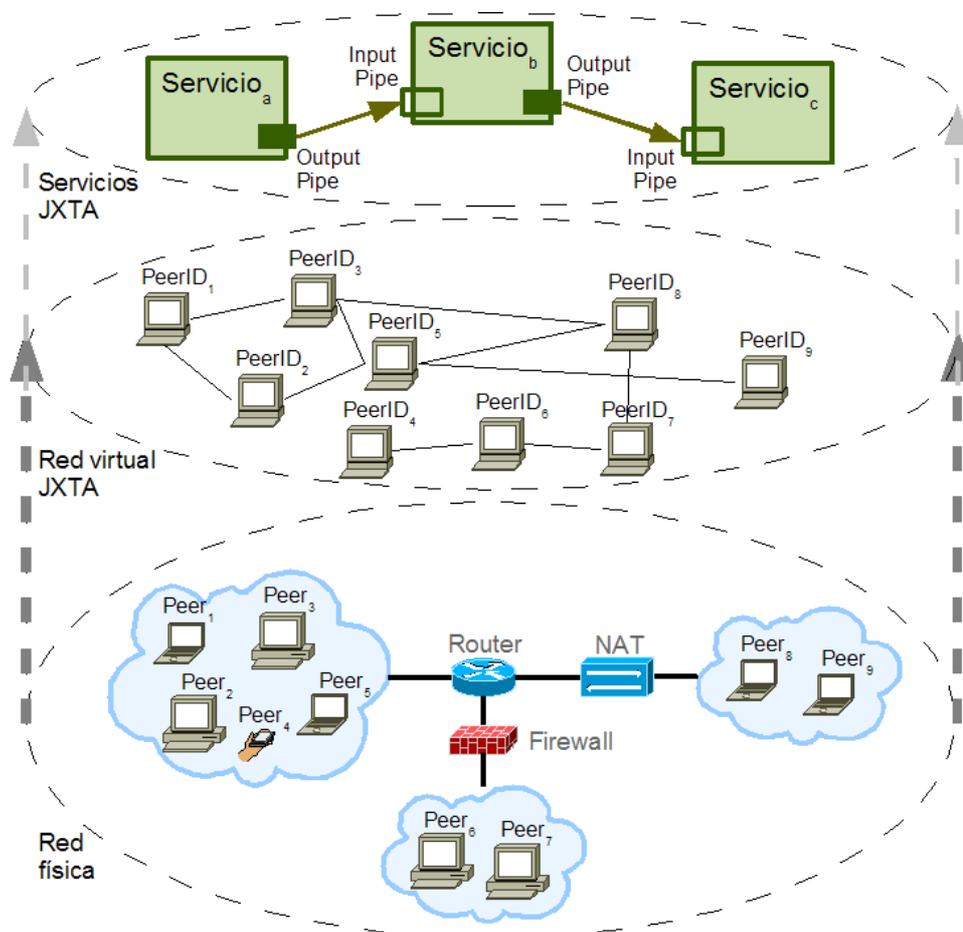


Figura 2.8: Modelo de red lógico de JXTA

Advertisements Todos los recursos dentro de la red JXTA se publican a través de *Advertisements*. De esta forma, los nuevos nodos, grupos, tuberías de comunicación, y servicios, se notifican a través de estos mensajes, codificados mediante XML. Todos los *advertisements* se publican con un tiempo de vida, y los propios nodos pueden cachearlos, con tal de satisfacer futuras búsquedas propias o ajenas de los recursos publicados por los nodos del grupo de comunicación P2P. Algunos nodos pueden cumplir complementariamente el rol de *Rendezvous*, con lo que son capaces de almacenar un gran número de *advertisements*, y de responder a los nodos del grupo que están buscando un recurso. Estos nodos especiales tienen un conocimiento más global de la red, por lo que pueden redirigir consultas a otros *Rendezvous*.

Pipes Las *pipes*, o “tuberías” de comunicación, ofrecen una conexión lógica entre los nodos de la red, por la que pueden enviarse mensajes. Los servicios que se implementan en la red JXTA hacen uso de tuberías de entrada (*input pipes*) o de salida (*output pipes*) para consumir o generar mensajes, tal y como se puede ver en la Fig. 2.8. Las tuberías

tienen un identificador único, y como el resto de los recursos, se publican a través de *advertisements*. Existen varios tipos de *pipes*: punto a punto, mediante una conexión unidireccional asíncrona; *propagate pipes*, en donde los mensajes se envían desde una tubería de salida hacia diversas de entrada, mediante técnicas de *multicast overlay* o IP *multicast*; y tuberías bidireccionales, confiables y seguras, implementadas sobre las dos anteriores.

Seguridad JXTA ofrece una infraestructura de clave pública que aporta seguridad en el intercambio de mensajes entre nodos. La creación de tuberías seguras implica, además, el uso de TLS (*Transport Layer Security*) para garantizar una comunicación extremo a extremo confidencial entre nodos.

Redes Overlay en Vehículos

La concepción de las redes overlay P2P en vehículos es una idea relativamente nueva en el mundo de ITS. En los últimos años están apareciendo algunas propuestas que están sirviendo como germen en el despliegue de las redes overlay dentro del ámbito vehicular. En [30] se analiza el potencial de las redes *overlay* P2P (estructuradas y distribuidas) dentro del ámbito concreto de la transmisión de información de tráfico. Como se puede apreciar en este trabajo, el uso de grupos de comunicación P2P y los mecanismos DHT, son esenciales para la compartición de información con los vehículos del entorno. Igualmente, se realiza un análisis de los principales factores de rendimiento en estas redes, haciendo hincapié en la escalabilidad, robustez, agregación de datos, y privacidad del sistema. Además, se presenta una posible aproximación de una red P2P adaptada al entorno vehicular, y se enfatizan las futuras aplicaciones de las redes P2P dentro del ámbito del vehículo, aparte de la transmisión de información de tráfico. Precisamente, dentro de este mismo grupo de servicios, los sistemas de información de tráfico, se encuadra otro trabajo cuya aplicación específica se centra en la detección de congestiones [36]. El sistema propuesto compone una arquitectura lógica para recabar información de fuentes de datos distribuidas sobre una gran zona geográfica, y que pueden estar en movimiento. Esta propuesta es aplicada a la recolección y compartición de trazas PVT (posición, velocidad y tiempo) de los vehículos, para que los sistemas de navegación de a bordo puedan variar dinámicamente la ruta programada. Aunque se quiere aplicar un carácter P2P a la solución, no se trata una tecnología de comunicación concreta a ninguno de los niveles de red OSI, ya sea físico, de red o de transporte. Ni siquiera se barajan tecnologías de nivel de aplicación P2P, aunque sí se acentúan las necesidades de procesamiento distribuido y la necesidad de una estrategia de diseminación de mensajes propias de las técnicas *multicast* de las redes *overlay* P2P.

En [31] se encuentra una propuesta más específica que las descritas anteriormente, orientada a un mecanismo de gestión de conexiones entre vehículos para conformar una malla de comunicación P2P. Mediante un lenguaje basado en XML, se establecen un conjunto de parámetros de definen la conexión de un vehículo con sus vecinos, considerando un entorno VANET. Esta información es intercambiada por los nodos de la red, con tal de adaptar dinámicamente la información de enrutamiento de la

red P2P. Puesto que los vehículos reciben información sobre la velocidad, el trayecto, y la posición de los que se encuentran en su ámbito local, es posible predecir cuáles serán los vehículos con los que se perderá o se ganará conectividad. Este sistema se adapta a la movilidad las redes vehiculares, ofreciendo una red *overlay* que garantiza la interconexión entre vehículos agrupados en determinadas zonas de la carretera.

JXTA también ha sido considerado en la creación de soluciones P2P para vehículos. En [15] se hace uso de un *middleware* que permite interconectar la plataforma de servicios de a bordo con el exterior, comunicando al vehículo con los de su entorno y con elementos de la infraestructura, mediante la red P2P. Este sistema se usa para crear grupos de comunicación en donde los vehículos interesados en determinadas alertas pueden unirse y recibir mensajes multi-difusión de interés, como avisos de encendido y apagado de luces en el paso por túneles, o la notificación de averías a centrales de monitorización remotas.

2.4. Tecnologías Complementarias para Soporte Ubicuo en ITS

Existen un conjunto de tecnologías que, si bien no están íntimamente relacionadas con ITS, ofrecen un complemento de suma importancia en la creación de sistemas que desean dotar de un carácter ubicuo a los servicios ofrecidos. Muchas de estas tecnologías suelen estar implantadas en la infraestructura de soporte, aunque también requieren de un hardware y software adaptado de a bordo. La ubicuidad presenta un novedoso campo de investigación dentro de la inteligencia artificial y las arquitecturas basadas en servicios, que poco a poco se está extendiendo a diversos ámbitos, como la inteligencia ambiental en el hogar, asistencia al turismo guiado, los servicios basados en localización en dispositivos móviles, o los propios sistemas inteligentes de transporte.

2.4.1. Computación Ubicua

Lo computación ubicua se considera un modelo de interacción entre las personas y las nuevas tecnologías, en donde el uso de los servicios que provee un sistema se encuentra integrado en las actividades que realizan de forma habitual los humanos [175]. En este modelo el usuario no es consciente de que está usando un sistema de computación envolvente. El paradigma de la computación ubicua es muchas veces denominado también como *computación pervasiva*, *inteligencia ambiental*, e incluso *everyware*, atendiendo al uso de software en cualquier lugar.

El desarrollo de un entorno de computación ubicua requiere del tratamiento del problema a **cuatro niveles de implantación** [176]: dispositivos, red, middleware de soporte, y aplicaciones.

Dispositivos Un entorno inteligente suele estar formado por periféricos tradicionales de entrada/salida, dispositivos móviles y, más recientemente, por hardware

más específico, como sensores embebidos y electrodomésticos “inteligentes”. La computación ubicua considera la integración de todos estos dispositivos de una forma totalmente transparente para el usuario, ofreciendo una inteligencia pasiva. Por su parte, los sensores del sistema pueden extraer información del entorno o del usuario, tal y como hacen los receptores GPS, dando una posición global del receptor, o como los sistemas de visión, identificando a personas u objetos en diferentes lugares.

Red La proliferación de dispositivos con carácter pervasivo está creciendo de forma importante en los últimos años. Los ordenadores de pequeñas dimensiones, principalmente en forma de PDAs y teléfonos móviles, y los localizados en el entorno, como la sensorización y los electrodomésticos de nueva generación, son cada vez más populares entre la sociedad. Esto hace necesario que todos ellos deban conectarse a una red común, por lo que la arquitectura actual de Internet deberá adaptarse progresivamente para integrar eficientemente las nuevas capacidades ubicuas.

Middleware de soporte Las aplicaciones que hacen uso del entorno pervasivo, e incluso los propios usuarios que acceden directamente a la red ubicua, necesitan de un soporte intermedio que les abstraiga de la complejidad inherente del sistema. Generalmente, este trabajo lo realiza un *middleware*, en forma de *firmware* o de software que se localiza en la pila de red de los dispositivos de los usuarios.

Aplicaciones Para hacer uso de un sistema ubicuo se hace necesario disponer de aplicaciones que accedan al sistema, con las que los propios usuarios puedan interactuar. Muchas veces, estas aplicaciones pueden ser software final en el lado del cliente, o de las estaciones servidoras o de monitorización, pero también pueden venir en forma de aplicaciones web desarrolladas para ofrecer un acceso remoto con información adaptada a las necesidades.

Independientemente de los elementos involucrados en un sistema pervasivo, es importante considerar los principales **ámbitos de trabajo dentro de la computación ubicua**. Estos se pueden resumir en tres principales [177]:

- Diseño de interfaces naturales que faciliten la comunicación entre los humanos y el sistema de computación. Este es un aspecto fundamental en ITS, puesto que los sistemas de a bordo no pueden usarse como las aplicaciones tradicionales para PC. Es por esto que las alertas sonoras, el reconocimiento del habla y la disposición de pantallas en el interior del habitáculo, son un aspecto fundamental.
- Automatización de las tareas de captura de datos del entorno, y oferta de un método eficiente de acceso a la información procesada por el sistema.
- Y finalmente, y sobre todo, adaptación de las capacidades del sistema al contexto del usuario.

La localización es la fuente de información contextual más extendida en la determinación del contexto. Es por esto que las aplicaciones basadas en localización

(LBS o *Location Based Services*) se pueden considerar como un caso particular de las aplicaciones sensibles al contexto. La proliferación de receptores GPS ha extendido el concepto de LBS en ámbitos como la provisión de servicios en teléfonos móviles o los sistemas inteligentes de transporte. Generalmente, el contexto se suele definir por lo que se denomina como “las cinco Ws”: *who*, correspondiendo con la identidad de usuario que accede al sistema; *what*, que indica la tarea que está realizando el usuario; *where*, puesto que la localización significa la propiedad más estudiada del contexto; *when*, estudiando el momento de acceso al sistema; y *why*, que quizá presenta el problema más complejo, puesto que saber por qué el usuario está realizando una determinada tarea no es, sin duda, una tarea sencilla. Para considerar todos estos factores que determinan el contexto, no sólo se usan sensores de posicionamiento, sino que otros campos como la visión pueden ser de gran utilidad, además de tradicionales medidas como humedad, temperatura o presión. La representación de la información relativa al contexto presenta también un problema de importancia, ya que es necesario disponer de datos procesables para que el sistema pueda conocer el estado del usuario. Como se verá después, la representación del entorno mediante ontologías es una técnica muy usada en la actualidad para tratar esta cuestión.

2.4.2. Radio-Identificación, RFID

Como se ha comentado anteriormente, la localización es una de las principales técnicas para la adecuación de servicios pervasivos al contexto del usuario. Aunque GPS ha supuesto en los últimos años la principal tecnología de localización, la posición es calculada por el propio equipo receptor, por lo que es necesario transmitir la información de navegación a una estación remota si se quiere integrar a un terminal en el entorno circundante.

Tecnologías Existentes

En la última década han aparecido otras técnicas de detección de presencia, principalmente basadas en radio frecuencia [178]. Las redes celulares permiten realizar un descubrimiento de los terminales que se encuentran en el radio de cobertura de una estación base, lo cual es de utilidad para ofrecer servicios LBS a estos dispositivos. Las tecnologías WLAN también permiten usar un mecanismo similar, mediante el uso de los puntos de acceso. Tanto las redes celulares como las WLAN pueden usarse también para afinar la posición aplicando triangulación con la señal recibida de los concentradores de conexión, lo cual puede ser de utilidad para aplicaciones que requieran de una mayor precisión. UWB (*Ultra Wide Band*) es una tecnología de transmisión de menor alcance, con tasas de transmisión elevadas, que también puede usarse para la detección de dispositivos móviles. Sin embargo, en este rango de acción la tecnología más conocida es Bluetooth. ZigBee ofrece características similares, pero con diferencias que lo hacen más apropiado para el despliegue de redes de sensores con un gran número de nodos, lo cual puede ser de gran interés dentro de la computación ubicua.

RFID

A pesar de todos los esfuerzos por usar tecnologías existentes de radio frecuencia para la detección e identificación de terminales, una tecnología se ha estado forjando específicamente para estos propósitos; esta es RFID. La llamada *Radio Frequency Identification* (RFID) [179], o identificación por radio frecuencia, ha estado presente durante muchos años en el ámbito de las telecomunicaciones, sin embargo, hasta que el coste de producción no ha disminuido, y se ha avanzado en las tecnologías de fabricación, RFID no se ha desplegado a gran escala.

Básicamente, RFID se centra en el mercado de los elementos que se quieren seguir con unas etiquetas (*tags*), que contienen unos radiotransmisores que emiten mensajes procesables por dispositivos lectores. Generalmente, estas etiquetas mantienen un número identificativo que el sistema de información (conectado al lector) es capaz de entender. Además de poder leer este valor, algunas permiten la escritura de cierta información de seguimiento. Existen dos tipos de etiquetas identificables en las soluciones RFID actuales: activas y pasivas.

Etiquetas activas Mantienen una fuente de energía propia en forma de batería, por lo que pueden emitir señales de mayor intensidad y ser detectadas a mayor distancia por los lectores. Sin embargo, este añadido implica un mayor tamaño de las etiquetas y un incremento del coste, por lo que suelen usarse para identificar elementos de gran envergadura sobre largas distancias, tales como contenedores o maquinaria industrial. La transmisión de la información almacenada en la etiqueta se realiza de forma periódica, o implementando un mecanismo de escucha del medio hasta detectar la presencia de un lector cercano. Además, el uso de una batería permite a las etiquetas activas transmitir a frecuencias altas, desde los 455 Hhz, hasta los 5.8 GHz, y pueden ser detectadas a distancias de hasta 100 metros.

Etiquetas pasivas Las etiquetas pasivas no hacen uso de una fuente de alimentación propia, sino que obtienen la energía de los mensajes de sondeo recibidos de los lectores, para reflejar una señal con la información almacenada. El coste y el tamaño de estas etiquetas es, por tanto, bastante pequeño, y son apropiadas para su instalación en productos de uso general. La sustitución de los códigos de barras tradicionales es un campo de aplicación directo de las etiquetas pasivas. La frecuencia usada varía entre los 100 KHz y 2 Ghz, y su elección depende fundamentalmente del alcance requerido y del tipo de material que se quiere que atraviesen las señales.

Actualmente existen diversos estándares referidos a RFID, tanto de la ISO (ISO 14443, ISO 15693 e ISO 18000), como de *EPCglobal*, organización destinada específicamente a estos menesteres y que desarrolló un estándar muy aceptado: *Electronic Product Code* (EPC).

Las aplicaciones de RFID son muy diversas en la actualidad, desde el uso en productos básicos de cadenas de suministros, como supermercados o tiendas textiles, hasta la seguridad y la identificación de personal, por medio de tarjetas con información sobre el usuario. En el caso del vehículo, por ejemplo, algunos modelos incorporan

un sistema de acceso y arranque basado en una llave RFID, lo cual facilita el uso y añade seguridad mediante la integración con el sistema de inmovilización electrónico. El seguimiento es, seguramente, la principal aplicación de RFID en la computación pervasiva. De este modo, la identificación de pacientes en hospitales, el seguimiento e identificación de animales, y la detección de la presencia de vehículos en lugares como aparcamientos o gasolineras, son usos potenciales de RFID. Una tecnología que sigue los mismos principios básicos que RFID es NFC, que se deriva de la técnica generalmente empleada en el diseño de etiquetas pasivas: *Near Field Communication* [180]. NFC permite establecer comunicaciones a muy corta distancia entre dispositivos móviles, sin necesidad de seguir mecanismos de conexión costosos y aprovechando una comunicación totalmente localizada, a diferencia de WLAN y Bluetooth. Fabricantes de teléfonos móviles como Nokia ya han apostado por NFC en sus productos, lo cual abre todo un mundo de aplicaciones.

El uso masivo de RFID en una amplia gama de dispositivos y productos de consumo general conlleva, sin embargo, un gran número de implicaciones relativas a la privacidad. Los usuarios pueden no estar conformes con que sus prendas de vestir sean detectadas tras la compra, o que su dispositivo móvil sea localizado en diferentes lugares. El despliegue de RFID en los próximos años requerirá de un tratamiento adecuado de su potencial, con tal de garantizar la privacidad de los usuarios.

2.4.3. Modelado del Entorno Mediante Ontologías

Tal y como se dijo antes, un aspecto fundamental en la computación ubicua radica en la adecuación de las capacidades del sistema al contexto del usuario. Un tratamiento eficiente de este problema redundaría en la percepción etérea que el usuario tiene del sistema. A la hora de contextualizar los diversos escenarios que se pueden dar en una arquitectura pervasiva es necesario utilizar una técnica de modelado del entorno. Aunque los lenguajes de programación orientados a objetos presentaron una primera aproximación para modelar elementos del entorno físico como *clases* que podían instanciarse, el nivel de abstracción no es lo suficientemente alto como para tratar un modelado genérico independiente del software que se ejecuta en los sistemas de computación. El modelado mediante ontologías resuelve este problema, facilitando una herramienta que favorece la interoperabilidad entre sistemas de información y ofreciendo beneficios desde el punto de vista ingenieril, como la reusabilidad, fiabilidad en la representación de los conceptos y abstracción en la especificación [181].

Una *ontología* es una representación formal de un conjunto de conceptos, considerando su dominio de aplicación y su interrelación [182]. Aunque su uso principal se centra en la inteligencia artificial, su ámbito se extiende hacia otras áreas de las ciencias de la computación, como la Web semántica o ingeniería del software. En las ontologías, las definiciones asocian los nombres de las entidades del universo de discurso con texto descriptivo y legible, además de con axiomas formales que les permiten ser procesados.

Generalidades sobre Ontologías

Las ontologías de la ciencia de la información actual presentan un conjunto de elementos estructurales comunes. Los *individuals* y las clases son los elementos constitutivos principales, y pueden estar parametrizados por atributos o interconectados mediante relaciones.

Individuals Los *individuals* se pueden considerar como instancias u objetos, ya que denotan elementos concretos dentro del universo de discurso del sistema. Ejemplos de estos serían personas, automóviles, cuerpos celestes o restaurantes.

Clases Las *clases* presentan un elemento de abstracción mayor, representando conceptos generales que pueden clasificar *individuals* o incluso otras clases. Los *individuals* no son necesariamente instancias de clases, tal y como puede pensarse si se busca una analogía con la programación orientada a objetos, ya que incluso pueden existir por sí mismos. Ejemplos de clases podrían ser persona, automóvil, ordenador, o “cosa”. Las clases pueden ser extendidas mediante herencia, lo cual permite crear subtipos organizados en jerarquías. Todo lo que se le pueda atribuir a una superclase, también se le atribuirá a las subclases.

Atributos Las clases o *individuals* pueden ser descritos relacionándolos con otros elementos mediante *atributos*. Los atributos pueden ser clases, *individuals* o tipos básicos ofrecidos por la notación en la que se escribe la ontología.

Relaciones Las *relaciones* especifican cómo los elementos de una ontología están asociados con otros elementos. La herencia se presenta como un tipo de relación, por ejemplo. El conjunto de relaciones incluidas en la ontología ofrece semántica al dominio que se está modelando, ya que da la posibilidad de interconectar elementos en el sistema. La composición es otro tipo de relación, mediante la que varios elementos de la ontología se pueden combinar para formar otros más complejos.

Dominio El universo de discurso sobre el que se mueven los elementos tratados en la ontología recaen dentro de un *dominio*. Partes de este universo pueden ser tratadas por otra ontología, con otro dominio distinto, lo cual provoca que los mismos conceptos sean modelados de diferente forma. La combinación de diferentes ontologías presenta, por tanto, un problema muchas veces intratable. El uso de una ontología de mayor abstracción, desde donde crear nuevas ontologías, puede solventar este problema.

En la actualidad existen diversos lenguajes que se utilizan para codificar ontologías, tales como CycL, Gellish, OIL, o el más conocido OWL. Se pretende que éste último sea usado globalmente en Internet, por lo que ha recibido una gran atención en los últimos años. Así mismo, existe una gran cantidad de herramientas para la asistencia al diseño de ontologías, a la vez que *frameworks* de programación e inferencia. Entre los editores más conocidos se encuentran *Protégé* y *SWOOP*, utilizados para la creación

de ontologías OWL. Jena es un ejemplo de framework de tratamiento automatizados de ontologías OWL, mientras que *Sesame* y *KAON* lo son para RDF.

OWL

OWL (Ontology Web Language) [183] es un lenguaje para la declaración de ontologías desarrollado por el *W3C (World Wide Web Consortium) Web Ontology Group*, y principalmente diseñado para representar información sobre categorías de objetos y sus interrelaciones en la Web [184]. El diseño de OWL está especialmente marcado por el uso de XML y RDF (*Resource Description Framework*), y ofrece un lenguaje de creación de ontologías genérico para la Web que integra anteriores propuestas, como OIL (*Ontology Interchange Language*) y DAML (*Agent Markup Language*).

OWL hace uso de la capacidad descriptiva de RDF, y de la potencia de *RDF Schema* (RDFS) para estructurar el diseño de las ontologías. De esta manera, es posible hacer uso de la herencia y de otras relaciones, como intersecciones, uniones, complementariedad o enumeraciones. Además, se pueden declarar atributos (o propiedades) que pueden organizarse igualmente en jerarquías, y que operan sobre clases o tipos de datos primitivos.

Debido a los múltiples orígenes de OWL, y a que es necesario soportar en la medida de lo posible las especificaciones de base, se han ideado tres versiones de OWL. *OWL DL (Description Logic)* permite realizar labores de inferencia de forma determinista, mediante el uso de lógica descriptiva. Existe un subconjunto de OWL DL, denominado *OWL Lite*, con una sintaxis más sencilla y que implica menos complejidad en la inferencia. Finalmente, si se requiere de una compatibilidad completa con RDF y RDFS, *OWL Full* es la opción más apropiada, incluyendo además OWL DL.

Como se ha dicho, una herramienta que ha sido muy usada en los últimos años en el tratamiento de ontologías OWL es Jena [185]. Este framework de código abierto ofrece funcionalidad para la extracción y manipulación de datos de grafos RDF, que pueden ser consultados mediante SPARQL (*Simple Protocol and RDF Query Language*). Jena ofrece varios motores de inferencia para OWL, con la posibilidad de extenderlo con otros externos.

Ejemplo de Ontología

Quizá la mejor manera de entender el concepto de ontología sea considerar un ejemplo. A continuación se incluye un extracto de una ontología OWL en la que se define la clase *Vehicle*, y se le aplican un conjunto de propiedades y relaciones:

```
<owl:Class rdf:ID="Vehicle"/>

<owl:Class rdf:ID="Truck">
<rdfs:subClassOf rdf:resource="#Vehicle"/>
</owl:Class>
```

```
<owl:Class rdf:ID="Car">
<rdfs:subClassOf rdf:resource="#Vehicle"/>
</owl:Class>

<owl:DatatypeProperty rdf:ID="vehicle_identification">
<rdfs:domain rdf:resource="#Vehicle"/>
</owl:DatatypeProperty>

<owl:ObjectProperty rdf:ID="ownership">
<rdfs:domain rdf:resource="#Vehicle"/>
<rdfs:range>
<owl:Class>
<owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
<owl:Class rdf:about="http://www.mindswap.org/2004/terrorOnt.owl#Organization"/>

<owl:Class rdf:about="http://www.mindswap.org/2004/terrorOnt.owl#Person"/>
</owl:unionOf>
</owl:Class>
</rdfs:range>
</owl:ObjectProperty>
```

Como se puede ver, se establece una relación de herencia entre vehículo y las subclases *Car* y *Truck*. A continuación se definen dos propiedades para la superclase: *vehicle_identification* y *ownership*. La primera de ellas hace uso de un tipo de datos primitivo para representar el identificador de un vehículo. En la segunda, en cambio, se hace uso de una propiedad definida como un objeto. Ésta está formada por un rango posible de datos conformado por la unión de otras dos clases: *Organization* y *Person*. Esto indica que tanto una organización como una persona pueden ser propietarios de un vehículo.

2.4.4. Computación Distribuida

Con la globalización de las tecnologías de red, el procesamiento de transacciones y la oferta de servicios ha pasado de realizarse en un solo ordenador, a considerarse en un entorno distribuido. La computación distribuida marca un aspecto fundamental en la ubicuidad de los sistemas [176], ofreciendo un acceso imperceptible a recursos remotos, además de un servicio tolerante a fallos, de alta disponibilidad y seguro. La Web actual se ha convertido en una infraestructura de comunicación cuasi-ubicua, en donde muchos usuarios están siempre disponibles mediante el acceso a sus espacios personales o a su dirección de correo electrónico. El terminal desde donde se accede a la Web ya no es relevante, ya que la propia WWW funciona como capa middleware pervasiva, que abstrae al usuario del sistema distribuido subyacente en muchos servicios remotos.

Aproximación Basada en Objetos Distribuidos

La computación distribuida puede ser abordada desde muchos puntos de vista, desde los sistemas multiprocesadores, la computación paralela o la computación grid, hasta los propios lenguajes de programación usados. La distribución del procesamiento entre distintos equipos conectados remotamente en red de forma intuitiva para el desarrollador, y totalmente oculta al usuario, es un campo de la computación distribuida que presenta una abstracción mayor que la dada por los nuevos avances en arquitectura de computadores. El desarrollo de estos *middlewares* para soporte distribuido se ha tratado en los últimos años a **diferentes niveles** [186]:

- Computación orientada a servicios, mediante tecnologías que ofrecen la posibilidad de definir y publicar servicios a través de notaciones de alto nivel, como XML.
- Transacciones distribuidas, tratando sistemas completos de gestión remota de peticiones en aplicaciones Web, como J2EE (*Java 2 Enterprise Edition*).
- *Middleware* de paso de mensajes, usando comunicación asíncrona entre los componentes distribuidos de la red, tal y como JMS (*Java Messaging Service*) e *IBM Websphere MQ* ofrecen.
- Llamada a procedimientos remotos, o RPC (*Remote Procedure Call*), con el que se pueden realizar llamadas a partes de código que se ejecutan en terminales remotos.
- Objetos distribuidos, que implica el uso de objetos que se ejecutan en máquinas desplegadas en la red para realizar llamadas remotas al estilo RPC.

Existen actualmente varias tecnologías de **computación orientada a objetos distribuidos**, entre las que destacan CORBA, DCOM, .NET *Remoting* y RMI. CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) ofrece un mecanismo para publicar objetos en un servidor que se encarga de gestionar las peticiones remotas. Tras obtener la referencia la objeto, el cliente puede hacer uso de los métodos disponibles. DCOM (*Distributed Component Object Model*) presenta un extensión a COM, ofreciendo la posibilidad de crear aplicaciones a través de componentes que puedan ser ejecutados en diferentes máquinas. .NET ha supuesto una renovación en la tecnología de objetos distribuidos ofrecida hasta el momento por Microsoft, fundamentada en DCOM. Mediante la primitiva *Remoting*, .NET ofrece una flexibilidad en la distribución de objetos similar a la dada por CORBA o RMI.

RMI

Java *Remote Method Invocation* (RMI) se basa en un protocolo de gestión remota de objetos denominado JRMP (*Java Remote Method Protocol*). Mediante la serialización, los objetos intercambiados en las llamadas a métodos remotos pueden ser transmitidos como flujos de datos. Cada objeto RMI define una interfaz que puede ser usada para

acceder a él desde una máquina virtual distinta a la local. El interfaz define el conjunto de métodos que podrán ser usados de forma remota, y es utilizada también por los clientes para encontrar un objeto remoto que la implemente. Es por esto que los equipos clientes deben disponer de una versión compilada de la interfaz, denominada *stub*.

RMI depende de un software de publicación de objetos remotos, denominado *RMI Registry*, que permite que los clientes puedan realizar búsquedas usando como parámetro el interfaz del objeto remoto que se desea. Tras obtener la referencia al objeto remoto, el cliente puede usarlo como si se tratase de un objeto local. Los datos pasados como parámetro en la llamada a los métodos remotos serán serializados, al igual que el resultado devuelto.

El despliegue de la tecnología Java en el ámbito Web ha favorecido la adopción de J2EE, y de RMI en concreto, en el ámbito de la computación basada en objetos distribuidos. Como se verá en el capítulo 6, RMI es usado en la tesis doctoral para distribuir el procesamiento de datos en un sistema de información que se encarga de gestionar incidencias de tráfico, y de enviar notificaciones sensibles al contexto a los vehículos.

2.5. Conclusiones

El contenido de este capítulo ha estado dirigido a establecer una base tecnológica apropiada para cada uno de los subsistemas ITS en los que se adentra la tesis doctoral. Para la creación una plataforma telemática integral como la que se pretende, existen multitud de ámbitos que deben ser explotados. Tal y como se ha visto, la dispersión tecnológica es apreciable a lo largo de las secciones previas, y una plataforma ITS vertical debe armonizar un marco apropiado de propuestas para cada uno de los subsistemas esenciales, adaptando las tecnologías disponibles, e integrando capacidades hasta ahora tratadas en la literatura de forma independiente.

En el estudio inicial sobre el equipamiento de a bordo en vehículos en el ámbito de ITS, se han identificado los principales subsistemas a considerar en una plataforma orientada a servicios telemáticos. El ordenador de a bordo, la red de comunicación inter-vehicular y con la infraestructura, y el sistema de navegación, se han destacado como los principales constituyentes en el lado del vehículo. Sin embargo, las tecnologías involucradas en la adecuación de un soporte complementario de la infraestructura, también han recibido una especial consideración. En la plataforma ITS descrita en el resto de capítulos, tanto las capacidades de a bordo, como las funcionalidades provistas por los dispositivos del lado de la carretera y un sistema de información remoto, se muestran indispensables para la creación de un entorno flexible de servicios ITS.

La unidad de a bordo, u OBU, y, en concreto, el ordenador embarcado, se muestra como un componente clave de la plataforma del vehículo, ya que es el encargado del procesamiento de la información y de la coordinación de los subsistemas de a bordo. Como se hace entrever, la tesis doctoral apuesta por una plataforma software sobre un computador de propósito general, lo cual, como se verá, soluciona los requerimientos de extensibilidad de las soluciones puramente hardware actuales.

En el caso del subsistema de navegación, la integración de SBAS en la navegación terrestre presenta interesantes mejoras sobre los parámetros de rendimiento descritos: disponibilidad, continuidad, precisión e integridad. Si bien, este último elemento es un factor de creciente importancia para los servicios telemáticos del futuro. La tesis doctoral integra en la plataforma un subsistema de navegación que explota de forma extendida las capacidades de SBAS, ampliando el rango de sistemas de a bordo que pueden hacer uso de éstas y monitorizando en tiempo real la integridad de la posición. El subsistema de comunicación del vehículo, por su parte, es uno de los ámbitos que más atención está recibiendo por la comunidad científica actualmente. A las propuestas independientes de nuevas redes VANET, se le suma la adecuación de iniciativas del IETF para su inclusión en vehículos. La propuesta de red vehicular de la tesis doctoral se integra tanto en la plataforma de a bordo como en la infraestructura, haciendo uso de una red overlay para abarcar muchas de las capacidades descritas en estos ámbitos. Las redes celulares, que se describen inicialmente como apropiadas para comunicaciones V2I, e I2V en algunos casos, son utilizadas por dicha propuesta de red para ofrecer capacidades V2I e I2V, e incluso comunicaciones V2V. Como último gran paso, las capacidades de base de esta red son ampliadas, integrando conceptos de la computación ubicua mediante una infraestructura de soporte complementaria. Este soporte pervasivo es la idea final que envuelve a la plataforma telemática que se presenta en la tesis doctoral.

Aparte de las generalidades dadas en cada uno de los ámbitos fundamentales de la tesis, como son la unidad de a bordo, el sistema de navegación, el de comunicaciones, y el sistema de información de la infraestructura, este capítulo ha servido también para introducir varias de las tecnologías de base utilizadas en el desarrollo de las principales propuestas. Como se verá en los capítulos siguientes, el desarrollo, implementación, y evaluación experimental de los distintos subsistemas y de la plataforma completa, son elementos clave del trabajo realizado.

Capítulo 3

Plataforma Multi-Servicio de a Bordo para Vehículos Terrestres

Tras el primer capítulo introductorio, el anterior ha sentado las bases de las principales tecnologías involucradas en la creación de plataformas telemáticas ITS, muchas de las cuales se verán reflejadas en el resto del documento. Ahora que ya se dispone del suficiente contexto, es posible entrar en detalle en la descripción de la plataforma propuesta en la tesis doctoral. Como primera aproximación, el presente capítulo detalla la arquitectura de la unidad de a bordo, y su integración en el vehículo prototipo considerado en la evaluación de todo el trabajo.

Después de una breve contextualización, el contenido del capítulo estará centrado en describir la plataforma hardware y software usada en el lado del vehículo, considerada en el resto de propuestas de la tesis doctoral. Ésta es utilizada como banco de pruebas (o *testbed*) en el diseño del sistema de navegación, de la arquitectura de comunicación vehicular, y de la integración final en la provisión de servicios dependientes del contexto. Esta idea se refleja en la Fig. 3.1, en donde se remarcan los componentes de la plataforma en los que se incide en este capítulo. La unidad de a bordo diseñada está basada en un ordenador de propósito general, y se encuentra provista del necesario hardware de comunicación para establecer conexiones de datos tanto con dispositivos locales como remotos. Los sensores GNSS conforman un aspecto fundamental en la explicación de la arquitectura de la OBU, aunque muchas veces son encuadrados dentro del concepto más global de equipamiento de a bordo, u OBE. El interfaz de usuario es también tratado, mediante un sistema de gestión gráfica de los servicios y la adecuación de un vehículo prototipo con la informática de a bordo.

El propósito final de la OBU propuesta radica en la creación de un entorno hardware y software de a bordo, adecuado para la provisión de servicios telemáticos ejecutables en un ordenador de propósito general. De esta manera, es posible afrontar los problemas de extensibilidad y los derivados de los costes en la adecuación del vehículo con funcionalidades telemáticas de valor añadido. Usualmente, estos nuevos servicios han sido ofertados mediante nuevo hardware, instalado generalmente en el interior del habitáculo; sin embargo, el uso de software y de una plataforma lo suficientemente genérica ofrece mayor versatilidad. La solución expuesta se centra en el uso de un

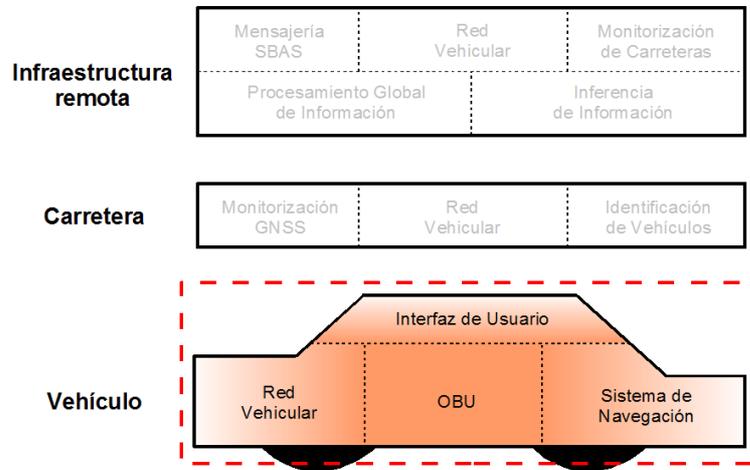


Figura 3.1: Aportación del capítulo 3 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral

framework OSGi como pasarela de servicios, sobre el que se sustenta una plataforma lógica basada en capas, para el desarrollo y despliegue de nuevas funcionalidades. Esta arquitectura es la base sobre la que se asienta el software para el lado del vehículo que se implementa en el resto de la tesis doctoral.

3.1. La Informática y las Telecomunicaciones en el Vehículo del Futuro

El interés creciente de la sociedad actual en las nuevas tecnologías, ha propiciado que una gran cantidad de productos encuadrados dentro de la informática y las telecomunicaciones estén emergiendo en ámbitos hasta ahora inexplorados. De entre éstos, el vehículo presenta un marco perfecto para incluir muchas de las funcionalidades disponibles en el trabajo o en el hogar. Sin embargo, esta expansión necesita de un soporte tanto hardware como software adaptado a los requisitos del mercado y a las necesidades del usuario.

Hasta el momento, la cantidad de servicios que los pasajeros han podido usar en el vehículo requiere de un importante despliegue hardware. Cada nueva funcionalidad suele estar implementada como un nuevo dispositivo. Aunque este procedimiento ha sido plausible hasta la fecha, la cantidad de servicios de a bordo está aumentando considerablemente en los nuevos vehículos. Además del reproductor de CD/MP3, el manos libres Bluetooth, y el navegador GPS, una nueva oleada de servicios ITS está emergiendo a consecuencia de las mejoras en las tecnologías de base. Como se describió en en la sección 1.3, los sistemas de seguridad activa, el entretenimiento de a bordo, y la recepción de información sensible al contexto, se están vislumbrando como aplicaciones estrella en los vehículos del futuro. Sin embargo, **el modelo de despliegue actual de servicios no es en absoluto escalable**, y es en este punto

donde las computadoras de propósito general comienzan a ser consideradas como una mejor opción frente a las dedicadas. La inclusión de nuevos servicios como software ejecutable en una plataforma hardware común presenta diversas ventajas. Primero, el modelo de negocio sufre un cambio radical debido a que tanto la fase de instalación como, sobre todo, las labores de actualización, no requieren de nueva inversión en hardware. Al mismo tiempo, el usuario se encuentra ante una interfaz común de gestión de los servicios, que facilita en gran medida el control de la funcionalidad de a bordo del vehículo.

No obstante, existen multitud de factores a tener en cuenta en la introducción de una arquitectura como la descrita anteriormente. Un vehículo implica un lugar peculiar, repleto de cuestiones relativas a la **interacción con el usuario**. Por este motivo, tenemos que considerar no sólo los requerimientos propiamente hardware de la OBU (y en general del OBE), sino también los relativos a la interfaz. Como se describe en [1], la instalación de un ordenador de a bordo en un vehículo presenta una cuestión delicada, donde se deben tener en cuenta las condiciones físicas de colocación y de alimentación. La interfaz de usuario, por su parte, está sujeta a restricciones legales de utilización. En [2] se presentan algunas cuestiones sobre el uso de dispositivos electrónicos en vehículos. Como se detalla en este trabajo, aunque la legislación de diversos países está recientemente concienciada sobre los problemas de usar teléfonos móviles, no existe un acuerdo claro sobre cómo tratar el uso de otros muchos sistemas de a bordo. En cualquier caso, lo que sí está claramente indicado es que el conductor debe ser capaz de controlar en todo momento su vehículo. Así pues, se deben tener en cuenta los problemas de seguridad que puede acarrear la instalación de nuevas funcionalidades de a bordo. Los servicios orientados al conductor son los que deben ser especialmente estudiados, frente a los orientados a los pasajeros, que pueden tener condiciones de interfaz más relajadas.

En la creación de una arquitectura de servicios ITS versátil, es esencial complementar a la OBU con otros **dispositivos periféricos, sensores y transceivers de comunicación**. Así pues, diversos dispositivos serán esenciales si estamos interesados en servicios basados en la localización, tales como un sensor GNSS (Global Navigation Satellite System) e interfaces de comunicación inalámbrica. Como se ha ido detallando en los capítulos 1 y 2, las tecnologías de comunicación inalámbrica y los sensores de posicionamiento presentan dos elementos arquitectónicos fundamentales en ITS.

La nueva era de software que será incluido en los vehículos de un futuro próximo necesitará cumplir con diversas restricciones de funcionamiento. En [111] se presenta un análisis de los principales requisitos de rendimiento de estos nuevos programas, reseñando que la arquitectura del software embebido en vehículos debe seguir un proceso riguroso de diseño inicial. De esta manera, además de un hardware apropiado, se hace necesario disponer de una **plataforma software** que permita el despliegue de servicios de a bordo de forma eficiente. Esta plataforma estará localizada en el ordenador de a bordo, y debería considerar los siguientes requisitos:

Modularidad Los nuevos servicios deberían ser implementados como composición de

módulos creados previamente.

Portabilidad Los servicios y, si es posible, la propia plataforma no deberían estar diseñados para un hardware o sistema operativo concreto.

Facilidad de despliegue La instalación y actualización de los servicios debe ser un proceso sencillo y eficiente.

Uso intuitivo La gestión de los servicios disponibles, a través de los procedimientos de arranque, instalación o eliminación, debe ser sencilla y adaptada al entorno vehicular.

La *Open Services Gateway initiative* [112] presenta una plataforma modular con una gran cantidad de características acordes a estos requerimientos, frente a otras soluciones como Jini o SLP (Service Location Protocol). La diferencia principal entre OSGi y estas últimas se centra en el campo de aplicación. OSGi está orientada al despliegue de servicios sobre una pasarela. Por el contrario, Jini, y SLP sobre todo, son válidas para servicios distribuidos sobre una red.

El trabajo presentado en este capítulo está centrado en el diseño y desarrollo de una arquitectura extensible para servicios, basada en computadores de propósito general. Usando un ordenador de a bordo como pasarela OSGi de aplicaciones, se resuelven las limitaciones de espacio en el habitáculo. Al mismo tiempo, la propuesta muestra un marco de despliegue de servicios basado en capas, que promueve la reusabilidad y el desarrollo modular. El sistema completo ha sido enriquecido con una gran cantidad de servicios de referencia, que muestran la validez de la solución propuesta. Todo este sistema software se ve sustentado por un diseño hardware integrado en un vehículo prototipo. El compendio de componentes hardware y la plataforma software, hacen de la OBU presentada la base para la implementación del software del lado del vehículo en el resto de la tesis doctoral, y ofrece un *testbed* de comunicación apropiado para la arquitectura de red que se propone en el capítulo 5.

3.2. Trabajo Relacionado con Plataformas Telemáticas en Vehículos

Los trabajos en vehículos prototipos de investigación adecuados para ITS necesitan de una gran inversión inicial, pero conforman un hardware de base que puede ser usado para multitud de trabajos. En [10] y [11] se muestran dos arquitecturas de vehículo válidas para estos menesteres. Los sensores INS (*Inertial Navigation System*), los captosres odométricos, y los receptores de posicionamiento GPS, son elementos clave en dichos sistemas, donde un software de control embebido fusiona toda la información recibida de todos ellos, dentro del algoritmo de control usado para la navegación autónoma. No obstante, en la definición de funcionalidades telemáticas, muchos de los sensores y componentes de automatización de estos vehículos pueden ser obviados, a favor de una plataforma informática complementada con un sistema de navegación

adecuado y los necesarios transceivers de comunicación. En [12] se sigue esta filosofía, para el montaje de una OBU dotada de interfaces de red con el objetivo de evaluar el rendimiento de una arquitectura VANET. Todavía más fiel al propósito marcado en el diseño de la OBU presentada en la tesis doctoral, es la plataforma de pruebas para ITS descrita en [13]. El ordenador de a bordo es incluso similar al considerado en la propuesta de este capítulo, incluyendo soporte para diversas tecnologías de comunicación intra e inter-vehicular. El hardware de soporte telemático no presenta, sin embargo, un nivel de integración en el vehículo como el sistema que se detalla en las siguientes secciones. La plataforma software de la OBU hace uso de OSGi, aunque no se ofrece un mecanismo de soporte adicional para facilitar la creación de aplicaciones ITS.

La literatura ITS referida a la creación de plataformas software donde ejecutar servicios telemáticos no es, sin embargo, muy extensa. Esto se debe principalmente a que muchas de las aportaciones en este campo provienen de compañías privadas, que, además, continúan estando centradas en soluciones muy específicas. En [14] se presenta un framework para desarrollar software de a bordo en vehículos orientado al usuario final. La propuesta de la tesis doctoral, a diferencia de lo presentado aquí, no muestra una arquitectura basada en APIs de programación para aplicaciones finales. Realmente, el interés de la tesis radica en dar las facilidades necesarias al programador para desarrollar aplicaciones visuales, pero también para crear drivers de acceso a dispositivos físicos, intercambiables durante el ciclo de vida del vehículo. Cada nueva entidad software será añadida de forma modular dentro de la arquitectura. En [15] se encuentra otro ejemplo de plataforma para el desarrollo de software de a bordo. Ésta se centra en los mecanismos de comunicación entre servicios instalados en el vehículo, así como entre estos servicios de a bordo y los que se ejecutan en el lado de la carretera. Jini y JXTA fundamentan la implementación de servicios, aunque el sistema constituye una plataforma mucho menos integrada que la ofrecida por la tesis doctoral, que se encuentra mucho más focalizada al ámbito de ITS, y tiene un carácter mucho más global en cuanto al software que se puede ejecutar en el lado del vehículo. En [16], los autores describen un framework de programación de software de a bordo. Éste consiste en una jerarquía de clases .NET que facilitan la labor del desarrollador. Aunque la idea de construir módulos software es similar al propósito de la arquitectura presentada posteriormente, la flexibilidad provista por OSGi no es comparable a una tecnología de programación, en este caso .NET.

Los trabajos presentados en [17–19] rondan en torno a una plataforma software de a bordo más general y completa que los casos anteriores. En ella se siguen las especificaciones de OSEK/VDX ¹, orientadas a regular la interfaz del software que se ejecuta en las distintas unidades de control del vehículo. Los autores presentan un sistema operativo adaptado a las restricciones de tiempo real del software de bajo nivel del vehículo, y que puede situarse tanto en unidades de control distribuidas, generalmente interconectadas mediante CAN, como en una pasarela común. En ésta última se considera el uso de OSGi para la creación de aplicaciones de alto nivel.

¹<http://www.osek-vdx.org/>

El sistema propuesto por los autores se diferencia, sin embargo, de la plataforma presentada en la tesis doctoral en el ámbito de aplicación principal. La aproximación de aquel trabajo está especialmente centrada en el software de bajo nivel de la electrónica del vehículo y, a pesar de incluir una pasarela general con OSGi, la plataforma telemática final resulta pobre para la creación de servicios ITS de carácter general. Este otro ámbito es tratado correctamente en [20], en donde se muestra un diseño de plataforma software que permite la creación de servicios telemáticos de diversa índole. Al igual que el trabajo que se describe en este capítulo, el sistema está sustentado por una base Java y OSGi, disponiendo además de un conjunto muy extenso de librerías de apoyo para el acceso a diversos dispositivos de a bordo. La aproximación de la tesis doctoral es ofrecer esta última funcionalidad también como servicios OSGi, pero de bajo nivel, que son reutilizados por los nuevos módulos software implementados. Otro concepto relacionado con el trabajo que se presenta en las siguientes secciones es el uso de un sistema de políticas que restringe el uso de los servicios bajo determinadas circunstancias, como cuando el vehículo está en movimiento.

3.3. Plataforma Hardware del Vehículo Referencia

El prototipo considerado en la tesis doctoral para la implementación y pruebas de los sistemas del lado del vehículo se basa en la arquitectura presentada en [10]. Inicialmente, este vehículo fue concebido dentro de varios proyectos de navegación autónoma, por lo que dispone de elementos de control para los pedales de aceleración, freno y dirección. El modelo consiste en un Comarth S1-50, mostrado en la Fig. 3.2. Como se puede observar, el vehículo es un deportivo biplaza, modificado con respecto al modelo comercializado mediante un acuerdo con el fabricante. En la Tabla 3.1 se encuentran las principales características del prototipo. Buena parte del hardware añadido de automatización y sensorización no es utilizado en la tesis doctoral, que sí está centrada, no obstante, en el diseño de una OBU apropiada para servicios telemáticos de nueva generación.

Tabla 3.1: Características del vehículo Comarth S1-50

Características	Descripción
Dimensiones	1780(A)x2500(L)x1120(H) mm
Peso	695Kg
Motor	Ford 1388 cc, 4 cil
Potencia	90 CV
Velocidad máxima	195 km/h
Aceleración 0-100 km/h	8.5 seg
Bastidor	Tubular de acero y aluminio
Carrocería	Fibra de poliéster



Figura 3.2: Vehículo prototipo de referencia en el trabajo

En la fotografía se puede observar cómo la pantalla LCD conectada a la OBU se encuentra integrada en el salpicadero, mientras que los periféricos comunes de control, mediante teclado y *trackball*, quedan ocultos bajo esta. El ordenador de a bordo se encuentra detrás del asiento del copiloto, y está conectado mediante puerto serie al bus CAN y al resto de sensores del vehículo. La mayoría de los sensores inerciales y el receptor GNSS se encuentran instalados bajo el capó, puesto que el vehículo dispone de tracción trasera. La odometría se encuentra, en cambio, distribuida entre las ruedas del vehículo, mediante diversos captosres.

3.3.1. Arquitectura de la Unidad de a Bordo

En la sección 2.1 se describía la arquitectura general de las unidades de a bordo consideradas en la provisión de servicios telemáticos. Dicho esquema se ve especializado con el diseño de la OBU que se considera en la tesis doctoral, que ofrece una plataforma de base adecuada para el despliegue de servicios tanto autónomos, como distribuidos, en los que es necesario hacer uso de redes de comunicación de datos.

En la Fig. 3.3 se muestra el **esquema general de la arquitectura** ideada. La unidad central de proceso se encuentra como coordinadora de la E/S, representada por diversos elementos funcionales en el ordenador de a bordo. Además, obviamente, se encarga de realizar las tareas de procesamiento, y hace uso de un almacenamiento tanto volátil como permanente para dicho trabajo. La electrónica encargada del sonido se encarga tanto de generar audio como de procesar su entrada mediante una entrada

de micrófono. El uso del sistema de sonido del vehículo permite, como se verá más adelante, que diversos servicios puedan emitir alertas sonoras, e incluso notificar mensajes hablados, lo cual mejora la experiencia del conductor y hace más segura la conducción. La interfaz de usuario, o HMI, está representada por periféricos de entrada, como son el teclado y un *trackball*, y la gestión del panel LCD integrado que se mostró anteriormente. Una parte fundamental en la OBU es el módulo de comunicaciones de datos. Como se puede ver en la figura, se hace uso de diferentes puertos y controladores de conexión para ofrecer una diversa conectividad al vehículo. La interfaz LAN permite establecer conexiones internas mediante Ethernet, además de ofrecer la posibilidad de que la OBU se comporte como pasarela de la red intra-vehículo. Mediante conexiones serie estándar (RS-232) es posible conectar la OBU al sensor GNSS, así como al resto de sensores inerciales y electrónica interna del vehículo. Para este último propósito, se hace uso de una conexión mediante interfaz serie al bus CAN. Mediante USB y PCMCIA se pueden conectar dispositivos de red complementarios. Además de ofrecer una interfaz PAN intra-vehículo con Bluetooth y la posibilidad de conexión a una WLAN, son de especial mención los módems de conexión a la red celular. Aunque en las primeras aproximaciones se hizo uso de GPRS, actualmente se apuesta por el servicio 3G mediante UMTS, y la mejora ofrecida por HSDPA.

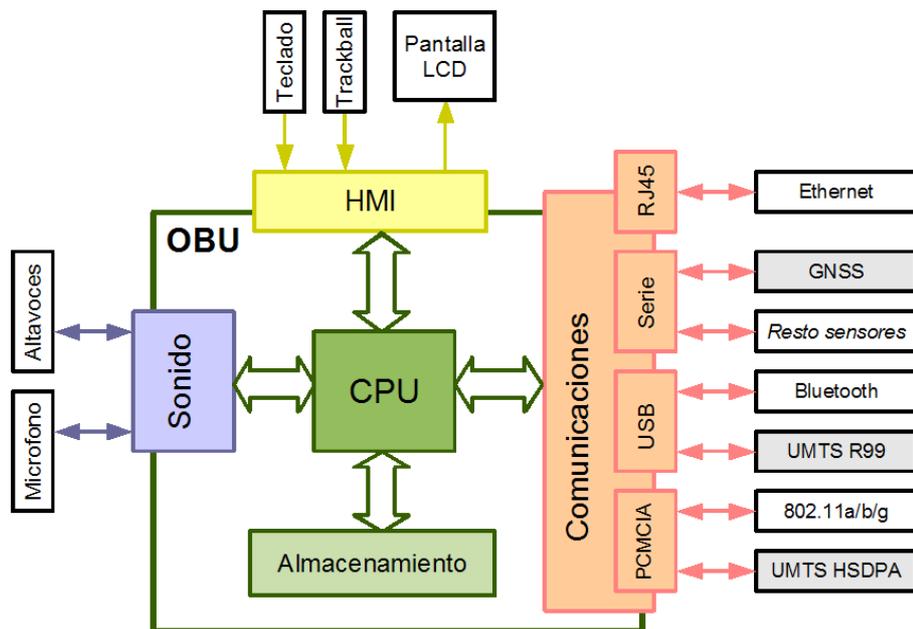


Figura 3.3: Arquitectura de la OBU

En términos concretos, el ordenador de a bordo se ve representado por una plataforma SBC (*Single Board Computer*), en la que la placa base contiene de forma integrada, y en pequeñas dimensiones, las principales funciones de un PC convencional. La Fig. 3.2 contiene una foto del exterior de dicho ordenador. El modelo es una placa VIA EPIA CN-1300 mini-ITX, que contiene un procesador de bajo consumo VIA

C7. La memoria volátil usada es un módulo de 1GB DDR2 RAM, mientras que el almacenamiento magnético viene de la mano de un disco duro de 80 GB. La fotografía anterior muestra el aspecto de la carcasa externa, cuya forma es perfecta para ocultar el ordenador tras el asiento del pasajero. En la propia placa se integra el hardware necesario para la gestión del audio y la E/S mediante monitor y otros periféricos. El sistema operativo considerado actualmente es Linux Fedora, con kernel 2.6. En el frontal de la carcasa se pueden observar dos conexiones USB, aunque existen otras dos en la parte posterior. Una de ellas es usada para insertar una interfaz Bluetooth 3COM Wireless USB Adapter. La conexión a redes WLAN se realiza mediante un adaptador PCMCIA 3COM OfficeConnect Wireless 11g, con soporte para 802.11b/g. El soporte Ethernet es dado por el mismo SBC, que dispone de un controlador integrado. En cuanto a los módems UMTS y a los sensores GNSS usados, las siguientes secciones detallan los dispositivos evaluados. Éstos últimos se han conectado a una interfaz RS232, también usada por el resto de los sensores del vehículo. Para solventar la limitación de puertos serie, cuyo número es de dos, se hace uso de un conversor múltiple USB-Serie.

3.3.2. Sensores GNSS

El conjunto de dispositivos de telecomunicación integrados en el vehículo se ve representado tanto por los interfaces de red para comunicación de datos de propósito general, como por el sensor GNSS utilizado. Durante el desarrollo de todo el trabajo se han usado diversos tipos de sensores GNSS, debido a que las necesidades han sido distintas en diferentes momentos. Para la adecuación del sistema de posicionamiento que se presenta en el capítulo 4 se hacía necesario disponer de receptores capaces de ofrecer opciones avanzadas en la interpretación de mensajes de corrección diferencial de diversa índole, mientras que para el resto de la plataforma telemática de servicios, las necesidades se centraban en disponer de un receptor de coste reducido, con capacidad para interpretar mensajes SBAS y de emitir información de posicionamiento en situaciones de baja cobertura, como en entornos urbanos. El uso de diferentes receptores ha permitido evaluar el rendimientos ofrecido por productos de diferentes fabricantes, a la vez que ha presentado una gran variedad de dispositivos con diferentes capacidades y precios, de la que poder escoger el sensor que más se adaptaba a las necesidades de la plataforma.

La Fig. 3.4 muestra todos los receptores considerados, sobre los que se incluye una pequeña descripción en las siguientes líneas.

Novatel OEM3 El sensor Novatel OEM3 (Fig. 3.4(a)) presentaba hace varios años uno de los receptores de gama alta con más capacidades del mercado. Su principal característica es la versatilidad que ofrece para poder procesar correcciones diferenciales en diferentes formatos. Ofrece soporte WAAS/EGNOS, y es capaz de emitir estos mensajes de navegación en crudo por sus puertos serie, lo cual es de gran utilidad en el trabajo presentado, como se verá en el capítulo 4. Como característica adicional,

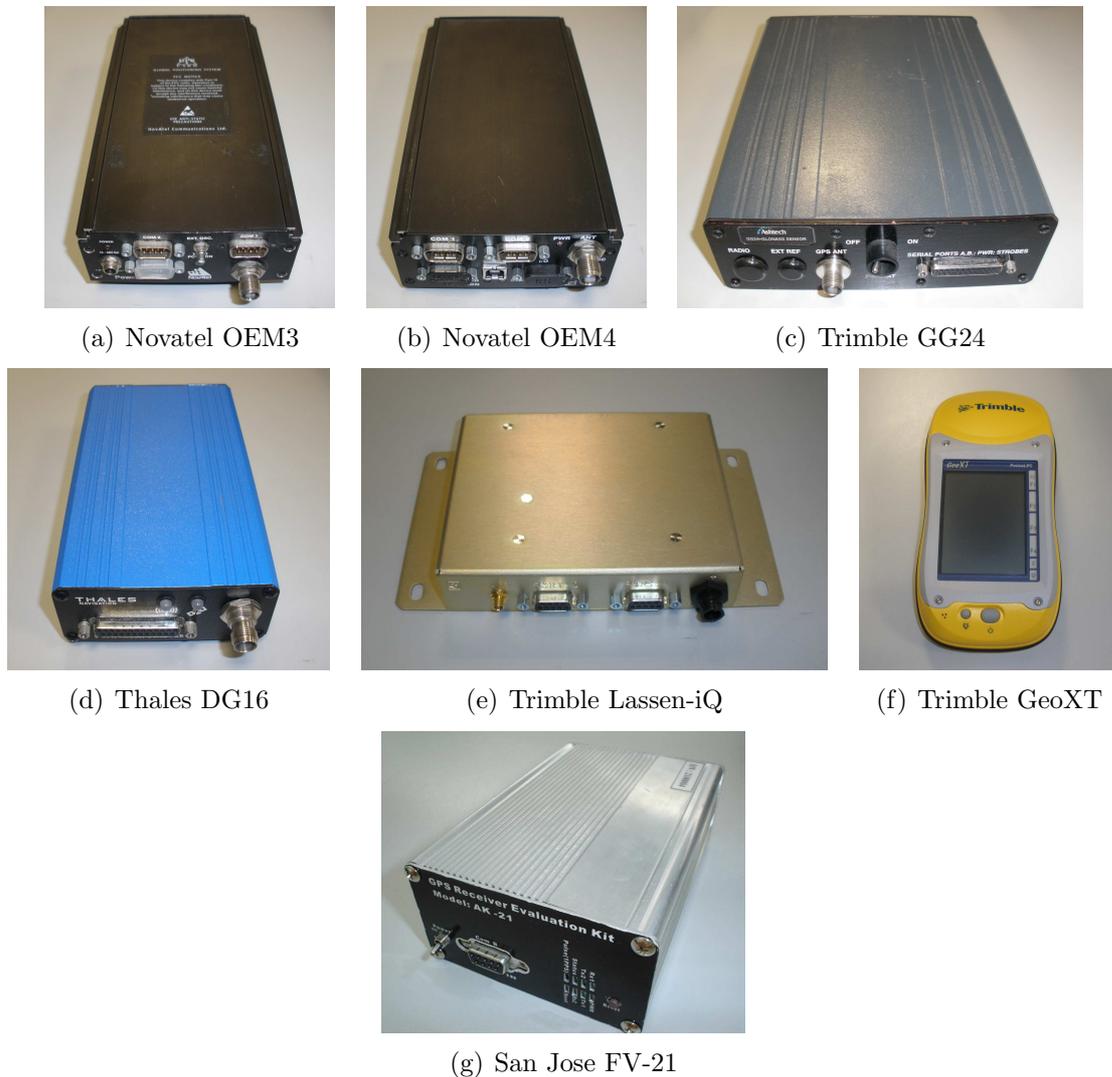


Figura 3.4: Sensores GNSS utilizados

el fabricante ofrecía la posibilidad de actualizar el *firmware* del receptor para poder interpretar directamente los mensajes de SISNeT.

Novatel OEM4 Este modelo ofrece características mejoradas con respecto a su predecesor (OEM3). El sensor Novatel OEM4 (Fig. 3.4(b)) ofrece un posicionamiento mejorado y un puerto USB adicional, con el que es posible disminuir el retardo de la comunicación local con el dispositivo. Sin embargo, no ofrece soporte para interpretar los mensajes SISNeT de forma directa.

Trimble GG24 El receptor Trimble GG24 (Fig. 3.4(c)) ofrece soporte de doble constelación GPS/GLONASS, con lo que mejora la disponibilidad de posición gracias

al uso de un mayor número de satélites. No obstante, no ofrece soporte SBAS y, según las pruebas realizadas con él [72], la mejora en el posicionamiento no es muy apreciable, debido a que hasta hace muy poco tiempo GLONASS había dejado de mantener sus órbitas, y el número de satélites operacionales no era muy alto.

Thales DG16 Este dispositivo también es considerado de gama alta. El receptor Thales DG16 (Fig. 3.4(d)) es compatible con SBAS, y admite correcciones diferenciales a través de sus puertos serie. Dispone de características similares a los modelos OEM3 y OEM4, aunque ofrece menos versatilidad en el conjunto de comandos disponibles.

Trimble Lassen-iQ El sensor Trimble Lassen-iQ (Fig. 3.4(e)) es un receptor de gama media/baja que ofrece una alta disponibilidad en entornos de mala cobertura. Su precisión no es demasiado alta, pero su coste lo hace apropiado para soluciones embebidas. No dispone de capacidades SBAS, pero ofrece la posibilidad de interpretar mensajes de corrección diferencial en varios formatos.

Trimble GeoXT En el producto se integra un GPS embebido en una plataforma PDA robusta (Fig. 3.4(f)). Aunque dispone de una antena interna, es posible conectar una adicional, que puede situarse en el exterior del vehículo. El receptor soporta WAAS/EGNOS y, gracias al software incorporado, es posible aplicar correcciones diferenciales en post-proceso. Mediante este mecanismo se pueden obtener posiciones de alta precisión. Es por esto que, en diversas ocasiones, la posición de este receptor se ha considerado como referencia para estudiar el rendimiento de los otros sensores.

San Jose FV-21 El sensor San Jose Navigation FV-21 (Fig. 3.4(g)) dispone de características y precio similar al Lassen-iQ, salvo que ofrece capacidades SBAS. Este receptor es un ejemplo claro de los avances en los receptores en los últimos años, siendo un producto con un buen funcionamiento y un precio muy ajustado. Al poder configurarse en modos con y sin soporte SBAS, es posible usarlo para aplicar correcciones diferenciales en tiempo real mediante puerto serie, o usar SBAS mediante EGNOS. Junto con el Novatel OEM3, este sensor ha sido el más usado, y se propone como receptor adecuado en la plataforma de a bordo del vehículo.

3.3.3. Módems de Conexión a la Red Celular

El prototipo hardware desarrollado ha sido dotado de una interfaz UMTS para poder hacer uso de la plataforma de comunicación presentada en el capítulo 5. Inicialmente la OBU disponía de un módem GPRS, que fue sustituido para dotar de un mayor ancho de banda a la conexión y un menor retardo. La arquitectura de comunicación ha sido evaluada inicialmente haciendo uso del primer despliegue de UMTS en Europa, conocido como R99. Para observar las mejoras introducidas por la tecnología HSDPA se hizo uso de un segundo módem. Puesto que se equipó otro

vehículo convencional para realizar pruebas de comunicación V2V², se consideran dos módems UMTS R99 y otros dos UMTS HSDPA.

Todos los módems utilizados se muestran en la Fig. 3.5. Los modelos Novatel Wireless Merlin U530 (Fig. 3.5(a)) y Huawei E220 (Fig. 3.5(c)) fueron los usados en la OBU del vehículo prototipo, mientras que el Huawei Mobile Connect E612 (Fig. 3.5(b)) y el ZTE MF620 (Fig. 3.5(d)) se instalaron en la plataforma adicional ofrecida por el vehículo complementario. Los modelos Huawei E220 y ZTE MF620, además de ser compatibles con UMTS, soportan HSDPA, con lo que han sido los escogidos para para la plataforma final. La mejora más importante de los modems HSDPA con respecto a los R99 se centra en el canal de bajada. Los modelos HSDPA usados ofrecen velocidades de conexión en el canal de bajada de hasta 3.6 Mbps y 384 Kbps en el de subida, lo cual mejora los valores de 384/128 Kbps de los modelos R99.



(a) Novatel Wireless Merlin U530 (b) Huawei Mobile Connect E612



(c) Huawei E220 (d) ZTE MF620

Figura 3.5: Modems UMTS considerados en la plataforma

²En el capítulo 5 se describe el vehículo adicional utilizado para las pruebas V2V

3.4. Arquitectura Software de a Bordo Basada en Pasarela de Servicios

Con el objetivo de tratar la creciente aparición de funcionalidades de a bordo, se ha diseñado una plataforma software sobre la que crear nuevas aplicaciones que puedan sustituir a la instalación de nuevos dispositivos en el vehículo. Mediante una base software orientada a servicios, se pueden cubrir los requisitos anteriormente discutidos de modularidad, portabilidad, facilidad de despliegue y facilidad de uso.

Una arquitectura orientada a servicios, como es el caso de OSGi, presenta diversos beneficios, entre los que se destacan los siguientes [20]:

Interfaz estandarizada La gestión del ciclo de vida de las aplicaciones de a bordo se realiza a través de un interfaz homogéneo, e incluso los propios usuarios pueden hacer uso de un entorno hardware/software familiar para acceder a los servicios disponibles.

Acceso centralizado Mediante la pasarela de servicios, cualquier funcionalidad de a bordo puede centralizarse mediante una interfaz hombre-máquina común.

Control sobre aplicaciones En la propia pasarela se puede gestionar el uso que se hace de las aplicaciones, cuidando de la seguridad en la conducción y teniendo en cuenta otras políticas.

3.4.1. Diseño de una Arquitectura de Abstracción en Capas

Como se ha mencionado previamente, las pasarelas de servicio se presentan adecuadas para el conjunto de funcionalidades software que pueden ser desplegadas en el vehículo. Desde las primeras andadas de esta tecnología en la creación de pasarelas residenciales, sus ventajas se han extendido a otros campos. El entorno del vehículo es, por ejemplo, uno de estos nuevos lugares en donde las pasarelas de servicio, como OSGi, presentan una buena integración. En el caso que nos ocupa, el ordenador de a bordo se ha dotado de esta capacidad, sobre la que se instala el software del vehículo de valor añadido, representado tanto por los diferentes servicios telemáticos que el usuario puede utilizar, como por el software de bajo nivel para el acceso a diferentes dispositivos.

La Fig. 3.6 muestra la arquitectura software diseñada para el despliegue de servicios en la OBU. Todos los sensores y dispositivos adicionales incluidos en el vehículo se conectan a la OBU a través de un medio de comunicación que puede alternar entre conexiones inalámbricas o con cable, tal y como se describió anteriormente. El ordenador considerado por la plataforma es un PC común con un sistema operativo no prefijado de antemano. Sobre éste último se dispone una máquina virtual Java (JVM) para ejecutar software independiente de la plataforma. Varios APIs de programación se sitúan sobre esta base Java, entre los que destacan Java Comm, Java Media Framework, Java Speech y JXTA. Java Comm es usado en las comunicaciones por puerto serie,

como la conexión hacia el sensor GNSS y hacia los captores odométricos; Java Media Framework es utilizado en el desarrollo de software multimedia; Java Speech provee de un API con funciones de síntesis de voz, que permitirá a la OBU emitir alertas habladas; finalmente, la librería de JXTA se usa para poder acceder a la red *overlay* diseñada. Otras APIs son usadas en la programación gráfica y matemática con Java. OSGi está localizada sobre esta base Java, haciendo a la OBU capaz de contener diferentes servicios. Los diferentes *bundles* que se instalan en el *framework* pueden funcionar como aplicaciones finales, o como *bundles* que ofrecen servicios en la plataforma.

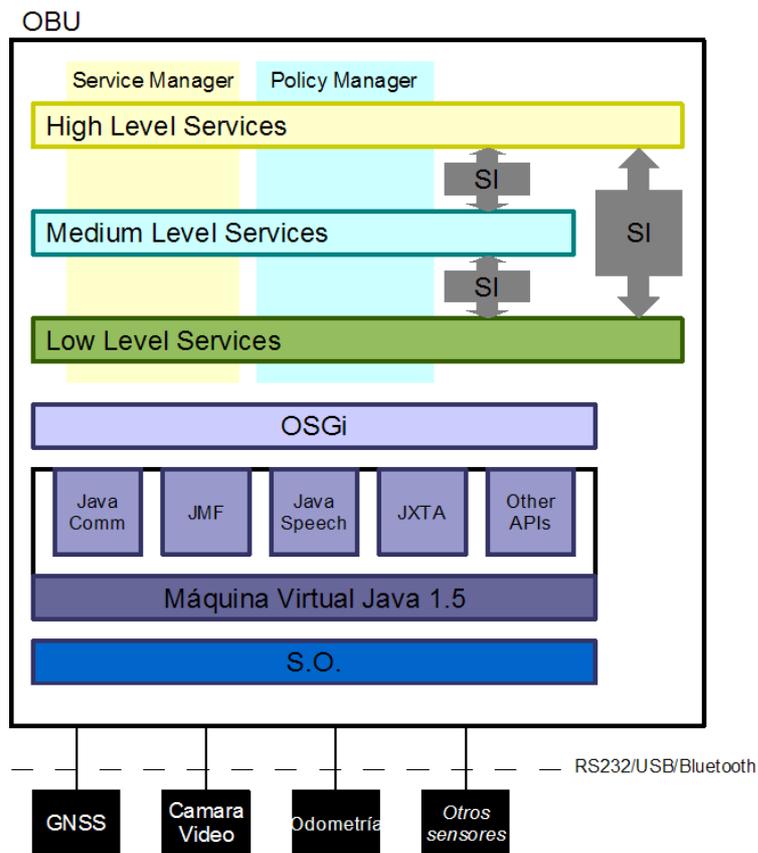


Figura 3.6: Arquitectura de definición de servicios OSGi basada en capas

De vuelta al diagrama, el conjunto de capas visibles sobre la de OSGi son los servicios implementados dentro de la arquitectura. Éstos se incluyen en una plataforma multi-capa que los clasifica de acuerdo con su nivel de abstracción, ofreciendo una división entre bajo nivel, nivel medio, y alto nivel. Los servicios de bajo nivel constituyen el software necesario para el acceso a los diversos dispositivos instalados en el vehículo. Así pues, estos servicios pueden ser considerados como drivers para el hardware del vehículo. Los servicios de nivel medio actúan como middleware entre los incluidos en la capa de bajo nivel y las aplicaciones de nivel de usuario. Esta capa realiza tareas de transformación y de adaptación de la información, enriqueciendo la

funcionalidad ofrecida por los servicios de bajo nivel. Finalmente, los servicios de alto nivel comprenden las aplicaciones finales, implementadas como bundles que no ofrecen nuevos servicios, y que presentan una interfaz directa con el usuario.

La estructura jerárquica de servicios descrita tiene un doble propósito. Primero, la creación de nuevos servicios es facilitada por una programación modular. Si alguna funcionalidad debe ser usada, o se espera que lo sea, por alguna nueva aplicación, ésta puede ser encapsulada como un servicio. Por otro lado, usando esta metodología de desarrollo, los problemas de sincronización en el acceso a los dispositivos instalados en el vehículo pueden ser resueltos. Esto es, no solamente el software que se usa como driver es reutilizado, sino que la implementación de servicios de bajo nivel sincroniza el uso del hardware. Este último hecho se ve de manifiesto en los sensores usados ampliamente por los servicios de a bordo, como puede ser el GNSS. Debido a que una gran cantidad de servicios puede necesitar información de posicionamiento, el acceso al sensor debe estar coordinado. Incluso, una ventaja añadida viene con la posibilidad de usar técnicas de *buffering* de información, por lo que es posible que los servicios de bajo nivel puedan servir peticiones que deberían circular hacia los dispositivos reales, pero que son tratadas mediante información almacenada temporalmente.

La comunicación entre capas se lleva a cabo mediante interfaces de servicio (SI). Cada capa define un conjunto de interfaces de servicio que indican las funcionalidades disponibles. Una SI es realmente una interfaz Java que puede estar implementada por uno o más bundles OSGi para ofrecer determinados servicios. Si un bundle situado en las capas superiores necesita de una funcionalidad provista por una SI, éste lanza una consulta al framework de la pasarela de servicios usando la SI como parámetro. Como resultado, el framework devuelve la implementación del conjunto de servicios que desarrollan la funcionalidad requerida. Hasta el momento, se ha definido un conjunto base de interfaces de servicio que establecen las capacidades de varios módulos de la capa *middleware* y la de bajo nivel. Estas conforman las siguientes funcionalidades:

- Acceso a sensores GNSS. Esta SI de bajo nivel establece el conjunto de primitivas de acceso al receptor de posicionamiento.
- Soporte de visión del vehículo. Contiene capacidades multimedia relacionadas con el soporte de una video cámara. Esta SI se sitúa igualmente en la capa de bajo nivel.
- Síntesis de voz. Se contemplan varias primitivas de emisión de alertas habladas, con tal de adecuar una interfaz con el usuario adecuada para los ITS embarcados. Esta SI se considera válida en las capas de nivel medio o bajo.
- Acceso a odometría. Si el vehículo dispone de odometría (como es el caso del prototipo considerado), los módulos que implementen esta SI deben ofrecer varias primitivas relacionadas con mediciones de velocidad. Debido a sus características de bajo nivel, esta SI forma parte de la primera capa de abstracción.

- Interpretación y procesamiento de información de navegación. Las primitivas relacionadas con los cálculos extendidos de SBAS se encuentran incluidas en esta SI de nivel *middleware*.
- Acceso a red P2P. Con esta SI se aglutinan las primitivas de acceso a una red P2P, necesarias en la plataforma de comunicación del vehículo. También es una SI dentro de la capa media, ya que ofrece un soporte *middleware* de acceso a una red P2P.

3.4.2. Middleware de Gestión Interna del Sistema

Existen dos módulos integrados en la arquitectura presentada que realizan una tarea bien definida en el sistema. Éstos son Policy Manager y Service Manager. Éste último ha sido desarrollado como un módulo de alto nivel, tal y como puede observarse en el color usado en la Fig. 3.6. Su interfaz gráfica muestra el conjunto de servicios que se han instalado en el sistema, ordenados por su nivel de abstracción. A partir de aquí, el usuario puede habilitar, deshabilitar o actualizar los servicios que se encuentran instalados.

Policy Manager ha sido creado como un servicio de nivel medio, ya que contiene un conjunto de funcionalidades usadas de forma transparente por los servicios de alto nivel. Gracias a Policy Manager, los servicios de nivel de usuario cumplen con regulaciones de seguridad cuando alguna restricción de entre un conjunto configurado se cumple. Por ejemplo, se podrían implementar interfaces gráficas para mantener la atención del usuario en la carretera cuando el vehículo está en movimiento. La Fig. 3.7 muestra un diagrama de clases con las entidades que intervienen en el gestor de políticas diseñado. Los servicios de nivel de usuario, implementados como servicios o bundles OSGi, heredan de una clase que incluye la funcionalidad necesaria para hacer que éstos estén restringidos por el sistema de políticas. De esta manera, el servicio Policy Manager envía una notificación cuando una restricción se cumple, y la propia implementación del servicio en cuestión (normalmente de nivel de usuario) decide qué hacer. Para realizar esta tarea, Policy Manager se encuentra continuamente funcionando y chequeando las políticas configuradas, como puede ser una comprobación sobre si el vehículo está en movimiento, si alcanza una velocidad determinada, o si se detecta humedad en el limpiaparabrisas.

Los servicios se registran en el gestor de políticas mediante un conjunto de restricciones. Éstas son gestionadas por Policy Manager haciendo uso de los servicios de bajo nivel que le proporcionan acceso a los sensores del vehículo, tal como la odometría o el receptor GNSS. En el diseño de la plataforma se han integrado las siguientes restricciones para controlar el funcionamiento de las aplicaciones de alto nivel:

- Movimiento. Monitoriza la dinamicidad del vehículo.
- Velocidad. Permite establecer diversos límites de control en base a la monitorización de la velocidad.

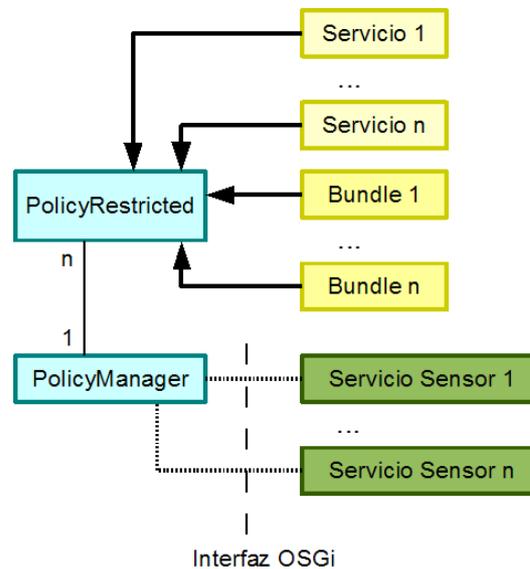


Figura 3.7: Subsistema de políticas de ejecución de aplicaciones

- Temperatura. Permite establecer cambios en el funcionamiento de las aplicaciones en base a la temperatura actual.
- Presencia de conductor y/o copiloto. Monitoriza si el conductor o el copiloto están sentados.

3.4.3. Implementación de la Plataforma

La arquitectura software se ha implementado sobre el ordenador de a bordo del vehículo prototipo, haciendo uso de dos desarrollos del *framework* OSGi para comprobar su correcto funcionamiento: Knopflerfish [44] y Oscar [45]. Ambos son implementaciones de código abierto de la *Release 3* de OSGi.

Tal y como se ha dicho anteriormente, existe un servicio de alto nivel que se implementa sobre la arquitectura propuesta, con el objetivo de permitir al usuario manejar el resto de los servicios de la plataforma. Este es Service Manager, cuya implementación de referencia se muestra en la Fig. 3.8. Esta aplicación muestra todos los servicios instalados actualmente en el framework OSGi que pertenecen a la arquitectura. El usuario puede iniciar, parar o actualizar cada uno de ellos de manera sencilla. Los servicios que se desarrollan para estar incluidos en la plataforma tienen unas características especiales en su archivo de despliegue JAR, distinguiéndolos del resto de los instalados en el framework OSGi mediante dos propiedades especiales, denominadas *Bundle-Type* y *Bundle-Icon*. La primera de las propiedades sirve para indicar la capa en la que se sitúa el bundle y los servicios que éste provee. La propiedad *Bundle-Icon* sirve para especificar una imagen representativa del *bundle*, que será usada por Service Manager para situar un icono en la interfaz gráfica. En la Fig. 3.8 se pueden

observar todos los servicios implementados, que se disponen en la pantalla de acuerdo con su nivel de abstracción.



Figura 3.8: Aplicación de gestión de servicios de la plataforma

Policy Manager se ha implementado también como un *bundle* OSGi común, por lo que no aparece en la ventana de gestión de servicios de la plataforma, ya que no debe estar directamente accesible por el usuario. Todos los servicios de alto nivel implementados hasta la fecha heredan de la clase abstracta que representa *PolicyRestricted*, e incluyen código específico para tratar los eventos de censura impuestos por el sistema. El procedimiento común llevado a cabo por las aplicaciones de nivel de usuario consiste en pausar la ejecución y ocultar el interfaz gráfico de la pantalla. Hasta el momento, Policy Manager usa el servicio Odometer para implementar la restricción de velocidad del vehículo. De esta manera, se chequea periódicamente si la velocidad del vehículo es mayor que un cierto umbral. Si es éste el caso, todos los servicios de alto nivel que están registrados con esta restricción son notificados.

3.4.4. Implementación de Servicios de Referencia

Los servicios que se han implementado hasta la fecha son descritos a continuación, atendiendo a su nivel de abstracción en la arquitectura software desarrollada. Los pertenecientes a las capas de bajo nivel y *middleware* (nivel medio) presentan una implementación para cada una de las SI hasta ahora consideradas en el diseño de la plataforma.

Servicios de Bajo Nivel

Los servicios de bajo nivel desarrollados hasta el momento son:

- GNSS Positioning. Éste es un servicio genérico de acceso al sensor de posicionamiento. Los diversos receptores GPS descritos anteriormente son soportados. El servicio está diseñado a través de un diseño extensible que permite la inclusión de nuevos sensores sin un gran esfuerzo. Mediante una arquitectura de clases extensible, se puede añadir el código necesario para soportar un nuevo receptor de forma sencilla.
- Video Camera. Este servicio es usado para establecer una conexión con una cámara situada en la parte trasera del vehículo. La lógica del servicio usa Java Media Framework para obtener la imagen recibida desde la cámara.
- Speech Module. Éste encapsula un sintetizador de voz disponible para el resto de los servicios que requieran emitir alertas habladas. Éste sistema permite que el conductor no tenga que desviar la vista de la carretera cuando se emite algún evento desde los servicios de a bordo. El software ha sido implementado usando FreeTTS [46], una implementación parcial del API Java Speech.
- Odometer. Este servicio obtiene información desde los sensores de odometría instalados en las ruedas del vehículo prototipo. La odometría del vehículo está compuesta por cuatro captosres que obtienen la velocidad de rotación de cada rueda, estimando la velocidad del móvil.

Servicios de Nivel Medio

En la capa intermedia se incluye un servicio middleware llamado *SBAS Processor Utility*, que contiene diversas utilidades relativas a los sistemas de aumento de la señal GNSS. En este sentido, la información SBAS recibida desde el propio sensor GNSS, o a través de Internet mediante SISNeT, es usada para propósitos de corrección y de cálculos de integridad de la posición. Las correcciones son adaptadas a un formato más común, como es RTCM, y se calcula el factor de integridad HPL. La red celular es necesaria para conectar con el servidor SISNeT cuando la señal SBAS no está disponible. Este módulo software comprende la implementación de la funcionalidad añadida al sistema de navegación que se presenta en el capítulo 4.

El servicio JXTA Communications ofrece funciones de comunicación P2P al resto de los servicios del sistema. El acceso a la librería JXTA se ha simplificado mediante una interfaz mucho más sencilla a través de este servicio. Con ella es posible establecer canales de comunicación mediante tuberías JXTA, abstrayéndose de los detalles de la red *overlay*. En el capítulo 5 se ofrecen más detalles sobre la implementación de la arquitectura de red vehicular diseñada.

Servicios de Alto Nivel

Las aplicaciones de alto nivel disponen de una interfaz directa con el usuario. En la Fig. 3.9 se muestra una captura de pantalla de cuatro de ellos³. Hasta el momento, el conjunto de servicios implementados en la capa de alto nivel son los siguientes:

- Integrity Monitor (Fig. 3.9(a)). Ésta es una aplicación usada para monitorizar la integridad de la posición emitida por el sistema de posicionamiento. Para este propósito, se hace uso del servicio SBAS Processor Utility, además del Speech Module, para alertar al conductor cuando el factor de integridad excede un límite prefijado.
- Media Player (Fig. 3.9(b)). Éste es un reproductor multimedia con el que se pueden abrir ficheros en diversos formatos de video y audio. Como demuestra este servicio, es destacable observar cómo los reproductores de video, e incluso los de CD/radio, podrían reemplazarse por software ejecutable en la OBU.
- Rear Visor (Fig. 3.9(c)). Con esta aplicación, el usuario dispone de una imagen desde la parte trasera del vehículo, gracias al servicio Video Camera. El propósito de esta funcionalidad es mejorar la visión del conductor en el aparcamiento, sobre todo.
- Navigator (Fig. 3.9(d)). Este programa dispone de funcionalidad de navegación y diversas características orientadas al peaje electrónico mediante GNSS, gracias al uso de un sistema de información geográfica (GIS). La aplicación depende del servicio GNSS Positioning, ya que la posición del vehículo es necesaria para localizarlo en la cartografía digital. El servicio SBAS Processor Utility es usado para calcular la integridad de la posición, y el Speech Module es útil para avisar al usuario acerca de eventos de interés. La captura que se puede observar en la figura ejemplifica una situación en la que el vehículo circula por el Campus de Espinardo de la Universidad de Murcia. La ventana indica un mensaje de alerta debido a que el HPL se encuentra fuera de los límites definidos. Aunque el programa muestra este evento gráficamente, una alerta hablada es emitida para que el conductor no cometa ninguna imprudencia desviando la vista de la carretera. El resto de la información incluida en la ventana comprende la posición actual, la distancia hasta la calle más cercana, y la información relativa a ésta.

³El servicio Message Console será explicado en detalle en el capítulo 5



Figura 3.9: Servicios de referencia implementados sobre la plataforma software

- Message Console. Esta aplicación hace uso del servicio JXTA Communications, para crear un sistema de avisos de seguridad en carretera y de información dependiente del contexto, implementando la aplicación cliente de referencia de la arquitectura de comunicación presentada en el capítulo 5.

3.4.5. Desarrollo Orientado a la Composición

Tal y como se desprende de la descripción de los servicios implementados, la creación de nuevos módulos software en la plataforma se realiza en base a los ya existentes, favoreciendo la reutilización mediante composición. La Fig. 3.10 representa gráficamente esta idea. Los nuevos servicios/aplicaciones se crean en base a los módulos que forman parte de las capas inferiores, lo cual se ve especialmente reflejado en el

software de nivel de usuario. Tradicionalmente, las nuevas aplicaciones de a bordo son desarrolladas de forma integral, por lo que no se hace uso de un diseño modular como el presentado. Además, como se ha dicho, muchos de estos servicios se despliegan sobre hardware específico, lo cual acentúa el problema. Estos factores encarecen los ciclos de implementación y mantenimiento.

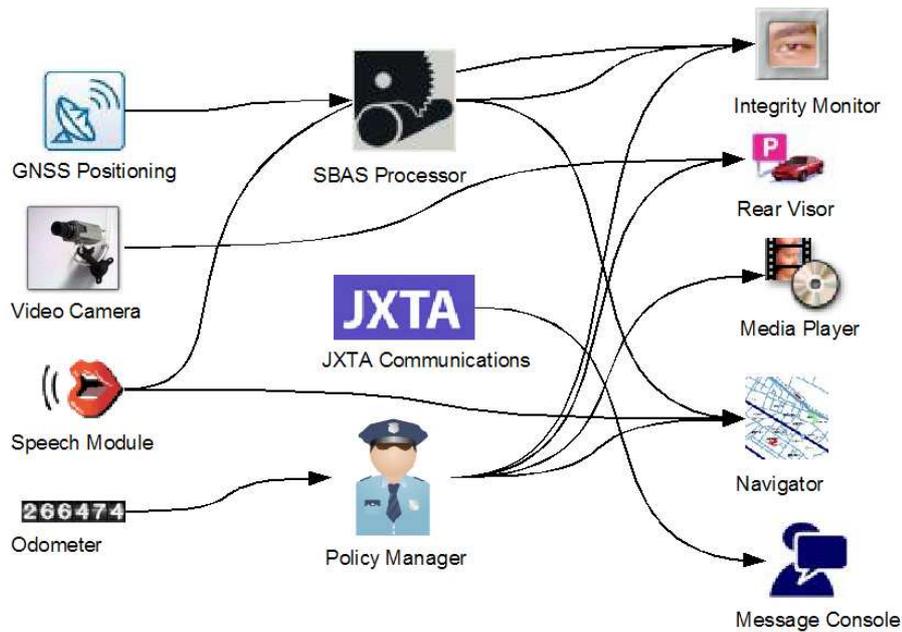


Figura 3.10: Composición de servicios en la plataforma software

Como se observa en el anterior diagrama, las nuevas aplicaciones hacen uso de módulos ya desarrollados, y que están altamente testeados, tanto a nivel individual como integrados en otros servicios. La aplicación de navegación, por ejemplo, usa tanto un módulo de bajo nivel para emitir alertas habladas, como información tratada proveniente del sistema de navegación del vehículo, además de estar restringida por el sistema de políticas. En un diseño tradicional, esta aplicación necesitaría de un soporte integral de todas estas funcionalidades que, por otro lado, no serían aprovechadas por otros servicios.

3.5. Conclusiones

El capítulo ha presentado la arquitectura hardware/software diseñada para la investigación en servicios telemáticos ITS, ofreciendo la base para el resto de propuestas descritas en la tesis doctoral. El vehículo prototipo considerado se muestra como un marco perfecto para el trabajo, ya que en el momento de comenzar ya disponía de un equipamiento de a bordo ampliamente dotado de sensores de navegación.

Recibe una especial mención el ordenador de a bordo considerado como núcleo de la OBU, el cual está basado en una arquitectura SBC que presenta un computador de propósito general. Sobre este ordenador se instala todo el software de valor añadido para usuarios y pasajeros. Las telecomunicaciones y la navegación en la OBU son especialmente relevantes para el propósito de la tesis doctoral, es por ello que se ha trabajado ampliamente en la incorporación de un sensor GNSS adecuado para los requerimientos de la plataforma, al igual que se han añadido las necesarias interfaces de comunicación de datos para ofrecer conectividad inalámbrica a diferente nivel. Además de las conexiones de corto y medio alcance ofrecidas por las redes PAN y LAN, y representadas por Bluetooth y 802.11b/g, las redes celulares presentan una gran importancia en todo el trabajo. El sistema de comunicación presentado en el capítulo 5 hace uso de la red UMTS para establecer una conexión con una red overlay. Por ello, se han considerado dos tecnologías diferentes de acceso celular, UMTS R99 y UMTS HSDPA, si bien la última evidenciará las mejoras que supone la evolución de las operadoras hacia la tecnología HSPA.

La arquitectura propuesta incluye una plataforma software basada en un ordenador de propósito general y que, por tanto, cuadra perfectamente en el ordenador de a bordo considerado. La arquitectura software dispone de la habilidad de soportar servicios de valor añadido para el conductor y los pasajeros mediante una pasarela de servicios. OSGi, después de mostrar sus ventajas en el entorno del hogar, es considerado como un elemento clave en el desarrollo de funcionalidad software para vehículos. Debido a esto, un framework OSGi se ha usado para soportar todos los servicios de a bordo. Éstos han sido clasificados mediante una plataforma basada en niveles de abstracción, permitiendo la creación de nuevos servicios de una manera modular. Esto favorece la reutilización, extensibilidad del sistema, y la creación de nuevas funcionalidades por composición. El sistema de políticas de ejecución gestiona la activación de los servicios dependiendo del estado del vehículo, lo cual incrementa la seguridad.

El conjunto de servicios implementados muestra el carácter genérico de la arquitectura software propuesta, así como los diferentes ámbitos que cubre el sistema en el espectro de la funcionalidad de a bordo para los ocupantes del vehículo. En este sentido, no solamente se han tratado servicios basados en la localización, sino también los multimedia y los de asistencia a la conducción. Los servicios de navegación y de monitorización de la integridad desarrollados en el prototipo son considerados dentro del grupo de LBS, mientras que el reproductor multimedia y el visor trasero caben dentro de los servicios de entretenimiento y de asistencia a la conducción, respectivamente. Los capítulos 5 y 6, sobre todo, ampliarán el carácter autónomo de estos servicios, mediante la conexión del vehículo a una red *overlay* y la integración de éste en el contexto de circulación.

La creciente implantación de funcionalidades de a bordo en los vehículos de reciente aparición justifica el uso de arquitecturas como la presentada, con el objetivo de evitar una excesiva proliferación de dispositivos en el habitáculo. Es por esto que, añadir servicios implementados como software embebido en un ordenador compartido de propósito general, puede jugar un papel clave en las futuras generaciones de vehículos. El modelo de negocio se puede ver mejorado, y el servicio ofrecido a los usuarios en la

actualización de funcionalidades de a bordo puede ser más eficiente y menos costoso.

El desarrollo de nuevos servicios, a medida que la demanda de funcionalidades de a bordo aumente, y la incorporación de un mecanismo de actualización remota de los módulos software de la plataforma, se identifican como principales labores a realizar en un futuro. Además, la investigación en nuevos interfaces de usuario para las aplicaciones de a bordo, es un aspecto relevante dentro de ITS. Aunque se ha considerado en el prototipo un sintetizador de voz y se han evaluado opciones de pantalla táctil, la interacción con la OBU sigue siendo manual y, según la normativa actual, esto debe limitarse a condiciones en las que el vehículo no esté en circulación. Los avances en el procesamiento natural de la voz serán de vital importancia para la gestión de los sistemas telemáticos de los vehículos del futuro.

Capítulo 4

Sistema de Navegación y Monitorización de Integridad Basado en GNSS/SBAS e Internet

El capítulo 2 sentó las bases tecnológicas necesarias sobre GNSS, las cuales serán de utilidad para la comprensión del sistema de navegación ideado en la tesis doctoral, presentado en este capítulo. Haciendo uso de la plataforma hardware del vehículo prototipo, y en particular de la OBU instalada, este capítulo describe la arquitectura del subsistema de navegación diseñado, centrado en explotar las ventajas de los SBAS en el ámbito de ITS. El sistema de navegación será considerado en la arquitectura de comunicación presentada en el capítulo 5 a la hora de notificar eventos, a la vez que mejorará la integración del vehículo en el entorno, según la arquitectura presentada en el capítulo 6, puesto que la posición es un parámetro primordial en la determinación del contexto.

Tras una breve introducción y un apartado de trabajo relacionado, el presente capítulo describe el sistema completo de uso extendido de información SBAS a través de la apuesta Europea EGNOS. La Fig. 4.1 muestra los principales elementos constituyentes de la plataforma propuesta que se tratan en esta parte de la tesis doctoral. El sistema de navegación de a bordo se complementa con una estación de monitorización situada en un laboratorio externo, al cual permite seguir el estado de GPS/EGNOS, y ofrece un servidor de mensajes SBAS accesible por Internet, alternativo a SISNeT. El sistema de navegación de a bordo se ha provisto de un software capaz de transformar los mensajes emitidos por EGNOS a un formato de mensaje de corrección diferencial mucho más sencillo, como es el propuesto por RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*). Este mecanismo expande la disponibilidad de las correcciones de EGNOS a receptores de gama media/baja, mediante la recepción de mensajes SBAS a través de Internet y su posterior conversión.

El mismo software que adapta las correcciones SBAS, también es capaz de calcular en la OBU el factor de integridad de la posición. Mediante este parámetro es posible monitorizar el estado del sistema de navegación, con tal de informar al usuario/aplicaciones de la fiabilidad de la posición calculada. El uso de la OBU

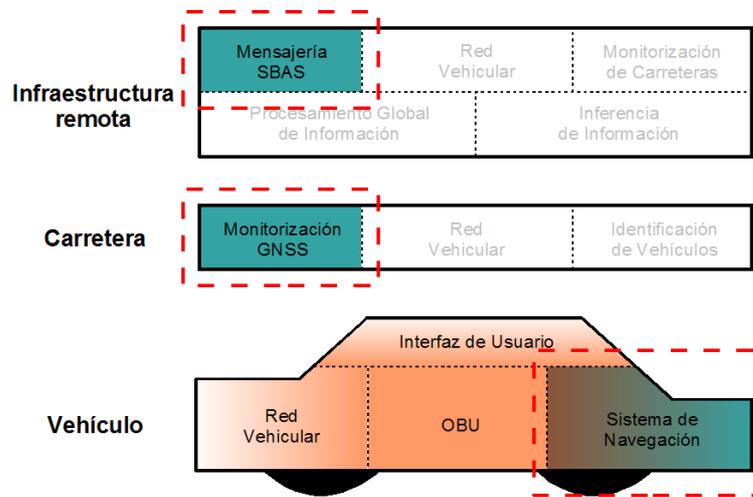


Figura 4.1: Aportación del capítulo 4 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral

para esta función descarga la complejidad necesaria en la electrónica del receptor, disminuyendo el precio del dispositivo a usar. El factor de integridad se calcula siguiendo un algoritmo equivalente al propuesto por la RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*), adecuando su cálculo al transporte por carretera y evaluando su implantación en el campo de ITS. La integridad de los sistemas de navegación terrestre es un aspecto de suma importancia en el campo de la navegación terrestre. El uso de un factor de integridad en sistemas de navegación GNSS, presenta hoy en día un amplio abanico de aplicaciones para servicios que estarán disponibles en un futuro inmediato, como pueden ser el peaje electrónico o la facturación de seguros por uso del vehículo. En estos casos, la integridad de la posición ofrece información sobre la fiabilidad de la localización, lo cual es vital para cobrar correctamente al conductor por el uso de las infraestructuras viarias o por el uso del propio vehículo.

El rendimiento del sistema de navegación es evaluado sobre entornos reales, variando entre emplazamientos urbanos y espacios abiertos. Además, la lógica de monitorización de integridad es analizada en pruebas tanto estáticas como dinámicas. Se ha realizado un estudio complementario de suma importancia a la hora de considerar el cálculo de dicho factor de integridad a través de los mensajes de EGNOS mediante SISNeT, ya que el canal de comunicación empleado en la conexión a Internet puede presentar fluctuaciones que impacten seriamente en los resultados obtenidos. Para este propósito, se ha comparado el nivel de integridad de la posición calculado de forma simultánea mediante el uso de los mensajes de EGNOS, directamente procesados por el receptor, y los recibidos mediante SISNeT.

4.1. La Navegación Terrestre y el Rol de la Integridad de la Posición

La cantidad de servicios vehiculares que requieren de capacidades de posicionamiento está creciendo a un ritmo vertiginoso actualmente; y aunque estas necesidades pueden cubrirse en muchas ocasiones con sensores GNSS de gama media/baja, como es el caso de los extendidos chips Shif, el despliegue de aplicaciones más complejas requiere de un posicionamiento más fiable. El peaje electrónico mediante el uso de GNSS, y los diversos servicios de seguridad que se están planteando en el mundo de ITS, son ejemplos claros de estas aplicaciones. En el primer caso, se pueden presentar problemas legales/administrativos si se factura al conductor por circular por un tramo de carretera que realmente no usó, además de las pérdidas que se pueden producir por el efecto contrario en el lado del operador de la autopista. No obstante, los problemas derivados de la seguridad son todavía más importantes en los servicios ITS de prevención de accidentes. Muchos trabajos relativos al uso de VANET para la evitación de colisiones, por ejemplo, hacen uso de un sistema de navegación para mantener información local sobre la posición de los vehículos circundantes [3, 4]. Por lo general, no se presta la necesaria atención al sistema de navegación usado, aunque la posición de los vehículos del entorno es, obviamente, una cuestión crítica a la hora de generar alertas.

Los requisitos de los sistemas de navegación están siendo cada vez más altos, y no solo en términos de precisión, sino también considerando la disponibilidad del sistema y la integridad de la posición calculada. Todos estos elementos deben ser tenidos en cuenta si se pretende desplegar un servicio de a bordo en el mercado. Tras la eliminación de la disponibilidad selectiva de la señal GPS en el año 2000, muchos sensores GNSS de gama media, e incluso baja, son capaces de ofrecer un buen rendimiento en localizaciones donde la cobertura hacia la constelación de satélites no se ve obstruida. Sin embargo, en emplazamientos urbanos y montañosos, la pérdida de cobertura satelital ocasiona variaciones en la calidad de la posición calculada. La aparición de SBAS, en Europa representado por EGNOS, ofrece una mejora en la precisión que se ha visto, no obstante, disminuida por la desactivación de la disponibilidad selectiva. Sin embargo, los SBAS actuales ofrecen satélites adicionales que pueden usarse como medidas complementarias de pseudo-distancia, mejorando la disponibilidad del sistema GNSS base. Además, una característica que se está haciendo cada vez más relevante es la posibilidad de calcular un factor de integridad de la posición. Esto no aumenta la precisión, pero permite a las aplicaciones ser conscientes de que el rendimiento del sistema de navegación cae por debajo de lo esperado. Actualmente, esta característica está siendo incluida en la propia información transmitida por el primer GNSS europeo, GALILEO.

En navegación, la integridad puede definirse como la capacidad del sistema para detectar anomalías en el funcionamiento, y avisar al usuario de cuándo el sistema de navegación no debe ser usado [121]. Tal y como se describió en el capítulo 2, el método RAIM ofrece esta capacidad en un sistema de navegación GNSS. Esta técnica, basada en un cálculo sobre-determinado de la posición, requiere de un mínimo de

cinco satélites para detectar un fallo en un satélite, y de seis o más para ser capaz de descartarlo [115]. Desafortunadamente, aunque este algoritmo puede ser eficiente en aviación, estas restricciones no pueden ser asumidas en un entorno vehicular, especialmente en ciudades. Mediante el uso de arquitecturas SBAS como EGNOS, es posible recibir mensajes con información sobre el estado de los satélites que, junto con la geometría de la solución, permiten el cómputo de factores de integridad. El uso de SISNeT complementa a EGNOS en lugares en los que no se dispone de cobertura hacia el satélite geostacionario, lo que permite disponer en todo momento de información de integridad.

El presente capítulo describe la solución propuesta en la línea antes introducida. El uso de GNSS conjuntamente con el del SBAS europeo EGNOS en el sistema que se propone, permite mejorar la precisión, aumentar la disponibilidad del sistema, y ofrecer información sobre la integridad de la posición. La utilidad de todas las ventajas de SBAS en estos términos se ve asegurada mediante el desplazamiento de la complejidad de procesamiento de los mensajes hacia el ordenador de a bordo. Un algoritmo de conversión situado en la plataforma software del OBU es capaz de transformar la información de corrección diferencial SBAS a un formato de mensaje mucho más sencillo y extendido, representado por RTCM SC-104; lo que permite usar receptores de bajas prestaciones o heredados. La disponibilidad de SBAS se incrementa gracias al uso de SISNeT, mediante un acceso por red celular a un servidor remoto de la propia ESA, o a uno implementado en una estación propia. Esto hace que la integridad se pueda calcular bajo condiciones de ocultación de la señal del satélite geostacionario.

4.2. Antecedentes en el Uso de SBAS y el Cálculo de Factores de Integridad en ITS

Las ventajas de la arquitectura SBAS europea (EGNOS) frente al uso del GPS convencional son evidentes desde las primeras etapas de su implantación [187]. Los errores cometidos en los cálculos de pseudo-distancia a los satélites de la constelación GPS se pueden reducir gracias a las correcciones transmitidas por los SBAS. Sin embargo, la misma ESA pronto fue consciente de los problemas de cobertura de EGNOS en diversos entornos de navegación terrestre. Es por esto que su tecnología SISNeT comenzó a ser aplicada en diversos desarrollos, en muchos casos apoyados por la misma Agencia Espacial Europea. En [188], por ejemplo, se presenta una solución en donde se explota la funcionalidad de SISNeT. Los mensajes de EGNOS son recibidos a través de Internet mediante una conexión GPRS, y la mejora que se obtiene frente a GPS es evidente en los resultados. En [189] se hace uso de SISNeT para desarrollar un navegador para invidentes. Los mensajes a través de Internet aseguran la disponibilidad de EGNOS y, por tanto, la fiabilidad del dispositivo en ciudad.

El trabajo descrito en [21] evalúa el uso de SISNeT sobre vehículos en la circulación por entornos urbanos. Las mejoras con respecto al uso aislado de GPS son importantes en diferentes emplazamientos en donde la señal de EGNOS a través del satélite geostacionario se ve afectada. El problema de esta solución, y de las anteriores, se

encuentra en que, o bien se aplican las correcciones en el propio software ejecutado en el terminal conectado al receptor, o bien se aplican las correcciones ofrecidas por SISNeT en postproceso para evaluar su rendimiento, como en este último caso. La propuesta descrita en este capítulo, sin embargo, ofrece una solución más flexible, en donde no se hace necesario el uso de un software fuertemente acoplado al receptor para ofrecer correcciones por software. De esta manera, las correcciones se transforman en mensajes RTCM, soportados por una gran cantidad de receptores del mercado. En [22] se da una primera aproximación al problema de la conversión de mensajes de EGNOS a RTCM. En el artículo se presenta el mecanismo de conversión utilizado y se comprueba numéricamente que las correcciones obtenidas mediante RTCM son equivalentes a las dadas por EGNOS. Sin embargo, las pruebas no se realizan en tiempo real, no se implementa el sistema, y no se evalúa su utilidad en entornos reales. Estas implicaciones sí son tenidas en cuenta en la tesis doctoral, ofreciendo un entorno completo de mejora del posicionamiento GPS para navegación terrestre.

Con el objetivo de mejorar la disponibilidad del sistema de navegación, existe una vía de investigación que apuesta por la integración de sensores inerciales, con tal de ofrecer una estimación de la posición en lugares de pérdida de cobertura [23]. Sin embargo, los costes añadidos, aun considerando sensores de gama media, suelen pesar en demasía con respecto a las mejoras obtenidas. En estos sistemas, el cálculo de un factor de integridad debe considerar el sistema de navegación acoplado con los sensores inerciales [24]. En [25] se presenta un sistema combinado GNSS/DR (*Dead Reckoning*) que, mediante técnicas de filtrado Kalman con un EKF (*Extended Kalman Filter*), ofrece un factor de integridad adaptado a las condiciones de la navegación terrestre. El trabajo presentado en [26] ofrece una aproximación similar, pero en este caso se presenta un modelo para aislar posiciones espurias.

En [27] se propone un receptor GPS implementado en software, con capacidades de monitorización de integridad a partir de información SBAS. Sin embargo, el programa funciona solamente en post-proceso. Este mismo problema se puede observar también en [28]. En esta propuesta se presenta una aplicación capaz de usar el servicio de EGNOS a través de Internet con SISNeT, y simular los datos de navegación recabados durante periodos de funcionamiento estático o dinámico. Durante esta simulación es posible calcular los factores de integridad SBAS. En [29] se presenta un algoritmo de cálculo de integridad en tiempo real a partir de SBAS. El sistema desarrollado, al igual que la propuesta que se ofrece en la tesis doctoral, se encuentra adaptado a las condiciones de la navegación terrestre. El trabajo incluye, además, un método para detectar multi-trayecto en la recepción de la señal de los satélites, haciendo uso del Efecto Doppler. Con este sistema se puede modelar el error que se comete en el lado del usuario, además del inducido por el propio GPS, del que se tiene constancia a través de SBAS. El artículo demuestra la importancia del concepto de integridad, mediante su aplicación al caso particular del peaje electrónico con GNSS.

Como se verá en las siguientes secciones, la plataforma de soporte extendido SBAS que se propone en la tesis doctoral abarca todos los ámbitos anteriores. De esta manera, se mejora el soporte de EGNOS para receptores de bajas prestaciones, y se mejora la disponibilidad del servicio en entornos de mala recepción del GEO. El soporte

complementario de servidores remotos de mensajería SBAS asegura la recepción de información de EGNOS en estos emplazamientos. Además del uso común de SBAS para mejorar la precisión de la posición final, mediante correcciones diferenciales, el *middleware* de navegación situado en la OBU es capaz de monitorizar la integridad del sistema de navegación. Esto se realiza mediante un algoritmo que hace uso de la información de EGNOS sobre el rendimiento de GPS y considerando las condiciones particulares de geometría satelital.

4.3. Sistema Avanzado de Soporte SBAS

El sistema diseñado ofrece una solución completa para la provisión de información SBAS a estaciones remotas en circulación por entornos terrestres. La Fig. 4.2 muestra un esquema del sistema. En ella se pueden distinguir dos entidades fundamentales: la estación de monitorización y el equipo remoto, éste último representado por la OBU del vehículo. En la estación de monitorización se realizan labores de estudio de la señal GPS/EGNOS mediante un equipamiento de altas prestaciones. Además de las tareas de monitorización, el software desarrollado implementa un servidor SISNeT equivalente al ofrecido por la ESA, con la intención de solventar problemas de disponibilidad del servicio y posibles retardos de la red. El servidor de SISNeT de la ESA es, sin embargo, considerado también, tal y como se puede observar. Ambos servidores son accedidos a través de una dirección IP pública, y se encuentran conectados a un enlace cableado a Internet de alta velocidad.

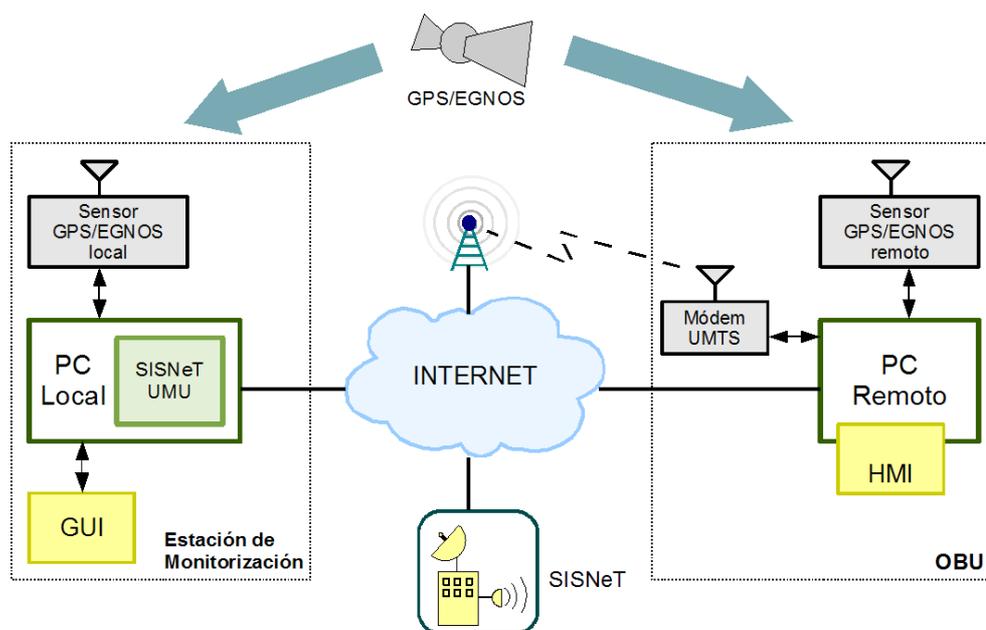


Figura 4.2: Sistema de ampliación SBAS a través de un canal alternativo por Internet

En la parte derecha de la Fig. 4.2 se encuentra la unidad de a bordo del vehículo. Como se observa, se hace uso de un receptor GPS/EGNOS, aunque éste suele disponer de menos capacidades que el considerado en la estación de monitorización. Mediante una conexión a Internet con la red celular UMTS, se establece una conexión con uno de los dos servidores de mensajes de EGNOS. El ordenador embarcado incluye un software dotado de un cliente SBAS, y de la lógica necesaria para la conversión de mensajes de corrección diferencial y el cálculo de los factores de integridad. El resto de los componentes de la OBU (la mayoría omitidos) comprenden el diseño presentado en el capítulo 3. El sistema de navegación del vehículo puede usar los mensajes EGNOS recibidos por dos vías alternativas, como se puede comprobar: bien por uno de los servidores SISNeT o bien a través del satélite geostacionario.

4.3.1. Estación de Monitorización y Gestión de Mensajes SBAS

La estación de monitorización está situada en uno de los laboratorios externos de la Universidad de Murcia, dentro de las instalaciones del Campus de Espinardo. En las inmediaciones de la estación no existen otros edificios que puedan bloquear la señal GPS/EGNOS. La Fig. 4.3 incluye algunas imágenes del **diseño hardware** considerado.

Tal y como se puede observar en la Fig. 4.3(a), la antena GPS está situada sobre el tejado del laboratorio, para mejorar la calidad de la señal. Se han utilizado fundamentalmente dos receptores Novatel Millenium OEM3 (Fig. 4.3(b)), aunque se soportan todos los considerados en el capítulos 3. Ambos sensores están conectados a la misma antena mediante un divisor de señal (Fig. 4.3(c)), lo cual permite realizar estudios simultáneos con diferentes configuraciones. El ordenador usado (Fig. 4.3(d)) es un PC común con procesador Pentium 4 a 4.2 Ghz, 512 MB de RAM y 70 GB de disco duro. El sistema operativo que se encuentra instalado actualmente es Linux Fedora, con kernel 2.6.

El **software desarrollado** para la estación de monitorización¹ presenta una interfaz intuitiva del estado del sistema GPS/EGNOS. De esta manera, es posible disponer de información sobre la posición actual en diferentes sistemas de referencia, y monitorizar diversos parámetros de rendimiento. Entre éstos últimos destacan los factores de bondad de la geometría de los satélites utilizados (DOP), el error real cometido por el receptor al calcular la posición en los planos horizontal y vertical, y los factores de integridad de la posición. Éstos son calculados según el algoritmo que se presenta posteriormente. Además, se muestra información en tiempo real del estado de los satélites seguidos, tanto de la constelación GPS como de los satélites geostacionarios SBAS.

El software de monitorización incluye un módulo sin interfaz gráfica que realiza funciones de **servidor de mensajes de EGNOS** en tiempo real, de forma equivalente a SISNeT. Para ello, utiliza los mensajes en crudo de EGNOS, extraídos de forma continua desde uno de los receptores, y los ofrece a través de una dirección y puerto

¹En [53] se detallan las características del software de monitorización implementado.

públicos. En el momento de establecer la conexión se realiza un proceso de autenticación según un nombre de usuario y contraseña, al igual que en SISNeT. A partir de este momento se pueden solicitar mensajes EGNOS.



(a) Laboratorio externo



(b) Receptores usados



(c) Divisor de señal GPS/EGNOS



(d) PC de monitorización y servidor SISNeT

Figura 4.3: Estación de monitorización de la señal GPS/EGNOS

4.3.2. Cliente WAAS/EGNOS

El sistema europeo EGNOS, al igual que el norteamericano WAAS, hace uso de las recomendaciones dadas por el documento RTCA/DO-229C [47] para la emisión de información desde los satélites geoestacionarios. Dichas directrices establecen los mensajes necesarios y la manera de decodificarlos para obtener correcciones e información sobre integridad del sistema GPS. Debido a que los mensajes transmitidos por un SBAS deben tener un cierto carácter local en su procesamiento en el lado del usuario, la información transmitida debe ser lo suficientemente genérica y extensa como para que el receptor adecue las correcciones recibidas a su posición. De esta manera, no sólo se transmiten correcciones y datos relativos al error cometido por el sistema GPS (generalmente por errores de reloj y de posición de los satélites), sino que también se

envía información atmosférica para gran parte del planeta, que será parcialmente usada por el receptor. Como resultado, la cantidad de mensajes que es necesario procesar para decodificar las correcciones de las pseudo-distancias a los satélites seguidos, y monitorizar la integridad del sistema de navegación, es relativamente grande.

Todos los mensajes usados por EGNOS y WAAS se coordinan mediante un identificador de emisión (*Issue of Data*), que identifica a todos aquellos mensajes que pertenecen a un mismo periodo de transmisión. Desglosando la información dada por las recomendaciones de RTCA/DO-229C, los diferentes tipos de correcciones disponibles son:

Correcciones rápidas Estas correcciones atenúan los errores que genera GPS y que son altamente variables, como los debidos a desviaciones en el reloj de los satélites. Los mensajes necesarios para decodificar dichas correcciones son la máscara que indica sobre qué satélites se va a enviar información (Tipo 1), los mensajes específicos de corrección rápida (Tipo 0/2-5), el mensaje sobre factores de degradación de las correcciones rápidas (Tipo 7), y el mensaje de parámetros de degradación general (Tipo 10).

Correcciones lentas Estas correcciones modelan errores que varían de forma menos frecuente, como las desviaciones en las efemérides de los satélites. Para procesarlos, es necesario disponer de la máscara (Tipo 1) y de los mensajes específicos de corrección lenta (Tipo 25).

Correcciones ionosféricas Estas correcciones dependen de condiciones variables de la ionosfera, las cuales hacen que las señales de los satélites sufran un retardo. Su cálculo se basa en la situación del satélite desde la posición del usuario, y en el estado de la ionosfera en el lugar de intersección de la señal del satélite. Dicho valor se calcula gracias a que el cliente SBAS mantiene una malla con información de retardo para cada parte de la ionosfera. Estos datos se reciben a través de una máscara que indica sobre qué parte de la ionosfera se está informando (Tipo 18), y mediante un mensaje específico de retardos (Tipo 26).

Adicionalmente, se usa un mensaje mixto que incluye correcciones rápidas y lentas (Tipo 24).

Los mensajes de correcciones rápidas y lentas disponen de información sobre el error asociado a cada uno de los satélites, conocida como UDRE (*User Differential Range Error*), y que es usada en el cálculo de los factores de integridad. Dicho valor se puede obtener de forma complementaria del mensaje Tipo 6. Para el caso de las correcciones ionosféricas, se dispone de un factor de error denominado GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*), también considerado en los cálculos de integridad.

El cliente SBAS implementado procesa todos los mensajes anteriormente nombrados, para extraer información de corrección diferencial y monitorizar la integridad del sistema de navegación. Como se puede comprobar en esta breve descripción, el procesamiento de los mensajes WAAS/EGNOS presenta una tarea

compleja que, si es incluida en el lado del receptor, necesita de la capacidad de cómputo y memoria adecuadas, lo cual puede encarecer la electrónica del sensor.

4.3.3. Comunicación con SISNeT

Para poder interpretar el amplio conjunto de mensajes SBAS es necesario disponer de cierta información previa. Inicialmente se deben recibir los mensajes con información sobre máscaras de transmisión (Tipo 1) y parámetros de degradación de las correcciones (Tipos 7 y 10), ya que hasta no disponer de estos datos no es posible interpretar la propias correcciones ni la información de integridad. Esto supone un problema para los receptores compatibles con SBAS actuales, ya que estos mensajes son enviados en algunos casos cada varios minutos.

Gracias al uso de SISNeT v3 [48] es posible reducir este tiempo de espera, puesto que se pueden pedir estos mensajes iniciales en el proceso de arranque del software de la OBU. Este es el proceso que sigue el sistema desarrollado, con tal de demorar lo menos posible la generación de correcciones. Una ventaja añadida de SISNeT v3 consiste en que no es necesario realizar una petición para recibir cada mensaje de EGNOS (tal y como pasaba en anteriores versiones), sino que se indica mediante un comando “START” el inicio de la recepción de mensajes de EGNOS conforme están disponibles. Este mecanismo es soportado también por nuestra implementación de SISNeT, ya que reduce en gran medida el retardo en la recepción de mensajes.

4.3.4. Conversión de Mensajes RTCA/DO-229C a RTCM SC-104

En contraposición a la diversidad de mensajes que se dan en el sistema de RTCA, RTCM SC-104 ofrece un conjunto de mensajes de corrección diferencial que requiere de un procesamiento mucho más sencillo. Esto se debe a que está destinado fundamentalmente a sistemas de corrección diferencial de área local, por lo que no es necesario transmitir información de carácter genérico. De entre todos los mensajes disponibles en la recomendación, se pueden escoger aquellos que resulten de interés para el sistema que se pretende, ya que son autocontenidos. Los mensajes Tipo 1 y 9, por ejemplo, contienen información de corrección para satélites GPS, incluyendo la corrección y el identificador del satélite. Los mensajes Tipo 9 son los paquetes escogidos para generar paquetes de corrección individuales para cada satélite, útiles para receptores que no disponen de capacidades SBAS.

El sistema de conversión desarrollado está ilustrado en la Fig. 4.4. Como se puede observar, los mensajes EGNOS provenientes de SISNeT son procesados mediante el cliente SBAS. Esta parte del software se encarga de decodificar los paquetes EGNOS y de extraer la información sobre corrección. Utilizando estos datos de entrada, el algoritmo de conversión adapta la diversa información de corrección de EGNOS a una representación numérica de corrección diferencial mucho más sencilla², que

²En [125] se desarrolla en detalle el modelo matemático del cálculo de las correcciones diferenciales.

puede insertarse directamente en los mensajes RTCM. Como se puede comprobar, el algoritmo de conversión necesita de cierta información de navegación para su correcto funcionamiento. Concretamente, desde el receptor se extraen datos sobre la posición de los satélites, y marcas de tiempo sobre la edad de la información transmitida por GPS sobre sus efemérides. Finalmente, el generador de mensajes RTCM se encarga de crear mensajes de corrección que son enviados por un puerto local al receptor GPS.

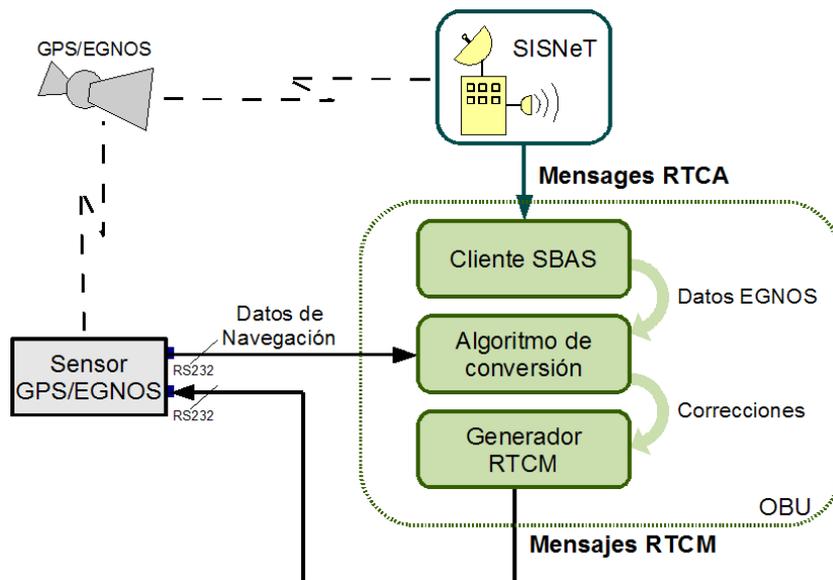


Figura 4.4: Esquema del sistema de conversión SBAS a RTCM SC-104

A partir del sistema de conversión de mensajes descrito, se amplía el rango de receptores que pueden hacer uso de las correcciones diferenciales provistas por SBAS. Éstos comprenden tanto receptores heredados, como aquellos de bajo coste. La aproximación tomada delega los cálculos complejos al software ejecutado como *middleware* en la OBU. Además, el uso de SISNeT garantiza la recepción de mensajes de EGNOS en situaciones de baja cobertura hacia el GEO. La solución expuesta presenta un desarrollo completo de un algoritmo de conversión de mensajes RTCA a RTCM SC-104, integrado además en el sistema de navegación de la plataforma. Propuestas similares a la dada [22] no consideran este nivel de integración, ni son evaluadas experimentalmente en tiempo real en un prototipo final.

4.4. Cálculo de un Factor de Integridad Basado en GNSS

El uso de SBAS permite calcular un factor de integridad de la posición, tal y como ya se ha comentado anteriormente. Para ello, es necesario interpretar los mensajes emitidos por el satélite geostacionario (o en su caso SISNeT), y aplicar el algoritmo

descrito en [47]. Dicho procedimiento no está completamente definido, y deja a elección del usuario diversos factores, como el tipo de precisión que se requiere del sistema, o la estimación del error que se comente en el lado del receptor. En la aproximación que se discute en esta sección, se adapta, además, dicho cálculo al caso concreto del transporte terrestre.

Los factores de integridad fundamentales que se calculan a partir de SBAS son el HPL (*Horizontal Protection Level*), y el VPL (*Vertical Protection Level*). Estos corresponden al plano horizontal y vertical, respectivamente. Puesto que el interés de la tesis doctoral radica en el transporte terrestre, la explicación estará centrada en el factor HPL, aunque el cálculo de ambos parámetros requiere de un procedimiento compartido. En la Fig. 4.5 se ilustra el concepto de integridad de la posición para el caso del HPL. El vehículo circula realmente por una trayectoria representada por las marcas más delgadas, pero el sistema de navegación estima una posición ligeramente desviada. A la diferencia, en cada instante, entre la posición real y la calculada, se le denomina HPE (*Horizontal Position Error*). El factor HPL encierra en cada momento una área de confianza en la que, con una alta probabilidad ($1 - 10^{-7}$), la posición calculada caerá. La cota HAL (*Horizontal Alert Limit*) establece un valor máximo permisible para el HPL. De esta manera, si $HPL > HAL$, el sistema de navegación debe informar al usuario/aplicaciones del problema para tomar la medida oportuna. Generalmente, los factores HPL y VPL calculados mediante información SBAS se suelen denominar HPL_{SBAS} y VPL_{SBAS} , respectivamente. Así se pueden diferenciar con los cálculos de integridad que se realizan mediante RAIM.

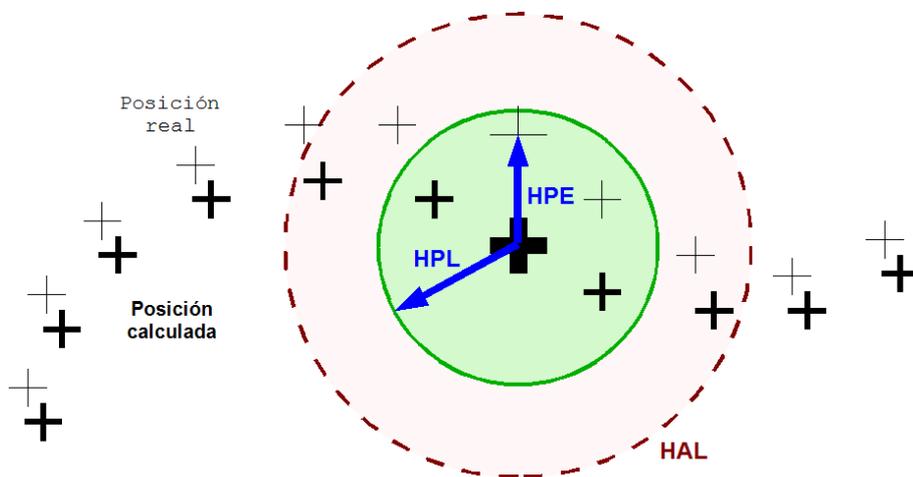


Figura 4.5: Concepto de HPL

4.4.1. Subsistema de Cálculo de Integridad

La lógica para el cálculo de integridad está integrada en el mismo software que realiza la interpretación de correcciones diferenciales. De hecho, el procesamiento

necesario de los mensajes es el mismo, por lo que los cálculos de correcciones y factores de integridad se efectúan simultáneamente. La Fig. 4.6 ilustra el procedimiento que se lleva a cabo. La información de navegación necesaria del receptor es, de nuevo, la posición absoluta de los satélites usados en el cómputo de la posición y una marca temporal que identifica la edad de las efemérides recibidas de GPS. Los mensajes de EGNOS pueden venir a través de dos vías alternativas: el satélite geostacionario e Internet. En el primer caso, es necesario hacer uso de un receptor que soporte SBAS, del que se puedan extraer las tramas EGNOS en crudo. No obstante, para cuando la señal de dicho satélite esté oculta, se utiliza un servidor SISNeT como fuente EGNOS. En este caso, se usa la conexión a la red celular UMTS para acceder al servidor SISNeT de la ESA o al implementado en la estación de monitorización.

Para cada mensaje EGNOS que llega, que es decodificado en la primera etapa de preprocesamiento en el cliente SBAS, se realiza una actualización del estado de las correcciones y de la integridad, tal y como se puede comprobar conjuntamente en las Fig. 4.4 y 4.6. La información de integridad que se mantiene se usa periódicamente para calcular los factores VPL_{SBAS} y HPL_{SBAS} , aunque solamente éste último es considerado en las aplicaciones de la plataforma software del vehículo. Tal y como se vió en el capítulo 3, existe una aplicación encargada de representar gráficamente el valor de HPL en tiempo real, y la aplicación de navegación usa este factor para informar al usuario de cuándo la posición del vehículo en el mapa puede estar desviada. Además, la plataforma de comunicación presentada en el capítulo 5 incluye en los mensajes emitidos, junto con la posición del vehículo, el factor de integridad, lo cual es útil en el uso de servicios telemáticos distribuidos.

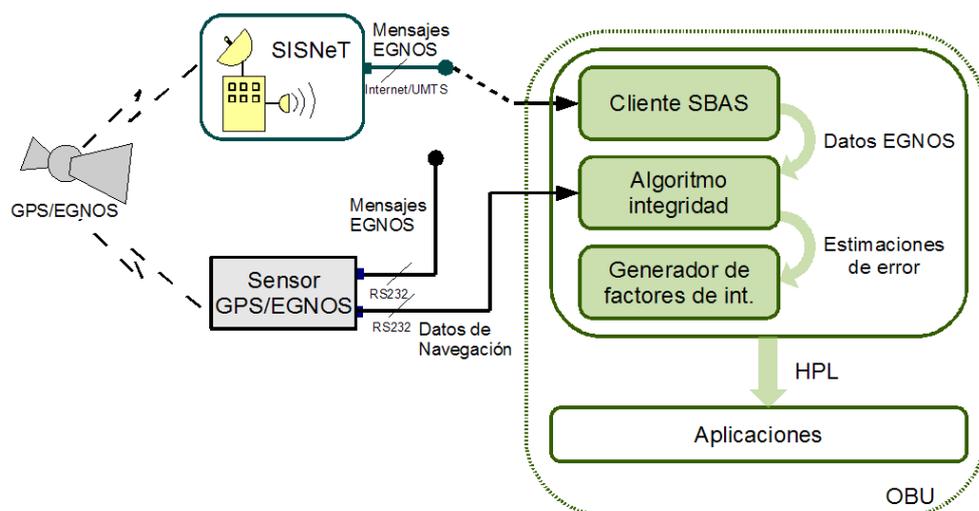


Figura 4.6: Esquema del sistema de cálculo de integridad SBAS

4.4.2. Cómputo del Factor de Integridad HPL_{SBAS}

Como ya se ha comentado, el cálculo del factor de integridad HPL_{SBAS} está basado en el algoritmo descrito en [47]. Este procedimiento ha sido adaptado a los requerimientos de la navegación terrestre, además de considerar varios cálculos complementarios no especificados en el estándar. Esta sección resume los aspectos más relevantes del algoritmo usado, si bien se puede consultar una descripción más detallada del proceso en el apéndice A.

En (4.1) aparece la expresión final necesaria para calcular el parámetro HPL_{SBAS} . Como se observa, se debe diferenciar entre el modelo de cálculo no preciso (NPA, o *Non Precise Approach*), y el modelo de cálculo preciso (PA, o *Precise Approach*). Estos definen el grado de fiabilidad que se requiere al asegurar que las posiciones que calcule el receptor caerán dentro del área circular definida por HPL_{SBAS} . En el presente trabajo se ha optado por el modo de aproximación no preciso, dado que, por un lado, los requerimientos no son tan estrictos como en ámbitos de aviación y, por otro, el funcionamiento de EGNOS no ha estado hasta hace muy poco totalmente afianzado, por lo que los requerimientos de retardos asociados al modo preciso podrían haber sido contraproducentes.

$$HPL_{SBAS} = \begin{cases} K_{H,NPA} \cdot d_{mayor} & \text{En ruta para modos NPA} \\ K_{H,PA} \cdot d_{mayor} & \text{En modo PA} \end{cases} \quad (4.1)$$

Las constantes usadas en el cálculo se definen en (4.2) y, como se ha dicho, se usa el correspondiente al modo de operación no preciso.

$$K_H = \begin{cases} 6,18 & \text{En ruta para modos NPA} \\ 6,0 & \text{En modo PA} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$(4.3)$$

Parámetros de Cálculo Generales

El valor d_{mayor} modela conjuntamente las estimaciones de error transmitidas por el SBAS, y la geometría que conforman los satélites usados para calcular la posición. Dicho parámetro es calculado según (4.4). d_{east}^2 y d_{north}^2 se calculan según (4.5) y (4.6), siendo las varianzas de las distribuciones que modelan el error cometido en los ejes este y norte, respectivamente. d_{EN} es la covarianza de la distribución que modela el error en la combinación de los ejes este y norte, cuyo cálculo es descrito en (4.7). d_U^2 , que se calcula según (4.8), es la varianza de la distribución usada para el caso del eje vertical.

$$d_{mayor} = \sqrt{\frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2}} + \sqrt{\left\langle \frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2} \right\rangle^2 + d_{EN}^2} \quad (4.4)$$

$$d_{east}^2 = \sum_{i=1}^N s_{east,i}^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (4.5)$$

$$d_{north}^2 = \sum_{i=1}^N s_{north,i}^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (4.6)$$

$$d_{EN} = \sum_{i=1}^N s_{east,i} \cdot s_{north,i} \cdot \sigma_i^2 \quad (4.7)$$

$$d_U^2 = \sum_{i=1}^N s_{U,i}^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (4.8)$$

Consideración de la Geometría de los Satélites

s_{east} , s_{north} y s_U son las derivadas parciales del error de la posición en las direcciones este, norte y vertical, respectivamente. La obtención de estos valores se realiza gracias al cálculo de la matriz mostrada en (4.9). Esta es la matriz de proyección usada en un cálculo de la posición por mínimos cuadrados. Los datos necesarios para formar las matrices necesarias para realizar la operación que se puede observar en la parte derecha aparecen descritos en (4.10) y (4.11). La primera de estas expresiones conforma el cálculo para obtener cada una de las filas de la matriz de geometría (G). Dicha matriz contiene la información sobre la geometría de los satélites usados para generar la solución. Por otro lado, la matriz de pesos (W) define cómo se cuantifica la geometría de cada satélite. De nuevo, y para ser coherentes, aquí se opta por el modo de aproximación no preciso, por lo que la matriz W, que será la inversa de la mostrada en la expresión, será igualmente la matriz identidad.

$$S = \begin{bmatrix} s_{east,1} & s_{east,2} & \dots & s_{east,N} \\ s_{north,1} & s_{north,2} & \dots & s_{north,N} \\ s_{U,1} & s_{U,2} & \dots & s_{U,N} \\ s_{t,1} & s_{t,2} & \dots & s_{t,N} \end{bmatrix} = \langle G^T \cdot W \cdot G \rangle^{-1} \cdot G^T \cdot W \quad (4.9)$$

$$G_i = [-\cos El_i \cdot \sin Az_i \quad -\cos El_i \cdot \cos Az_i \quad -\sin El_i \quad 1] = i^{\circ} \text{ fila de } G \quad (4.10)$$

$$W^{-1} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} & \text{En modo NPA} \\ \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix} & \text{En modo PA} \end{cases} \quad (4.11)$$

Cuantificación de los Errores Locales al Receptor y en las Correcciones

Para realizar todos los cálculos anteriores, es necesario obtener la varianza del error cometido en la obtención de la pseudo-distancia a cada satélite (σ_i^2). La ecuación (4.12) muestra todos los errores que hay que considerar para llegar a esta estimación final. σ_{flt}^2 es la varianza del error causado por las imprecisiones derivadas de las correcciones lentas y rápidas. σ_{UIRE}^2 es la varianza del error en la estimación del efecto de retardo que implica la ionosfera. σ_{tropo}^2 cuantifica, igualmente, el error en la estimación de la corrección aplicada por efectos en la transmisión de la señal en la troposfera. Finalmente, σ_{air}^2 es la varianza del error que se comete al estimar (o no estimar) los errores locales en la recepción de la señal de los satélites. Dentro de los efectos posibles, el multi-trayecto es el error más común, sobre todo en entornos urbanos.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,air}^2 \quad (4.12)$$

Para el cálculo de σ_{air} , es necesario considerar el tipo de receptor usado, acorde con el estándar. Las clases de equipamientos considerados se dividen en cuatro. De ellas, la Clase 1 obtiene un valor constante de 25 m^2 para el error en cuestión. Para el resto de receptores se considera la expresión (4.13). La clase de equipamiento 1 soporta navegación en modo no preciso, y no considera las correcciones de la ionosfera; la Clase 2 soporta también las correcciones de la ionosfera; la Clase 3 incorpora además navegación en modo preciso y, finalmente, la clase 4 soporta exclusivamente la navegación en modo preciso usando, obviamente, todas las correcciones posibles. Se considera que el hardware de posicionamiento, en el ámbito en el que se encuadra la tesis doctoral, corresponde con la clase de equipamiento 2, con lo que será necesario aplicar (4.13).

$$\sigma_{i,air}^2 = \sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,multipath}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \quad (4.13)$$

$$\sigma_{i,multipath} = 0,13 + 0,53 \cdot e^{-E/10} \quad (4.14)$$

Mientras que el cálculo del error ocasionado por la multi-trayectoria de la señal desde los satélites ($\sigma_{multipath}$) se calcula con la expresión dada (4.14), no ocurre así para las estimaciones σ_{noise} y σ_{divg} . El primero de estos valores considera los errores que se producen en las operaciones que realiza el receptor, debidos al ruido térmico e interferencias, fundamentalmente. σ_{divg} estima los errores que se producen en el filtro de recepción de la señal desde los satélites. El estándar establece unas cotas para la suma de estos dos parámetros, a partir de la elevación del satélite en cuestión. En (4.15) y (4.16) se indica el valor a considerar en dichos extremos, primero para el caso de satélites convencionales y después para los SBAS. Para la obtención de un valor acorde a la elevación real del satélite se ha optado por realizar una interpolación lineal a partir de estas cotas, considerando que el nivel mínimo de señal está situado a los 5° de elevación y el máximo a los 90°.

$$\sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \leq \begin{cases} 0,0225 & \text{Si el nivel de la transmisión es mínimo} \\ 0,0121 & \text{Si el nivel de la transmisión es máximo} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \leq \begin{cases} 1,8 & \text{Si el nivel de la transmisión es mínimo} \\ 1,0 & \text{Si el nivel de la transmisión es máximo} \end{cases} \quad (4.16)$$

4.5. Evaluación del Sistema de Navegación sobre Entornos Reales

El sistema de navegación descrito en las secciones anteriores ha sido evaluado en entornos reales, con tal de comprobar el rendimiento de la solución presentada. Para tales fines, se ha implementado un software con las capacidades de soporte SBAS de adquisición de mensajes EGNOS a través de Internet, y con las funciones de adaptación de correcciones y monitorización de la integridad. Además, se ha hecho uso del programa de monitorización de la señal GPS/EGNOS situado en la estación de monitorización estática, para analizar el factor de integridad HPL_{SBAS} durante un largo periodo. En la presente sección se muestran los resultados más relevantes de la amplia cantidad de pruebas realizadas.

4.5.1. Software de a Bordo de Soporte SBAS Desarrollado

El cliente SBAS y los algoritmos de interpretación de correcciones y de monitorización de integridad, están incorporados en un módulo software dentro de la arquitectura lógica del OBU presentada en el capítulo 3, denominado *SBAS Processor Utility*. Como el resto de los módulos, está implementado en Java 1.5, y permite ser ejecutado también fuera de la plataforma OSGi mediante línea de comandos. El funcionamiento del programa está totalmente parametrizado, con lo que es posible establecer el modo en el que se quiere que el sistema de navegación del vehículo funcione. En el apéndice B se describe el funcionamiento del programa implementado. A continuación se resumen algunas de las configuraciones más relevantes:

- *Modo autónomo (single)*. El sensor GNSS funciona sin hacer uso de ningún sistema de corrección ni mejora de la señal GPS.
- *Modo EGNOS*. Se configura el sensor GNSS para que haga uso de EGNOS a través de uno de los satélites geoestacionarios. El software, sin embargo, considera SISNeT para recibir mensajes de EGNOS y calcular los factores de integridad.
- *Modo SISNeT*. Los mensajes de EGNOS son insertados a través de uno de los puertos locales del receptor. El módulo software hace uso del cliente SBAS para pedir los mensajes a un servidor SISNeT.
- *Modo RTCM*. Se configura el sensor para recibir correcciones diferenciales mediante mensajes RTCM SC-104. El software se encarga de realizar la conversión de las correcciones recibidas desde SISNeT.
- *Modo EGNOS Input from Receiver*. Se configura el sensor GNSS para que use EGNOS directamente y, además, para que emita a través de uno de sus puertos locales los mensajes SBAS recibidos. El software usa estos mensajes desde el sensor GNSS para calcular los factores de integridad.
- *Modo EGNOS and EGNOS Input from Receiver*. Combina estos dos modos, creando dos motores de procesamiento SBAS simultáneos mediante la recepción de los mensajes desde SISNeT y desde el receptor.

Cabe destacar que no siempre es posible hacer uso de todas las posibilidades de configuración del sistema de navegación, debido a que los receptores considerados (presentados en el capítulo 3) no soportan todos los modos de funcionamiento.

4.5.2. Rendimiento General del Sistema de Navegación

Para comprobar el funcionamiento del sistema de navegación, se han realizado pruebas tanto en situaciones de buena cobertura como en entornos urbanos, en donde los edificios dificultan la propagación correcta de la señal de los satélites hasta el vehículo. El receptor GPS utilizado ha sido el modelo San José Navigation FV-21, considerado, como se dijo en el capítulo 3, como el sensor GNSS más apropiado para la plataforma del vehículo prototipo. Éste soporta SBAS y es capaz de decodificar correcciones RTCM SC-104 insertadas por uno de sus puertos locales. Puesto que no soporta la decodificación de mensajes EGNOS por un puerto local, se ha hecho uso de la conversión a RTCM para insertar correcciones diferenciales EGNOS desde SISNeT.

En la Fig. 4.7 se muestran las posiciones obtenidas en tres recorridos, configurando el sistema de navegación en los modos autónomo (*single*), EGNOS y RTCM. La ruta corresponde a una zona del Campus de Espinardo de la Universidad de Murcia, con buena cobertura satelital. En el trayecto usando EGNOS, todas las posiciones extraídas fueron marcadas por el receptor como diferenciales. Sin embargo, se observa una desviación importante en el tramo que se encuentra en la parte inferior izquierda. En dicha zona, el vehículo, que circula en el sentido contrario al de las agujas del

reloj, se encuentra de frente con un desnivel que oculta momentáneamente la señal del satélite geostacionario. Puesto que se dejan de recibir los mensajes de EGNOS durante un tiempo, las correcciones comienzan a degradarse, lo cual se traduce en una desviación momentánea. La posición vuelve a obtenerse correctamente una vez se ha superado la zona conflictiva. El recorrido realizado con conversión a RTCM no sufre dicha alteración, ya que los mensajes de EGNOS se reciben sin discontinuidad desde SISNeT.

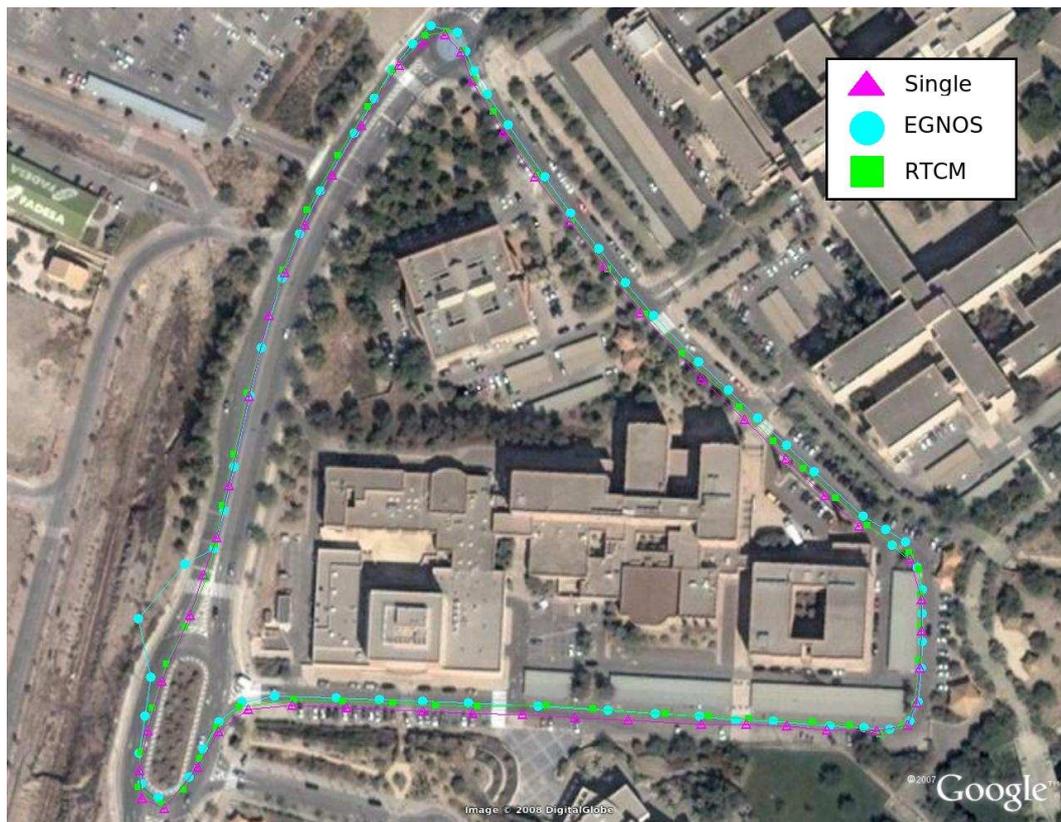


Figura 4.7: Funcionamiento del sistema de navegación en un entorno semi-rural

La corrección diferencial que supone EGNOS es evidente en la Fig. 4.7. Si se observan los tres recorridos, las posiciones obtenidas a través EGNOS y RTCM son prácticamente equivalentes en gran parte del trayecto. Sin embargo, para el caso de la configuración usando solamente GPS, se observa un desplazamiento de las posiciones hacia el sur, que es notable en los tramos de navegación con mayor componente horizontal en la imagen.

En el trayecto recogido en la Fig. 4.8, el vehículo circula por una calle de la ciudad de Murcia, en donde la cobertura es baja por la presencia de edificios que dificultan la recepción de la señal de los satélites. El vehículo se mueve en este caso desde la parte superior de la imagen a la inferior. Al llegar a la zona más problemática, se observa una desviación importante para la configuración EGNOS, que en el caso del modo

autónomo y el RTCM es menor. Esto es debido a la pérdida progresiva de la cobertura hacia el satélite geoestacionario y la consecuente degradación de las correcciones. La acumulación de posiciones situadas en el centro de la imagen se debe a que el vehículo estuvo parado en los tres recorridos en el mismo semáforo. Dicho efecto es usual en los sensores GNSS, ya que sus algoritmos de estimación de la posición suponen la dinamicidad del usuario a través de las posiciones previas para calcular una nueva. La pérdida de cobertura EGNOS se traduce en que las posiciones recogidas a partir de este momento comienzan a no ser diferenciales. Esto es visible en la figura a través de marcas de posición no rellenas. Tras superar la zona conflictiva y pasar una zona verde cercana, el funcionamiento en modo EGNOS se normaliza y, poco después, se vuelven a recoger posiciones diferenciales. Bajo estas condiciones, el sistema de conversión de mensajes a RTCM evita la discontinuidad de la señal. Un sistema de navegación integrado con cartografía digital podría haber considerado para el trayecto EGNOS que el vehículo se encontraba en la plaza situada en el centro de la imagen, ya que su algoritmo de *map-matching* podría haber detectado dicha zona como la más próxima.



Figura 4.8: Funcionamiento del sistema de navegación en condiciones de baja cobertura

La Tabla 4.1 resume el tipo de posición recogido durante las tres pruebas urbanas consideradas, con un recorrido prefijado de cerca de 5 Km por las principales avenidas de Murcia y por el casco antiguo. En la tabla se observa cómo el uso del sistema de corrección RTCM asegura posiciones diferenciales durante todo el recorrido. Los problemas de cobertura de la señal de EGNOS se ven reflejados en la segunda columna, en donde se muestra que una alta proporción de las posiciones recogidas (el 39 %) en la configuración con EGNOS no fueron en modo diferencial. Se observa, además, cómo el receptor permitió recoger posiciones (al menos) GPS en todo momento, lo cual se

Tabla 4.1: Posiciones recogidas en Murcia en modos autónomo, EGNOS y RTCM

	Single		EGNOS		RTCM	
N/D	0	0 %	0	0 %	0	0 %
GPS	380	100 %	160	39.22 %	0	0 %
DGPS	0	0 %	248	60.78 %	397	100 %

explica por la adaptación del sensor a condiciones de navegación terrestre. Aunque la posición puede verse degradada en situaciones de baja cobertura, el receptor siempre emite una posición, que en muchas ocasiones es estimada. Además, el receptor es capaz de seguir satélites cuya señal es muy débil.

Tras las pruebas realizadas, se demuestra cómo con el sistema de navegación ideado es posible disfrutar de las ventajas de SBAS en entornos con problemas de cobertura, y con receptores de gama media/baja o heredados. Además, con la conversión de mensajes a RTCM, se solventan los problemas de rendimiento en situaciones de discontinuidad temporal de la señal de EGNOS.

4.5.3. Resultados Obtenidos en la Monitorización de la Integridad

Para observar el funcionamiento del algoritmo de integridad implementado, se han realizado pruebas de monitorización tanto en la estación emplazada en el laboratorio externo, como en entornos de movilidad haciendo uso del vehículo prototipo. Además, se ha estudiado cómo el cálculo del factor de integridad HPL_{SBAS} se puede ver afectado cuando se hace uso de SISNeT, a través de un enlace de comunicación celular, para recibir los mensajes de EGNOS vía Internet.

Monitorización de la Integridad en Estático

Para evaluar el funcionamiento del algoritmo de integridad en estático, se ha considerado la información que es capaz de representar el software de monitorización desarrollado. En la Fig. 4.9 se encuentra la gráfica usada para monitorizar la integridad del sistema de navegación durante largos periodos de funcionamiento. En el eje horizontal se representa el HPE, u error horizontal real cometido, mientras que en el vertical se encuentra el factor HPL_{SBAS} . El gráfico comprende una malla de celdas (píxeles) que varían su color en función de la densidad de puntos que caen dentro. El área representada en color gris claro considera las posiciones calculadas cuyo HPL_{SBAS} asociado está por debajo del límite HAL (40 metros para el modo de navegación no preciso), y cuyo error real está encerrado en el área de confianza que conforma el valor de HPL_{SBAS} . En las posiciones cuyo error real (HPE) es mayor que HPL_{SBAS} , el algoritmo de integridad no fue capaz de informar sobre el estado real del sistema de navegación. Estas posiciones están recogidas a la derecha de la diagonal como

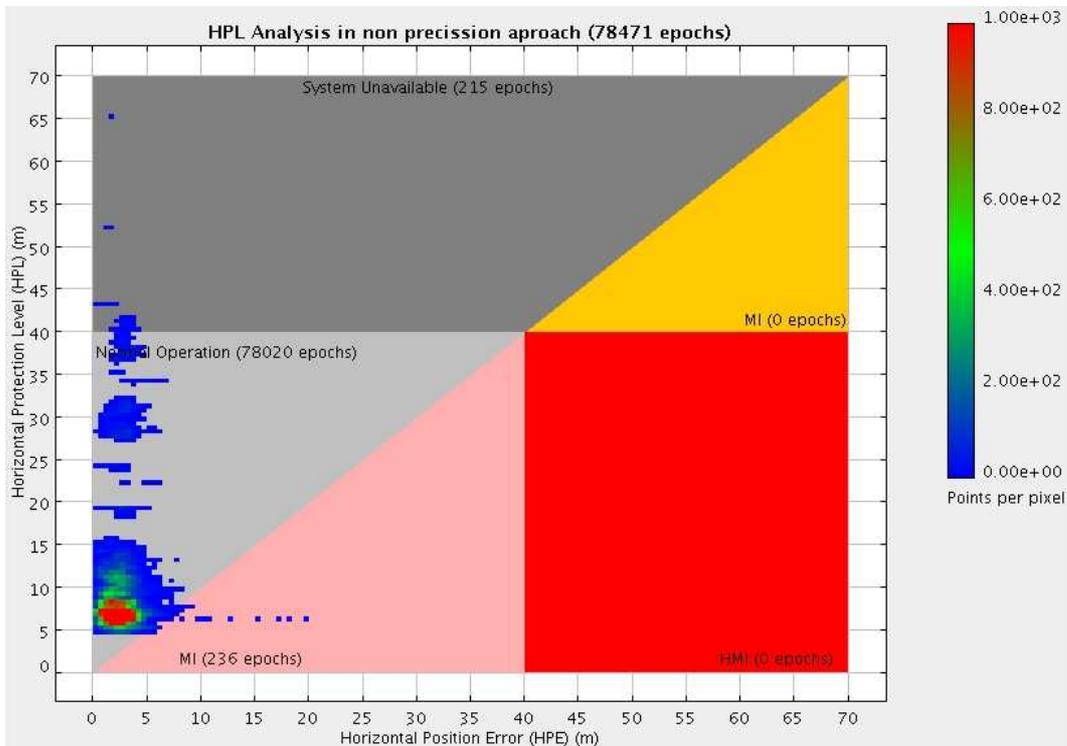


Figura 4.9: Gráfica de Stanford de monitorización del factor HPL_{SBAS} durante 24 horas

“información engañosa”, o *misleading information* (MI). En los resultados de 24 horas que se muestran, un 0.3% de las posiciones (236 en total) fueron recogidas en este estado, frente a un 99.7% de posiciones (78235 en total) correctamente encerradas por el factor de integridad. El total de posiciones que cayeron fuera del HAL fueron 215, el 0.27%, momento en el cual las aplicaciones deberían considerar el alertar al usuario o modificar su comportamiento. La zona de peligro, denominada *Hazardously Misleading Information* (HMI), no recogió ninguna posición. Este límite representa aquellas posiciones cuyo valor real de error es desmesurado.

Monitorización de la Integridad en Dinámico

Las pruebas de monitorización de la integridad en dinámico fueron realizadas con la plataforma vehicular presentada en el capítulo 4. El sensor GNSS San Jose FV-21 fue sustituido, sin embargo, por el modelo OEM3 de Novatel, debido a la amplia versatilidad de este dispositivo en configuraciones SBAS. El entorno de las pruebas se puede observar en la Fig. 4.10, que corresponde con las instalaciones del Campus de Espinardo de la Universidad de Murcia. Cabe destacar que en todas las pruebas realizadas no se observaron fallos en el funcionamiento de ninguno de los satélites GPS, por lo que las estimaciones de error para cada satélite se ven sujetas a valores

que no superan grandes magnitudes.

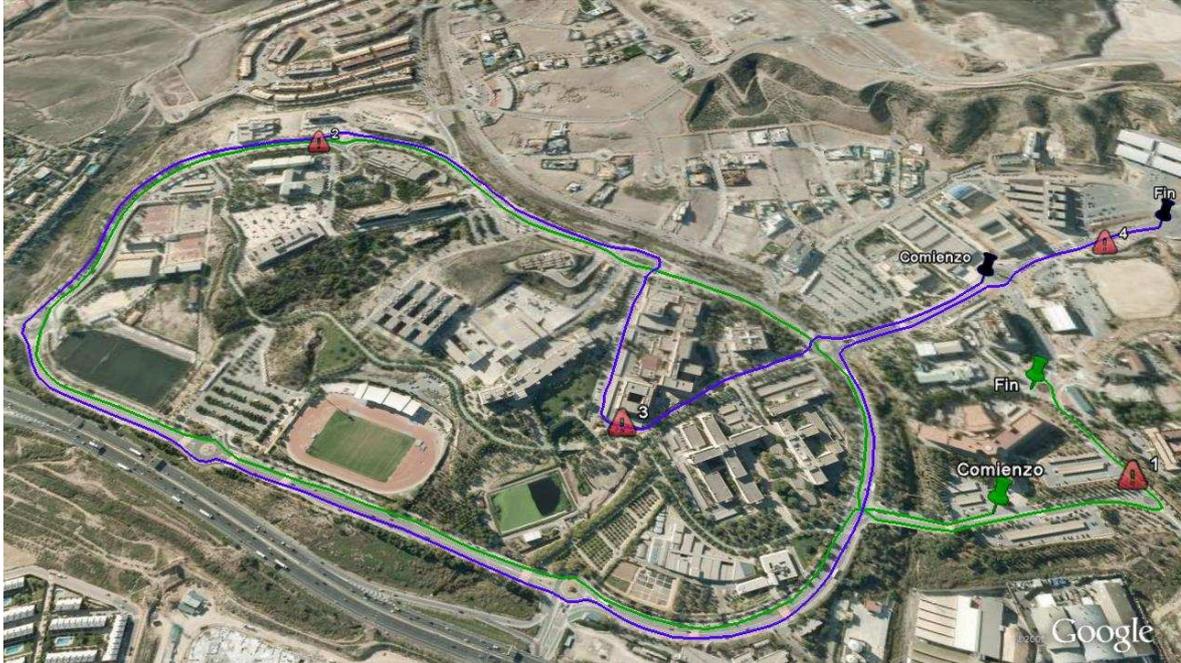


Figura 4.10: Recorridos realizados en las pruebas de integridad

La primera de las pruebas, representada en color verde en la Fig. 4.10, está centrada en monitorizar el rendimiento del sistema de integridad en movilidad. La configuración empleada del sistema de navegación es *EGNOS Input from Receiver*, con la que se calcula el factor de integridad usando los mensajes de EGNOS extraídos del receptor. La Fig. 4.11 presenta los resultados recabados del factor HPL_{SBAS} durante el recorrido. Escalones como los que se producen en los instantes 120 s y 310 s, son debidos a cambios en las estimaciones de error recibidos desde EGNOS. Son apreciables, además, varios picos en el valor obtenido de HPL_{SBAS} , fundamentalmente debidos a problemas de cobertura hacia la constelación de satélites. La gráfica inferior representa el número de satélites GPS utilizados para calcular la posición en cada momento. En los instantes 400 s y 730 s (zonas reseñadas como “1” y “2” en la Fig. 4.10), se observan problemas de cobertura importantes. En dichos instantes la geometría de la posición calculada es peor, incrementando el factor HPL_{SBAS} . Desde el instante 400 s al 700 s la señal hacia el satélite geostacionario de EGNOS se ve parcialmente bloqueada, lo cual ocasiona una degradación progresiva de las correcciones y, por consiguiente, un aumento de HPL_{SBAS} .

4.5.4. Impacto de las Comunicaciones en el Uso de SISNeT

Con el objetivo de comprobar el funcionamiento del algoritmo de cálculo de la integridad mediante SISNeT, se efectuaron nuevas pruebas de monitorización de la

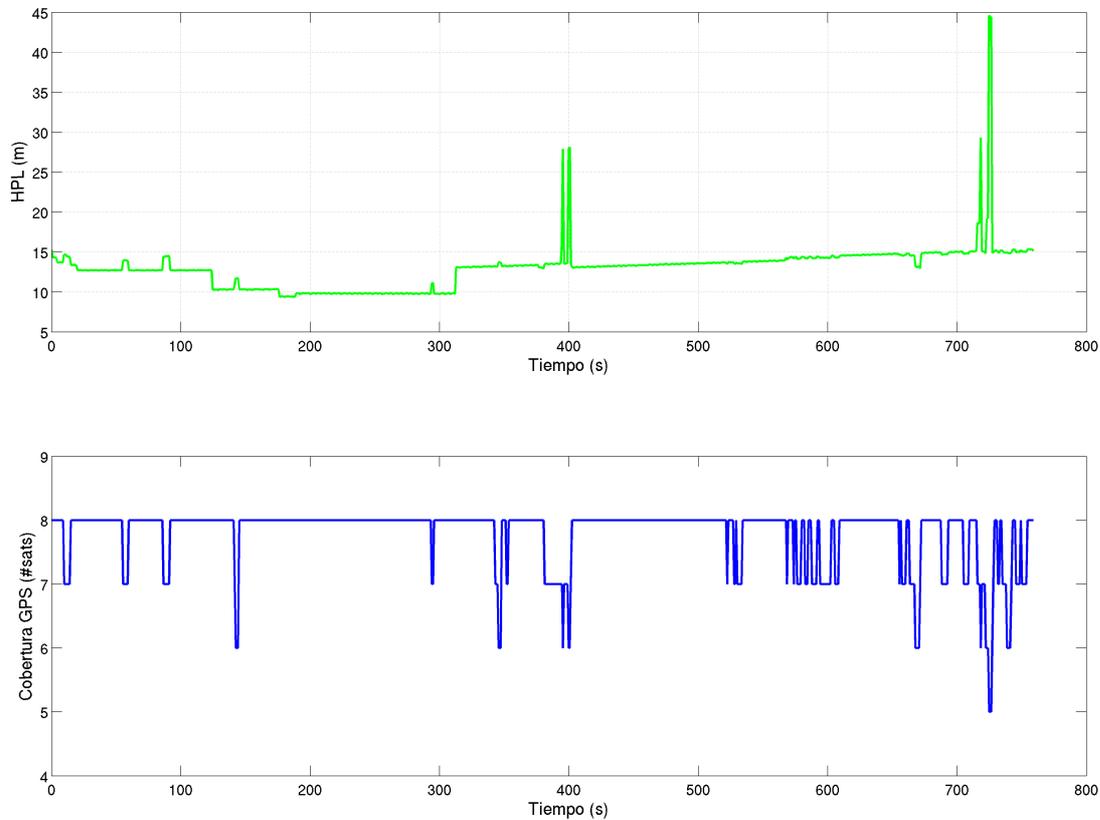


Figura 4.11: Monitorización dinámica de HPL_{SBAS}

integridad a través del Campus de Espinardo. En este caso, el recorrido considerado es el representado con color azul en la Fig. 4.10. Para tal fin, se añadió la configuración en modo SISNeT del sistema de navegación.

La Fig. 4.12 contiene una representación en tres dimensiones de los valores de HPL_{SBAS} recogidos usando los mensajes captados por el receptor a través del satélite geoestacionario, y los recibidos a través de SISNeT. Como se puede observar, los cambios en el factor HPL_{SBAS} presentan similitudes con la prueba dinámica anterior. Los problemas en la zona marcada como “2” en la Fig. 4.10 se ven de nuevo representados en los resultados actuales. Además, aparece una nueva zona con problemas de cobertura, representada como “3”, y que se puede ver en la parte central de los resultados. En este emplazamiento, el vehículo circula junto a varios edificios de considerable altura y, seguidamente, comienza a atravesar una zona adyacente de aparcamiento techado que dificulta la señal de los satélites.

Como se comprueba en el histórico de satélites usados en las dos configuraciones (parte inferior de la Fig. 4.13), los problemas de cobertura se reproducen de forma similar en ambos casos. Sin embargo, los valores de HPL_{SBAS} se ven magnificados en las situaciones de baja cobertura para el caso de SISNeT. Esto se debe a los problemas

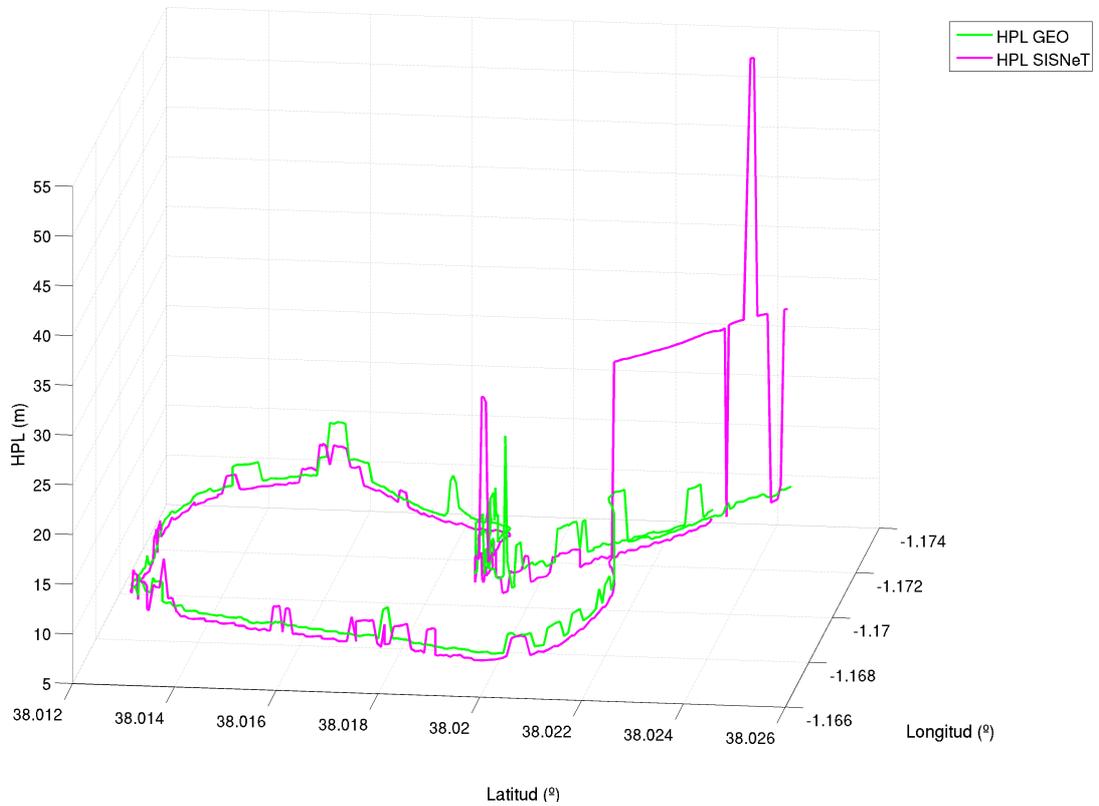


Figura 4.12: Valores obtenidos de HPL_{SBAS} usando el satélite geostacionario y SISNeT

en el enlace de comunicación celular. En estos lugares, el enlace de comunicación con la estación base de la operadora de telefonía se ve afectado también, por tanto los mensajes de SISNeT sufren un retardo adicional, e incluso algunos llegan a perderse. En la parte final del recorrido con SISNeT se aprecia en gran medida este efecto. Si se compara la cobertura disponible con el valor obtenido de HPL_{SBAS} , se observa cómo a pesar de tener una muy buena cobertura, el valor de integridad aumenta desmesuradamente. En este caso se comprobó que la conexión con el servidor SISNeT se vio interrumpida temporalmente. Este efecto no se comprueba en la parte inicial del recorrido, que considera la misma zona. Esto hace ver que, en este caso, el problema no se debe al bloqueo de la señal con la estación base, sino a la saturación de la red UMTS.

Como se ha podido observar, la cobertura satelital y la calidad del enlace de comunicación son dos aspectos fundamentales en el cálculo de la integridad mediante SBAS y SISNeT. Atendiendo a los resultados, se observa que el rendimiento del sistema de monitorización es mejor mediante el uso del satélite geostacionario. Sin embargo, estos resultados varían dependiendo del entorno de circulación. Durante la mayoría de los recorridos considerados, existió línea de visión hacia el satélite EGNOS, lo cual no

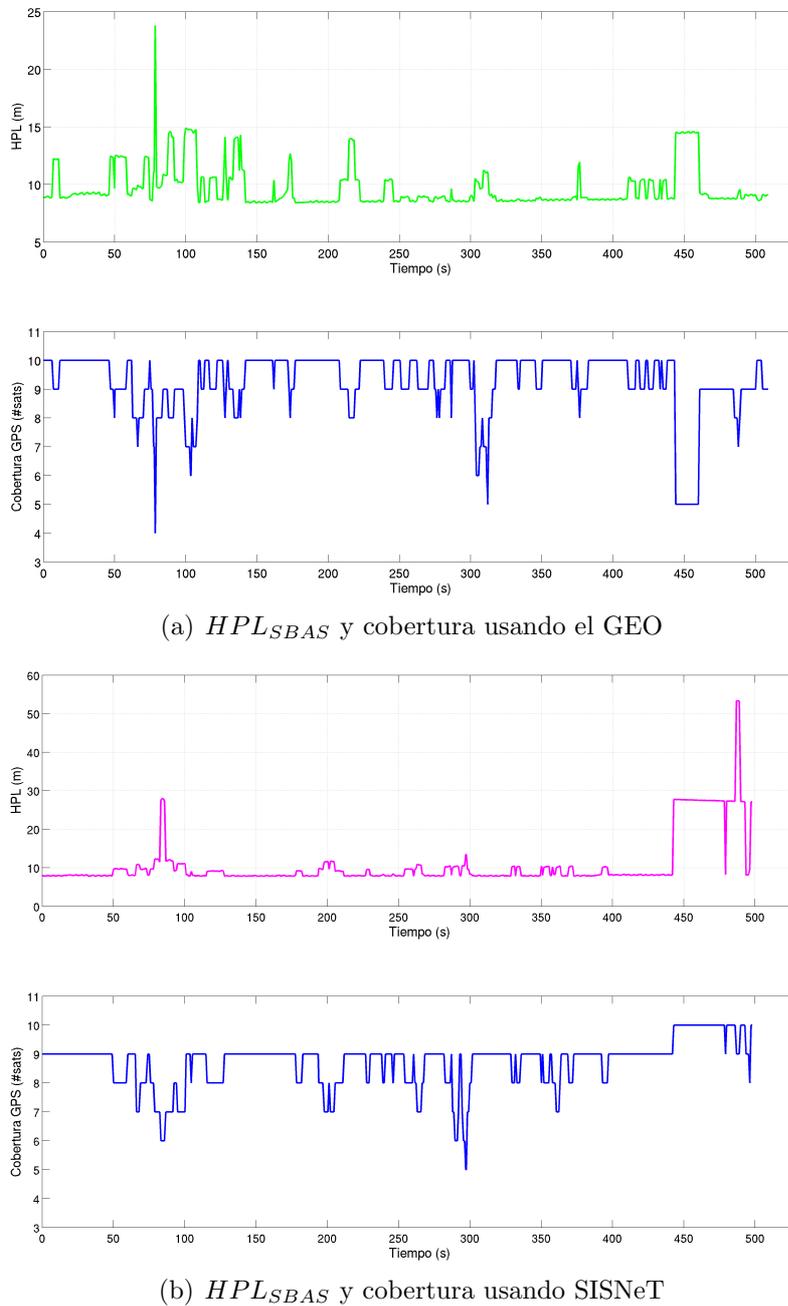


Figura 4.13: Monitorización dinámica de HPL_{SBAS} con el satélite geostacionario y SISNeT

es posible en muchos emplazamientos urbanos, por ejemplo. En estos casos, únicamente se puede calcular el factor de integridad SBAS si se obtienen los mensajes de una fuente alternativa, tal y como es SISNeT.

Las capacidades de monitorización de la integridad, al igual que el resto de las

funcionalidades provenientes de SBAS descritas, se integran dentro del sistema de navegación del vehículo. A su vez, éste es utilizado en los servicios telemáticos que necesiten de información de navegación. A los comunes valores de latitud y longitud (o medidas norte y este), se le suma el de integridad de la posición. En el capítulo 5 se describe cómo estos tres valores son utilizados en la información de cabecera de los mensajes emitidos por los vehículos en la plataforma de red. De esta manera, la localización de las incidencias de tráfico, por ejemplo, puede ser procesada con un índice de fiabilidad.

4.6. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha presentado el (sub)sistema de navegación considerado en la plataforma vehicular del capítulo 3. Una estación de monitorización complementaria ha sido diseñada e instalada en un laboratorio externo, ofreciendo información continuada del GNSS representado por la sinergia de GPS y EGNOS. Dicha estación ofrece un servidor SISNeT alternativo al provisto por la ESA, que puede ser usado por la plataforma de soporte SBAS de a bordo del vehículo.

La parte principal del trabajo está enfocada al sistema de posicionamiento del vehículo prototipo. Un módulo lógico incrustado en la plataforma software de a bordo descarga de tareas de soporte SBAS al sensor GNSS, que no tiene porqué ser un receptor de gama alta. Los mensajes de EGNOS, recibidos desde un servidor SISNeT o desde el propio satélite geoestacionario, se usan para extraer información de interés sobre correcciones diferenciales e integridad. Las correcciones pueden ser pasadas a mensajes RTCM SC-104, mucho más sencillos de procesar y soportados por una amplia gama de receptores. Este mecanismo, junto con el uso complementario de SISNeT, amplía la disponibilidad de SBAS en una doble dimensión: un mayor número de usuarios puede hacer uso del servicio, y se ofrece la posibilidad de acceder a EGNOS en lugares sin visión directa hacia el satélite geoestacionario.

La lógica de cálculo de los factores de integridad de la posición está integrada en el mecanismo de procesado de mensajes SBAS. Como se ha explicado, la integridad de la posición ofrece un novedoso factor que tendrá cada vez más repercusión en el conjunto de servicios vehiculares del futuro. Mediante ella, es posible determinar la fiabilidad que el usuario/aplicación puede tener en el sistema de navegación. La aproximación seguida en la tesis doctoral radica en la monitorización del factor HPL_{SBAS} , cuyo cálculo se ha adecuado al entorno de circulación terrestre. Mediante SISNeT es posible realizar dicho cálculo aún en situaciones de pérdida de la señal del satélite geoestacionario. Esta continuidad es de suma importancia si la integridad es usada en servicios con implicaciones legales o de seguridad.

Los resultados expuestos sobre entornos de circulación real muestran las pruebas más relevantes de entre todas las realizadas con el sistema de navegación. Gracias a la versatilidad ofrecida por el software desarrollado, ha sido posible configurar el sistema de navegación para hacer uso de correcciones a través del propio EGNOS, o mediante la conversión a RTCM SC-104 usando SISNeT. Así, se ha comprobado que la precisión en

el posicionamiento y la disponibilidad de correcciones diferenciales se ven aumentadas con la plataforma de soporte SBAS de a bordo. La integridad ofrecida por el factor HPL_{SBAS} ha sido igualmente analizada, concluyendo que la geometría que conforman los satélites usados para calcular la posición, y la calidad del enlace de comunicación, en el caso de hacer uso de SISNeT, son clave en dicho cálculo. Estos factores son las principales causas en las variaciones que se producen en la monitorización de la integridad de la posición, en ausencia de problemas de funcionamiento de los satélites de la constelación GPS. No obstante, el cálculo de la integridad de la posición no es posible en situaciones de pérdida de la señal EGNOS, por lo que SISNeT es crucial bajo estas condiciones.

A lo largo del trabajo se ha experimentado el proceso de mejora de la señal EGNOS, representada por la precisión en el posicionamiento y valores de integridad más ajustados. Se espera que en un futuro próximo, la incorporación de la integridad del sistema de navegación sea considerada en servicios de alto calado social, como el peaje electrónico y los seguros. Por eso, siguiendo la línea de trabajo presentada en este capítulo, el sistema de cálculo de integridad SBAS se pretende integrar en una arquitectura de navegación multi-funcional para transporte por carretera. En dicha plataforma, el uso de GPS y SBAS se pretende estudiar conjuntamente con el nuevo GNSS europeo GALILEO, que ya incluye información de integridad por si mismo, y con sensores inerciales complementarios. En términos más concretos, también se desean modificar aspectos del algoritmo de cálculo del factor HPL_{SBAS} . La estimación local que se realiza del error en la recepción y procesado de señales en el receptor puede mejorarse. Actualmente se apuesta por una estimación centrada en la elevación de los satélites, pero diversas condiciones del entorno pueden bloquear la línea de visión directa hacia éstos, y los fenómenos de multi-camino no son explícitamente tratados.

Capítulo 5

Arquitectura de Comunicación Overlay con Soporte Unificado V2V, I2V y V2I

Según se propuso en la arquitectura de la OBU del capítulo 3, además del sistema de navegación, el otro de los subsistemas centrales de a bordo es el de comunicaciones. En el capítulo 2 se sentaron las bases de los sistemas de comunicación vehicular considerados actualmente en proyectos de investigación y en el ámbito científico en general. Partiendo de toda la amalgama de soluciones actuales, la arquitectura presentada en este capítulo de la tesis doctoral ofrece una red de comunicación con capacidades de comunicación intra-vehículo y con la infraestructura, a partir de las redes de comunicación celular y las redes *overlay*.

Puesto que el uso de las redes celulares en el entorno ITS ha estado prácticamente limitado a sistemas de comunicación V2I con capacidades de monitorización, este capítulo considera como pilar fundamental el estudio de la viabilidad de las redes celulares dentro de las comunicación vehiculares. Con este propósito, se analizan los principales factores de rendimiento de las redes vehiculares, ofreciendo una doble visión en este estudio, tanto desde el punto de vista tradicional de las redes VANET, como desde las redes celulares.

Tras este estudio previo, se presenta la arquitectura de comunicación diseñada, la cual se integra en los tres ámbitos de estudio de los servicios telemáticos ITS, tal y como se muestra en la Fig. 5.1. Mediante una red P2P, el sistema usa grupos de comunicación para localizar los mensajes enviados tanto por el vehículo como por la infraestructura dentro de áreas de cobertura. La OBU es capaz de mantener una suscripción a servicios de mensajería ofrecidos en estas áreas mediante un mecanismo de *handover* asistido por la arquitectura, que permite realizar cambios transparentes en los grupos de comunicación P2P empleados por cada vehículo. Como se verá, es el propio terminal del vehículo el encargado de solicitar dicho *handover*, gracias a que mantiene la geometría de la zona de cobertura y, mediante el sistema de navegación, puede determinar cuándo tiene que solicitar un cambio de área. Los sensores y resto de hardware del lado de la carretera se integran en la arquitectura de red, bien mediante

la conexión con un servidor local a cada área, o bien a través de una conexión directa a la plataforma red, si disponen de la capacidad necesaria.

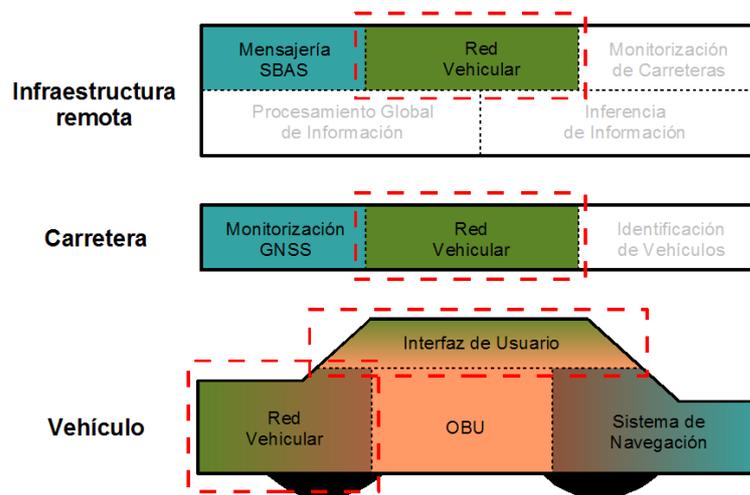


Figura 5.1: Aportación del capítulo 5 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral

El sistema diseñado permite la creación de servicios basados en el envío de eventos que necesiten de comunicaciones I2V, V2I o V2V. Dicha versatilidad se ve de manifiesto en la implementación de referencia que se ha hecho de una aplicación para la transmisión de incidencias de tráfico. Ésta complementa el interfaz de usuario conformado en el capítulo 3, tal y como se ilustra en la Fig. 5.1. Dicho programa se ha incorporado dentro de la plataforma software desarrollada, con lo que es capaz de acceder al sistema de navegación y al resto de módulos mediante la arquitectura lógica sobre OSGi. Las entidades de la arquitectura de comunicación localizadas en el lado de la infraestructura han sido igualmente implementadas y puestas en funcionamiento sobre sistemas reales.

La plataforma de comunicación ha sido evaluada en términos funcionales y de rendimiento. Para este fin se han realizado un conjunto significativo de pruebas sobre un entorno que combina emplazamientos mixtos de nivel de cobertura celular, y se han analizado los factores de rendimiento dados al comienzo del capítulo. En dicha evaluación experimental se consideran transmisiones V2I, I2V y V2V, con tal de comprobar el rendimiento esperado de la plataforma para potenciales servicios que necesiten de diferentes paradigmas de comunicación. Los resultados, centrados en el estudio de la latencia de la comunicación, revelan que es posible considerar la arquitectura desarrollada, y las redes celulares, por extensión, en una gran amalgama de servicios telemáticos ITS.

5.1. Comunicaciones en Vehículos y Redes Celulares

La utilidad de las comunicaciones inalámbricas en el ámbito del vehículo es destacable en diversas aplicaciones comerciales que permiten monitorizar las flotas de transporte desde hace algunos años. Estos sistemas están principalmente basados en un sensor GNSS para obtener la posición del móvil y un canal de comunicación generalmente tomado de la red celular. Estas soluciones son, sin embargo, el inicio de una sucesión de servicios telemáticos que está comenzando en la actualidad. Las aplicaciones ITS comerciales del futuro necesitan de un sistema de comunicación adecuado para integrar al vehículo en el entorno de circulación [5].

Como ya se dijo en el capítulo 2, a pesar de la existencia de diversos paradigmas de comunicación vehicular (V2I, I2V, RVC, etc.), la comunidad científica ha estado centrada en los últimos años en las comunicaciones inter-vehiculares (V2V), y casi exclusivamente aplicando conceptos heredados de MANET, mediante soluciones VANET. Las comunicaciones con la infraestructura no han recibido la misma atención, y en muchas ocasiones se han considerado estrategias basadas en las mismas tecnologías de comunicación WLAN usadas en V2V para el caso de la interconexión con la infraestructura [8]. A pesar de que esta aproximación puede ser suficiente para aplicaciones que necesiten de transacciones esporádicas en determinados puntos de comunicación, como es el caso del peaje electrónico DSRC, ofrecer una conectividad permanente mediante esta aproximación no es, al menos, económicamente viable.

Las redes de comunicación celular están extendidas por los lugares de tráfico habituales y, al igual que se han usado para aplicaciones de monitorización y seguimiento mediante una estrategia V2I, también podrían haberse considerado en comunicaciones I2V e V2V. No obstante, la latencia y el bajo ancho de banda que han supuesto las redes GSM hasta hace muy poco han impedido desarrollar dicha idea. Es por esto que las redes celulares han estado mucho tiempo fuera de la investigación ITS. La presente tesis doctoral apuesta por recuperar el uso de las redes celulares en este ámbito, debido a la reciente mejora de las conexiones de datos ofrecidas por los operadores de telefonía móvil.

Muchos de los trabajos realizados en comunicaciones vehiculares orientan, además, la arquitectura de red para una aplicación ITS concreta. Este hecho es muy común en servicios de seguridad activa, como los de detección de colisiones [4], en donde los protocolos VANET son adaptados para tal fin. Esta aproximación limita la generalidad de la red vehicular, que debería cubrir todas las necesidades de comunicación de todos los potenciales servicios de a bordo [6]. En la arquitectura presentada en este capítulo se demuestra cómo la simbiosis entre las redes *overlay* y las redes celulares pueden ofrecer un sistema de comunicación válido para diversos servicios.

Aparte de las consideraciones de rendimiento que implica el uso de las redes celulares en el entorno vehicular, que serán tratadas posteriormente, existen diversas cuestiones generales que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, es necesario diferenciar el propio hardware transceptor necesario en el OBU. Si bien en VANET

se suelen considerar las tecnologías 802.11a/b/g/p, en el caso de las redes celulares la única posibilidad hasta hace muy poco había sido GPRS. Sin embargo, UMTS está actualmente extendida, y sus capacidades para el transporte de datos están siendo gradualmente mejoradas. Esto hace que el conjunto de servicios ITS que pueden desplegarse con las nuevas ofertas de ancho de banda y latencia puedan incrementarse en gran medida. El coste de un módem de conexión UMTS es similar al de un transceptor 802.11, e incluso puede llegar a ser más barato si se adquiere a partir de una operadora de telefonía. No obstante, existe un coste colateral en el uso de las redes celulares, representado por el precio que hay que pagar por el uso de la red del operador. A diferencia de las redes VANET, el uso de UMTS implica un coste por datos y/o el pago de una cantidad mensual. Este problema se está abordando actualmente mediante acuerdos especiales entre los proveedores de servicios y las operadoras, posibles cuando se desea realizar un uso masivo de la red. Este es el caso del sistema de peaje alemán Toll Collect, como ya se dijo en el capítulo 2.

Las redes de comunicación celular ofrecen un acceso de red mucho más global que las soluciones VANET, ya que permiten conectar al vehículo directamente a Internet; sin embargo, este carácter es en sí un problema también. Las redes VANET transmiten información local relevante para los vehículos del entorno, aproximación que no es posible seguir mediante un acceso a Internet solamente. La arquitectura que se presenta en este capítulo ofrece localidad a los mensajes transmitidos por los vehículos mediante un soporte complementario de una red *overlay*. Un middleware P2P permite mantener una conexión con un grupo de comunicación lógico, en donde están incluidos los vehículos del entorno interesados en una determinada información. La aproximación final permite solventar los problemas de enrutamiento y de ratio de vehículos equipados que implican los diseños VANET.

5.2. Trabajos Previos en Redes Overlay y Sistemas de Comunicación Celular Aplicados a ITS

Como ya se vio en la revisión de tecnologías empleadas en comunicaciones vehiculares en el capítulo 2, el uso de redes overlay en el ámbito ITS no está todavía explotado, por lo que la literatura relacionada es limitada. Lo mismo ocurre con la aplicación de las redes celulares en ITS, ya que fuera de las soluciones de monitorización remota, el uso de éstas para otros servicios telemáticos no se ha empezado a considerar hasta la reciente mejora de las infraestructuras por parte de los operadores de telefonía.

Un trabajo que defiende el uso de las redes *overlay* en comunicaciones vehiculares es [30]. Aquí se argumenta que las redes VANET presentan hoy día un grave problema para la provisión de servicios que requieran de continuidad en la comunicación. Es por esto que se considera como solución factible el uso de una red *overlay* sobre la red celular, lo cual ofrece características equivalentes a las redes VANET usando una tecnología de comunicación subyacente basada en infraestructura. En [31] se aplican los conceptos de las redes P2P al ámbito vehicular, mediante una propuesta de red *overlay* que cubre las necesidades de movilidad de los nodos. Los vehículos intercambian información PVT

y de rumbo, a través de mensajes de estado basados en XML, con la que se pueden agrupar en grupos dinámicamente adaptables, según los cambios de topología. Estos problemas son tratados habitualmente en las redes ad-hoc a nivel de enrutamiento IP, pero añadiendo la semántica *overlay* se puede conseguir este propósito siguiendo una estrategia más flexible. No obstante, el mecanismo propuesto está centrado en tratar la conectividad entre grupos de vehículos cercanos entre sí, que usan una red VANET para comunicarse, sin cubrir la interconexión de estos grupos con el resto de la red.

El rendimiento de una red P2P de intercambio de ficheros sobre un enlace de comunicación celular es estudiado en [32], aunque utilizando una simulación alejada de los problemas ocasionados por la movilidad en un entorno vehicular. En el análisis de los resultados presentados en el trabajo, se considera a UMTS apropiado para las redes *overlay*, aunque se remarca la necesidad de que el protocolo P2P debe estar adaptado a las pérdidas de conectividad esporádicas. En las evaluaciones realizadas con la arquitectura de comunicación presentada, se estudian estos problemas en emplazamientos reales por los que la mala cobertura de la red o el número de usuarios conectados empeoran el rendimiento.

Haciendo uso de una red P2P JXTA dentro del ámbito vehicular, es destacable la somera aproximación presentada en [15]. Los vehículos interesados en determinados mensajes de interés emitidos por el resto de vehículos o por entidades de la infraestructura, pueden unirse a grupos P2P multi-difusión. La propuesta presentada no deja de ser una solución muy limitada en cuanto a su ámbito de aplicación, y el prototipo desarrollado ofrece una implementación muy particular de un sistema P2P de comunicación vehicular. No se realiza un estudio sobre cómo el sistema se puede aplicar a gran escala, puesto que miles de vehículos no deberían hacer uso de los mismos grupos de comunicación para enviar mensajes. Para los vehículos situados lejos de la zona de interés del servicio, no resulta práctico recibir mensajes de significado local. La plataforma de comunicación contenida en la tesis, en contraposición a esta implementación parcial, cubre los requerimientos de transmisión de mensajes localizados por grupos de comunicación JXTA locales, presentando una solución de comunicación mucho más completa. Además, a diferencia del sistema propuesto por estos autores, el presente capítulo analiza la tecnología de comunicación a usar, lo cual es obviado en aquel trabajo. En [33] se aplica el concepto de red *overlay* sobre una red de sensores de propósito general, en donde los nodos de interconexión con la red fija ejecutan JXTA sobre un enlace de red celular GPRS. El trabajo presenta un prototipo muy limitado, aunque sirve para demostrar que el sistema concebido funciona. Puesto que GPRS no dispone de soporte *multicast*, es necesario insertar un nodo *rendezvous* dentro de la red del operador. En la propuesta de arquitectura presentada en este capítulo se evalúa el rendimiento de JXTA sobre la red celular de forma mucho más extensa, y se hace uso de UMTS, lo cual mejora el funcionamiento y permite flexibilizar la arquitectura, ya que no es necesario situar un equipo de conmutación *rendezvous* en la red del operador.

La transmisión de mensajes a los vehículos circundantes es un aspecto fundamental en la arquitectura de comunicación que se presenta en la tesis doctoral. Un trabajo dentro de VANET que trata la transmisión *multicast* de mensajes se presenta en [190].

Existen muchas propuestas *multicast* orientadas a MANET, pero no tantas destinadas al caso particular de las redes vehiculares. En la arquitectura de comunicación que se plantea en la tesis doctoral, este objetivo se consigue mediante el uso de grupos P2P de comunicación, en los que los vehículos reciben los mensajes transmitidos por el resto dentro de un entorno de circulación delimitado.

Relativo al caso específico de transmisión de mensajes de seguridad en carretera a través de redes celulares, que comprende el desarrollo concreto considerado en este capítulo, se pueden encontrar algunos trabajos. La aparición de GPRS supuso una mejora en la transmisión de datos con respecto al GSM estándar, propiciando la aparición de sistemas de alerta en carretera mediante la difusión de mensajes en las celdas de comunicación celular. En [34] se presenta un trabajo en donde los mensajes de seguridad son difundidos mediante GPRS a los vehículos circundantes. Esta tarea la lleva a cabo un servidor conectado directamente al router de salida hacia Internet de la red del operador. Para determinar los vehículos que serán notificados, es necesario que el sistema reciba, de forma proactiva, información sobre el estado de los terminales suscritos. Para obtener un rendimiento aceptable es necesario que los vehículos manden esta información de forma muy frecuente, lo cual tiene implicaciones económicas y técnicas, ya que en situaciones de tráfico denso, solamente unos pocos vehículos podrían acceder a la red GPRS. En [35] se presenta un trabajo más evolucionado de esta idea, pero ahora considerando la tecnología MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Service*), con la que es posible realizar transmisiones *multicast* en áreas de servicio a través de un canal común desde la estación base, lo cual ahorra recursos de red y evita una monitorización continua de los vehículos. Esta misma idea es seguida a nivel lógico con la red *overlay* utilizada en la arquitectura que se presenta en este capítulo, la cual añade mayor versatilidad al sistema final, al solucionar, por ejemplo, el problema de que ocurran incidencias de tráfico en la frontera entre dos áreas de servicio. Además, la aparición de la tecnología MBMS no se espera hasta el despliegue de la siguiente generación de redes UMTS.

El carácter integral de una arquitectura de comunicación válida para diversos tipos de servicios no es tratado en los trabajos que se pueden encontrar en la literatura del momento. Además, muchos de ellos no consideran implementaciones realistas de los diseños propuestos, en donde los requerimientos de coste o rango de penetración son factores clave. La plataforma descrita hace uso de una red *overlay*, desde una perspectiva P2P, que es aplicada sobre la base de las redes 3G UMTS, desplegadas en gran medida en la actualidad. Este sistema ofrece las capacidades de comunicación necesarias en muchos de los servicios telemáticos considerados en la literatura ITS actual. De esta manera, se tratan bajo una misma plataforma los paradigmas de comunicación V2I, I2V y V2V, y se evalúa su rendimiento bajo entornos reales.

5.3. Factores de Rendimiento en Redes Vehiculares Basadas en VANET y Comunicación Celular

Independientemente de la aproximación considerada a la hora de diseñar una arquitectura de comunicación vehicular, existen un conjunto de parámetros de rendimiento que deben tenerse en cuenta previamente a la definición de servicios que hagan uso de tal despliegue. Las métricas más conocidas en la evaluación de redes de ordenadores son el ancho de banda, la tasa de mensajes perdidos, el retardo, y la variación del retardo (*jitter*). En el caso particular de las comunicaciones vehiculares, el retardo de la red es especialmente importante, sobre todo en servicios relativos a la seguridad activa. Sin embargo, la continuidad en la comunicación, es decir, la posibilidad de acceder a la red en todo momento, también es un aspecto fundamental a estudiar. Con el objetivo de tratar estos parámetros, la presente sección estudia los principales factores que afectan a estas métricas en un entorno tan especial como el de los vehículos. Para cada uno de estos, se toman en consideración las tecnologías de comunicación celular y las soluciones ad-hoc mediante VANET. Este último caso se puede considerar como una referencia en las comunicaciones en ITS, debido al gran número de trabajos publicados en este área.

En el estudio de estos factores de rendimiento se debe considerar, no obstante, que las redes VANET están generalmente limitadas a tratar el paradigma de comunicación V2V, aunque también existen trabajos relativos a la comunicación entre el vehículo y transceptores en el lado de la carretera. En el caso de las redes celulares, el ámbito es más general, gracias a la conectividad directa hacia Internet y la flexibilidad que esto conlleva.

5.3.1. Tecnología de Comunicación

Tal y como se listó en la sección 2.3, existen diversas tecnologías de comunicación a nivel físico/enlace que pueden considerarse en el dominio del vehículo. Para el caso de las comunicaciones V2V, los dispositivos que cumplen con los estándares 802.11a/b/g, y el novedoso 802.11p, son los más extendidos en sistemas VANET, como ya se dijo.

En aplicaciones en donde el funcionamiento en tiempo real es esencial, como la prevención de colisiones, la latencia que implica el sistema de comunicación en la transmisión de mensajes es un factor clave [134]. No obstante, un bajo retardo de la red VANET en la transmisión de información entre coches cercanos, no implica un buen rendimiento en el caso general. En aplicaciones en las que no basta con la simple difusión de datos sobre el estado del vehículo objeto hacia los circundantes, se deben considerar protocolos multi-salto. Esta estrategia implica nuevas consideraciones de retardo en las comunicaciones, que deben ser atendidos cuidadosamente [133]. Las redes VANET diseñadas a partir de protocolos de enrutamiento *multi-hop*, soportan la emisión de mensajes que se propagan en la red, como eventos específicos de seguridad o sobre el estado del tráfico.

En el caso de las redes de comunicación celular, la tecnología empleada

consiste generalmente en evoluciones de GSM. Gracias a mejoras recientes en las infraestructuras de los operadores [140], ahora es posible expandir el ámbito de aplicación de las redes celulares no solo en soluciones V2I, sino también I2V, e incluso V2V. De acuerdo con estudios recientes [50, 52], las latencias obtenidas haciendo uso de la tecnología HSPA de UMTS se sitúan ya alrededor de los 100 ms, para el caso de comunicación con la infraestructura, y por debajo de los 500 ms para la comunicación entre dos terminales móviles. Estos valores son todavía altos para hacer que un servicio de prevención de colisiones evite un accidente entre coches consecutivos; pero, incluso considerando esta aplicación crítica, para distancias de unos pocos cientos de metros la red celular puede ofrecer una mejor solución que una aproximación VANET multi-salto, tal y como se discute después.

5.3.2. Disponibilidad de la Red

La disponibilidad de la red es uno de los principales inconvenientes de las redes celulares en muchos emplazamientos remotos. En los diseños VANET no se hace necesario disponer de una infraestructura física de comunicación, debido al inherente carácter descentralizado de estos sistemas. Un vehículo equipado con un terminal VANET puede emitir siempre mensajes, ya que el propio vehículo es parte de la “infraestructura”¹.

Los operadores de telefonía móvil no ofrecen, obviamente, conectividad sobre toda la superficie terrestre y, aun en lugares con cobertura, el rendimiento no es homogéneo. Sobre entornos urbanos la cobertura celular suele ser excelente, y la cantidad de estaciones base a las que el módem de la OBU puede estar vinculado es alta. En muchas zonas rurales, por el contrario, no existe red del operador.

En las conexiones de datos mediante el uso de la red celular, es también importante diferenciar entre dos conceptos relativos a la propia disponibilidad de la red: la cobertura y la capacidad. La **cobertura** puede entenderse como la posibilidad del terminal móvil de acceder a la red, debido a que en la localización en la que se encuentra el usuario se ha desplegado la infraestructura necesaria. Sin embargo, incluso en circunstancias de buena cobertura, existen ocasiones en las que la red rechaza peticiones de conexión. En estos casos, se considera que la **capacidad** de la red celular ha sido excedida. Dependiendo de diversas cuestiones técnicas, tales como la modulación empleada, la asignación de frecuencias de transmisión, o la estrategia de coordinación de transmisiones de usuarios (*time slot scheduler*), este efecto tiene un impacto diferente.

5.3.3. Movilidad del Vehículo

Aparte de la posibilidad de acceder a la red, existen problemas de rendimiento derivados de la movilidad del vehículo tanto para VANET como para el caso de la red

¹Otra cuestión diferente es que estos mensajes sean recibidos por algún vehículo, tal y como se discute después

celular. En [50] se consideran estos aspectos a partir de evaluaciones experimentales. En el caso de las transmisiones 802.11, la distancia entre el emisor y el receptor es un factor clave, haciendo disminuir de forma lineal la probabilidad de recepción de mensajes, como también se muestra en [3, 134]. Incluso, la pérdida de la línea de visión presenta importantes pérdidas de paquetes de datos [152]. En el caso de las redes celulares, los procesos de *handover* entre estaciones base son también relevantes, si bien la presencia de obstáculos en la comunicación son menos importantes. En condiciones en las que el vehículo circula cerca del límite de alcance de una celda, o cuando se encuentra en el transcurso de un *handover*, se pueden producir variaciones de latencia y ancho de banda [191]. El *efecto ping-pong* se presenta como un caso especial dentro de este problema, y aparece cuando el terminal realiza continuos cambios de estación base, al circular a través de una zona de cobertura en donde más de una estación se considera buena candidata para establecer conexión.

La interferencia con otros equipos de radio es otro de los factores externos que afectan a las redes VANET, debido al amplio uso del rango de frecuencias consideradas por 802.11 [50]. Además, los diversos lugares por los que pueden circular los vehículos, pueden conllevar bloqueos de la señal debidos a la orografía del terreno, tanto en las comunicaciones celulares como en las soluciones VANET. Son muy diversos los factores externos derivados de la movilidad y, en el caso de simulaciones VANET, la creación de patrones de circulación realistas presenta por sí mismo un campo de investigación propio [192]. En entornos urbanos la consideración de estos factores es especialmente importante en estudios VANET [3, 193], debido a la mayor vulnerabilidad de la interfaz física 802.11 ante factores externos.

5.3.4. Protocolos de Enrutamiento en VANET

Los protocolos de enrutamiento usados por encima del nivel MAC y LLC implican un impacto en el rendimiento de las soluciones VANET. Existen multitud de propuestas disponibles en la literatura en estos términos. En muchos sistemas VANET, la estrategia seguida se basa en la difusión en abierto de los mensajes hacia los vehículos del entorno; este es el caso de muchos sistemas de prevención de colisiones [134]. Sin embargo, cuando es necesario propagar mensajes de importancia a través de la red con algoritmos multi-salto [9], la complejidad de los protocolos de enrutamiento crece.

Partiendo de los diferentes tipos de protocolos de enrutamiento que se pueden dar en MANET (según se explicó en la sección 2.3), pueden existir retardos ocasionados por la emisión del primer paquete de datos ante una nueva topología de red, tal y como se estudia en [192]. En [9] se analiza el retardo en la propagación de mensajes a través de una red VANET multi-salto. Como muestra este trabajo, en un servicio de prevención de colisiones pueden existir accidentes en emplazamientos localizados a 200 metros del origen del mensaje, debido a retardos en la propagación del paquete de aviso. Un sistema de avisos de seguridad que haga uso de la red UMTS, como el sugerido en [35], o el implementado en la tesis doctoral, puede solventar ya estos problemas, ya que el retardo en las comunicaciones celulares es constante sobre una zona muy amplia.

La situación en cuanto a los protocolos de enrutamiento usados en las redes celulares

está mucho más establecida, a partir de los desarrollos llevados a cabo por la 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Existe un conjunto de protocolos de enrutamiento que funcionan a nivel de enlace entre los diferentes elementos de la infraestructura, si bien existe una conversión paulatina hacia una red troncal IP para encapsular todo el tráfico de las operadoras. La disponibilidad de la infraestructura de comunicación es un punto a favor de las redes celulares. Además, su uso genérico en el acceso a Internet ha supuesto un importante ámbito de investigación, debido a los problemas de rendimiento que acarrea el uso de TCP sobre el enlace inalámbrico [191, 194]. En el caso de VANET, este problema también es evidente a partir de varios trabajos en evaluación experimental con WLAN [12, 154].

5.3.5. Ratio de Penetración

El problema del ratio de penetración en el campo de VANET es bien conocido por la comunidad científica. Los protocolos considerados en este campo requieren (e incluso asumen en algunos casos) la presencia de un número de vehículos suficiente en las inmediaciones, para que se pueda crear una malla de transmisión multi-salto [195]. Incluso en soluciones basadas en difusión abierta, se hace necesario recibir información de los vehículos de los alrededores, con tal de saber de ellos. Aunque un bajo ratio de penetración es obviamente un problema, un exceso de vehículos equipados que accedan al medio de transmisión acarrea también implicaciones de rendimiento. Debido a que el medio inalámbrico tiene una capacidad teórica máxima [196], cuando la densidad del tráfico es alta, el rendimiento de la red se ve afectado por problemas de interferencia y de acceso al medio [50, 192]. En las redes celulares, también estas situaciones son indeseadas, ya que la capacidad máxima en el mantenimiento de conexiones de datos puede sobrepasarse, y la red puede bajar el rendimiento cuando el planificador de transmisión debe servir a muchos usuarios [194].

El bajo índice de penetración en VANET puede aliviarse mediante técnicas de *buffering* temporal de información [197], aunque es necesario disponer de vehículos equipados en la carretera con tal de poder usar determinados servicios. En el caso opuesto de alta densidad de terminales, la solución radica en el mejor uso de los recursos inalámbricos, tanto a nivel físico, ajustando la potencia de transmisión de acuerdo con las condiciones del tráfico [198], como a nivel de red, no inundando el medio con mensajes de control [192]. En el caso de la red celular, entre las mejoras que supone la tecnología HSPA, se considera la reutilización de canales de comunicación cuando éstos no están siendo usados.

5.3.6. Velocidad de Circulación

La velocidad de los vehículos presenta un efecto más derivado de la movilidad de los terminales de comunicación. En el caso de VANET, el incremento de la velocidad ocasiona la rotura de caminos de comunicación por cambios en la topología [195], fundamentalmente en protocolos proactivos. La mayor fragmentación de la red es una consecuencia directa de patrones de alta movilidad. Sin embargo, la

propia velocidad de los vehículos puede usarse para solventar este problema mediante protocolos de enrutamiento que aprovechen el tráfico en sentido contrario para propagar mensajes [197]. Según este trabajo, la latencia y el ancho de banda de la red pueden verse mejorados con el incremento de la velocidad usando este mecanismo en vías interurbanas.

Los problemas derivados de la velocidad del terminal, también acarrearán problemas de rendimiento en la red celular [199]. A nivel físico, el efecto Doppler, la atenuación, y el multi-camino, se ven acentuados cuando la velocidad es muy alta. Ya a nivel de enlace, los trasposos entre estaciones base ocasionan también problemas, tal y como se ha comentado al discutir la disponibilidad de la red. Este mecanismo está principalmente basado en la medición de la potencia de la señal recibida de la estación base. Cuando un terminal detecta una estación como más cercana, realiza un *handover*. En dicho proceso, el mejor caso se presenta cuando no existe una pérdida apreciable en la calidad del servicio (*soft handover*); sin embargo, hay ocasiones en las que existen pérdidas de mensajes (*hard handover*), e incluso se puede llegar a producir la desconexión. La correcta configuración de las estaciones base es clave en el despliegue de la infraestructura de comunicación por parte del operador, pero la velocidad del vehículo también influye en el proceso de traspaso. Debido a que estos trasposos llevan un tiempo, si el vehículo circula por una zona en donde las celdas son demasiado pequeñas, puede que el terminal nunca llegue a finalizar un registro con ninguna de ellas en un caso extremo. Esta es la razón por la que el incremento de la potencia de transmisión de las estaciones base situadas en carreteras es favorable, además de por la obvia reducción de costes.

5.4. Arquitectura de Comunicación Overlay para ITS

En esta sección se describe la arquitectura de comunicación diseñada. Ésta se fundamenta en una red *overlay* que se asienta sobre la base TCP/IP de la conexión a Internet que provee la red celular UMTS. Después de una visión general del sistema, se describen los protocolos de comunicación utilizados y se aclara el funcionamiento de la red mediante la descripción de los escenarios de funcionamiento más representativos.

5.4.1. Visión General de la Arquitectura

La plataforma software presentada en el capítulo 3 ha sido ampliada para soportar el sistema de comunicación, incluyendo un nuevo módulo de acceso a la red P2P, e implementando un servicio de referencia para el acceso a la red desarrollada, tal y como se verá después. Siguiendo esta aproximación, cada nuevo servicio que requiera de capacidades de red no tiene que implementar un protocolo de comunicación propietario desde la base TCP/IP. El lado del vehículo es solamente una parte de la arquitectura de comunicación desarrollada, habiéndose diseñado un soporte asistido por la red para

facilitar el envío de mensajes de ámbito local, el procesamiento centralizado de eventos, y la gestión de mensajes procedentes de servicios de seguridad crítica.

Usando una red P2P sobre la red celular, los vehículos pueden enviar y recibir eventos con información contextual desde otros vehículos o desde la propia infraestructura. La Fig. 5.2 muestra un esquema general de la arquitectura de comunicación propuesta. Las zonas de circulación de tráfico se organizan en áreas de servicio, sobre las que se puede acceder a diversos grupos de comunicación P2P. Estas áreas presentan una zona lógica en base a una geometría definida en la entidad Group Server (GS), por lo que no están sujetas a la cobertura de las estaciones base. GS mantiene una base datos central en la que se mantienen tanto la geometría de las áreas de comunicación, como el conjunto de servicios disponibles dentro de ellas, representadas mediante grupos de comunicación P2P. Un mismo servicio puede estar disponible en distintas áreas de cobertura, usando grupos de comunicación propios del área. Una entidad local a cada área, llamada Environment Server (ES), escucha todos los mensajes que se envían dentro del área, con tal de ofrecer un procesamiento extendido de mensajes críticos. Además, esta entidad es la que concentra los dispositivos instalados en el lado de la carretera y, en determinados servicios, es capaz de enviar también mensajes a los vehículos. En un caso general, los ESs conforman entidades lógicas que pueden ejecutarse en servidores remotos, por lo que no sería necesario realizar la instalación de este equipamiento en el lado de la carretera.

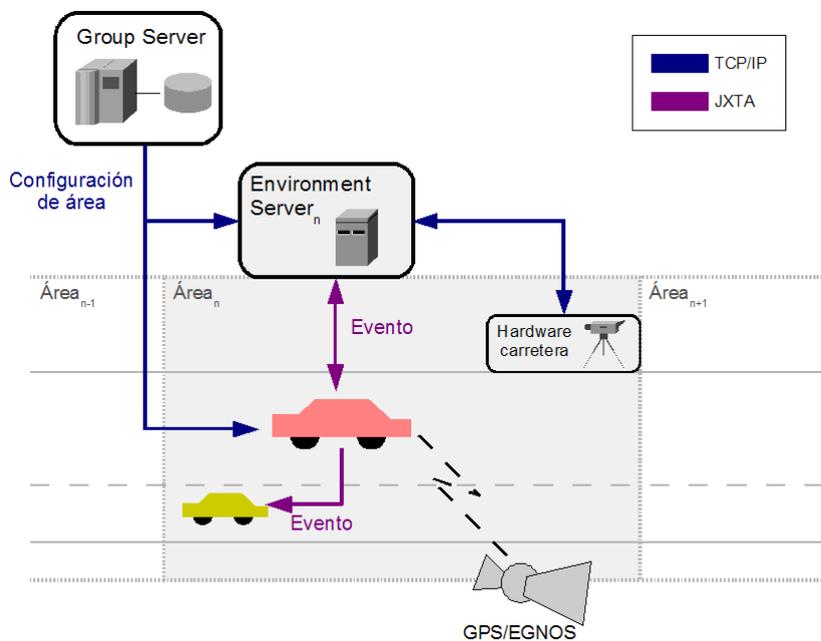


Figura 5.2: Diseño del sistema de comunicación *overlay*

Los eventos (mensajes) que envían los vehículos y los ESs, se encapsulan en paquetes P2P (JXTA), como se puede observar en la Fig. 5.2. Los mensajes enviados por los

vehículos son propagados a todos los terminales conectados al grupo P2P en cuestión, pero en el caso de los generados por ES, existe la posibilidad de enviar paquetes solamente a un vehículo. El middleware de comunicación de encarga de filtrar los mensajes que no van destinados hacia el terminal. En la implementación del servicio que use la plataforma se pueden definir mecanismos de comunicación de más alto nivel. La comunicación de los vehículos y ESs con Group Server se lleva a cabo mediante un protocolo sobre TCP/IP. De la misma manera, la conexión de ES con los dispositivos al lado de la carretera también se considera TCP/IP, aunque no existe un protocolo definido para este caso. Si el hardware en cuestión instalado en la red viaria dispusiera de suficientes capacidades, también podría conectarse a la red P2P directamente, con lo que podría emitir directamente mensajes sin necesidad de estar conectado a un ES.

Para mantener la conectividad a los servicios cuando los vehículos cambian de área, existe un proceso de traspaso asistido por GS. Inicialmente, el vehículo efectúa una conexión con GS para recibir la configuración del área de servicios en la que se encuentra. Aparte de los grupos de comunicación que se pueden usar, el vehículo recibe de GS la geometría del área de cobertura. Cada vehículo hace uso del sistema de navegación presentado en el capítulo 4 para conocer su posición actual, con lo que el propio terminal de a bordo determina cuándo se ha salido del área de servicios actual. Es en este momento cuando se inicia el proceso de traspaso con GS. En dicho procedimiento, el vehículo recibe la configuración del nuevo área, con lo que puede mantener la conexión a un servicio ofertado a través de diversas zonas.

Como se ha dicho, los servicios pueden distribuirse a través de distintas áreas, usando grupos de comunicación P2P distintos. Esto hace que los mensajes emitidos por la infraestructura, o por los vehículos, queden delimitados dentro del rango de acción del área. Sin embargo, también pueden existir servicios que hagan uso de un mismo grupo de comunicación a través de dos o más áreas, con tal de evitar el proceso de traspaso cuando los eventos que se emiten presentan un ámbito mayor. Esto puede ocurrir, por ejemplo, en un servicio de información meteorológica, cuyos eventos tienen interés dentro de una zona geográfica muy grande.

En esta primera aproximación a la arquitectura de red diseñada, se puede observar cómo la red P2P usada complementa a la conexión celular para ofrecer comunicaciones V2V, ampliando la funcionalidad de comunicación directa con la infraestructura de las redes celulares (sección 2.3).

5.4.2. Detalles de los Protocolos

Un conjunto de mensajes intercambiados entre las entidades de la arquitectura de comunicación son necesarios para permitir la propagación efectiva de eventos. Los mensajes intercambiados en el sistema están divididos en **tres grupos fundamentales de paquetes**:

- Comunicación vehículo-GS.
- Comunicación ES-GS.

Tabla 5.1: Mensajes en el enlace Vehículo-Group Server de la arquitectura de red

Mecanismo	Mensaje	Emisor
Gestión de la conexión	Area_Update_Request	V
	Area_Update_Reply	GS
	GS_Disconnect	V
Traspaso	Area_Update_Request	V
	Area_Update_Reply	GS
Subscripción	Event_Subscription	V

- Notificación de eventos.

El funcionamiento de los protocolos considerados es descrito tanto en este apartado como en el siguiente. Sin embargo, no se ha incluido el formato de los paquetes para clarificar la explicación. Esta información está disponible en el apéndice C.

La Tabla 5.1 incluye los mensajes intercambiados en el caso de la **comunicación vehículo-GS**. Los mensajes están divididos según el mecanismo para el que son usados. El emisor identifica el origen de los mensajes, que en este caso están encapsulados en datagramas TCP sobre la conexión celular. El primer mecanismo descrito es el de *gestión de la conexión*. El mensaje `Area_Update_Request` es utilizado inicialmente para registrar al vehículo con GS. Éste último responde con un mensaje `Area_Update_Reply`, que contiene la configuración del área inicial de servicios. El mensaje `GS_Disconnect` finaliza la conexión del vehículo a la red. El uso posterior de los mensajes de actualización de área se hace en el mecanismo de *traspaso*, en donde el vehículo emite el mensaje `Area_Update_Request`, cuando detecta la salida del área de servicios actual, y recibe una nueva configuración con una respuesta `Area_Update_Reply`. Los datos contenidos en los mensajes `Area_Update_Request` incluyen solamente la posición del vehículo, ya que los identificadores de los servicios a los que el usuario está suscrito se mantienen en la sesión con GS. La información transmitida en los mensajes `Area_Update_Reply` contiene la geometría del nuevo área de servicios, representada a través de un conjunto de coordenadas geográficas que determinan un polígono, y el conjunto de servicios disponibles, junto con el identificador de los grupos de comunicación P2P usados. Cuando el usuario desea realizar una *suscripción* a un determinado conjunto de servicios, el terminal del vehículo envía un mensaje `Event_Subscription`, incluyendo los identificadores de éstos y el del propio vehículo, con tal de conservar la sesión.

Como se observa, al no ser necesario que el vehículo emita continuamente su posición, el mecanismo de traspaso asistido por la infraestructura ahorra recursos de red. No obstante, cuando el vehículo no está conectado a ningún área de servicios, el terminal móvil debe enviar cada cierto tiempo un mensaje `Area_Update_Request` con la posición, ya que el vehículo no dispone de información sobre ningún área.

Tabla 5.2: Mensajes en el enlace Environment Server-Group Server de la arquitectura de red

Mecanismo	Mensaje	Emisor
Gestión de la conexión	ES_Registration	ES
	ES_Registration_OK	GS
	ES_Registration_ERROR	GS
	ES_Registration_Update_Request	ES
	ES_Registration_Update_Reply	GS
Reenvío de mensajes	Neighbour_Groups_Request	ES
	Neighbour_Groups_Reply	GS

La **comunicación ES-GS** se lleva a cabo mediante los mensajes incluidos en la Tabla 5.2. En este caso también se dispone de un mecanismo de *gestión de la conexión*, entre Environment Server y Group Server. El primer mensaje, **ES_Registration**, es usado por cada ES para establecer una conexión con GS. Este paquete contiene la localización del ES, con lo que GS puede buscar todos los servicios para los que existen grupos de comunicación y responder con un mensaje **ES_Registration_OK**, incluyendo dicha información. Los ESs se conectan a todos los servicios disponibles en el área, ya que escuchan todos los mensajes que se transmiten en su interior. Si existiera cualquier error en el registro, GS respondería con un mensaje **ES_Registration_ERROR**, con el motivo del error. Puesto que los Environment Server son entidades estáticas que pueden estar conectadas durante largos periodos a la red P2P, necesitan actualizar cada cierto tiempo los grupos de comunicación disponibles. Esta tarea se realiza mediante los mensajes **ES_Registration_Update_Request** y **ES_Registration_Update_Reply**.

El segundo mecanismo disponible en la comunicación ES-GS, es el correspondiente al *reenvío de mensajes*. Cuando existe un problema de seguridad crítico, es necesario asegurar que todos los vehículos cercanos a la incidencia reciban las notificaciones enviadas a través de los servicios de tráfico disponibles. Sin embargo, la localización de estas incidencias puede estar cerca de la frontera entre dos áreas de servicios. Para asegurar que el mensaje es recibido por los vehículos localizados en el área adyacente, es necesario propagar los mensajes al grupo de comunicación P2P usado en dicha zona. Para realizar esta tarea, los ESs, que escuchan todos los eventos enviados en el área, realizan una petición de los grupos de comunicación vecinos para el servicio en cuestión. Esto se realiza mediante el envío de una solicitud **Neighbour_Groups_Request** a GS, incluyendo el identificador del servicio. GS responde con un mensaje **Neighbour_Groups_Reply**, incluyendo los grupos de comunicación adyacentes, que el ES origen utilizará para reenviar el evento. Estos grupos pueden almacenarse temporalmente para evitar consultas continuas.

Finalmente, la Tabla 5.3 recoge los mensajes utilizados en la **notificación de eventos**, encapsulados en mensajes P2P. El único mecanismo utilizado es el de *notificación de evento*, que comprende tres tipos de mensajes. **VehicleEvent** es

Tabla 5.3: Mensajes en el enlace Vehicle-Vehicle/Environment Server de la arquitectura de red

Mecanismo	Mensaje	Emisor
Notificación de evento	Vehicle_Event	V
	Environment_Event	ES
	Specific_Environment_Event	ES

enviado por los vehículos para notificar un evento de un servicio al que está suscrito el usuario. En estos mensajes se incluyen los identificadores del servicio y el evento notificado, el identificador del vehículo, su posición y, adicionalmente, es posible incorporar el factor de integridad de la posición HPL_{SBAS} , cuyo cálculo es descrito en el capítulo 4. Esto permite desarrollar servicios en donde es necesario disponer de información de fiabilidad del sistema de navegación. Los mensajes **Vehicle_Event** son recibidos por los vehículos que se encuentran dentro del grupo de comunicación P2P y por el ES local. Cada Environment Server puede también enviar mensajes dentro de la red P2P, mediante el uso de paquetes **Environment_Event**. Estos son recibidos por todos los vehículos adheridos al grupo de comunicación P2P. El mecanismo de reenvío de mensajes usa este tipo de paquetes. Si se desea enviar un mensaje a un vehículo en concreto, es posible usar **Specific_Environment_Event**, que incluye el identificador del vehículo destino. Este tipo de mensaje se puede usar solamente en servicios concretos, como en el sistema de adaptación de información contextual que se presenta en el capítulo 6.

5.4.3. Escenarios Representativos

Los cinco escenarios más representativos del sistema de comunicación se ilustran en la Fig. 5.3. En el primero se observa cómo el conductor se suscribe a un conjunto de servicios en los que está interesado. Para hacer esto, la OBU envía un mensaje de suscripción con los identificadores de los servicios. A partir de este momento, el terminal se conectará automáticamente a los grupos de comunicación P2P disponibles que pertenezcan a los servicios en cuestión, realizando los traspasos necesarios entre áreas de servicio. El proceso de traspaso, o de conexión inicial a la red, es mostrado en el segundo escenario. En el caso concreto de la imagen, el vehículo pasa de un área de servicio a otra. Puesto que el propio terminal detecta la salida del polígono formado por coordenadas geográficas, que conforman el área de servicios origen, inicia el proceso de traspaso y recibe la configuración del nuevo área. El tercer escenario muestra un ejemplo en donde un ES está conectado a un lector de etiquetas RFID, con lo que es posible enviar un mensaje personalizado a un vehículo que circula en el área de servicios local. Esto presenta un mecanismo de comunicación I2V. El cuarto escenario muestra un mensaje enviado por un vehículo debido a la presencia de obras en la calzada. El mensaje es recibido por los vehículos conectados al servicio dentro del área (V2V), además de ser procesado por ES. Finalmente, el último caso ilustra el mecanismo de

reenvío de mensajes. ES_n recibe un mensaje de un servicio de seguridad crítico que debe ser propagado. Para ello, realiza una solicitud de los grupos de comunicación P2P del servicio en las áreas adyacentes (ES_{n+1}), y propaga el mensaje a los vehículos situados en las zonas próximas de circulación.

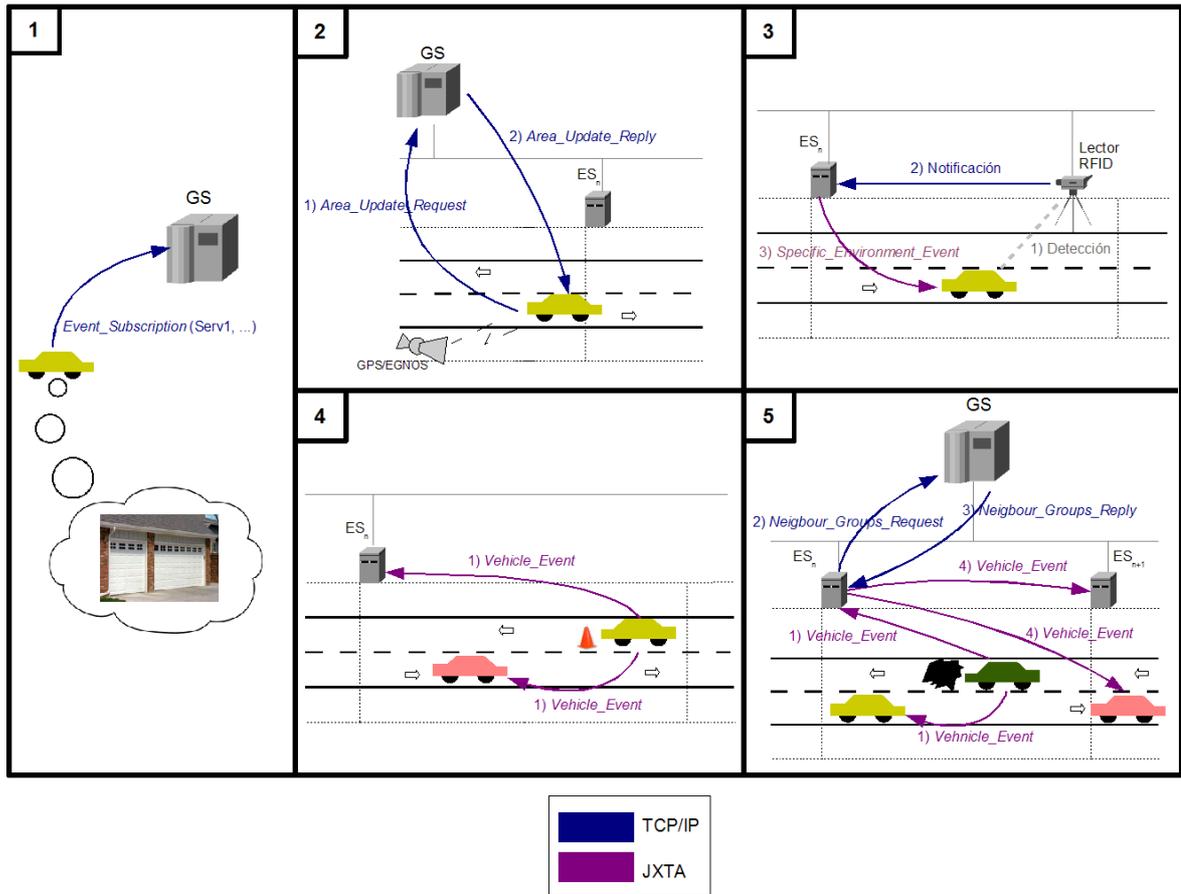


Figura 5.3: Escenarios de funcionamiento del sistema de comunicación

5.5. Evaluación Experimental del Sistema

La arquitectura de comunicación presentada ha sido desarrollada sobre un prototipo real, con tal de comprobar el funcionamiento y la utilidad del sistema, pero también para analizar el rendimiento del mismo en condiciones de circulación real. Tanto el lado del vehículo, como las entidades de la infraestructura, han sido implementados y puestos en funcionamiento. Además, se ha desarrollado una aplicación de referencia que permite emitir y recibir eventos a través de diversos servicios. Esta utilidad ha sido usada en las pruebas de rendimiento, en patrones de comunicación I2V, V2I y V2V.

5.5.1. Desarrollo y Puesta en Funcionamiento de la Arquitectura de Comunicación

Para el lado del vehículo, como se ha comentado antes, se ha hecho uso de la plataforma de OBU considerada en el vehículo prototipo, y presentada en el capítulo 3. El sistema de navegación, mediante el receptor San Jose Navigation FV-21, y el módem UMTS Huawei E220, con soporte HSDPA, fueron usados para las pruebas de rendimiento. Un segundo vehículo convencional fue usado en la realización de las pruebas V2V. Este coche fue equipado con un ordenador portátil con procesador Pentium M 1.5 Ghz y 512 MB de RAM, sistema operativo Windows XP, máquina virtual de Java 1.5, y ejecutando la misma plataforma software del OBU del vehículo prototipo. El receptor que se usó en este caso fue el modelo Novatel OEM3, y el módem de conexión a la red celular fue el ZTE MF620, también con soporte HSDPA.

En el lado de la infraestructura de comunicación, se ha implementado el software correspondiente a Group Server y Environment Server. Tanto Group Server, como todas las instancias de Environment Server (una por área de servicios), se ejecutan sobre un servidor de altas prestaciones, dotado de un sistema multiprocesador AMD Opteron con 3 GB de RAM. Éste se encuentra conectado a Internet mediante un enlace de alta velocidad a través de la red académica y de investigación RedIris, y dispone de una dirección pública accesible desde el exterior. Environment Server y Group Server están implementados en Java 1.5, siendo programas totalmente parametrizables.

La plataforma software del OBU se ha ampliado con un módulo de soporte a la red P2P, denominado JXTA Communications, que funciona como *middleware* de comunicación. Para ello se ha hecho uso de la tecnología JXTA que, tal y como se explicó en la sección 2.3, dispone de capacidades de comunicación P2P basada en grupos. El módulo de nivel intermedio JXTA Communications permite establecer canales de comunicación en las áreas de servicios, mediante la creación de tuberías (*pipes*) *multicast* de entrada y salida. Los nombres de los grupos de comunicación JXTA disponibles en cada área de servicios, son provistos por Group Server en el proceso de traspaso o de conexión inicial a la red. El módulo *middleware* usa estos datos para añadir al terminal del vehículo como un nuevo *peer* dentro de la red. Cada Environment Server funciona como *rendezvous*, en donde se almacenan las publicaciones (*advertisements*) de los grupos de comunicación pertenecientes al área al que pertenece.

Además del *middleware* de soporte JXTA, se ha desarrollado un módulo de alto nivel en la plataforma software que comprende una aplicación cliente de la arquitectura de comunicación. Ésta consiste en un terminal de envío y recepción de eventos de tráfico. La Fig. 5.4 contiene una captura de pantalla de la aplicación. El panel de la derecha muestra todos los servicios a los que se puede suscribir el usuario. Una vez realizada la suscripción, éstos aparecen como activados en la parte inferior. Dependiendo del tipo de servicio, se pueden recibir eventos, mandarlos, o ambos. En la imagen, el usuario ha activado todos los servicios soportados, sin embargo, solamente tres de ellos se encuentran disponibles en el área actual. El panel central lista todos los eventos recibidos. En la captura dada, se han recibido dos eventos, uno indicando una avería de

un vehículo, y otro con información meteorológica. La aplicación hace uso del módulo de síntesis de voz, con lo que puede leer todos los eventos recibidos, con tal de que el conductor no desvíe la mirada de la carretera.

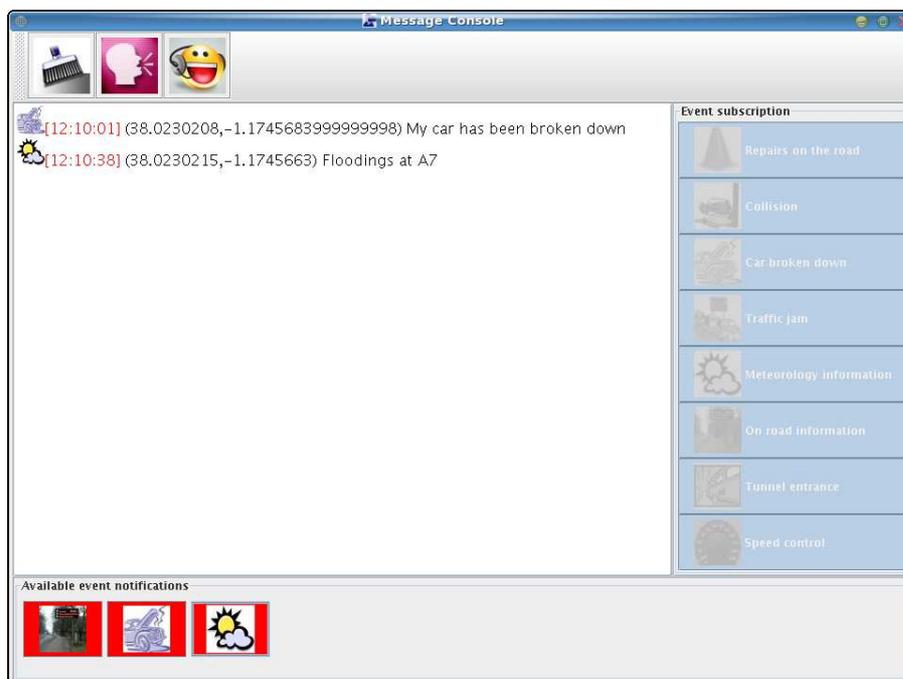


Figura 5.4: Aplicación de envío y recepción de eventos de tráfico

Como se verá en el capítulo 6, esta aplicación, al igual que la infraestructura telemática desarrollada, se ha visto mejorada con nuevas capacidades destinadas a la mayor integración del vehículo dentro del contexto de circulación.

5.5.2. Entorno Considerado en las Pruebas de Campo

Para comprobar el funcionamiento correcto de la arquitectura de comunicación, se han realizado pruebas de operación a lo largo de un entorno real. El lugar escogido ha sido un tramo de la Autovía A-7 a la altura de su paso por Murcia. En la Fig. 5.5 se puede observar el tramo seleccionado, que comienza en las inmediaciones del Campus de Espinardo de la Universidad de Murcia, y termina en la localidad de Librilla. En la imagen se han marcado las áreas de servicio definidas a lo largo del tramo, con tal de comprobar el funcionamiento del mecanismo de traspaso. En total, existen ocho áreas encerradas por polígonos irregulares, que recogen cerca de tres kilómetros de carretera cada uno. En un despliegue real de la red, estas áreas deberían ser más amplias, ya que con la configuración actual los vehículos permanecen muy poco tiempo dentro de cada zona. Esta organización se ha escogido para facilitar las labores de evaluación.

La primera de las áreas de servicios especificadas en la Fig. 5.5, ha sido la usada en los estudios de rendimiento del mecanismo de notificación de eventos. Este área



Figura 5.5: Entorno de las pruebas generales de funcionamiento del sistema de comunicación

se encuentra ampliada en la imagen de la Fig. 5.6. En este caso se muestra una fotografía, con tal de apreciar las diferentes infraestructuras de la zona. Las pruebas de comunicación se han efectuado en sentido contrario al de las agujas del reloj, comenzando desde la marca situada en la parte superior derecha. Los Nodos-B de la red UMTS, que se utilizan en la conexión a la red celular, se encuentran instalados en una zona elevada del centro del campus. El vehículo parte desde un área de expansión de la universidad, circula alrededor del campus, y sale de él para rodear una zona residencial. Finalmente, vuelve a entrar en el campus universitario, aunque recorriendo una zona escondida por la orografía del terreno.

5.5.3. Descripción de las Pruebas

La latencia se encuentra como la principal métrica a estudiar en arquitecturas de comunicación basadas en red celular. Actualmente, las recientes mejoras en la red UMTS permiten obtener anchos de banda más que suficientes para la implantación de la mayoría de los servicios ITS. Con velocidades cercanas a 1 Mbps en el canal de bajada, y 500 Kbps en el subida, en muchos de los despliegues actuales, la velocidad de transmisión es incluso adecuada para la descarga de ficheros y reproducción multimedia

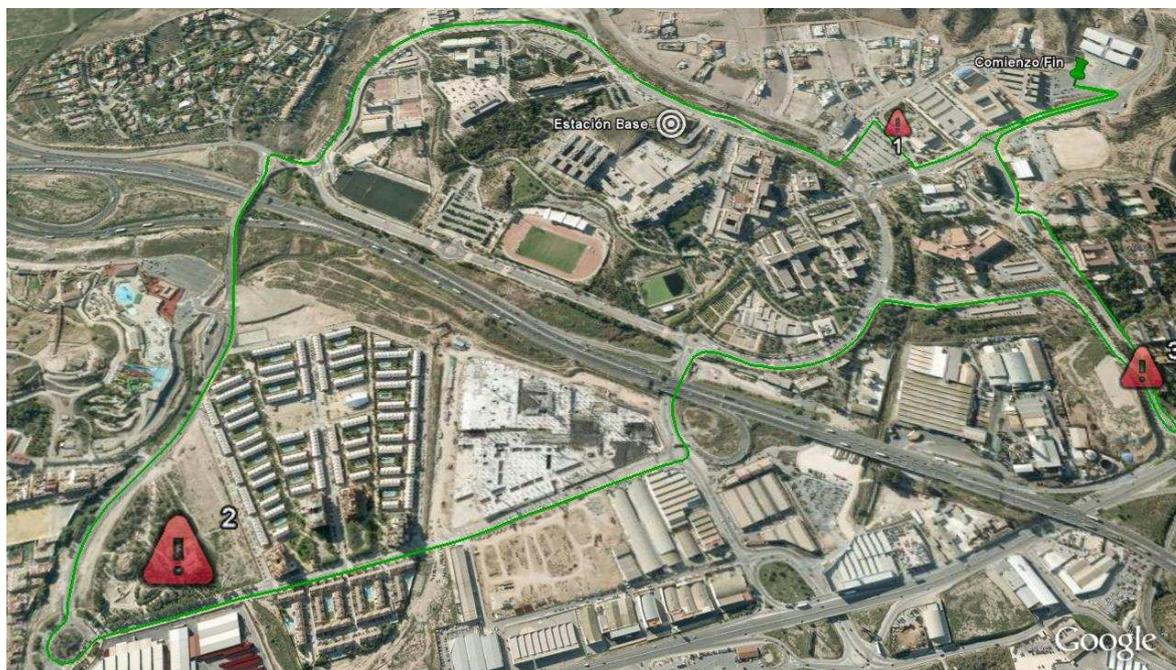


Figura 5.6: Circuito utilizado en las pruebas de rendimiento de la red

en *streaming*. La latencia en la comunicación presenta, sin embargo, un parámetro de rendimiento de suma importancia en ITS. Muchos de los servicios y aplicaciones en el entorno vehicular necesitan de un funcionamiento lo más cercano posible al tiempo real.

Los resultados analizados también tratan la continuidad de la conexión, si bien la tasa de paquetes perdidos no se analiza por las condiciones especiales del sistema diseñado. A través de diversas pruebas iniciales usando UMTS R99 (sin mejoras HSPA), se observaban pérdidas de paquetes en no más de un 4% del total de los enviados. Sin embargo, el uso de módems con soporte HSDPA ha supuesto un avance sustancial en este sentido, explicados por las mejoras en la gestión del canal de comunicación y el nuevo mecanismo de retransmisión y corrección de errores HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) [51]. En las pruebas realizadas no se han observado pérdidas de paquetes, si bien se ha comprobado que, mientras que los mensajes en el canal de subida fueron enviados por la red JXTA mediante UDP, en el de bajada llegaban mediante TCP. Este hecho fue estudiado mediante un analizador de red situado tanto en el terminal emisor como en el receptor.

En las pruebas de transmisión I2V, se hizo uso de un nodo conectado a la red cableada con la plataforma software descrita, y del vehículo prototipo, conectado a la red UMTS. Éste último recibía mensajes emitidos de forma periódica cada segundo, a partir de una versión modificada de la aplicación de notificación de eventos de tráfico. Los mensajes transmitidos consistían en paquetes `Vehicle_Event` de 38 bytes, transmitidos por la red JXTA, y que contenían una marca de tiempo de longitud fija

como campo de datos, para poder calcular el retardo de transmisión. No obstante, la red P2P introduce numerosos datos de control en estos mensajes, además de intercambiar toda la información mediante mensajes XML codificados en ASCII. Finalmente, los mensajes transmitidos en el canal de bajada consistían en 1927 bytes, empaquetados mediante dos mensajes TCP que requerían de una confirmación desde el vehículo. En el caso de las pruebas V2I, el emisor de los mensajes fue la OBU. Los paquetes de 38 bytes `Vehicle_Event` eran empaquetados en mensajes JXTA de 1498 bytes en este caso y, finalmente, enviados mediante un mensaje UDP que se fragmentaba en dos paquetes IP en la red. En las pruebas V2V se observó el uso conjunto de estos dos mecanismos anteriores, con lo que los mensajes eran emitidos mediante UDP y recibidos en paquetes TCP, según lo explicado. En estas pruebas, los dos vehículos circularon en caravana durante el recorrido, con tal de mantener el mismo entorno de circulación.

Para el cálculo de la latencia de comunicación, se ha hecho necesario mantener la hora local de los terminales emisor y receptor sincronizada. Para esto, se han utilizado los sensores GNSS, con tal de obtener de forma periódica la hora UTC. La OBU, o el ordenador portátil usado en el caso del otro terminal, sincronizaban su hora local cuando ésta se desviaba de la correcta.

5.5.4. Resultados y Análisis

Considerando el recorrido marcado anteriormente, se han realizado multitud de pruebas de rendimiento del sistema de comunicación. La Tabla 5.4 resume todas ellas. Como se puede observar, se han realizado varios recorridos con cada configuración (I2V, V2I y V2V) a distintas horas del día. El valor medio del retardo de la comunicación se muestra en la quinta columna, junto con la desviación estándar de la muestra de valores, que ofrece una visión de la variación del retardo de la red. Las pruebas finales estudian el impacto de la velocidad de los terminales, por eso los vehículos circularon más rápido.

Análisis General de los Resultados

En los valores de retardo medio mostrados en la Tabla 5.4 se puede observar que el canal de comunicación de bajada (I2V) ofrece unos resultados similares a los recabados en el de subida (V2I). En condiciones generales el canal de bajada funciona mejor, por las características asimétricas de la red celular; y más aún si se tiene en cuenta que se usa HSDPA, que implica una mejora adicional en la transmisión de datos desde la red. Los resultados obtenidos se explican por la transmisión de los mensajes mediante TCP en el canal de bajada, además de por el uso de las nuevas técnicas de gestión dinámica del enlace HSDPA. En condiciones de movilidad, HSDPA adapta la capacidad del canal de comunicación dependiendo de las condiciones particulares del terminal, lo cual redundará en variaciones continuas de retardo. Al no realizarse una transmisión de datos continua, el terminal debe intercambiar en algunos casos cierto tráfico de control antes de volver a recibir un mensaje, debido a cambios a modo de bajo consumo [52]. Como se verá después más detalladamente, TCP incrementa los

Tabla 5.4: Resumen de pruebas realizadas con la red y principales características

Test	Tipo	Velocidad (Km/h)	Hora	Retardo medio (ms)	STD (ms)
T1	I2V	17-25	27/11/07 13:11-13:30	227.62	566.78
T2	I2V	17-25	30/11/07 12:43:13:07	295.86	1242.86
T3	I2V	17-25	05/12/07 11:14-11:39	244.98	561.63
T4	I2V	17-25	05/12/07 11:51-12:14	247.72	558.16
T5	V2I	17-25	28/11/07 10:23-10:44	248.06	129.96
T6	V2I	17-25	28/11/07 10:53-11:16	266.28	231.71
T7	V2I	17-25	12/12/07 11:37-11:58	242.91	239.07
T9	V2I	17-25	12/12/07 12:04-12:26	236.96	147.46
T9	V2V	17-25	30/11/07 11:22-11:43	464.33	903.09
T10	V2V	17-25	30/11/07 11:48-12:09	489.62	814.31
T11	V2V	17-25	30/11/07 15:43-16:04	378.93	475.92
T12	V2V	17-60	11/12/07 15:59-16:12	400.37	357.28
T13	V2V	17-60	11/12/07 16:13-16:26	412.55	375.44
T14	V2V	17-60	11/12/07 16:32-16:45	415.7	339.45

problemas de comunicación en situaciones de baja cobertura, al no estar adaptado a redes de comunicación inalámbrica. Los problemas de pérdidas y retardos de la red son interpretados por TCP como situaciones de congestión, lo cual no suele ser cierto en redes de comunicación inalámbrica. El valor de desviación estándar de la última columna de la Tabla 5.4, refleja las grandes variaciones de retardo en el caso de I2V, que aumentan el valor medio de latencia.

En el caso de las comunicaciones V2V, se pueden comprobar valores que rondan la suma de las latencias obtenidas en el canal de subida y en el de bajada, ocurriendo lo mismo para la desviación de las muestras. Esto es lógico, si se tiene en cuenta que se acumulan los problemas de ambos casos. El aumento de la velocidad de circulación, desde los 17-25 Km/h a los 17-60 Km/h, no refleja aparentemente ningún cambio apreciable en los valores de latencia y variaciones en el retardo. Inicialmente, la pequeña variación se puede deber solamente a las circunstancias particulares del periodo en el que se realizaron las pruebas.

La hora de realización de las pruebas se muestra como parámetro importante en el análisis de los resultados. Atendiendo al valor medio de retardo de las pruebas realizadas, se puede observar un incremento en la latencia en las horas cercanas a medio día, hasta llegar a la una de la tarde. Todas las pruebas fueron realizadas en días laborales y de asistencia a clase. Al medio día, alumnos y personal de la universidad, residentes de la zona urbanizada señalada como “2” en la Fig. 5.6, y trabajadores en general que circulan en este momento del día por la zona (no hay que olvidar que una autovía atraviesa el recorrido considerado), hacen un mayor uso de la red celular, lo cual hace que el rendimiento decaiga. Las once de la mañana también es un momento de

movilidad de personal dentro de la universidad, debido a cambios de clase y descansos por el desayuno. Como se puede observar en las pruebas V2V, a partir de medio día el rendimiento de la red mejora, aunque vuelve a empeorar cuando se aproxima la hora del final de la jornada laboral y docente.

Comunicación I2V

Los gráficos incluidos en la Fig. 5.7 analizan los resultados de una de las pruebas I2V realizadas, en concreto en el caso del test T3². El primer gráfico representa los valores de retardo obtenidos de cada mensaje enviado desde el terminal conectado a la red cableada. A primera vista es apreciable el efecto de la movilidad en la variación del retardo. Existen tres zonas fundamentales de problemas en las comunicaciones, marcadas en la Fig. 5.6. La primera de estas zonas, marcada como “1”, se ve representada por el pico de retardo que se observa entre los segundos 400 y 500. Este área corresponde al inicio del recorrido, al atravesar una zona de aparcamiento cubierto de metal. La segunda de las zonas conflictivas es mucho más evidente, y abarca desde el segundo 670 al 830. Esta zona comprende a la marcada como “2” en la Fig. 5.6. Además de que el vehículo alcanza el emplazamiento más alejado de la estación base, se circula cerca de varios edificios que empeoran todavía más la calidad de la conexión. Al dejar esta zona y volver al campus universitario, la comunicación se recupera, aunque vuelven a aparecer problemas temporales al circular el vehículo por la zona “3”. En este caso, el vehículo está menos alejado de la estación base que en el caso anterior, pero la orografía del terreno dificulta la comunicación.

La gráfica que representa la función de distribución acumulativa (*Cumulative Distribution Function*) muestra cómo los valores entre los 100 y 140 ms corresponden con cerca del 85 % de los valores recogidos. El resto de los retardos se distribuyen a escala quasi-logarítmica, si bien existe una pequeña fluctuación correspondiente a los valores entre los 400 y 500 ms, frecuentes en los pequeños picos. Estos son debidos al tráfico de control que es necesario intercambiar en la gestión del canal de bajada HSDPA. La última de las gráficas evidencia esta distribución de valores, mostrando un histograma con las frecuencias de aparición de valores de retardo. Las cubetas para los valores de latencia se han distribuido de forma logarítmica en el eje de abscisas. El pequeño número de valores que producía el escalón en la representación anterior se ven representados ahora en el histograma tras todos los valores más frecuentes.

Comunicación V2I

En la Fig. 5.8 se representan los valores de retardo recogidos en el test V2I T7. Considerando los resultados del test I2V anterior, existen varias cuestiones de interés a remarcar. Por un lado, se puede observar cómo existe una variación del retardo mucho menor. Esto, como se ha dicho anteriormente, se debe a que se usa UDP, en detrimento de TCP, y no se considera la modulación dinámica del canal de bajada con HSDPA.

²Aunque no se muestran en detalle todas las pruebas realizadas de la arquitectura de comunicación, los resultados obtenidos son similares para cada tipo de transmisión.

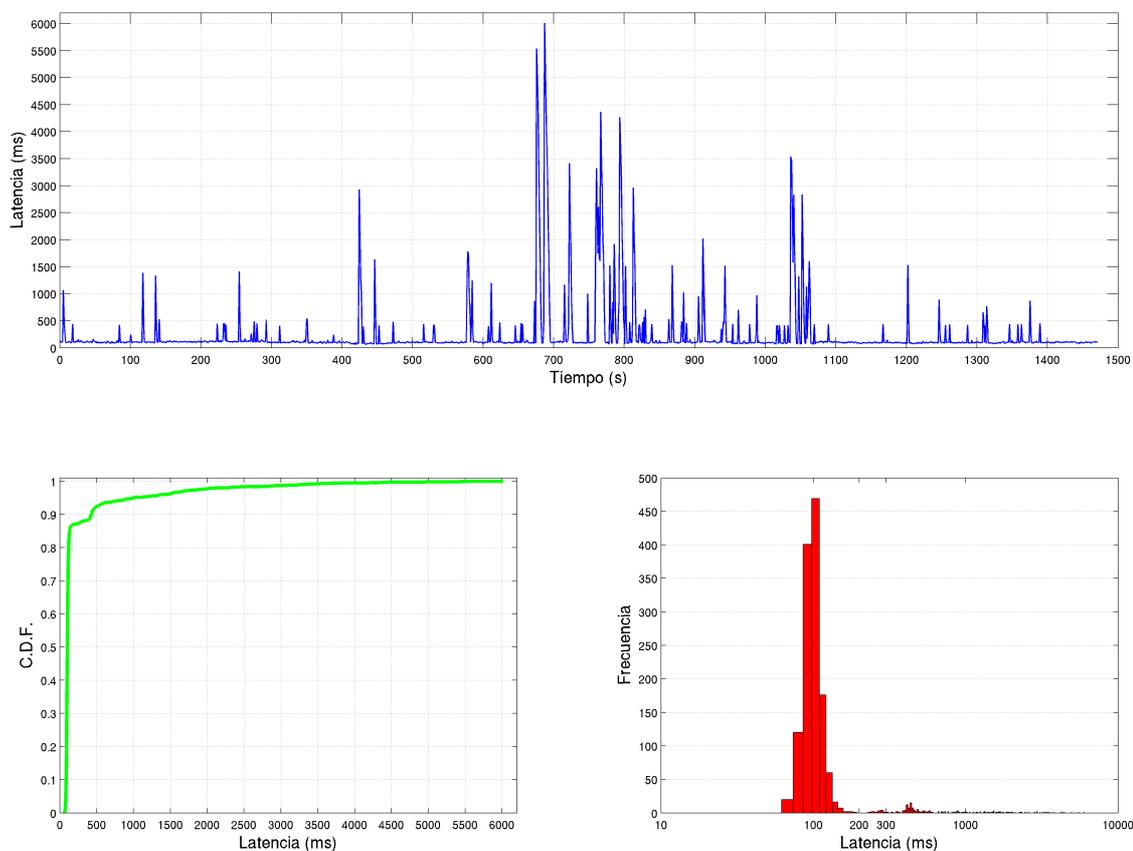


Figura 5.7: Rendimiento del sistema en transmisión I2V en el test T3

La ausencia de variaciones bruscas en el rendimiento en este caso hacen que el retardo medio de las pruebas sea similar al caso I2V. Sin embargo, atendiendo a la distribución y a la frecuencia de aparición de los valores de retardo, se comprueba que en la mayoría de los casos se obtiene una latencia situada ente los 180 y 240 ms (frente al intervalo 100-140 ms del caso I2V), lo cual evidencia, en cualquier caso, la mayor capacidad del canal de bajada en condiciones de buena cobertura.

Las zonas con problemas de rendimiento de la red que se veían en el caso I2V, están de nuevo presentes en este caso, tal y como se puede observar en la primera de las gráficas de la Fig. 5.8. Los picos situados entre los 150 y los 200 s, los que se encuentran entre los 540 y 700 s, y la variación entre los 900 y 950 s, representan, respectivamente, las zonas problemáticas “1”, “2” y “3” de la Fig. 5.6. En este caso, la función de distribución acumulativa no muestra ninguna discontinuidad después del punto de inflexión que suponen los valores de retardo por encima de los 250 ms. Esto es debido a que no se han recogido una cantidad apreciable de picos de latencia de valor similar, derivados en el caso anterior de la gestión del canal de bajada HSDPA.

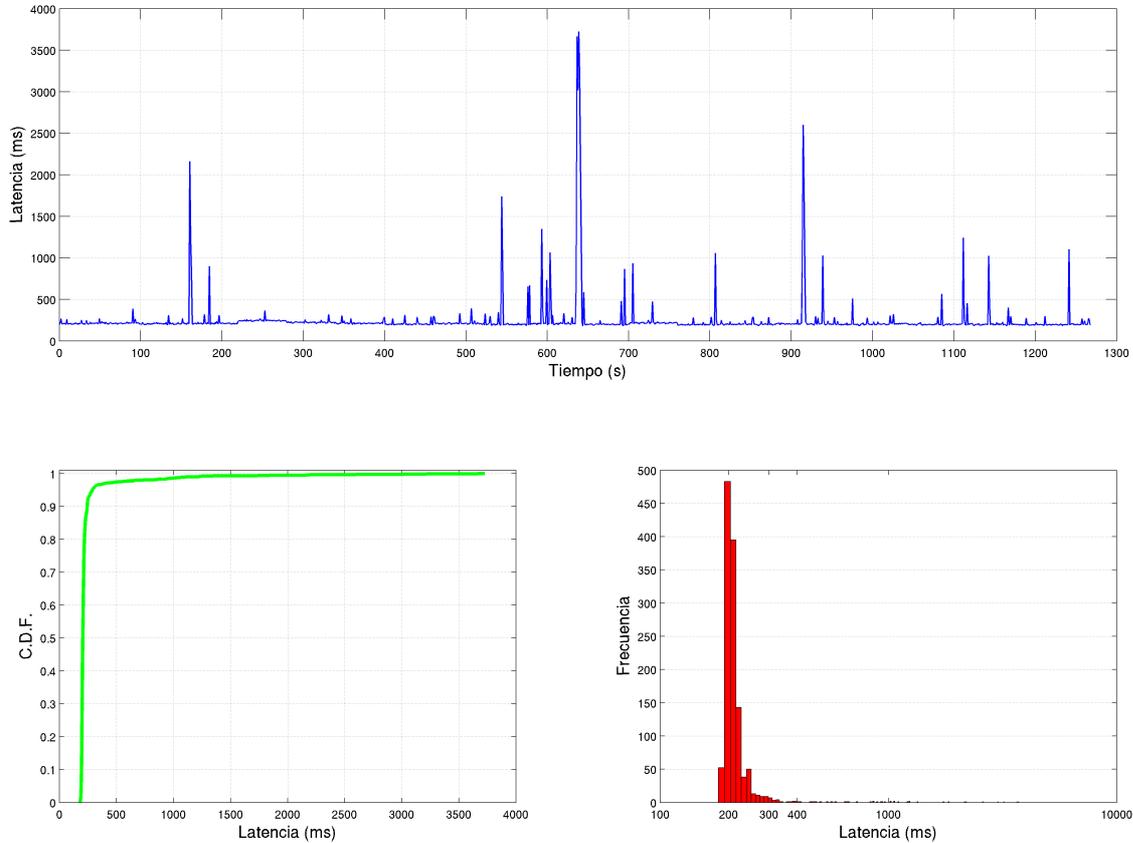


Figura 5.8: Rendimiento del sistema en transmisión V2I en el test T7

Comunicación V2V

Las pruebas de comunicación V2V presentan prácticamente una convolución de los resultados obtenidos en los casos I2V y V2I, tal y como se observa en la Fig. 5.9, que analiza el test T11. Los problemas de cobertura, y el resto de los derivados de la movilidad, se presentan tanto en el canal de subida como en el de bajada, magnificando los problemas. Las zonas “1”, “2” y “3” en la Fig. 5.6, se ven reflejadas en los intervalos 300-330 s, 440-640 s, y 800-850 s. La distribución acumulativa muestra una curva híbrida entre los dos casos anteriores, y se observa en el histograma cómo los valores frecuentes de latencia se desplazan hacia la derecha, situados ahora entre los 200 y los 300 ms. Además, éstos se encuentran ahora más distribuidos, ya que existen valores de retardo más variados.

En la parte inicial del recorrido, en los primeros 120 s, se observa una variación de retardo continua que cesa para el resto del test. En este caso, los vehículos comenzaron estacionados junto a un edificio que dificultaba la señal con el Nodo B. Hasta que ambos nos comenzaron a circular, y salieron a una zona abierta, la red no se estabilizó.

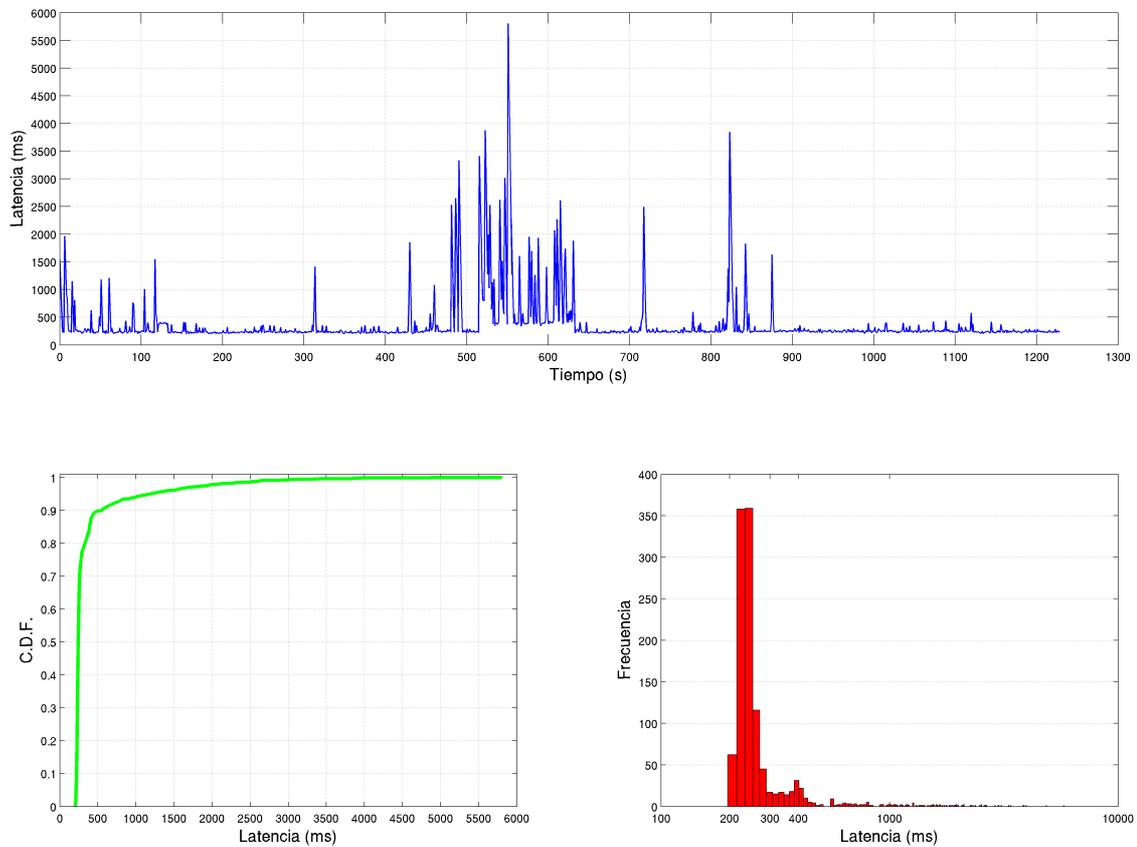


Figura 5.9: Rendimiento del sistema en transmisión V2V en el test T11

Impacto de la Velocidad de Circulación

Un aspecto que se ha considerado relevante en el estudio de la movilidad de los terminales ha sido la velocidad de circulación. Debido a que siempre es un aspecto controvertido en el análisis de comunicaciones inalámbricas, se realizaron pruebas a mayor velocidad para el caso V2V. Como ya se dijo anteriormente, no se observaron variaciones apreciables con respecto a los resultados anteriores V2V. Sin embargo, al analizar los resultados obtenidos, sí se aprecian diferencias significativas en el comportamiento de la red.

La Fig. 5.10 ilustra los resultados obtenidos en el test T13. En primer lugar, se observa cómo los periodos de conectividad limitada provocan variaciones de retardo menos acentuadas. En el caso anterior se observaba como se mantenía un valor de retardo elevado durante la permanencia en la zona marcada como “2” en la Fig. 5.6. En el caso actual las zonas de baja cobertura son atravesadas más rápidamente, con lo que el efecto es menor. La distribución acumulativa tiene un aspecto equivalente al caso V2V de menor velocidad, pero se encuentra ligeramente desplazada hacia la derecha. Este hecho es más apreciable en el histograma de retardos. A diferencia de

la prueba V2V anterior, la mayoría de los valores recogidos se encuentran ahora entre los 300 y los 400 ms (y no entre los 200 y 300 ms). Debido a esto, la línea base de retardos se sitúa a un valor que ronda los 300 ms, durante la circulación por zonas sin problemas de cobertura, a diferencia de alrededor de 240 ms para el caso previo. En definitiva, una mayor velocidad ha permitido superar las situaciones adversas de cobertura rápidamente, aunque el retardo base es mayor al acentuarse las implicaciones de movilidad: cambios rápidos de condiciones de señal que no permiten estabilizar la calidad del enlace HSDPA, aumento de problemas físicos de propagación (doppler y multi-camino), etc.

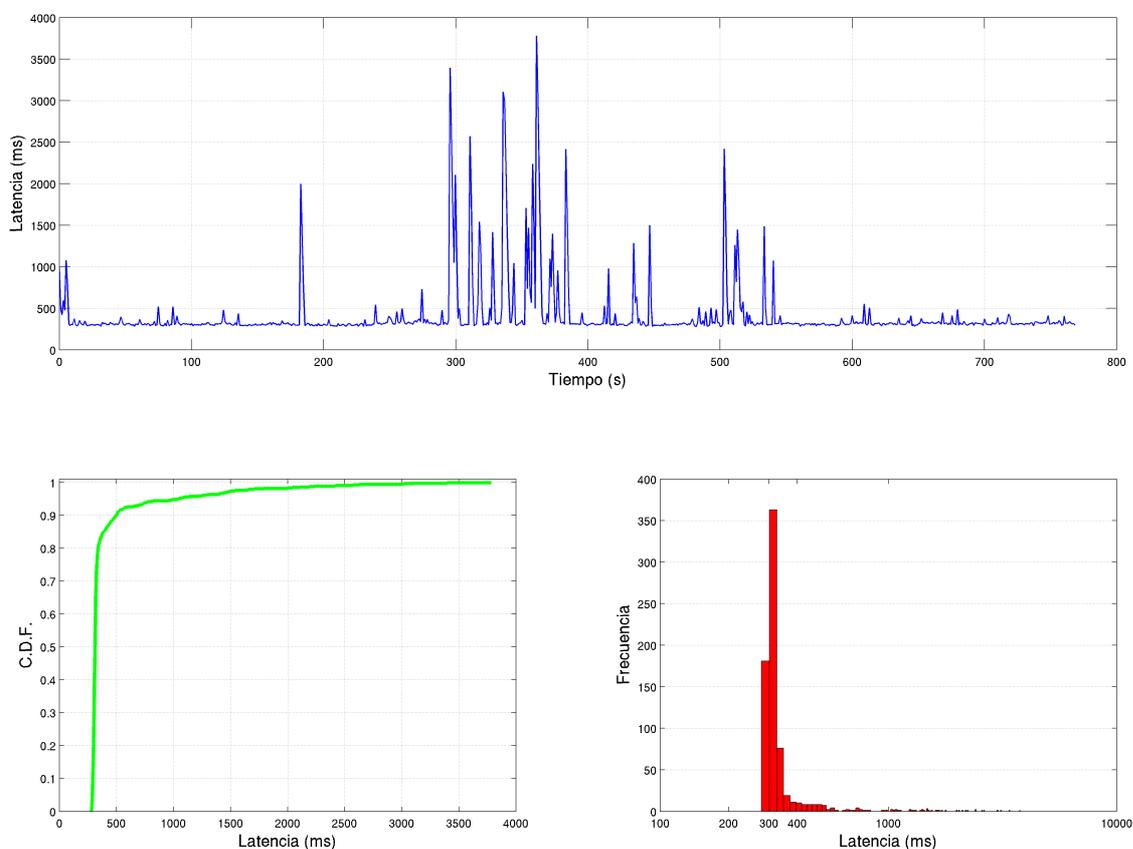


Figura 5.10: Rendimiento del sistema en transmisión V2V a mayor velocidad (test T13)

Hay que considerar, no obstante, que en el recorrido escogido no existen traspasos entre distintas estaciones base (Nodos B emplazados en distintas localizaciones). En estas condiciones, una mayor velocidad permitiría realizar el **handover** más rápidamente cuando existiesen, por ejemplo, zonas sin cubrir entre dos celdas de cobertura. Además, si la penetración de estaciones base fuera muy alta, se podrían notar problemas de rendimiento derivados de traspasos demasiado frecuentes.

5.6. Conclusiones

El contenido del presente capítulo ha estado dirigido al estudio de viabilidad, explicación de la arquitectura, y análisis con pruebas de campo, del sistema de comunicación propuesto para la plataforma telemática de la tesis doctoral. La arquitectura está diseñada tomando en consideración la nueva oportunidad que presentan las redes de comunicación celular, y la ampliación del conjunto de funcionalidades de la misma para ITS mediante la integración de las redes *overlay*.

La aplicación de las redes de comunicación celular en ITS es un aspecto que ha sido discutido por la comunidad científica en los últimos años. Es por esto que se ha realizado un análisis del potencial de esta tecnología en el ámbito de las comunicaciones vehiculares. En dicho estudio se han tomado en consideración tanto cuestiones generales de implantación, como los parámetros de rendimiento más importantes. Para este último caso se ha dirigido la explicación tomando como punto de referencia a las soluciones VANET actuales, ya que representan gran cantidad de los trabajos relativos a comunicaciones en ITS. Muchos de los factores que implican problemas de rendimiento para el caso de la red celular (cobertura, movilidad, capacidad de la red, velocidad, etc.), son retomados en el análisis de los resultados de la arquitectura de comunicación desarrollada.

Tal y como se hace ver en el capítulo, las redes celulares se consideran ya apropiadas para una gran cantidad de servicios ITS. Es por esto que se utilizan como base para el desarrollo de una plataforma de comunicación *overlay*, en donde es posible establecer comunicación entre vehículos, y con la infraestructura en los dos sentidos de transmisión. La arquitectura localiza los eventos transmitidos dentro de áreas de servicio lógicas, definidas mediante polígonos determinados por coordenadas geográficas, e independientes de las celdas de la red celular. Los vehículos son capaces de mantener la conexión a los diferentes servicios mediante un sistema de traspaso entre áreas asistido por la red, pero iniciado por el propio terminal. La OBU hace uso del sistema de navegación presentado en el capítulo 4, para ofrecer un posicionamiento mejorado y ofrecer un factor de integridad que se incluye en la cabecera de los mensajes transmitidos, junto con la localización. El *middleware* de comunicación de la OBU dispone de la funcionalidad necesaria para realizar estas tareas de forma transparente. Todos los mensajes transmitidos y recibidos por los vehículos, relativos a los servicios ITS, son intercambiados a través de paquetes P2P, que circulan sobre la base TCP/IP de la conexión celular.

La implementación del sistema añade nuevos módulos a la plataforma software del capítulo 3, ofreciendo uno que funciona como *middleware* de comunicación y que abstrae al desarrollador de aplicaciones de los detalles de la red P2P. JXTA se ha considerado como tecnología P2P para el sistema de comunicaciones, ya que dispone de las características necesarias de comunicación basada en grupos. Haciendo uso de este módulo, se ha desarrollado una aplicación de referencia que ha sido usada en las pruebas de campo. Todos los elementos localizados en la infraestructura han sido implementados y puestos en funcionamiento en servidores con acceso externo. Además, aparte de considerar el vehículo prototipo en los recorridos realizados, se ha considerado

una plataforma embarcada adicional en un vehículo común, con tal de realizar pruebas de red V2V.

La evaluación experimental del sistema no sólo demuestra la viabilidad y utilidad de la arquitectura de red, sino que analiza el rendimiento obtenido en condiciones de comunicación real con la infraestructura y entre vehículos. La red celular se muestra apropiada para la implantación de multitud de servicios telemáticos ITS. Aquellos que requieran de retardos de comunicación en torno a los 100 ms podrían ser considerados en sólo unos meses, conforme al ritmo de mejora del servicio de las operadoras de telefonía móvil. Los principales parámetros que han determinado el rendimiento del sistema de comunicación han sido la calidad de la señal con la estación base, la presencia de usuarios cercanos haciendo uso de la red, y la gestión del canal de datos HSDPA. La movilidad del vehículo afecta claramente al funcionamiento de la red, evidente en variaciones de retardo continuas que han sido mucho más destacables en situaciones de baja cobertura y cuando se hacía uso del canal de subida y de bajada (pruebas V2V). La velocidad del terminal no influye aparentemente en el retardo global de la red, pero analizando los resultados es posible ver cómo la latencia media en situaciones de buena cobertura aumenta, aunque los problemas de señal con la estación base son menos evidentes, ya que el canal de datos soporta menos tiempo condiciones adversas.

Si bien la plataforma telemática se ve ampliada en el capítulo 6, existen diversos trabajos futuros relativos a la mejora del funcionamiento del sistema de comunicación base presentado en la tesis doctoral. La inclusión del futuro soporte *multicast* MBMS de las redes UMTS puede mejorar el rendimiento del sistema, ya que los grupos de comunicación podrían mapearse sobre un canal físico de difusión, por lo que la evaluación de este mecanismo dentro de la arquitectura es un aspecto fundamental en un futuro próximo. La evolución de la red P2P JXTA también supone nuevas características que merecen especial análisis en futuras revisiones de la implementación, ya que es posible crear canales de comunicación seguros, con lo que se podrían cubrir las necesidades de autenticación, confidencialidad e integridad en la notificación de eventos. Relativo a la propia arquitectura de red, se han identificado cambios que pueden mejorar el rendimiento global del sistema. Por un lado, la implementación de los protocolos se hace actualmente mediante mensajes en ASCII y tamaños de campo variables, lo cual puede degradar el rendimiento de sistema en condiciones de tráfico elevado. Además, se ha previsto un cambio adicional para descargar a Group Server, que centraliza las labores de gestión de la conexión de terminales. Ésta radica en distribuir el acceso a la red P2P entre las entidades locales al área de servicio (Environment Server), con tal de que JXTA busque directamente los grupos de comunicación en estos servidores, sin pasar por Group Server. Se prevee igualmente que en futuras pruebas de campo se monitorice la intensidad de la señal con la estación de base, de cara a mejorar el análisis de los resultados.

Capítulo 6

Plataforma Ubicua de Provisión de Servicios e Información Contextual

En el capítulo 5 se describió y evaluó la arquitectura base de comunicaciones considerada en la plataforma telemática que se propone en la tesis doctoral. Ésta, junto con el sistema de navegación presentado en el capítulo 4, conforman los dos principales constituyentes de la OBU descrita en el capítulo 3. No obstante, a pesar de que la plataforma de comunicación ya incluye ciertas entidades en el lado de la red fija, para integrar al vehículo en el contexto de circulación, es necesario aportar un soporte adicional de la infraestructura. De esta manera, es posible ofrecer servicios que, aparte de estar destinados al trasiego de información entre los propios vehículos o con entidades locales en la infraestructura, también integren la notificación de eventos a estaciones centrales y, en definitiva, un procesamiento centralizado que provea de una visión global en determinados servicios.

Adoptando esta aproximación, el interés central del presente capítulo radica en completar la plataforma telemática disponible con un soporte complementario de la infraestructura principal y del lado de la carretera, tal y como muestra la Fig. 6.1. Las principales aportaciones que se incluyen consideran:

- El diseño de una infraestructura principal distribuida, para la gestión de bajo nivel y el almacenamiento de información relativa a las incidencias de tráfico y perfiles de los usuarios.
- Creación de un prototipo de software Web centralizado con un doble propósito: monitorización de la red de carreteras y provisión de información sobre las infraestructuras viarias a los usuarios.
- La inclusión de un sistema de notificación de información contextual adaptada a las preferencias del conductor.
- Integración de la tecnología RFID para la detección e identificación de vehículos en lugares de interés.

- La adecuación de la plataforma software de a bordo, para ofrecer funcionalidades integradas de navegación y gestión dinámica de incidencias, recabadas a través de los servicios de tráfico utilizados.

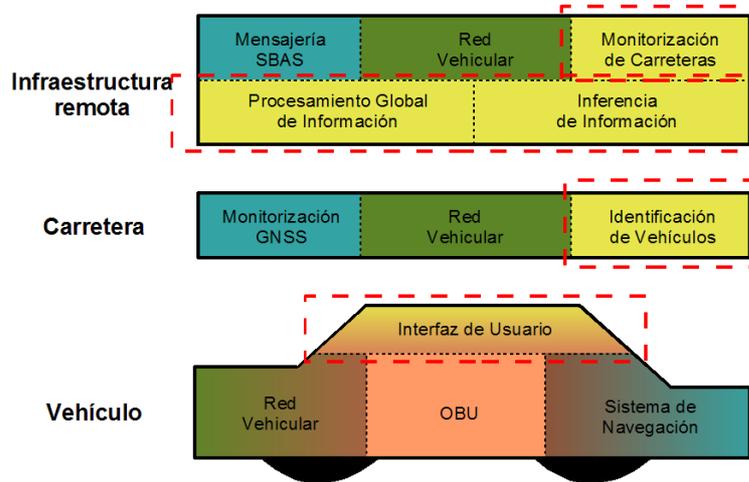


Figura 6.1: Aportación del capítulo 6 en la plataforma propuesta en la tesis doctoral

El trabajo considera la integración de conceptos relativos a los servicios basados, no ya en localización, sino en el contexto. Esto requiere de un análisis previo de trabajos presentes en la literatura. Tras esto, se entra en detalles en la propuesta concreta. Primeramente, se da una visión global del sistema extendido para servicios telemáticos en ITS. Inicialmente, se parte de sistema de comunicaciones descrito en el capítulo 5, para introducir los nuevos elementos constituyentes. Aquí se presta especial importancia al sistema distribuido que gestiona la información sobre los eventos recabados en los servicios de tráfico. Una nueva funcionalidad localizada en la infraestructura ofrece un acceso indirecto a esta información, con lo que es posible descargar los eventos enviados previamente cuando el vehículo realiza un traspaso a un nuevo área de servicios. Además, se incluye en la arquitectura un servidor de interfaz Web con un doble rol de acceso al sistema: los usuarios pueden consultar el estado de la red viaria, y el personal autorizado puede gestionar y monitorizar las incidencias de tráfico en tiempo real.

La atención del capítulo no está puesta solamente en los servicios de tráfico, sino también en los destinados a la provisión de información adaptada al contexto y a las preferencias de los usuarios. Por este motivo se ha aportado a la plataforma un servicio especial, a modo de referencia, en donde la información general sobre el área de servicios, como lugares turísticos, gastronomía o entretenimiento (entre otros), es procesada y enviada a los vehículos. Dicho procesamiento considera la inferencia a partir de la base de conocimiento local y el perfil del usuario, modelados mediante ontologías. La infraestructura principal de la plataforma almacena estos perfiles, que son descargados por los servidores de entorno dinámicamente. Además, el acceso Web

remoto permite a los usuarios modificar su perfil, personalizando sus preferencias dentro de este servicio de información en carretera. El modelado mediante ontologías permite la representación estructurada de la información contextual, y ofrece la posibilidad de realizar inferencia mediante un motor complementario de razonamiento.

La parte final del capítulo describe los prototipos desarrollados en base a todo el diseño que se presenta. De esta forma, la arquitectura se puede validar en condiciones de funcionamiento real. El escenario de pruebas relativo a la identificación de vehículos mediante RFID presenta un especial interés, aunque no menos el software de gestión de incidencias de tráfico en el vehículo, y la aplicación Web del lado de la infraestructura.

6.1. Integración del Vehículo en el Contexto de Circulación

La provisión de información de tráfico ha sido uno de los principales retos en las administraciones de muchos países alrededor del mundo. En Europa y Suramérica, RDS¹, y su homólogo RBDS en Norteamérica, han supuesto una primera aproximación al problema de la emisión de información dependiente del contexto a los vehículos. TMC hace uso de RDS para emitir incidencias de tráfico mediante transmisiones digitales, que pueden ser interpretados por los terminales de los usuarios para modificar la ruta hacia el destino, por ejemplo. Actualmente, la comunidad científica y las administraciones públicas se afanan por ofrecer servicios evolucionados de este concepto.

El canal de comunicación y la fuente de información son cuestiones importantes a tener en cuenta en estos sistemas de emisión de eventos. Lejos de las soluciones (solamente) centralizadas, donde las notificaciones son emitidas desde una estación central para rangos de cientos de kilómetros, los trabajos actuales se encuentran dirigidos a la propagación local de eventos, fundamentalmente mediante VANET. Además del canal de comunicación y el propio diseño de los servicios, existe un tercer elemento que debe ser tenido en cuenta en un sistema de información vehicular completo: el lado de la infraestructura. En muchos de los servicios ITS se hace necesario un procesamiento y monitorización desde el lado de la infraestructura principal, ya sea automático o asistido por la plataforma. En servicios de seguridad críticos es, además, crucial el reenvío de las incidencias a un sistema de gestión que las haga llegar a las autoridades. Para tratar con todas estas demandas, la provisión de información contextual, la investigación en un paradigma de comunicación globalizador, y el diseño de una infraestructura principal adecuada, son fundamentales para alcanzar el concepto de carretera inteligente [5]; conceptos que se han considerado como pilares clave en la plataforma telemática desarrollada en la tesis doctoral.

¹En la sección 2.3 se puede encontrar más información sobre RDS.

6.1.1. Primera Aproximación al Problema con la Arquitectura de Red Diseñada

El capítulo 5 presentó la primera aproximación al problema global que se pretende abordar, con el diseño de red vehicular propuesto, y ofreciendo un estudio paralelo a los trabajos realizados en VANET, tecnología extendida en comunicaciones ITS. Como se vio, tanto VANET como las redes celulares disponen de características beneficiosas para ITS. VANET ofrece soluciones de buena conectividad entre vehículos cercanos, gracias a que las arquitecturas descentralizadas usan a los propios vehículos para crear redes cooperativas en malla. Las redes celulares, por otro lado, ofrecen acceso directo a Internet mediante una conexión física con una estación base, en muchos casos de larga distancia. La red celular reduce los problemas de ratio de penetración de VANET, y comprende una tecnología de red probada y extendida.

La arquitectura de comunicación desarrollada en la tesis doctoral combina el uso de las redes de comunicación celular y las *overlay*, en un sistema que permite emitir eventos siguiendo paradigmas de comunicación I2V, V2I y V2V. De esta forma, se consiguen combinar muchas de las ventajas de VANET y las propias de la red celular, abarcando muchos de los servicios considerados con ambas tecnologías. La Fig. 6.2 ilustra esta idea, y recapitula la aproximación seguida en el capítulo 5. La red P2P crea una arquitectura descentralizada (lógica), donde los vehículos se comunican entre ellos y con la infraestructura. Inicialmente, los problemas de retardo para vehículos que circulen cerca están todavía presentes, pero, como se comentó, los continuos avances en las redes celulares ofrecen una mejora gradual en el rendimiento.

6.1.2. La Importancia de la Infraestructura en la Gestión de Información Contextual

Una red V2V permite a los vehículos comunicarse y propagar información sobre un ámbito local. Esta estrategia es útil para notificar incidencias, condiciones de la carretera, compartir ficheros, establecer conversaciones entre los ocupantes de diferentes vehículos, etc. Sin embargo, un enlace de comunicación con la infraestructura ofrece beneficios extra, como los clásicos de monitorización y seguimiento, contacto con autoridades ante situaciones de emergencia, recepción de información turística, etc. En esta línea, el trabajo que se presenta va un paso más allá a partir de la arquitectura de comunicación diseñada, ofreciendo un soporte complementario de la infraestructura para proveer de información dependiente del contexto a los vehículos, adaptada a las preferencias indicadas por el conductor y, en general, aprovechar un sistema global capaz de procesar los eventos desde la carretera.

La Fig. 6.2 ilustra las nuevas capacidades pretendidas por la plataforma telemática cuando se añade el procesamiento y la inferencia de información desde el lado de la infraestructura. Las nuevas funcionalidades comprenden una visión global del estado de la red viaria, con capacidades de monitorización y procesamiento de la información recibida desde los vehículos y dispositivos localizados en el lado de la carretera. Explotando tal idea, sería posible notificar problemas relativos a una autovía concreta,

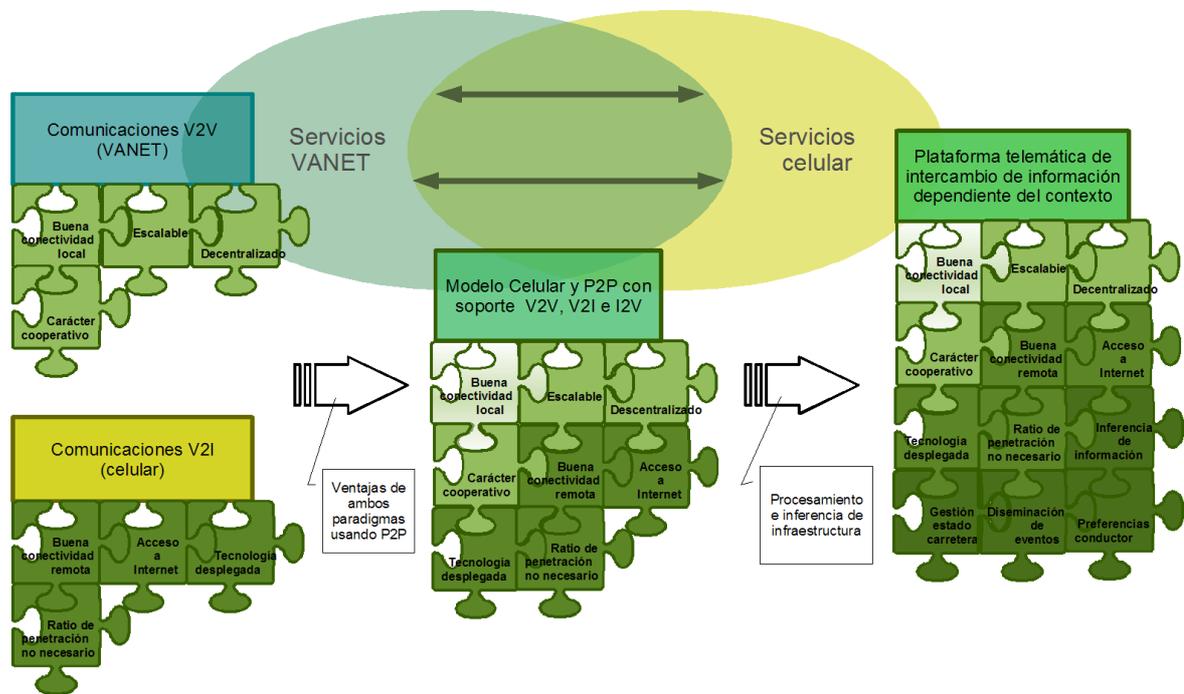


Figura 6.2: Ventajas de una arquitectura basada en red celular/P2P con soporte de la infraestructura

informar de problemas de polución en una zona de tráfico, o emitir mensajes de alerta ante la aparición de congestiones, gracias a las mediciones desde sensores de la carretera o datos recibidos desde los vehículos. Éstas son solamente algunas de las aplicaciones que un sistema con estas características puede ofrecer, gracias a una combinación de comunicaciones I2V, V2I y V2V.

La información enviada a los vehículos puede también ser adaptada considerando la aproximación anterior. La arquitectura presentada en este capítulo considera la inferencia de información contextual atendiendo a las preferencias del usuario. Tanto la información del entorno de circulación, como los perfiles de los conductores se modelan mediante ontologías, lo cual facilita la representación y la inferencia de notificaciones de interés para los vehículos. Mediante un acceso remoto, los usuarios y personal autorizado en el lado del operador de carretera, pueden modificar estos perfiles, y monitorizar el estado de la red viaria. Una infraestructura principal es la encargada de gestionar la información relativa a los usuarios y los eventos de interés recabados desde la carretera. Los prototipos desarrollados hacen realidad el diseño ideado, ampliando la funcionalidad software de la OBU, implementando mediante computación distribuida el sistema de gestión de información, manteniendo informados a los vehículos de incidencias (incluso en cambios de área de servicios), y ofreciendo un acceso Web para la gestión y monitorización de las carreteras.

6.2. Trabajos Relacionados con la Provisión de Información Dependiente del Contexto en ITS

La investigación en sistemas de monitorización de tráfico está ya muy especializada en la actualidad, y los trabajos recientes tratan de mejorar los mecanismos tradicionales de seguimiento y trasiego de información [139]. No así ocurre con trabajos integrales en sistemas de información para el ámbito de ITS, en donde la presencia de arquitecturas generales de recepción de eventos de tráfico, procesamiento, gestión, y provisión de información, no son muy frecuentes en la literatura actual.

En [36] se presenta un sistema de procesamiento de información proveniente de sensores distribuidos, destinados a recabar datos sobre el tráfico. Los vehículos funcionan como sensores remotos, enviando trazas PVT sobre su estado que son procesadas por el sistema. El trabajo hace hincapié en la arquitectura lógica del sistema, tratando pocos detalles sobre la tecnología de comunicación usada. Sin embargo, se consideran las redes celulares para la transmisión de mensajes SMS esporádicos dentro de las celdas. Este mecanismo es usado para que los vehículos distribuyan, mediante una aproximación P2P, la información del tráfico. El sistema, no obstante, presenta limitaciones en el procesamiento global que se puede realizar a partir de la información recibida desde el lado de la carretera, debido al énfasis que se hace en la naturaleza distribuida de la arquitectura. A su vez, este carácter redundante en problemas de ratio de penetración. En la plataforma presentada en la tesis doctoral se aprovecha también el uso de la red celular, aunque se mejora el tratamiento global de la información proveniente de los vehículos y se diseña un canal de comunicación adecuado.

El desarrollo de una plataforma telemática de carácter ubicuo es tratado en [37]. Los autores defienden el uso de protocolos de alto nivel estandarizados en Internet, como es el caso de HTTP, para la provisión de servicios Web, fundamentalmente. La plataforma centralizada realiza un tratamiento general de la información recibida desde los vehículos, y se ofrece la posibilidad de que los usuarios gestionen sus datos de suscripción al sistema, de forma similar a como se realiza en la propuesta de la tesis doctoral. No obstante, se hace énfasis en el uso de tecnologías WLAN mediante el uso de puntos de acceso públicos, lo cual limita la disponibilidad del servicio en un entorno como el vehicular. La adaptación al contexto, y la provisión de información sintetizada para el usuario, son cuestiones no incluidas dentro del sistema descrito por los autores.

El mecanismo de publicación/subscripción que se incorpora en la arquitectura de servicios telemáticos presentada en este capítulo, encuentra similitudes con la idea descrita en [30]. Aquí los vehículos no realizan consultas periódicas sobre el estado del tráfico, sino que muestran su interés en dichos datos en el momento de la suscripción y, a medida que surgen nuevos eventos en la red de carreteras, son informados por el sistema. Esta idea cumple con las directrices de desarrollo de sistemas de notificación de eventos asíncronos basados en *publish/subscribe* [200].

La envío de información dependiente del contexto mediante ontologías está especialmente extendido en la asistencia a visitas guiadas. En [201], por ejemplo, los autores desarrollan un sistema de asistencia para el recorrido de museos, que ajusta las

recomendaciones de visita de obras de arte en base al contexto individual del visitante. De forma similar a la propuesta presentada en la tesis doctoral, el trabajo está basado en tecnologías de web semántica, como OWL, lo cual disminuye los costes asociados al mantenimiento de la información sobre el museo. Las reglas son expresadas en este caso en ROWL (*Rule OWL*), mientras que en la tesis doctoral se considera Jena para estos menesteres. Relativo al caso de ITS, existen algunos trabajos de interés en la literatura en esta línea. En [6] se describe un sistema multi-propósito para la provisión de información contextual válido para el entorno vehicular. Los usuarios pueden realizar consultas al sistema centralizado sobre las condiciones del tráfico, y solicitar rutas optimizadas hacia un destino. Sin embargo, la plataforma sólo es válida para entornos urbanos, y no es capaz de adaptar la información provista a las preferencias del usuario.

Existen trabajos más específicos en donde se hace uso de ontologías para modelar información relativa a sistemas ITS. En [38] se representa la información que se procesa en el lado de un operador de tráfico a través de ontologías, lo cual permite crear un interfaz común de trabajo en donde las labores de gestión de incidencias se ven semi-automatizadas. En las siguientes secciones se verá como las ontologías son usadas en el sistema presentado, no para la interpretación de datos provenientes de la carretera, sino para modelar la base de información relativa a las áreas de circulación de los vehículos. En [39] sí se hace uso de ontologías dentro de una propuesta general de arquitectura ITS. Al igual que en el sistema que se propone en la tesis doctoral, se hace uso de OWL para el modelado de la información intercambiada entre las distintas entidades de la arquitectura. De esta forma, se favorece la homogeneidad en el trasiego de datos entre distintos sistemas de información, a la vez que es posible gestionarlos de forma eficiente y razonar a partir de ellos. El trabajo presentado en [40] persigue un propósito similar, de nuevo considerando OWL como lenguaje de modelado. Aquí se diseña una ontología para vehículos terrestres mediante un proceso riguroso de definición de propiedades, y orientada a recabar información en maniobras militares. El ámbito de aplicación del trabajo es más específico que en los casos anteriores, aunque se asegura que el uso de ontologías puede automatizar los procesos de análisis de las maniobras realizadas con vehículos terrestres.

Un artículo de interés que refleja la idea de modelar las preferencias de los usuarios a través de perfiles es [41]. El trabajo desarrollado va en la línea de la propuesta realizada en este capítulo, centrada en representar mediante OWL los intereses de los usuarios. La ontología desarrollada en aquel trabajo considera los aspectos más generales de los individuos, simplificando al máximo la información redundante. En los perfiles de usuario creados en la plataforma de la tesis doctoral se consideran, no obstante, características propias de un servicio de provisión de información al viajero. Sin embargo, la incorporación de datos generales de los usuarios, siguiendo la estrategia descrita en aquel trabajo, se consideran de interés para futuras ampliaciones de la ontología de perfil ideada. Un aspecto común relativo a OWL de éste y los anteriores trabajos, a la vez que en la presente tesis doctoral, es el uso de la herramienta Protégé, muy extendida en la edición de ontologías.

En general, la integración de capacidades ubicuas en el ámbito de ITS no está explotado en las soluciones actuales de la literatura. En parte porque no existen

plataformas verticales y con un carácter tan generalista como la presentada en la tesis doctoral. La plataforma final a la que se llega en este capítulo, parte de las capacidades de a bordo del vehículo de referencia, y amplía las funcionalidades de red con un soporte complementario de la infraestructura. De esta manera, se integra al vehículo en el contexto del tráfico, mediante una doble estrategia adicional de provisión de información adaptada a las condiciones particulares de cada usuario: a través de un procesamiento global y consultas Web, y mediante la inferencia de notificaciones contextuales relativas al área de circulación.

6.3. Arquitectura Telemática de Gestión y Provisión de Información Contextual

La arquitectura ideada para la red vehicular, descrita en el capítulo 5, ha sido ampliada con nuevos componentes, con tal de ofrecer un soporte extendido desde el lado de la infraestructura. Esto ha permitido el desarrollo de servicios orientados a la provisión de información dependiente del contexto. Tras una breve recapitulación de la arquitectura de comunicación, esta parte del capítulo describe el despliegue adicional realizado en el lado de la infraestructura, y las capacidades de la arquitectura telemática final.

En la Fig. 6.3 se observa una ampliación de la arquitectura presentada en la sección 5.4. Las nuevas entidades se localizan en la parte de la infraestructura, si bien el sistema de comunicación de base permanece inalterado. Recordando brevemente dicho sistema, es necesario atender a las entidades Group Server, Environment Server, y al propio vehículo. Los vehículos son capaces de mantener una suscripción a diversos servicios de comunicación, los cuales pueden ser usados por aplicaciones finales, o consistir, por ejemplo, en canales de mensajería de tráfico, como se consideró en el prototipo presentado en el capítulo anterior. Puesto que el vehículo hace uso de la conexión a Internet que ofrece la red celular, se integra una capa P2P de alto nivel para formar grupos de comunicación locales. Estos grupos se organizan en áreas que cubren zonas de tráfico, determinadas por coordenadas geográficas. Si un servicio desarrollado está disponible en una de estas áreas, existe un grupo de comunicación P2P para él registrado en Group Server. Gracias a este elemento centralizado, los vehículos disponen de información sobre la configuración P2P y la geometría de cada área. Así, cuando un vehículo realiza un cambio de área, detectado gracias a la información provista por el sistema de navegación, inicia un proceso de traspaso con la red. Como se observa en el diagrama, los eventos lanzados y recibidos por los vehículos se transportan en mensajes P2P, a través de la tecnología JXTA; mientras que los datos de control son intercambiados mediante TCP/IP.

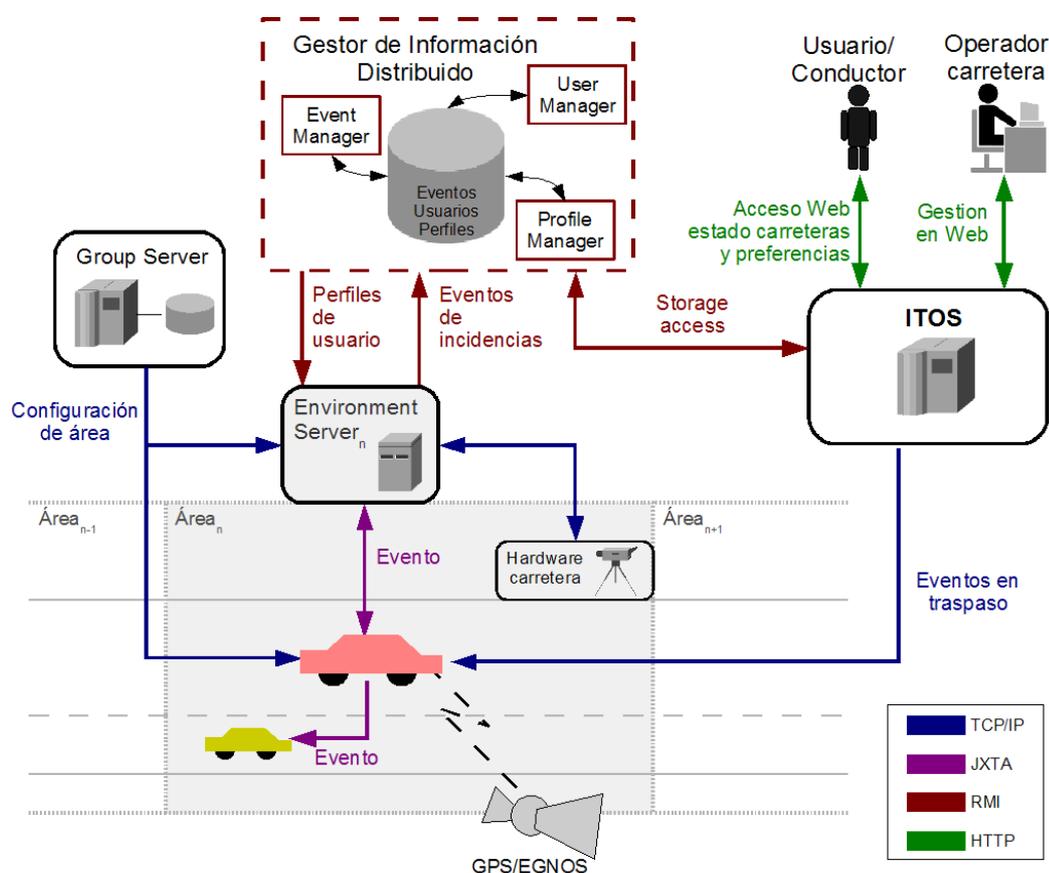


Figura 6.3: Arquitectura global de acceso a servicios telemáticos

6.3.1. Soporte Extendido de la Infraestructura en el Procesamiento de Información

El conjunto de entidades nuevas que se aprecian en el diagrama de la Fig. 6.3 son las correspondientes a la parte de gestión distribuida de información del sistema, y la plataforma de control y monitorización de dichos datos, denominada *Internet-based Traffic Operation Server* (ITOS). La gestión de los eventos recibidos desde los vehículos, de los perfiles de los usuarios, y de la información general de acceso al sistema ITOS, se lleva a cabo mediante entidades distribuidas accesibles a partir del resto de los componentes de la infraestructura. Cada ES puede reenviar los eventos recibidos desde los vehículos, los terminales de red conectados a dispositivos del lado de la carretera, u el resto del hardware que no disponga de capacidad de conexión a la red celular, y que pueda encontrarse conectado a la red cableada. La plataforma ITOS ofrece un acceso Web para consultar el estado de la red viaria y realizar cambios en los perfiles de los usuarios. Para esto, procesa los eventos recogidos desde la carretera, y disponibles en la infraestructura de gestión de información. ITOS ofrece dos accesos diferenciados a esta vista, distinguiendo a usuarios de operadores. Éstos últimos disponen de un

Tabla 6.1: Mensajes en el enlace Vehículo-Internet Traffic Operation Server en la plataforma telemática

Mecanismo	Mensaje	Emisor
Gestión de la conexión	Area_Events_Request	V
	Area_Events_Reply	ITOS
	ITOS_Disconnect	V
Traspaso	Area_Events_Request	V
	Area_Events_Reply	ITOS

acceso administrativo, mediante el que pueden añadir, modificar, o eliminar eventos en el sistema, principalmente relativos a servicios de información de tráfico. Además, pueden realizar las tareas permitidas a un usuario común, como modificar los datos de acceso al sistema o sus perfiles. Una autenticación inicial permite acceder al sistema a operadores u usuarios comunes.

Como se observa en la Fig. 6.3, existe una conexión TCP/IP entre el vehículo e ITOS. Mediante este enlace, se ofrece un soporte adicional al proceso de traspaso entre áreas de servicios, y al de conexión inicial a la red. Cuando el vehículo entra en un nuevo área, notifica dicho evento a Group Server, con tal de obtener los parámetros P2P de los servicios disponibles en su interior. No obstante, mediante esta técnica el usuario desconoce los eventos que acaecieron anteriormente, que pueden seguir teniendo vigencia. Para solventar este problema, tras la conexión a los nuevos grupos de comunicación del área, el vehículo realiza una consulta a ITOS sobre la historia de eventos de importancia todavía vigentes. La Tabla 6.1 resume los mensajes utilizados en esta conexión, y que se encuentran detallados en el apéndice C. El mecanismo de conexión se realiza mediante los mismos mensajes usados en el mecanismo de traspaso: `Area_Events_Request` y `Area_Events_Reply`. Inicialmente, el mensaje `Area_Events_Request` sirve para establecer la comunicación, aunque también es emitido hacia ITOS cuando se realiza un traspaso. En su contenido se incluye la información geométrica del área de servicios. La respuesta de ITOS hace uso del mensaje `Area_Events_Reply`, especificando, si los hubiera, los eventos de interés dentro de la zona. Para ello, se añade la posición de cada evento, el factor de integridad de la misma, y el contenido específico del servicio. Cuando el vehículo se desconecta de la red, envía un mensaje `ITOS_Disconnect`, con el que termina la conexión con ITOS.

La adaptación de información que se lleva a cabo en determinados servicios está distribuida entre los ESs. Éstos mantienen la base de conocimiento relativa al área de servicios, aunque las preferencias de los usuarios son obtenidas dinámicamente de la infraestructura principal, tal y como ilustra la Fig. 6.3. Es por esto que cada ES mantiene una conexión remota con un gestor de perfiles. Un flujo de información similar, aunque en el sentido inverso, es utilizado por ES para reenviar los eventos escuchados de los vehículos en el área de servicios, o los generados por él mismo, al sistema de gestión de información principal.

6.3.2. Nuevos Escenarios de Funcionamiento

La ampliación de la funcionalidad soportada por el lado de la infraestructura, ha supuesto la modificación de dos de los escenarios de funcionamiento de la arquitectura de comunicación mostrados en la sección 5.4. La Fig. 6.4 actualiza estos casos de estudio. En el primero de ellos, concerniente al segundo de los escenarios presentados, se considera el nuevo mecanismo de traspaso que los vehículos realizan en la plataforma. Los mensajes tercero y cuarto sirven para informar de los eventos vigentes en el área, que fueron notificados antes de la entrada del vehículo, como se ha comentado. En el escenario cuarto, tras la emisión de un evento desde un vehículo, se puede observar cómo el Environment Server local lo registra en el sistema de almacenamiento principal.

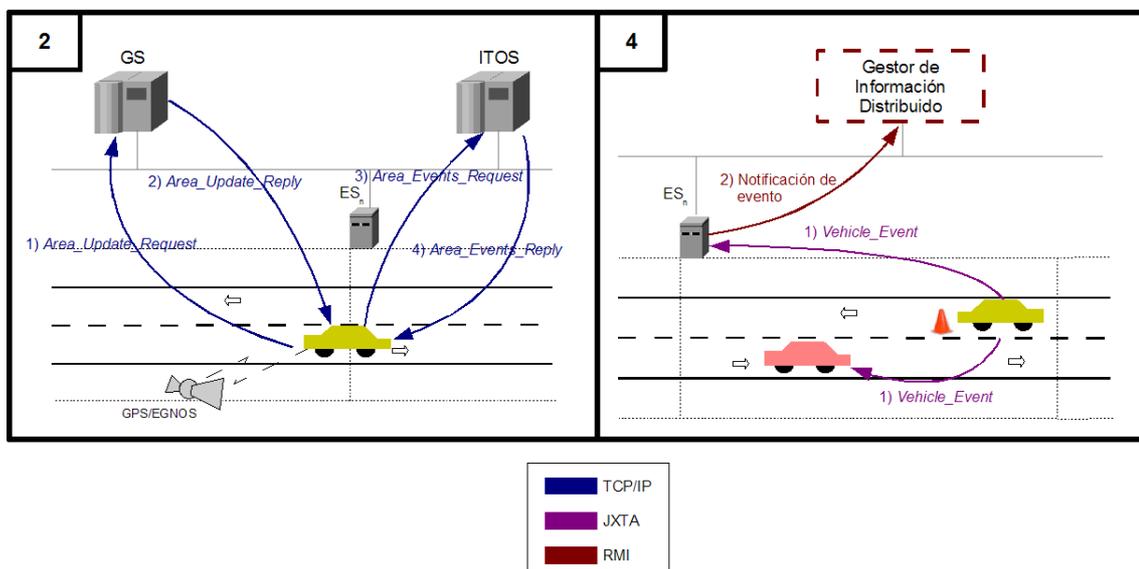


Figura 6.4: Ampliación de los escenarios de funcionamiento de la plataforma

6.3.3. Técnicas de Notificación de Eventos a Diferente Nivel

Como se desprende de la explicación anterior, existen **dos métodos de provisión de información** diferenciados. Estos han sido simplificados en la Fig. 6.5 para facilitar la explicación. Por un lado, la información proveniente de ciertos servicios (como los de tráfico considerados en el desarrollo) es compartida con los vehículos conectados al servicio en el área actual. El procedimiento se ilustra en la Fig. 6.5(a). Estos mensajes son recibidos por la infraestructura principal de gestión de información y, como se ha explicado, se puede ofrecer información procesada y global a través de una interfaz Web. El otro método disponible se muestra en la Fig. 6.5(b). Aquí se muestra cómo otros servicios se encargan de emitir información adaptada a las preferencias del usuario. Para ello, es necesario que ES descargue el perfil del usuario.

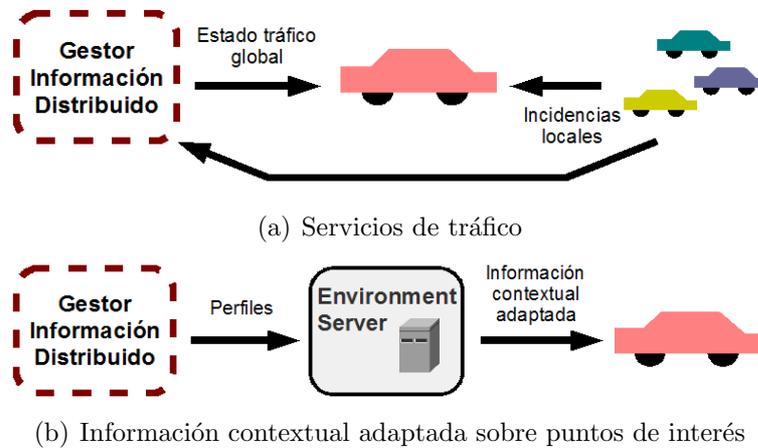


Figura 6.5: Notificación de eventos mediante dos técnicas complementarias

Mediante los dos métodos descritos, se desprenden **tres niveles de tratamiento** de la información:

1. Vehículo. Los vehículos generan eventos de tráfico que reciben los demás conectados al servicio, y encerrados en el área.
2. Environment Server. Los ESs realizan labores de reenvío, e infieren información de interés para el usuario, que es enviada a los vehículos.
3. Infraestructura principal. El sistema ITOS ofrece información procesada sobre los eventos recogidos.

6.4. Sistema de Gestión de Información Contextual Mediante Modelado Ontológico

El uso de ontologías para la representación de información y el razonamiento, es un aspecto de interés dentro de la plataforma telemática desarrollada para fines ITS. Por esta razón es necesario detallar el trabajo realizado en estos términos.

6.4.1. Modelado e Inferencia Mediante Ontologías

La importancia del contexto en los sistemas de información actuales está creciendo al mismo ritmo que la aparición de dispositivos móviles con mayores capacidades, ya que éstos están especialmente afectados por cambios en el entorno de funcionamiento. La computación dependiente del contexto puede servir para ofrecer una capa de abstracción que amortigüe el impacto de la movilidad en estos sistemas. Existen numerosas ventajas de modelar estos entornos mediante lenguajes ontológicos, como OWL. Primero, la información representada por el modelo puede ser fácilmente

compartida entre aplicaciones de diversa índole, mediante una representación común. Otra característica fundamental radica en la semántica dada a los datos modelados, sobre los que se puede ejecutar un proceso de inferencia. Este procedimiento permite razonar sobre el modelo, ofreciendo como resultado nueva información de interés en el dominio de aplicación. La inferencia es llevada a cabo mediante un cierto conjunto de reglas, que operan en base a jerarquías de clases, tipos de propiedades, y otras relaciones utilizadas en las ontologías. Aprovechando esta capacidad, es posible definir un conjunto propio de reglas para expresar cambios en el comportamiento de una aplicación en un determinado instante. De este modo, el sistema adapta su funcionamiento acorde con el contexto del usuario.

En la tesis doctoral se hace uso del modelado mediante ontologías para captar estos escenarios cambiantes en los servicios, acordes con la dinamicidad del contexto del usuario. En este sentido, se presta especial atención a diversos factores que determinan el contexto del vehículo, y se consideran las preferencias del usuario para adaptar la información que recibe. Una serie de *reglas de contexto* [202], usadas en este proceso de inferencia, permiten variar el funcionamiento de un servicio de información sobre puntos de interés. Estas reglas de inferencia reciben este nombre debido a que están definidas en base al modelo del entorno diseñado. De esta manera, toman como argumentos determinados atributos contenidos en la ontología que representa al contexto de circulación, como se verá posteriormente.

6.4.2. Determinación del Contexto del Vehículo

Un aspecto relevante a considerar es cómo se determina el contexto del vehículo, de cara a adaptar la información y los eventos que éste recibe. En la breve introducción dada en la sección 1.4 sobre computación ubicua, se incluía una definición por la que se pueden determinar los parámetros que definen el contexto, denominada “las cinco Ws”: *who, what, where, when, why*. La aproximación adoptada en la tesis doctoral sigue esta línea, ofreciendo la posibilidad de determinar el contexto particular de un vehículo mediante tres factores fundamentales: localización del vehículo, servicio, e identidad.

Localización del vehículo La posición geográfica del vehículo es un aspecto fundamental de cara a que el usuario propague y reciba información dentro de su zona de interés (*where*). En el lado de la OBU, el sistema de navegación diseñado (capítulo 4) ofrece un posicionamiento ampliado mediante diversas capacidades SBAS, ofreciendo información sobre la integridad de la posición calculada, lo cual es especialmente útil en determinados servicios. A la misma vez, por parte de la arquitectura de comunicación, los mensajes transmitidos y recibidos se localizan en un área de interés local, si bien la infraestructura es capaz de gestionar aquellos eventos que requieran una mayor propagación. De hecho, esta gestión centralizada permite que la infraestructura notifique eventos emitidos con anterioridad (principalmente relativos a incidencias), pero que todavía siguen teniendo validez (*when*).

Servicio Cada servicio representa la información en la que el usuario o una aplicación concreta está interesado. Puesto que cada servicio de comunicación está orientado a un propósito, es posible determinar qué está haciendo el usuario mediante su interés en una determinada información (*what*). En la plataforma telemática presentada, los usuarios o aplicaciones finales pueden realizar una suscripción a los servicios de comunicación de interés, con tal de obviar el resto de mensajes relativos a otros ámbitos. Una oferta diversificada de servicios puede delimitar la actividad realizada por el conductor. Por ejemplo, la suscripción a un servicio de visita turística (similar al servicio de referencia desarrollado), de búsqueda de aparcamientos públicos, o de ruta gastronómica, determinan la actividad del usuario.

Identidad El sistema dispone de un doble soporte de personalización (*who*), mediante perfiles de usuario (conductor) e identificación de vehículos, con tal de adaptar la información que la infraestructura emite a los vehículos, dependiendo de las preferencias de los usuarios en determinados servicios. El modelado del perfil del usuario y el sistema de detección de vehículos mediante RFID desarrollan este concepto.

6.4.3. Aplicación del Modelado Ontológico para la Gestión de Información en ITS

La semántica de la plataforma telemática presentada se ha visto aumentada mediante el modelado del contexto de circulación y el perfil del conductor. Esto se ha realizado mediante un diseño centrado en ontologías, que satisface los requerimientos de representación del entorno de circulación e inferencia de información adaptada al conductor. En el modelo realizado, es importante distinguir, no obstante, entre el esquema y las instancias de las ontologías creadas. Mientras que sólo existen dos esquemas que representan la estructura del entorno modelado y el perfil del usuario, existen multitud de instancias de éstos para representar información concreta del dominio. La ontología Profile, por ejemplo, contiene un esquema con las diferentes preferencias del conductor sobre restaurantes, hoteles, museos, etc., y existe una instancia de ésta para cada usuario del sistema.

Otro de los requisitos establecidos en la plataforma telemática desde su concepción, estaba centrado en el carácter distribuido en el procesamiento de los mensajes locales a las áreas de servicio. Por esto, las ontologías se han repartido entre los diferentes componentes de la arquitectura. La ontología Profile (esquema e instancias) se mantiene en el gestor de perfiles de la infraestructura principal. El acceso a los mismos se realiza mediante el interfaz Web de ITOS. Mediante el identificador del vehículo, la infraestructura de gestión de información puede devolver el perfil del conductor. Por otro lado, la ontología Environment, representada en la Fig. 6.6, es distribuida en cada Environment Server. Esta ontología modela la información contextual en cada área de servicios, representando elementos que pueden ser de interés para los usuarios: hoteles, estaciones de servicio, restaurantes, cines, o lugares turísticos, como iglesias, centros comerciales, miradores o museos.

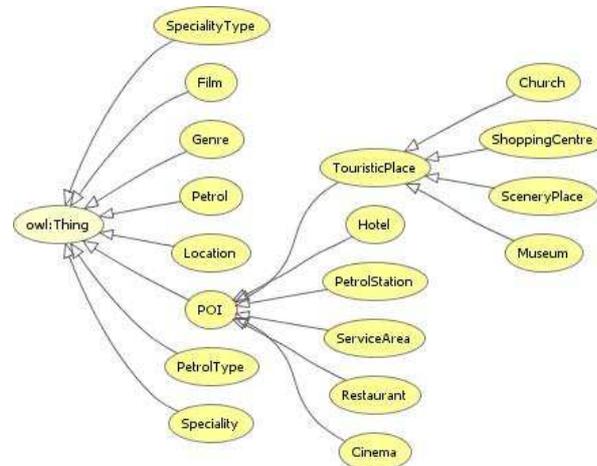


Figura 6.6: Representación jerárquica de la ontología Environment

De forma dinámica, los vehículos son detectados en ciertos puntos de las áreas de servicios definidas, momento en el que el ES local descarga el perfil del usuario y realiza una inferencia de la información de interés para el mismo. La Fig. 6.7 incluye un diagrama de secuencia del sistema de adaptación de información propuesto. El método por el que se detecta la localización del vehículo es independiente del modelo de conocimiento usado. En el caso particular desarrollado, se hace uso de la tecnología RFID para detectar el paso de un vehículo por ciertos lugares. Tras una detección del vehículo, el sistema al que se conecta el lector RFID envía un mensaje `Reader_Notification`, en donde se incluye el identificador guardado en la etiqueta RFID instalada en el vehículo. Este simple protocolo de notificación se ha contemplado sobre una conexión TCP/IP. ES, al recibir este mensaje, realiza una petición de un perfil de usuario que concuerda con el identificador del vehículo. Esta comunicación es ahora realizada mediante una llamada a método, siguiendo una interfaz ofrecida por el objeto remoto que gestiona los perfiles. Una vez en disposición del perfil, ES hace uso de la base de conocimiento local para realizar el proceso de inferencia. Tras ello, ES está en disposición de mandar un mensaje de provisión de información contextual. Esto se realiza mediante un mensaje `Specific_Environment_Event`² en la red P2P JXTA, dirigido al vehículo en cuestión. El software del OBU es ya el encargado de procesar el mensaje de forma adecuada.

El proceso de inferencia se realiza mediante la combinación de la ontología Profile con la ontología Environment, presente en cada ES. Para este propósito se han creado un conjunto de reglas de contexto, codificadas en consultas RDF. A continuación se lista una de estas reglas a modo de ejemplo:

```
[menuPrice:
(?profile rdf:type prf:Profile)
```

²En el capítulo 5 se encuentran los detalles de los protocolos de la plataforma de comunicación.

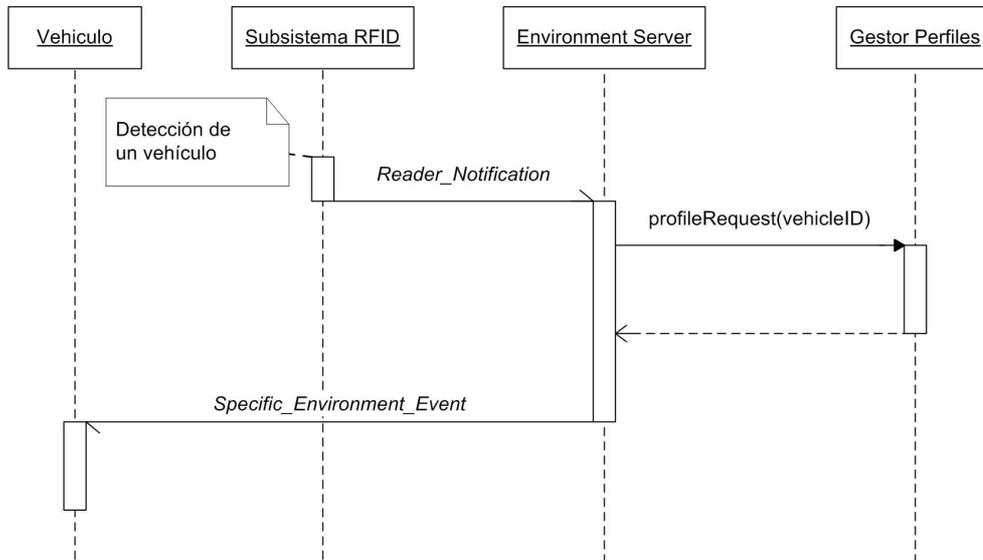


Figura 6.7: Diagrama de secuencia del proceso de adaptación de información

```

(?profile prf:restaurantProfile ?rp)
(?rp prf:maxMenuPrice ?maxmp)
(?rp prf:minMenuPrice ?minmp)

(?res rdf:type srv:Restaurant)
(?res srv:menuPrice ?mp)

le(?mp,?maxmp)
ge(?mp,?minmp)
->
(?profile prf:matches ?res)
(?res srv:matcheswith 'menuPrice')
]
  
```

Esta regla se usa en la inferencia de restaurantes que entran dentro del rango de precio deseado por el usuario. Para ello, se comprueba que el precio del menú es menor que el máximo especificado en el perfil ($le(?mp, ?maxmp)$), y mayor que el mínimo ($ge(?mp, ?minmp)$). Si se cumple esta condición para algún restaurante, éste es añadido a la lista de coincidencias ($(?profile prf:matches ?res)$), especificando la condición que se satisface ($(?res srv:matcheswith 'menuPrice')$).

Puesto que las reglas pueden usarse para todas las instancias de las ontologías Profile y Environment, las mismas reglas se usan en todos los ESs. Además, la gestión de éstas se simplifica, ya que no forman parte el software compilado en cada ES.

6.5. Desarrollo y Validación de la Arquitectura Telemática Global

El prototipo desarrollado para la plataforma de comunicación en el capítulo 5, ha sido ampliado con las nuevas funcionalidades que conforman la plataforma telemática final propuesta por la tesis doctoral. Los desarrollos principales se dirigen a cuatro partes fundamentales de la arquitectura descrita: la OBU, la infraestructura de gestión distribuida de información, la detección de vehículos mediante RFID, y la aplicación Web de monitorización/gestión de incidencias y datos de usuarios. Las siguientes secciones explican en detalle el trabajo realizado en cada uno de estos ámbitos.

En el prototipo global se han considerado el vehículo y la OBU propuestos en el capítulo 3, si bien las pruebas de identificación RFID fueron realizadas con un vehículo auxiliar. Además, el sistema de navegación conforma la arquitectura de soporte extendido SBAS que se describe y analiza en el capítulo 4. En el lado de la infraestructura, el mismo servidor de altas prestaciones usado en el prototipo del capítulo 5, se considera ahora para instalar la aplicación Web.

6.5.1. Ampliación de las Capacidades Software de la OBU

La aplicación de recepción y envío de alertas de tráfico, desarrollada como terminal de la arquitectura de comunicación, ha sido ampliada con nuevas capacidades, con tal de integrar al vehículo en el contexto de circulación. Como se especificó en el capítulo 5, esta aplicación consiste en un *bundle* OSGi de alto nivel en la arquitectura software de la OBU. Ésta, a su vez, hace uso de un *middleware* de acceso a la red P2P JXTA, provisto por un módulo de nivel intermedio.

La Fig. 6.8 ilustra el aspecto final del programa de a bordo. El servicio de mensajería “On road information” es el que implementa la funcionalidad de provisión de información adaptada al usuario, que será explicada posteriormente. “Tunnel entrance” y “Speed control” son servicios no usados actualmente, aunque el software de a bordo los incluye para futuros desarrollos relacionados con la detección del vehículo en determinados puntos de la red viaria. El resto de los servicios conforman canales de mensajería sobre eventos de tráfico. Esta información ya no es solamente mostrada en modo texto en el panel central del programa, sino que también es procesada en el terminal del vehículo.

Como se comprueba en las imágenes de la Fig. 6.8, se han incluido capacidades de navegación en el software de a bordo. Esto se ha realizado mediante el soporte de Google Maps, aunque se dispone también de prototipos que hacen uso de cartografía digital. Google Maps es una solución más extensible, aunque el ahorro en el coste de los datos cartográficos se traduce en costes adicionales por el uso de la red celular, ya que es necesario mantener una conexión a Internet para descargar dinámicamente las imágenes de fondo. El programa sitúa sobre el mapa los eventos emitidos previamente en el área de servicios, recibidos en el proceso de traspaso, pero también los nuevos que se reciben de los vehículos circundantes. Como se ve en la figura, estos se marcan sobre

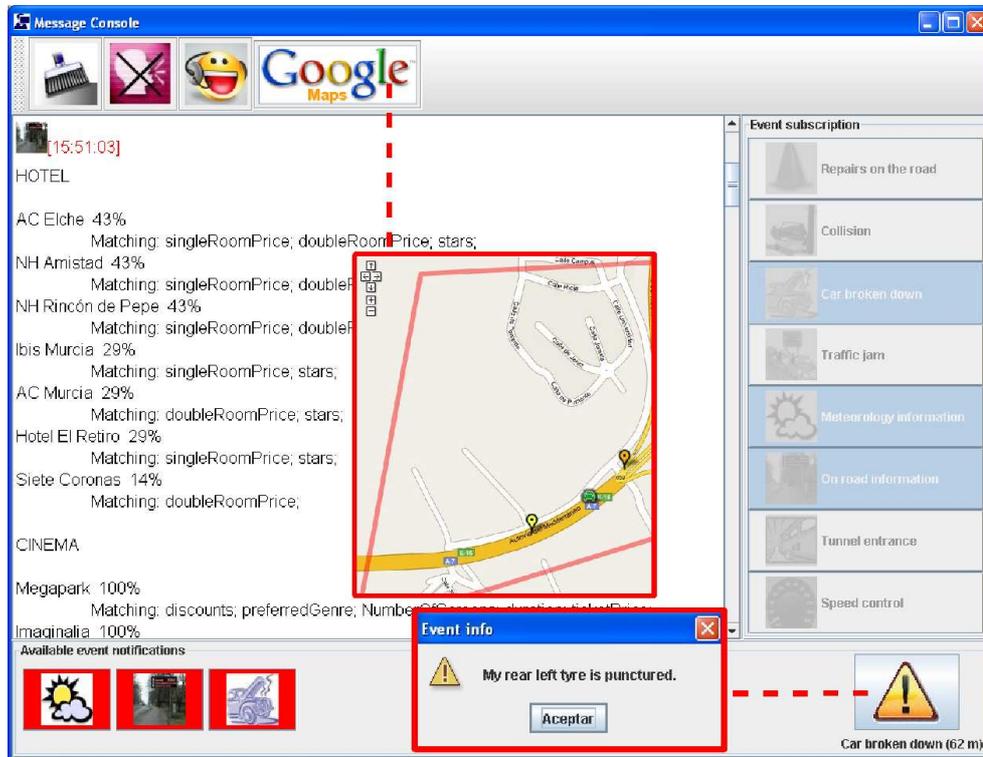


Figura 6.8: Software de a bordo con servicios de referencia de tráfico y notificación de puntos de interés

la carretera. El polígono que cubre el área de servicios también está representado en color rojo claro. Cuando el vehículo está próximo a una incidencia, la aplicación muestra una alerta en la parte inferior derecha de la ventana, indicando el tipo de evento y la distancia que queda hasta alcanzarlo. Aunque estos eventos se muestran gráficamente, si la emisión de alertas sonoras está activada, la aplicación notifica mediante el sistema de sonido el evento, y lee la información detallada del mismo.

En la captura de pantalla que se muestra en la Fig. 6.8, el vehículo recibe una alerta de aproximación a un vehículo averiado en la calzada³. Este evento se representa, en este caso, mediante una marca amarilla en el mapa. El usuario percibe el evento mediante el icono gráfico, el mapa, y una alerta sonora. Si el mensaje hubiera sido emitido recientemente por el vehículo en problemas, también aparecería un mensaje en la parte central de la ventana.

6.5.2. Plataforma Distribuida de Gestión de Información

La gestión de información relativa a usuarios y los eventos recabados desde la carretera, son procesados por una serie de objetos RMI que conforman el Gestor de

³La incidencia fue simulada, situando un evento de avería desde la interfaz Web de ITOS.

Informaci3n Distribuido, descrito anteriormente. Estos objetos presentan una interfaz conocida que permiten el acceso a aplicaciones distribuidas sobre una red TCP/IP. Actualmente se dispone de tres de estas entidades: Event Manager, User Manager y Profile Manager. La primera recibe las incidencias pertenecientes a los servicios de tráfico, que son reenviadas por cada Environment Server Local, y son accedidas por ITOS para las labores de monitorizaci3n y soporte de traspaso entre áreas. User Manager administra los datos de acceso a la aplicaci3n Web, y los perfiles son gestionados por Profile Manager. Las labores de bajo nivel en el tratamiento de todos estos datos son llevadas a cabo en las propias aplicaciones distribuidas.

En la implementaci3n actual, todas las aplicaciones distribuidas hacen uso de una base de datos central MySQL, que es accesible de forma remota. Tanto el sistema gestor de base datos como todo el software RMI, se ejecutan en el servidor multiprocesador Opteron usado para las entidades de la infraestructura en la plataforma de comunicaci3n. En un despliegue real, estos elementos podrían ejecutarse en equipos distintos, para aprovechar las ventajas de la computaci3n distribuida mediante objetos remotos.

6.5.3. Provisi3n de Informaci3n Contextual Mediante la Detecci3n de Vehículos con RFID

El sistema de informaci3n contextual diseñado se ha implementado en el prototipo final de la plataforma. Para ello se han modelado mediante ontologías los perfiles y los lugares de interés en las áreas de servicios. La informaci3n sobre los perfiles es gestionada por la aplicaci3n distribuida Profile Manager, descrita anteriormente. Ésta se encarga de acceder a la base de datos, en donde se encuentran todas las instancias de la ontología Profile, que contienen las preferencias de los usuarios contemplados en el sistema. En el caso de la informaci3n sobre los puntos de interés del entorno, todas las instancias de la ontología Environment se almacenan de forma local en cada Environment Server. Para el procesamiento de las ontologías se hace uso de Jena, el cual ofrece capacidades de acceso a bases de datos relacionales.

Aunque sobre la plataforma se pueden idear diversos mecanismos de seguimiento de la posici3n del vehículo, en el prototipo se ha hecho uso de RFID activo para detectar el paso del mismo por un determinado lugar. En la Fig. 6.9 se incluyen varias fotografías del despliegue realizado para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Un lector RFID Wavetrend L-RX201 fue instalado en un marco metálico sobre un área abierta. Este incorpora la antena y un módulo de radio frecuencia, que decodifica el identificador de los vehículos detectados en su alcance. Además, dispone de capacidades de comunicaci3n por Ethernet y puerto serie. Éste último fue usado para conectar un ordenador portátil, que realizó las labores de terminal de red descritas en la secci3n 6.4. Este ordenador consiste en un Pentium M 1.5 Ghz con 512 MB de RAM, sistema operativo Windows XP y máquina virtual de Java 1.5. Las etiquetas (activas) usadas son Wavetrend L-TG501, que disponen de una batería interna de larga duraci3n y son detectables a distancias de hasta 100 metros. Un vehículo común fue usado en las

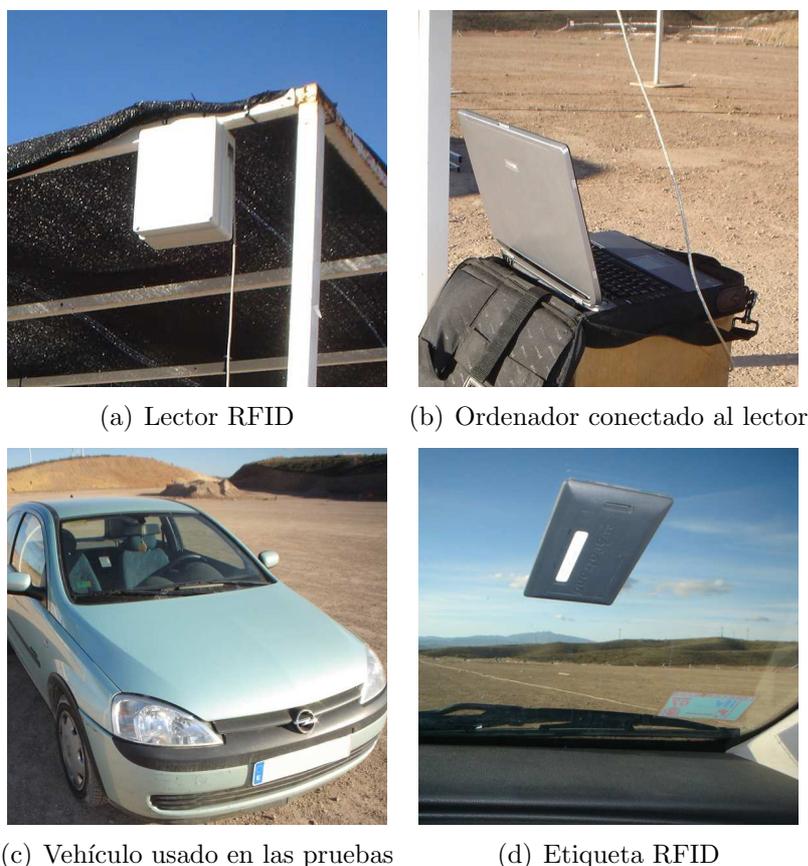


Figura 6.9: Despliegue hardware del prototipo de identificación RFID

pruebas de funcionamiento del sistema, al que se instaló una de estas etiquetas en el parabrisas. Tras las pruebas que se realizaron del sistema de identificación, consideradas fuera del ámbito de la tesis doctoral, se determinó que era posible detectar vehículos circulando a una velocidad de hasta 50 km/h. Esto nos permite usar el sistema en ámbitos urbanos, y determinados puntos de interés, como estaciones de servicio o aparcamientos.

El software desarrollado para la comunicación con el lector RFID recibe el identificador del vehículo por puerto serie, y lo envía mediante un mensaje `Reader_Notification` al Environment Server local. Éste recibe la notificación, pide el perfil del conductor a Profile Manager, y carga en memoria la base conocimiento local, si no lo estaba. En base al perfil, se aplican la serie de reglas de contexto definidas para los puntos de interés modelados. Cuando el proceso ha finalizado, ES emite la información adaptada al vehículo en cuestión, incluyendo un factor de adecuación del punto de interés al perfil del usuario. Para esta notificación se hace uso de un mensaje `Specific_Environment_Event`, que es procesado por el software de a bordo. En la

Fig. 6.8 se comprueba cómo se ha recibido un evento de este tipo⁴, mediante el servicio “On road information”. En este caso, se han recibido datos sobre hoteles y cines de la zona. Los hoteles que más se adaptan a las preferencias del usuario son “AC Elche” y “NH Rincón de Pepe”, con un ratio del 43 %. Este valor es calculado en base al total de características que concuerdan entre las ontologías Profile y Environment, y son fruto del proceso de inferencia llevado a cabo mediante las reglas de contexto.

6.5.4. Rendimiento del Proceso de Inferencia de Información Contextual

Un aspecto importante a considerar es el tiempo necesario por el proceso de inferencia cuando se emplea el mecanismo de adaptación de información. En un ámbito como el vehicular, la velocidad del terminal móvil es tal que, si este proceso es muy costoso, los mensajes de información podrían enviarse cuando el vehículo hubiera atravesado la zona de interés.

Para evaluar el rendimiento del sistema, se ha considerado una base conocimiento realista empleando diferentes perfiles de usuario. El modelo utiliza 11 clases para representar el interés del usuario ante determinados lugares, dentro de la ontología Profile, y 18 clases para modelar los puntos de interés en la ontología Environment. Además, se han escrito 32 reglas de contexto para definir el proceso de concordancia entre el perfil y los puntos de interés. Un Environment Server se ha configurado para funcionar dentro de un área de servicios simulada, de forma que se ha usado un registro de posiciones de un vehículo que circula en ella para analizar el funcionamiento de la inferencia. El servidor contiene 110 instancias de diferentes puntos de interés, tales como restaurantes, cines, u hoteles, por ejemplo. En las pruebas se consideran cuatro perfiles diferentes para estudiar la respuesta del sistema, cada uno centrado en diferentes puntos de interés. P_r concentra el estudio en los restaurantes, P_c en los cines, P_h en los hoteles, y P_m considera una mezcla de los tres anteriores. El estudio realizado divide el proceso de adaptación de información en tres partes:

1. Carga de la base de conocimiento. En esta etapa se recuperan de disco las ontologías Environment y Profile, con todas las instancias de puntos de interés, y las reglas de contexto. Además, hace uso del perfil en cuestión, almacenado también de forma local.
2. Proceso de inferencia. Para cada uno de los perfiles, en esta etapa se aplican las reglas de contexto sobre el total de los puntos de interés definidos en la ontología Environment.
3. Extracción de coincidencias. En este caso, se recuperan los conceptos que son notificados al usuario, junto con su ratio de coincidencia con respecto al perfil.

⁴En este caso se simuló la identificación del vehículo, ya que no era factible usar el lector RFID en autovía.

El equipo usado en la evaluación del rendimiento considera un procesador Intel Pentium D a 3 Ghz, con 1 GB de RAM, Linux Fedora Core 5, y con la misma configuración de Java y Jena usada en el prototipo del sistema global. Es importante notar que se hace uso de un equipo de sobremesa, pero, aún así, los valores de tiempo recabados son satisfactorios.

La Tabla 6.2 muestra los resultados obtenidos en las pruebas. La operación más costosa es la carga de la base de conocimiento, que ronda entre dos y tres segundos. Sin embargo, este proceso es realizado en el sistema real solamente en el arranque de cada ES, por lo que no afecta al rendimiento general. Este tiempo depende del tamaño de la base de conocimiento en cuestión, por lo que en los resultados solamente varía en función del perfil cargado. El proceso de inferencia y recolección de coincidencias sí es importante en cada notificación enviada a un usuario. La inferencia es la etapa que más tiempo lleva de las dos, ya que aquí se aplican las reglas sobre toda la base de instancias de puntos de interés. En el caso de la extracción de coincidencias, se realiza un recorrido de todos los puntos de interés que quedaron de la aplicación de las reglas, se ordenan en orden decreciente de índice de concordancia, y se pasan a una representación mediante cadena de texto para enviarla al vehículo. El tiempo empleado en esta etapa depende, por tanto, del número de concordancias encontradas.

Tabla 6.2: Rendimiento del sistema en el proceso de inferencia

Perfil	Carga base conocimiento (ms)	Inferencia (ms)	Extracción coincidencias (ms)
P_r	2484	250	62
P_c	2625	281	63
P_h	2890	313	47
P_m	3410	381	105

Atendiendo a los valores concretos de tiempos de la Tabla 6.2, se observan algunas particularidades. En el caso de los perfiles P_r , P_c , P_h , los resultados son similares, si bien es notable un ligero incremento consecutivo en el tiempo inferencia. Teniendo en cuenta que la cantidad de instancias de puntos de interés considerado para cada caso es igual, es decir, mismo número de restaurantes, cines y hoteles, la diferencia radica en el propio modelo. Observando las preferencias relativas a cada uno de estos conceptos en la ontología Profile, se observan siete para los restaurantes, ocho para los cines, y 10 para los hoteles. En el caso de los cines, solamente existe una preferencia más considerada en los perfiles con respecto a los restaurantes. Sin embargo, es necesario recorrer todas las películas disponibles para cada uno, representadas por una clase adicional en el modelo. Para el caso del perfil P_m , las propias preferencias son más detalladas, con lo que aumenta el tiempo de carga. El proceso de inferencia requiere más tiempo, ya que se hace un estudio más exhaustivo sobre la base de conocimiento. Sin embargo, es en la recolección de coincidencias en donde más aumenta el tiempo en comparación con los resultados anteriores. Esto es debido a que el número de aciertos

es significativamente mayor.

6.5.5. Software de Gestión de Incidencias de Tráfico y Perfiles de Usuario

La aplicación Web localizada en ITOS, que ofrece funciones de monitorización/gestión de incidencias de tráfico, y el acceso a la gestión de perfiles, ha sido desarrollada y puesta en funcionamiento en el servidor antes nombrado. La implementación se ha realizado mediante JSP (*Java Server Pages*) e integrando, nuevamente, Google Maps para la visualización de mapas. El acceso a los datos de la plataforma se hace a través de los objetos RMI de gestión de información.

En las Fig. 6.10 y 6.11 se muestran dos capturas de la aplicación. En la primera de ellas se observa la vista ofrecida para la consulta de incidencias en la red de carreteras. Como se observa en la parte inferior de la pantalla, en este momento se pueden gestionar las incidencias, ya que el usuario que ha accedido al sistema es un operador. En este momento, éste se encuentra leyendo información sobre un evento de meteorológico recibido desde un vehículo en las inmediaciones de Madrid, en donde se informa de problemas de deslizamiento en la calzada. Todos los tipos de incidencias, modelados en el prototipo de la plataforma como diferentes servicios, pueden verse en la parte izquierda de la ventana. Para cada una se hace uso de una marca distinta, igual que en el caso de la aplicación de la OBU. Un usuario común solamente puede visualizar esta vista de mapa, por lo que las labores de manipulación de eventos y de usuarios registrados quedan limitadas a los operadores. Cada usuario puede, sin embargo, acceder a la parte del programa orientada a la gestión de perfiles. En la Fig. 6.11 se muestra esta funcionalidad. Aquí se observa cómo se pueden modificar las preferencias de un usuario de cara a la recepción de información sobre puntos de interés. Para el caso de las gasolineras, por ejemplo, el usuario determina que desea recibir notificaciones sobre las que dispongan de un precio del combustible “Super 95” entre los 0.932 y 0.989 euros.

6.6. Conclusiones

A través de las nuevas entidades que aumentan la funcionalidad del sistema de comunicación del capítulo 5, y considerando la arquitectura de OBU del capítulo 3 y el sistema de navegación del capítulo 4, se ha alcanzado la plataforma telemática para ITS propuesta en la tesis doctoral. El soporte ampliado que ofrece ahora la infraestructura, permite adentrar al vehículo en el contexto de circulación a mayor escala, a través de diferentes servicios de intercambio de información contextual entre los propios vehículos y con la infraestructura.

Con la intención de recabar los eventos de interés que son enviados por los vehículos dentro de la arquitectura de comunicación, se ha desarrollado una infraestructura principal de almacenamiento y gestión de datos. Dicho elemento se encuentra diseñado mediante aplicaciones distribuidas, y se encarga de mantener toda la información sobre

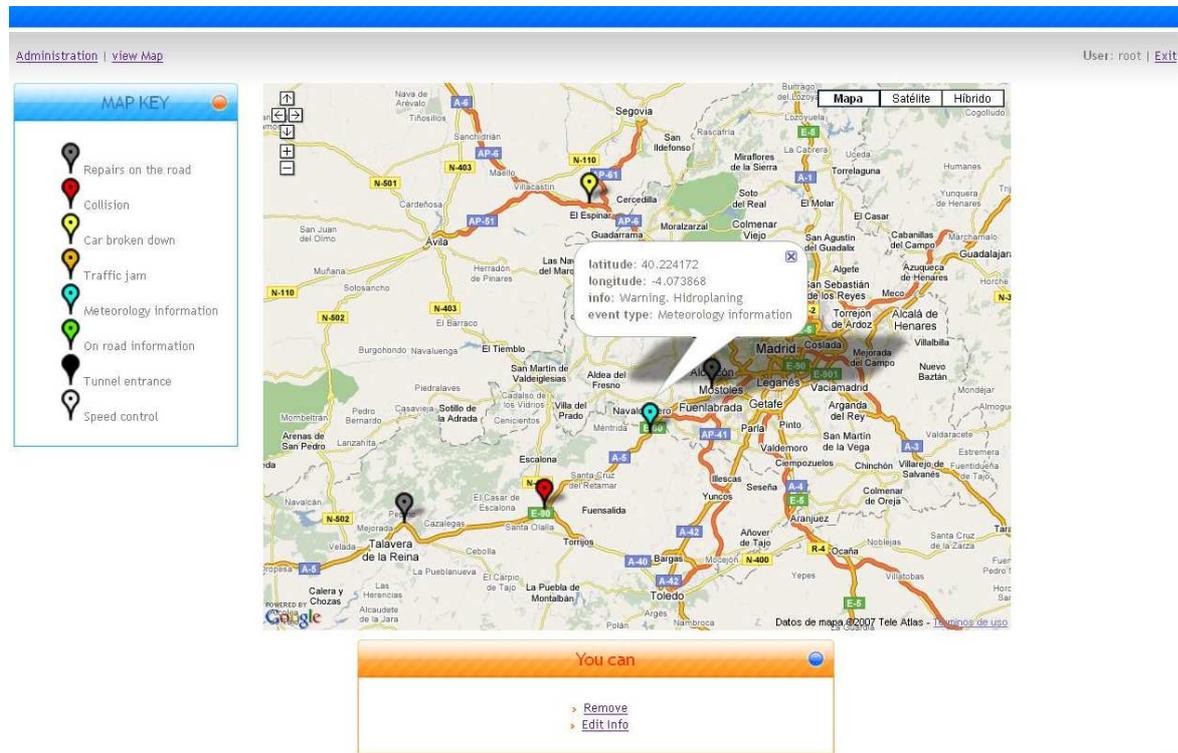


Figura 6.10: Monitorización de incidencias en la aplicación Web remota

las incidencias recabadas de los servicios de tráfico, además de gestionar los perfiles y datos de registro de los usuarios en el sistema. Toda esta información es utilizada por una entidad diseñada en el marco de la tesis (ITOS) que realiza un procesamiento general, y que permite monitorizar las incidencias mediante un acceso Web. Este sistema ofrece una visión global del estado de la red viaria, complementando la visión local de que dispone cada terminal del vehículo mediante la emisión de eventos dentro de cada área de servicios. Siguiendo esta línea, el proceso de traspaso entre cada una de estas áreas de servicios, está ahora soportado por un nuevo mecanismo con el que se descargan las incidencias recogidas previamente en el nuevo área. Esto permite mantener informado al conductor no sólo de los eventos que se reciben en tiempo real, sino también de los notificados con anterioridad y que siguen vigentes.

Para mejorar la adecuación de la información recibida al contexto del usuario, el sistema se ha dotado de un mecanismo de inferencia que considera la identidad del conductor y sus preferencias para adaptar las notificaciones enviadas. Dicho mecanismo hace uso del modelado mediante ontologías para representar la información contextual en cada una de las áreas de servicios, además de para describir los perfiles de los usuarios. Cada uno de los servidores locales en las áreas de servicio son los encargados de solicitar dinámicamente a la infraestructura los perfiles de los usuarios, con tal de enviar notificaciones cuando el vehículo se adentra en una zona determinada. Precisamente,

Cinema Profile
Max. film duration: 140 Min. film duration: 120
Max. number of screens: 12 Min. number of screens: 8
Max. ticket price: 6.0 Min. ticket price: 5.5
Discount required: true Preferred genre: Animación, Comedia, Histórica

Restaurant Profile
Max. menu price: 35.0 Min. menu price: 20.0
Max. stars: 4 Min. stars: 3
Credit card payment: true Desired menu: true
Choose specialties: Carnes, Platos de la tierra, Arroces

Petrol Station Profile
Max. petrol price: 0.988 Min. petrol price: 0.932
Desired petrol: Super 95 octanos, Diesel, Super 98 octanos

Service Area Profile
Hotel required: false Petrol station required: true
Picnic area required: false Restaurant required: true
Toilets required: true

Points of Interest:
Church Religion: Católica, Ortodoxa, Protestante Church Style: Moderno, Barroco, Clásico
Museum Artist: Juan Baretta, Acebuch, Begoña Rojas Style: Surrealismo, Impresionismo, Expresionismo
Scenery type: Cordillerano, Marítimo, Desierto
Max. number of cinemas: 10 Min. number of cinemas: 9

Hotel Profile
Max. double room price: 100.0 Min. double room price: 50.0
Max. single room price: 60.0 Min. single room price: 30.0
Max. stars: 4 Min. stars: 3
Gym required: false Internet required: true
Sauna required: false Swimming Pool required: false

Figura 6.11: Edición del perfil del usuario en la aplicación Web remota

el seguimiento también se ha considerado desde un punto de vista complementario a la información de posicionamiento disponible, y se ha incluido en el diseño el despliegue de un sistema RFID activo para la detección del vehículo en zonas de interés. La detección RFID y la inferencia de información, se han enlazado para conformar un servicio de referencia de provisión de información, al que se puede suscribir el usuario. De esta forma, cuando el vehículo es detectado en un determinado emplazamiento, el servidor local al área (Environment Server) descarga el perfil del usuario, infiere la información relevante para el conductor dentro de la base de conocimiento local, y envía una notificación sobre puntos de interés en las inmediaciones. El rendimiento del proceso de adaptación de información se ha analizado detenidamente, para demostrar su utilidad dentro de la plataforma.

Todas las entidades de la plataforma se encuentran prototipadas, con lo que se ha comprobado el correcto funcionamiento del sistema. El software localizado en la OBU del vehículo se ha visto mejorado, incorporando funciones de navegación añadidas, para considerar en tiempo real las incidencias de tráfico que se reciben. Esto se ha realizado mediante el uso de Google Maps, aunque existe la posibilidad de considerar información de cartografía digital local. El acceso Web también se ha implementado, haciendo uso de una aproximación similar, aunque en este caso el propósito radica en ofrecer una visión global de la red de carreteras. En esta misma aplicación se pueden modificar los perfiles de usuario, con tal de variar el interés del conductor en recibir cierto tipo de

información.

Existen diversos puntos de mejora del sistema que están siendo considerados en la actualidad. La gestión del conocimiento repartido entre los servidores locales a cada área de servicios requeriría de un tratamiento extendido, en caso de una implementación a gran escala. Además, se pretenden crear nuevos servicios de referencia que hagan uso, de forma complementaria, del conocimiento de la red sobre la presencia de un vehículo en un área de servicios, para disponer de un nivel más de información de contexto. La realización de este trabajo está ligado a la distribución de la funcionalidad ofrecida por Group Server, dentro de la arquitectura de comunicación, entre ITOS y los servidores locales a cada área. Además, se prevee mejorar el uso que se hace de la información de contexto recibida por los vehículos, ya que los conceptos modelados del entorno disponen de localización, con lo que su integración en la navegación con Google Maps ofrecería nuevas posibilidades.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

Este último capítulo concluye con una descripción resumida de los resultados obtenidos, e identificando diversas líneas de trabajo futuras. Las principales aportaciones que implica la arquitectura telemática ideada para el ámbito de ITS, son expuestas conjuntamente y de forma concisa, con tal de ofrecer una visión global de todo el trabajo realizado. Además, se describen las principales vías futuras de trabajo, así como investigaciones que están actualmente en curso y que han quedado fuera del ámbito de la tesis doctoral.

La organización del capítulo considera inicialmente una síntesis de las principales conclusiones que se pueden recabar, ofreciendo una visión preliminar del ámbito de estudio y pasando después a recapitular, en el mismo orden de exposición de los capítulos anteriores, las aportaciones más notorias. En la segunda parte del capítulo se exponen, en términos generales, las líneas de investigación actuales y futuras que surgen del trabajo presentado.

7.1. Conclusiones Generales

El desarrollo de servicios telemáticos en vehículos es un caso particular de la expansión que está sufriendo hoy día la informática móvil. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con los ordenadores portátiles, teléfonos móviles y ordenadores de bolsillo, el despliegue masivo de tecnologías de a bordo asistidas por computadores de propósito general, y redes digitales de comunicación de datos, está todavía en sus inicios. Muchas de las tecnologías que ya se están considerando de serie en vehículos comerciales, no son mas que un avance técnico con respecto a los dispositivos móviles de ámbito general. Este es el caso del uso conexiones Bluetooth para manos libres, la integración de reproductores MP3 en el sistema de sonido del vehículo, o la inclusión de capacidades de reproducción multimedia típicas de despliegues domésticos de cine en casa. Los sistemas de guiado a través de la navegación por satélite, generalmente GPS, son un caso particular dentro de este conjunto de funcionalidades telemáticas. Además de ser uno de los primeros servicios de este tipo que se han considerado especialmente en vehículos, su despliegue en el mercado ha sido exponencial en los últimos tiempos. Esto

presenta un futuro prometedor para otros servicios de integración de la informática y las telecomunicaciones en el ámbito del vehículo.

Si bien existe una pequeña porción de vehículos comerciales que considera cierto grado de integración de las anteriores capacidades, la comunidad científica se ha dado cuenta del potencial de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones en un mercado tan extenso como el transporte terrestre. El vehículo, no en vano, es uno de los espacios en donde la población permanece más tiempo de forma diaria. De esta forma, no sólo el intento por hacer más seguro y eficiente la conducción, sino que también la expansión de las funcionalidades de la tecnología doméstica y de la oficina al vehículo presenta un campo de creciente interés.

Todo este nuevo conjunto de servicios se encuadra dentro del ámbito de los sistemas inteligentes de transporte, y la investigación en la pila de tecnologías a diferente nivel que son necesarias para implantarlos presentan hoy día uno de los estandartes fundamentales de la investigación en ITS. Sin embargo, a diferencia de las áreas centradas en la ingeniería de la mecánica, el control, la seguridad pasiva o la navegación autónoma, los esfuerzos en incorporar telemática avanzada en vehículos descubren la necesidad, en muchos casos, de un sistema complementario de comunicación, ya sea con otros vehículos, con la infraestructura de carretera, hacia Internet, o con la red satelital. Sin embargo, las necesidades tecnológicas no quedan aquí, ya que la adecuación de una arquitectura telemática general necesita de un soporte más amplio. En el capítulo 1 se identificaron los principales subsistemas que una plataforma de a bordo apropiada para tales aplicaciones necesita: interfaz con el usuario, sensorización, unidad de a bordo, y comunicaciones. La tesis doctoral presenta una propuesta de arquitectura vertical que abarca estos subsistemas y que, al mismo tiempo, considera la integración del vehículo en el contexto de circulación, mediante enlaces de comunicación entre los vehículos y la infraestructura. El soporte de esta última ha demostrado ser especialmente importante para la oferta de servicios sensibles al contexto.

La ingeniería en estos subsistemas de a bordo está suponiendo el paso de tecnologías heredadas de otros ámbitos, al diseño de nuevos soportes hardware y software adaptados al entorno del vehículo. En el capítulo 2 se sintetizaban las principales tecnologías implicadas en la telemática vehicular. La unidad de a bordo está pasando de ser un simple microcontrolador que da breves estadísticas, a diversificarse su funcionalidad entre el computador altamente embebido, que gestiona el funcionamiento básico de vehículo, y el computador orientado a ofrecer servicios de valor añadido. En el caso de la sensorización, el sistema de navegación es hoy día la principal fuente de datos sobre el vehículo. En este sentido, los sensores de posicionamiento por satélite son los que reciben una mayor importancia, mediante el uso de GPS y los recientes sistemas de ampliación WAAS y EGNOS. El futuro sistema de navegación GALILEO ya ha sido diseñado tomando en consideración el transporte terrestre. Las redes de comunicación vehicular están demostrando ser uno de los campos de mayor interés en la comunidad científica ITS, y el uso inicial de conceptos MANET ha dado paso a una explosión de propuestas en el campo específico de VANET, y a retomar el uso de las redes de comunicación celular. La tesis se adentra en estos pilares troncales del equipamiento embarcado: ordenador de a bordo, navegación y comunicaciones;

si bien hace hincapié en el soporte de la infraestructura. La plataforma finalmente conformada ha sido validada tanto de forma individual para cada subsistema, como de forma conjunta mediante la creación, incluso, de servicios de referencia. Esta validación se ha llevado a cabo en todos los casos mediante pruebas sobre entornos reales.

La primera de las partes que conforma el cuerpo de la propuesta de la tesis doctoral se encuentra en el capítulo 3. Aquí se describe el diseño hardware del vehículo prototipo considerado en el resto del trabajo, en base a los principales subsistemas de a bordo descritos. El ordenador de a bordo es especialmente tratado, mediante una propuesta centrada en un computador de propósito general y una plataforma lógica de pasarela de servicios. Dicha plataforma sirve de base para todo el software desarrollado en el lado del vehículo. En general, las principales aportaciones ofrecidas por el sistema de a bordo presentado son las siguientes:

- Configuración de un vehículo como banco de pruebas para el análisis de sistemas de navegación, comunicación vehicular, y para el despliegue de servicios.
- Integración de diferentes tecnologías de red en diferentes ámbitos: PAN, mediante las comunicaciones intra vehículo con Bluetooth; LAN, gracias al enlace de corto/medio alcance que suponen las redes 802.11; y WLAN, con la incorporación de un módem de conexión a la red celular UMTS.
- Arquitectura de a bordo basada en un ordenador de propósito general.
- Arquitectura software centrada en una pasarela de servicios OSGi, sobre la que se sitúa una plataforma basada en niveles de abstracción para el desarrollo de servicios vehiculares.
- Sistema software modular que favorece la reutilización, extensibilidad del sistema, y el desarrollo de aplicaciones de a bordo por composición.
- Control de servicios activos, mediante un *middleware* basado en políticas de ejecución ligadas al estado del vehículo.
- Desarrollo de servicios de a bordo de referencia de diversa índole, explotando las capacidades de la plataforma software.
- Desarrollo de un soporte software para diversos sensores de posicionamiento GNSS.
- Consideración de la interfaz de usuario mediante una aplicación de gestión de módulos, y la integración de un servicio con capacidades de síntesis de voz.

Las publicaciones relacionadas con la investigación en la OBU del vehículo han sido [57, 58, 66, 67].

Sobre la base hardware y software que supone la plataforma del vehículo de referencia, en el capítulo 4 se describe el diseño de un sistema de navegación que hace un uso extendido de las funcionalidades de SBAS. En concreto, se explotan las

capacidades de EGNOS mediante dos vías complementarias, SISNeT y el GEO, con tal de mejorar la precisión de la posición, mediante correcciones diferenciales adaptadas a las capacidades del receptor; ofrecer continuidad en el uso de SBAS a través de Internet; y monitorizar la integridad del sistema de navegación. Este último factor es de especial importancia en numerosos servicios en donde se requiere información extendida sobre la fiabilidad de la posición. Estas funciones adicionales de navegación se consideran mediante soporte software, con lo que se aumenta la flexibilidad de la solución. En resumen, las aportaciones pertenecientes a esta parte de la tesis se resumen en las siguientes líneas:

- Desarrollo de una estación de monitorización de la señal GPS/EGNOS, emplazada en un laboratorio externo.
- Implementación de una estación equivalente al servicio SISNeT ofrecido por la ESA.
- Desarrollo de un módulo dentro de la plataforma software de la OBU, con las capacidades de soporte extendido de SBAS.
- Desarrollo de un cliente SBAS de procesamiento de mensajes RTCA/DO-229C.
- Soporte de SISNeT para la recepción complementaria de los mensajes SBAS a través de Internet.
- Algoritmo de conversión de correcciones desde los mensajes RTCA/DO-229C, provistos por WAAS y EGNOS, a mensajes de corrección diferencial de procesamiento sencillo RTCM SC-104.
- Cálculo del factor de integridad HPL_{SBAS} , orientado al uso en el entorno del transporte terrestre.
- Evaluación del rendimiento del sistema de navegación, en términos de precisión y disponibilidad del sistema, a través de pruebas de campo realizadas en diferentes entornos de circulación.
- Evaluación experimental del subsistema de integridad en pruebas de campo, considerando especialmente las implicaciones del canal de comunicación en caso de usar SISNeT para recibir los mensajes de EGNOS.

Las publicaciones relativas al sistema de navegación incluido en la tesis doctoral han sido las siguientes [53–56, 61, 108, 109].

El siguiente de los sistemas del equipamiento de a bordo que se ha considerado en la tesis ha sido el de comunicación. A este respecto, en el capítulo 5 se detalla y evalúa una plataforma de red *overlay* que permite que los vehículos puedan comunicarse entre sí, a la misma vez que es posible la comunicación con la infraestructura. De esta manera, el sistema permite la implementación de servicios que requieran de comunicaciones V2V, I2V o V2I, lo cual es de suma importancia en la creación de una plataforma genérica.

La red celular se ha evaluado para ser utilizada como tecnología de base de esta red lógica. Para ello, se han analizado los principales factores de rendimiento de una red vehicular, considerando de forma conjunta a las redes celulares y VANET, éstas últimas tomadas como referencia ineludible en la literatura. El sistema final de comunicación ha demostrado ser adecuado para multitud de servicios ITS. En términos concretos, los siguientes puntos resumen las principales aportaciones del sistema:

- Identificación y análisis de los principales factores de rendimiento de las redes vehiculares, considerando las soluciones VANET existentes y el potencial de las renovadas redes celulares.
- Diseño de una red vehicular *overlay* basada en grupos de comunicación P2P.
- Diseño de un sistema de traspaso entre áreas de comunicación asistido por la red, y gestionado por la OBU mediante el sistema de navegación de a bordo.
- Integración de la integridad de la posición en las notificaciones de eventos enviadas por los vehículos dentro de la red.
- Desarrollo de un *middleware* de acceso a la red P2P, implementado como módulo en la plataforma software de la OBU.
- Implementación total de la arquitectura, mediante la codificación de las entidades situadas en el lado de la infraestructura, los protocolos de control, y el paso de mensajes P2P mediante JXTA.
- Evaluación experimental del sistema, mediante un extenso conjunto de pruebas sobre entornos reales.
- Análisis de los principales factores de rendimiento identificados en el estudio inicial, a través de los resultados recabados de las pruebas. Estos evidencian, principalmente, el impacto de la movilidad, las limitaciones debidas la cobertura disponible, y la capacidad de la red.

El sistema de comunicación ideado y las implicaciones del uso de la red celular en ITS, se han presentado en las publicaciones [62, 64, 65, 110].

La última parte de la tesis doctoral comprende la propuesta de arquitectura telemática general, incluida en el capítulo 6. En éste se presentan nuevas capacidades añadidas al sistema de red, haciendo especial énfasis en la integración del vehículo en el contexto de circulación. Para ello, se trabaja en una infraestructura principal de gestión de información de usuarios y vehículos, y se presta atención al procesamiento global de los datos recabados desde la carretera, a través de una plataforma de gestión y monitorización de eventos. Además, se incorpora un soporte complementario de adaptación de la información en determinados servicios, gracias al modelado de los datos del entorno y los perfiles de usuario mediante ontologías. En este capítulo se alcanza la arquitectura telemática para ITS fundamentada en las líneas introductorias

de la tesis, que es validada a través de diversos servicios de referencia. Las principales aportaciones de este último fragmento de la propuesta se resumen en los siguientes puntos:

- Desarrollo de una infraestructura de gestión distribuida de datos, sobre los eventos lanzados por los vehículos y la información sobre los usuarios del sistema.
- Desarrollo de un sistema Web de monitorización de eventos de tráfico y gestión de perfiles de los usuarios.
- Modelado de perfiles de usuarios e información contextual relativa a las áreas definidas, con el objetivo de realizar labores de inferencia en el envío de notificaciones de interés.
- Integración en la plataforma de un mecanismo de detección e identificación de vehículos basado en RFID activo.
- Adecuación de capacidades de navegación extendidas en la OBU, que integran los eventos relativos a incidencias de tráfico para alertar al usuario.
- Implementación de referencia de un servicio de información sobre puntos de interés, adaptable al perfil del conductor.
- Análisis del rendimiento del proceso de inferencia de información, con el fin de demostrar su utilidad en el entorno vehicular.
- Validación del prototipo general de la tesis doctoral.

Las publicaciones realizadas hasta la fecha que presentan la plataforma que se propone en la tesis, o alguno de los mecanismos de adaptación de información al contexto, son las siguientes [59, 60, 63].

Como se puede notar después de considerar las aportaciones presentadas en la tesis doctoral, el abanico de tecnologías usadas en la plataforma final es realmente alto. Unido a esto, el desarrollo de la arquitectura vertical para el despliegue de servicios vehiculares, ha requerido de trabajos relativos a distintos ámbitos de investigación en ITS. Todo ello ha confluído en una plataforma final que representa fielmente el carácter multidisciplinar de la telemática aplicada en vehículos. No obstante, esta aproximación tan sumamente global da pie a numerosas mejoras, ampliaciones, y a nuevas líneas de investigación tanto centradas en la propia plataforma, como haciendo uso de ella total o parcialmente en otras empresas.

7.2. Vias Futuras

El trabajo realizado en la tesis avanza hacia una solución final de carácter vertical, para el despliegue de servicios vehiculares. En tal plataforma se consideran aspectos de configuración hardware, la mejora de las medidas dadas por el sensor de

posicionamiento GNSS, la creación de un marco de despliegue de módulos software en la OBU, el desarrollo de una plataforma de comunicación de carácter genérico, la adecuación de la infraestructura para la provisión de información dependiente del contexto; además de otras aportaciones de relevancia dentro del contexto ITS. En el transcurso del trabajo realizado para la definición del sistema final, se dejaron en el camino diversas mejoras y líneas de investigación centradas tanto en los propios subsistemas, como en la plataforma global. Esta sección resume todas estas vías futuras, algunas de ellas en consideración actualmente, dividiéndolas entre las ampliaciones de la plataforma y nuevos ámbitos de investigación.

7.2.1. Mejoras y Ampliaciones de la Plataforma

En el caso de la unidad de a bordo, la plataforma software, diseñada en base a una pasarela de servicios OSGi, puede ser mejorada en diversos ámbitos. Uno de ellos radica en la actualización remota de los módulos instalados en la plataforma, con tal de evitar que un técnico tenga que realizar esta labor. Además, otra cuestión fundamental es el tratamiento de la interfaz con el usuario. En un entorno como el vehicular, la legislación existente prohíbe el manejo de dispositivos de a bordo de estas características cuando se está en circulación. Es por esto que se hacen necesarias novedosas interfaces con el sistema de a bordo, que sigan la línea del sintetizador de voz incorporado como módulo software.

El sistema de navegación hace uso de las capacidades de EGNOS, complementando la funcionalidad de GPS. En un futuro cercano, se espera considerar sensores GNSS multiconstelación que soporten la señal de GALILEO. Por este motivo, es especialmente relevante la evaluación de las capacidades de este tipo de receptores en términos de precisión, disponibilidad del sistema mediante un conjunto ampliado de satélites, y continuidad del servicio. Los cálculos de los factores de integridad también tendrán que ser reconsiderados, ya que el propio GALILEO incorporará información sobre integridad, sin necesidad de usar la fuente alternativa de EGNOS para estos menesteres. Mientras tanto, se ha identificado una mejora significativa en el algoritmo de cálculo del factor HPL_{SBAS} , centrada en considerar los errores locales que se producen en la recepción de la señal desde los satélites. El multi-camino es el principal causante de estos errores, y existen algunos trabajos que ya consideran este problema en los cálculos de integridad [203].

El soporte de mecanismos de seguridad en los protocolos usados, es otro aspecto no tratado en el desarrollo de la plataforma de red. En el caso de los mensajes de control intercambiados, los canales TCP/IP se pueden securizar a nivel de red mediante túneles IPsec (*Internet Protocol security*), o a nivel de transporte, mediante SSL (*Secure Sockets Layer*) o TLS (*Transport Layer Security*), por ejemplo. La desventaja de aplicar seguridad a nivel de transporte, radica en la necesidad de modificar el código de las entidades de la arquitectura. En el caso de los mensajes JXTA intercambiados, las tuberías de comunicación utilizadas en la difusión de mensajes son no seguras, para facilitar la implementación. Sin embargo, éstas pueden configurarse para establecer canales encriptados, lo cual aplicaría seguridad a la difusión de eventos. Además, sobre

estos mismos protocolos, tanto en los basados en TCP/IP como en los JXTA, se han identificado diversas mejoras en la implementación realizada. La codificación binaria de datos numéricos, y el uso de paquetes con tamaños de campo fijo, son cambios directos que mejorarían el rendimiento del sistema en situaciones de tráfico alto.

La evaluación de la arquitectura *overlay* sobre la red celular presenta uno de los aspectos más relevantes de la tesis doctoral. Sin embargo, en un futuro se desean enriquecer las pruebas, mediante medidas simultáneas del nivel de señal con la estación base. Éste sería un parámetro de suma importancia, de cara a identificar, en determinadas circunstancias, los problemas de rendimiento de la red con la escasa cobertura.

Considerando ya la plataforma telemática general, el punto de acceso centralizado en Group Server e ITOS, para el soporte del traspaso entre áreas, disminuye el carácter distribuido del sistema. Es por esto que se están evaluando opciones para la distribución de esta funcionalidad entre el resto de entidades localizadas en la infraestructura. La información sobre las áreas de servicio y los grupos de comunicación JXTA puede moverse hacia el sistema de gestión de información principal de la arquitectura. El soporte de traspaso y las labores de *rendezvous* en la red JXTA, pueden atribuirse a los servidores locales, con tal de evitar el acceso a un punto de fallo central. Incluso, como método complementario a la detección del vehículo en ciertos lugares con RFID, se ha identificado un nuevo nivel de localización de utilidad. Éste consiste en la información de que dispone la red acerca del área de servicios en la que se encuentra el vehículo. Aprovechando este dato se pueden modelar mecanismos de inferencia similares al propuesto, en base al perfil del usuario.

El software localizado en el lado del vehículo se ha mostrado como un avance interesante, al considerar la situación actual y las incidencias de tráfico sobre un mapa en tiempo real. Éstas son procesadas en la OBU, para alertar al conductor cuando se aproxima a alguna de ellas. Un tratamiento similar podría realizarse con las notificaciones sobre puntos de interés de que provee uno de los servicios de referencia implementados. En el modelado de estos puntos se incluye su localización geográfica, por lo que se podría sacar partido de tal información. De esta manera, el propio terminal podría ofrecer la posibilidad, por ejemplo, de seleccionar uno de estos lugares y guiar al usuario hasta él.

7.2.2. Nuevos Ámbitos de Investigación

Dentro de los trabajos realizados alrededor del sistema de navegación, existe la idea de aunar la información de navegación extra proveniente de SBAS, dentro de un sistema de navegación inercial elaborado en la Universidad de Murcia [23]. La incorporación de la información de integridad de la constelación GNSS, a las propias estimaciones de error obtenidas en la integración multisensorial, daría lugar a un factor de integridad más eficiente que los obtenidos por separado. Este trabajo entraría perfectamente dentro de las líneas de investigación actuales relativas a la navegación terrestre.

La información sobre la integridad del sistema de navegación es sin duda un aspecto de creciente interés para los proveedores de servicios. Dentro de esta línea,

la Universidad de Murcia se encuentra actualmente involucrada en un programa de identificación de parámetros de rendimiento de GNSS para el caso concreto del peaje por carretera. Aquí, la integridad de la posición se considera vital para ofrecer un estimador fiable sobre la bondad de las rutas seguidas por los vehículos. Atendiendo al futuro despliegue en masa de los sistemas de peaje electrónico, la navegación por satélite ofrece una alternativa mucho más eficiente en coste que las costosas instalaciones hardware en multitud de puntos de control sobre la red viaria.

Las nuevas mejoras en las redes celulares, auguran además importantes aumentos en la calidad del servicio ofrecido por la operadoras en las conexiones de datos. La progresiva mejora en el ancho de banda y, sobre todo, en la latencia de la comunicación, harán ganar enteros a la arquitectura de comunicación desarrollada, pudiéndose considerar nuevos servicios con necesidades críticas de rendimiento. También están previstos nuevos avances tecnológicos en el seno de las infraestructuras de los operadores. MBMS, o *Multimedia Broadcast Multicast Service*, es capaz de aportar a nivel físico algunas capacidades consideradas en la propia red que se presenta, ya que ofrece soporte nativo para la diseminación de mensajes en áreas de cobertura. El uso de esta tecnología podría aumentar en gran medida el rendimiento de la arquitectura propuesta, al ofrecer un canal dedicado de difusión en la red celular.

Es importante destacar que la propia arquitectura *overlay* diseñada no está ligada a una tecnología de red. La plataforma puede funcionar sobre una conexión de acceso a Internet genérica, cuyo router de salida soporte preferiblemente *multicast*. Por este motivo, se está evaluando la posibilidad de estudiar el funcionamiento de la red sobre WiMAX. Éste ofrece rangos de cobertura por estación base similar en muchos casos a la red celular, permitiendo, no obstante, un ancho de banda solamente dedicado al tráfico de datos. En la Universidad de Murcia ya se han llevado a cabo pruebas de comunicación con equipos pre-WiMAX, y se sigue trabajando en esta campo. Generalizando más en esta línea, el diseño y evaluación de un mecanismo de traspaso vertical entre diferentes tecnologías de red presenta un aspecto crucial en las redes vehiculares del futuro, tal y como se trata en CALM. Así pues, la evaluación del rendimiento del sistema, adaptado a tales condiciones, y considerando pues tanto *handovers* horizontales como verticales es un estudio que despierta gran interés para el futuro.

Por último, la investigación en nuevos sensores integrados a diversos niveles dentro de una arquitectura telemática ITS presenta un gran interés. Para el caso del sistema de navegación, ya existen algunos trabajos que apuestan por considerar la cartografía digital como un sensor más que mejora la precisión en el posicionamiento [204]. A nivel de los sistemas instalados en el lado de la carretera, las redes de sensores pueden presentar una opción interesante a la hora de recabar datos sobre el tráfico. Finalmente, a nivel del sistema de información remoto localizado en la infraestructura, una de las líneas de trabajo que incluso se está empezando a conformar, se centra nuevamente el uso de la cartografía digital para el análisis de datos desde los vehículos. La estación de monitorización ITOS podría utilizar datos GIS para detectar congestiones, en base a las características de las vías y los datos PVT recogidos de los vehículos.

Como se ve, la plataforma global que se presenta en la tesis doctoral, o la consideración individual de los subsistemas, abre las puertas a futuros trabajos de

investigación dentro de proyectos fin de carrera, tesis doctorales, o proyectos de investigación relacionados con la provisión de servicios telemáticos en vehículos.

Bibliografía

- [1] C. Simonds. Software for the next-generation automobile. *IT Professional*, 5(6):7–11, November/December 2003.
- [2] W. Vanlaar. Legislation, regulation and enforcement for dealing with distracted driving in europe. In *International Conference on Distracted Driving*, Toronto, Canada, October 2005.
- [3] J. Ueki, S. Tasaka, and Y. Hatta. Vehicular-collision avoidance support system (vcass) by inter-vehicle communications for advanced ITS. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E88-A(7):1816–1823, July 2005.
- [4] J.A. Misener, R. Sengupta, and Hariharan Krishnan. Cooperative collision warning: Enabling crash avoidance with wireless technology. In *ITS World Congress*, San Francisco, USA, November 2005.
- [5] S. Fuchs, S. Rass, and B. Lamprecht. Context-awareness and collaborative driving for intelligent vehicles and smart roads. In *International Workshop on ITS Ubiquitous Roads, IEEE Global Information Infrastructure Symposium*, Marrakech, Morocco, July 2007.
- [6] W. Kiess, J. Rybicki, and M. Mauve. On the nature of inter-vehicle communications. In *Workshop on Mobile Ad-Hoc Networks*, pages 493–502, Bern, Switzerland, February/March 2007.
- [7] G. Hattori, C. Ono, S. Nishiyama, and H. Horiuchi. Implementation and evaluation of message delegation middleware for ITS application. In *Symposium on Applications and the Internet-Workshops*, pages 326–333, Tokyo, Japan, January 2004.
- [8] T. Okabe, T. Shizuno, and T. Kitamura. Wireless lan access network system for moving vehicles. In *IEEE Symposium on Computers and Communications*, pages 211–216, La Manga del Mar Menor, Spain, June 2005.
- [9] S. Biswas, R. Tatchikou, and F. Dion. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. *IEEE Communications Magazine*, 44(1):74–82, January 2006.

-
- [10] A.G. Skarmeta, H. Martínez, M.A. Zamora, B. Úbeda, F.C Gómez, and L.M. Tomás. MIMICS: Exploiting satellite technology for an autonomous convoy. *IEEE Intelligent Systems*, 17(4):85–89, July/August 2002.
- [11] M. Wada, X. Mao, H. Hashimoto, M. Mizutani, and M. Saito. iCAN: Pursuing technology for near-future ITS. *IEEE Intelligent Systems*, 19(1):18–23, January/February 2004.
- [12] A. Festag, H. Fubler, H. Hartenstein, A. Sarma, and R. Schmitz. Fleetnet: Bringing car-to-car communication into the real world. In *ITS World Congress*, Nagoya, Japan, October 2004.
- [13] C. Pinart, I. Lequerica, I. Barona, P. Sanz, D. Garcia, and D. Sanchez-Aparisi. Drive: a reconfigurable testbed for advanced vehicular services and communications. In *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, Innsbruck, Austria, March 2008.
- [14] E.C. Nelson, K.V. Prasad, V. Rasin, and C.J. Simonds. An embedded architectural framework for interaction between automobiles and consumer devices. In *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pages 192–199, Toronto, Canada, May 2004.
- [15] L. Baresi, C. Ghezzi, A. Miele, M. Miraz, A. Naggi, and F. Pacifici. Hybrid service-oriented architectures: a case-study in the automotive domain. In *International Workshop on Software Engineering and Middleware*, pages 62–68, Lisbon, Portugal, September 2005.
- [16] Z. Benedek. A framework built in .NET for embedded and mobile navigation systems. In *International Workshop on .NET Technologies*, Pilsen, Czech Republic, May/June 2004.
- [17] Y. Sun and F.-Y. Wang. A design architecture for OSEK/VDX-based vehicular application specific embedded operating systems. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 882–887, Las Vegas, USA, June 2005.
- [18] Y. Li, F.-Y. Wang, and Z. Li. OSGi-based service gateway architecture for intelligent automobiles. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 861–865, Las Vegas, USA, June 2005.
- [19] Y. Sun, W.-L. Huang, S.-M. Tang, X. Qiao, and F.-Y. Wang. Design of an OSEK/VDX and OSGi-based embedded software platform for vehicular applications. In *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pages 1–6, Beijing, China, December 2007.
- [20] T.J. Giuli, D. Watson, and K. Venkatesh. The last inch at 70 miles per hour. *IEEE Pervasive Computing*, 5(4):20–27, October-December 2006.

-
- [21] F. Toran-Marti, J. Ventura-Traveset, E. Gonzalez, M. Toledo, A. Catalina, C. Barredo, and A. Salonic. Positioning via internet: SISNeT catches GPS in urban canyons. *GPS World*, 15(4):28–35, April 2004.
- [22] L. Schöne, H. Zunker, F. Toran-Marti, and J. Ventura-Traveset. Applying SISNeT through RTCM interface. In *European Navigation Conference*, Rotterdam, Holland, May 2004.
- [23] R. Toledo-Moreo, M.A. Zamora-Izquierdo, B. Ubeda-Miñarro, and A.F. Gomez-Skarmeta. High-integrity IMM-EKF-based road vehicle navigation with low-cost GPS/SBAS/INS. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(3):491–511, September 2007.
- [24] P.A. Boysen and H. Zunker. Integrity hits the road. *GPS World*, 16(7):30–43, July 2005.
- [25] S. Feng and W. Ochieng. Integrity of navigation system for road transport. In *ITS World Congress*, Beijing, China, October 2007.
- [26] S. Hewitson and J. Wang. GNSS receiver autonomous integrity monitoring with a dynamic model. *Journal of Navigation*, 60(2):247–263, May 2007. 2007.
- [27] G. Bacci, F. Principe, M. Luise, C. Terzi, and M. Casucci. SOFT-REC: A GPS real-time software receiver with EGNOS augmentation. In *Workshop on EGNOS Performance and Applications*, pages 1–7, Gdynia, Poland, October 2005.
- [28] M. Opitz and R. Weber. Testing the performance of a SISNeT simulation software - SISSIM. *European Journal of Navigation*, 4(1):44–48, February 2006.
- [29] M.A. Martinez-Olague and J. Cosmen-Schortmann. GNSS based electronic toll collection system of guaranteed performances. In *ITS World Congress*, Beijing, China, October 2007.
- [30] J. Rybicki, B. Scheuermann, W. Kiess, C. Lochert, P. Fallahi, and M. Mauve. Challenge: peers on wheels - a road to new traffic information systems. In *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 215–221, New York, USA, September 2007.
- [31] M. Aoyama and H. Takeichi. Adaptive self-organizing overlay network for car-to-car communications. In *International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing*, pages 605–610, Phuket, Thailand, August 2008.
- [32] T. Hossfeld, K. Tutschku, F.-U. Andersen, H. Meer, and J.O. Oberender. Simulative performance evaluation of a mobile peer-to-peer file-sharing system. In *IEEE Next Generation Internet Networks*, pages 281–287, Rome, Italy, April 2005.

-
- [33] S. Krco, D. Cleary, and D. Parker. P2P mobile sensor networks. In *Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 324–332, Hawaii, USA, January 2005.
- [34] B.M. Masini, C. Fontana, and R. Verdone. Provision of an emergency warning service through gprs: Performance evaluation. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 1098–1102, Washington, DC, USA, October 2004.
- [35] G. Jodlauk, Q. Mu, and G. Gehlen. Cellular communication based mechanism for road traffic information distribution. In *ITS World Congress*, New York, USA, November 2008.
- [36] S. Goel, T. Imielinski, K. Ozbay, and B. Nath. Grassroots - a scalable and robust information architecture. Technical Report DCS-TR-523, Rutgers University, New Jersey, USA, June 2003.
- [37] C. Bisdikian, I. Boamah, P. Castro, A. Misra, J. Rubas, N. Villoutreix, D. Yeh, V. Rasin, H. Huang, and S. Simonds. Intelligent pervasive middleware for context-based and localized telematics services. In *International Workshop on Mobile Commerce*, pages 15–24, Atlanta, USA, September 2002.
- [38] A. Saez, V.R. Tomas, J.J. Samper, and L. Van-der Berg. Improving a traffic operator interface using an ontology and intelligent rules. In *Euro American Conference on Telematics and Information Systems*, Faro, Portugal, May 2007.
- [39] L. Deirdre and M. Rene. Primary-context model and ontology: A combined approach for pervasive transportation services. In *Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, pages 419–424, New York, USA, March 2007.
- [40] C. Schlenoff, R. Washington, and T. Barbera. An intelligent ground vehicle ontology to enable multi-agent system integration. In *International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems*, pages 169–174, Waltham, USA, April 2005.
- [41] M. Golemati, A. Katifori, C. Vassilakis, G. Lepouras, and C. Halatsis. Creating an ontology for the user profile: Method and applications. In *International Conference on Research Challenges in Information Science*, pages 407–412, Ouarzazate, Morocco, April 2007.
- [42] S. Helal, W. Mann, H. El-Zabadani, J. King, Y. Kaddoura, and E. Jansen. The gator tech smart house: A programmable pervasive space. *Computer*, 38(3):50–60, March 2005.
- [43] C. Lee, D. Nordstedt, and S. Helal. Enabling smart spaces with OSGi. *IEEE Pervasive Computing*, 2(3):89–94, July–September 2003.

-
- [44] Knopflerfish OSGi. <http://www.knopflerfish.org>.
- [45] Oscar OSGi. <http://oscar.objectweb.org>.
- [46] FreeTTS software project. <http://freetts.sourceforge.net/>.
- [47] The Radio Technical Commission for Aeronautics, Washington, DC, USA. *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*, 1 edition, November 2001.
- [48] A. Raj, F. Toran-Marti, and J. Ventura-Traveset. *SISNeT User Interface Document*. ESA, Toulouse, France, issue 3, rev. 1 edition, May 2006.
- [49] T. Walter. WAAS MOPS: Practical examples. In *National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, pages 283–294, San Diego, USA, January 1999.
- [50] C. Wewetzer, M. Caliskan, K. Meier, and A. Luebke. Experimental evaluation of UMTS and wireless LAN for inter-vehicle communication. In *International Conference ITS Telecommunications*, pages 287–292, Sophia Antipolis, France, June 2007.
- [51] 3rd Generation Partnetship Project, Valbonne, France. *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) Overall Description*, 8 edition, June 2008.
- [52] S. Sories, J. Huschke, and M. Phan. Delay performance of vehicle safety applications in UMTS. In *ITS World Congress*, New York, USA, November 2008.
- [53] J. Santa, B. Ubeda, R. Toledo, and C. Sotomayor. A facility for GPS/EGNOS signal monitoring. In *Workshop on EGNOS Performance and Applications*, pages 183–188, Gdynia, October 2005.
- [54] C. Sotomayor, R. Toledo, B. Ubeda, and J. Santa. Avant: A wide range utility for GPS/EGNOS navigation system users. In *Workshop on EGNOS Performance and Applications*, pages 195–200, Gdynia, October 2005.
- [55] R. Toledo, B. Ubeda, J. Santa, M.A. Zamora, and A.F. Skarmeta. A high integrity low cost positioning system for location based services. *International Conference on Transport Systems Telematics*, 2005(1):470–475, November 2005.
- [56] J. Santa, B. Ubeda, R. Toledo, and A.F.G. Skarmeta. Monitoring the position integrity in road transport localization based services. In *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*, pages 1–5, Montreal, Canada, September 2006.
- [57] J. Santa, B. Ubeda, and A.F.G. Skarmeta. A multiplatform OSGi based architecture for developing road vehicle services. In *IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pages 706–710, Las Vegas, USA, January 2007.

- [58] J. Santa, A.F.G. Skarmeta, and B. Ubeda. An embedded service platform for the vehicle domain. In *IEEE International Conference on Portable Information Devices*, pages 1–5, Orlando, USA, May 2007.
- [59] J. Santa, A. Muñoz, and A.F.G. Skarmeta. A novel architecture for retrieving context aware information in a P2P based vehicle communications paradigm. In *IEEE International Workshop on ITS for Ubiquitous Roads*, Marrakech, Morocco, June 2007.
- [60] J. Santa, A. Muñoz, and A.F.G. Skarmeta. A context-aware solution for personalized en-route information through a P2P agent-based architecture. *Lecture Notes in Computer Sciences*, 4707(1):710–723, August 2007.
- [61] R. Sanchez, J. Paniagua, S. Gutierrez, J.G. Jordan, J. Santa, I. Fernandez, and P. Gomez. Proyecto GIROADS: Sistema de peaje basado en GNSS sobre una plataforma multiservicio LBS. In *Congreso Español sobre ITS*, Valencia, Spain, September 2007.
- [62] J. Santa, R. Toledo-Moreo, and A.F. Gomez-Skarmeta. A novel vehicle communication paradigm based on cellular networks for improving the safety in roads. *Intelligent Journal of Intelligent Information and Databased Systems*, 2(2):240–257, May 2008.
- [63] J. Santa, A. Moragon, and A.F. Gomez-Skarmeta. Ubiquitous information provision in the vehicle domain. In *IEEE Internacional Symposium on Wireless Pervasive Computing*, pages 485–489, Santorini, Greece, May 2008.
- [64] J. Santa, A. Moragon, and A.F. Gomez-Skarmeta. Experimental evaluation of a novel vehicular communication paradigm based on cellular networks. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 198–203, Eindhoven, Holland, June 2008.
- [65] J. Santa, A.F. Gomez-Skarmeta, and M. Sanchez-Artigas. Architecture and evaluation of a unified V2V and V2I system based on cellular networks. *Computer Communications*, 31(12):2850–2861, July 2008.
- [66] J. Santa, A.F.G. Skarmeta, and B. Ubeda. Plataforma para el desarrollo de servicios en el ambito de la telematica de a bordo en vehiculos. In *Jornadas de Ingeniería Telemática*, pages 577–580, Malaga, Spain, September 2007.
- [67] J. Santa, B. Ubeda, R. Toledo, and C. Sotomayor. Arquitectura software multiservicio aplicada al transporte por carretera. In *Congreso Español sobre Sistemas Inteligentes de Transporte*, Valencia, Spain, September 2007.
- [68] W. Barfield and T.A. Dingus, editors. *Human Factors in Intelligent Transportation Systems*. Lawrence Erlbaum Associates, United Kingdom, 1998.
- [69] J. Ehrlich, editor. *Intelligent Transportation Systems*, volume 60 of *Annals of Telecommunications*. GET - Lavoisier, France, March/April 2005.

- [70] M. Peden, R. Scurfield, D. Sleet, D. Mohan, A.A. Hyder, E. Jarawan, and C. Mathers, editors. *World Report on Road Traffic Injury Prevention*. World Health Organization, Switzerland, 2004.
- [71] M.A. Chowdhury and A. Sadek. *Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning*. Artech House, USA, 2003.
- [72] B. Ubeda. *Evaluación de sensores GNSS/SBAS en el entorno de los Sistemas Inteligentes de Transporte por carretera: Diseño de un sistema de seguimiento de vehículos basado en la combinación de sensores GNSS/EGNOS y redes de comunicación celulares*. PhD thesis, University of Murcia, Murcia, Spain, June 2006.
- [73] B. Ubeda, Toledo R., J.G. Jordan, and S. Montes. A theoretical and practical analysis of GNSS based road pricing systems, considering the EGNOS/SISNeT contributions. In *ESA Conference Navitec*, Noordwijk, Holland, December 2004.
- [74] M.S. Grewal, L.R. Weill, and A.P. Andrews. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley, USA, second edition, 2007.
- [75] M. Weigle and S. Olariu, editors. *Handbook on Vehicular Networks*. Taylor and Francis, United Kingdom, October 2008.
- [76] B. McQueen and J. McQueen. *Intelligent Transportation Systems Architectures*. Artech House, USA, 1999.
- [77] P. Varaiya. Smart cars on smart roads: Problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(2):195–207, February 1993.
- [78] M.L. Sichitiu and M. Kihl. Inter-vehicle communication systems: A survey. *IEEE Communications Surveys*, 10(2):88–105, April-June 2008.
- [79] O. Andrisano, R. Verdone, and M. Nakagawa. Intelligent transportation systems: The role of third-generation mobile radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 38(9):144–151, September 2000.
- [80] California Partners for Advanced Transit and Highways (California PATH) project. <http://www.path.berkeley.edu/>.
- [81] PReVENT project. <http://www.prevent-ip.org/>.
- [82] GNSS Introduction in the ROAD Sector (GIROADS) project. <http://www.intelligentroads.org>.
- [83] Vehicle-to-Vulnerable roAd user cooperaTive communication and sensing teCHnologies to imprOVE transpoRt safety (WATCH OVER) project. <http://www.watchover-eu.org>.

-
- [84] Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS) project. <http://www.cvisproject.org>.
- [85] Advance PROtection SYStems (APROSYS) project. <http://www.aprosys.com>.
- [86] Co-operative Systems for Road Safety (SAFESPOT) project. <http://www.safespot-eu.org>.
- [87] CO-OPerative systEmS for intelligent Road Safety (COOPERS) project. <http://www.coopers-ip.eu>.
- [88] COMMunications for eSafety (MeSafety) project. <http://www.comesafety.org>.
- [89] SEcure VEhicular COMmunications (SEVECOM) project. <http://www.sevecom.org>.
- [90] i-Travel - service platform for the connected traveller. <http://i-travelproject.com/>.
- [91] EuroFOT - european field operational test on active safety functions in vehicles. <http://www.eurofot-ip.eu/>.
- [92] SMART-VEI - the smart vehicle. <http://www.smart-vei-project.com/>.
- [93] ROSATTE - road safety attributes exchange infrastructure in europe. <http://www.ertico.com/en/subprojects/rosatte/>.
- [94] GEONET - geo-addressing and geo-routing for vehicular communications. <http://www.geonet-project.eu/>.
- [95] HAVE-IT - highly automated vehicles for intelligent transport. <http://www.haveit-eu.org/>.
- [96] ADOSE - reliable application specific detection of road users with vehicle on-board sensors. <http://adose-eu.org/>.
- [97] EVITA - e-safety vehicle intrusion protected applications. <http://evita-project.org/>.
- [98] ITETRIS - an integrated wireless and traffic platform for real-time road traffic management solutions. <http://evita-project.org/>.
- [99] European commission eSafety initiative. http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety
- [100] CAR 2 CAR communication consortium. <http://www.car-to-car.org/>.
- [101] ISO technical committee 204 (ISO TC 204), intelligent transport systems. http://www.tiaonline.org/standards/secretariats_tags/iso_tc204/.

-
- [102] CEN technical committee 278 (CEN/TC 278), road transport and traffic telematics. <http://www.nen.nl/cen278/>.
- [103] S. Ammoun, F. Nashashibi, and C. Laugeau. Real-time crash avoidance system on crossroads based on 802.11 devices and gps receivers. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 1023–1028, Toronto, Canada, September 2006.
- [104] H. Tan and J. Huang. Dgps-based vehicle-to-vehicle cooperative collision warning: Engineering feasibility viewpoints. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4):415–428, December 2006.
- [105] J. Huang and H. Tan. Impact of communication reliability on a cooperative collision warning system. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 355–360, Seattle, USA, September/October 2007.
- [106] G. Korkmaz and E. Ekici. Effects of location uncertainty on position-based broadcast protocols in inter-vehicle communication systems. In *Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, pages 152–159, Lipary, Italy, June 2006.
- [107] R. Toledo. *A High Integrity Navigation System for Vehicles in Unfriendly Environments*. PhD thesis, University of Murcia, Murcia, Spain, November 2005.
- [108] R. Toledo-Moreo, J. Santa, M.A. Zamora-Izquierdo, B. Ubeda, and A.F. Gomez-Skarmeta. A study of integrity indicators in outdoor navigation systems for modern road vehicle applications. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles*, Nice, France, September 2008.
- [109] J. Santa, B. Ubeda, and A.F.G. Skarmeta. Monitoring the position integrity in road transport using SBAS/EGNOS and communication issues. *Location Magazine*, 2(1):38–42, January/February 2007.
- [110] J. Santa and A.F. Gomez-Skarmeta. Potential of cellular networks in vehicular communications. In *ITS World Congress*, New York, USA, November 2008.
- [111] A. Sangiovanni-Vicentelli and M. Di-Natale. Embedded system design for automotive applications. *Computer*, 40(10):42–51, October 2007.
- [112] D Marples and P. Kriens. The open services gateway initiative: an introductory overview. *IEEE Communications Magazine*, 39(12):110–114, December 2001.
- [113] OSGi Alliance. <http://www.osgi.org>.
- [114] GST - global system for telematics. <http://www.gstforum.org/>.

-
- [115] E.D. Kaplan and Hegarty C. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House, USA, second edition, 2006.
- [116] G.M. Polischuk, V.I. Kozlov, V.V. Ilitchov, A.G. Kozlov, V.A. Bartenev, V.E. Kossenko, N.A. Anphimov, S.G. Revnivykh, S.B. Pisarev, A.E. Tyulyakov, B.V. Shebshaevitch, A.B. Basevitch, and Y.L. Vorokhovskiy. The global navigation satellite system GLONASS: Development and usage in the 21st century. In *Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, pages 151–160, Reston, USA, December 2002.
- [117] Coordination Scientific Information Center, Moscow, Russia. *GLONASS Interface Control Document*, 5 edition, September 2002.
- [118] United States Coast Guard Navigation Center, USA. *Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification*, 2 edition, June 1995.
- [119] Space and Missile Systems Center, El Segundo, USA. *Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces*, d edition, December 2004.
- [120] J. Benedicto, S.E. Dinwiddy, G. Gatti, R. Lucas, and M. Lugert. *Satellite System Design and Technology Developments*. European Space Agency, Noordwijk, Holland, November 2000.
- [121] G.W. Hein. From GPS and GLONASS via EGNOS to Galileo - positioning and navigation in the third millennium. *GPS Solutions*, 3(4):39–47, April 2000.
- [122] A.E. Zinoviev. Using GLONASS in combined GNSS receivers: Current status. In *ION GNSS*, pages 1046–1057, Long Beach, USA, September 2005.
- [123] R. Prasad and M. Ruggieri. *Applied Satellite Navigation Using GPS, GALILEO, and Augmentation Systems*. Artech House, USA, 2005.
- [124] F. Toran-Marti and J. Ventura-Traveset. The ESA EGNOS project. In *Navigare Conference*, Winterthur, Switzerland, June 2004.
- [125] J. Santa. Mejora de la disponibilidad de SBAS en navegación terrestre. Master’s thesis, University of Murcia, Murcia, Spain, July 2008.
- [126] F. Toran-Marti and J. Ventura-Traveset. The ESA SISNeT project: Current status and future plans. In *European Navigation Conference*, Manchester, United Kingdom, May 2006.
- [127] Gilbert Held. *Inter- and Intra-Vehicle Communications*. Taylor and Francis, USA, 2008.
- [128] S. Shen, L. Hong, and S. Cong. Reliable road vehicle collision prediction with constrained filtering. *Signal Processing*, 86(11):3339–3356, November 2006.

-
- [129] G. Toulminet, M. Bertozzi, S. Mousset, A. Bensrhair, and A. Broggi. Vehicle detection by means of stereo vision-based obstacles features extraction and monocular pattern analysis. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(8):2364–2375, August 2006.
- [130] T. Nolte, H. Hansson, and L. Lo Bello. Automotive communications - past, current and future. In *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pages 985–992, Catania, Italy, September 2005.
- [131] A. Sugiura and C. Dermawan. In traffic jam ivc-rvc system for ITS using bluetooth. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(3):302–313, September 2005.
- [132] H. Sawant, J. Tan, Q. Yang, and Q. Wang. Using bluetooth and sensor networks for intelligent transportation systems. In *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Washington, DC, USA, October 2004.
- [133] S. Yousefi, S. Bastani, and M. Fathy. On the performance of safety message dissemination in vehicular ad hoc networks. In *European Conference on Universal Multiservice Networks*, pages 377–390, Toulouse, France, February 2007.
- [134] T. ElBatt, S.K. Goel, G. Holland, H. Krishnan, and J Parikh. Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications. In *International Conference on Mobile Computing and Networking, International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks*, pages 1–9, Los Angeles, USA, September 2006.
- [135] M. Han, S. Moon, Y. Lee, K. Jang, and D. Lee. Evaluation of moip quality over WiBro. In *Passive and Active Measurement Conference*, Cleveland, USA, April 2008.
- [136] E. Duros, W. Dabous, and H. Izumiyama. *A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links*. IETF Network Working Group, March 2001. RFC3077.
- [137] O. Adrisano, R. Verdone, and Nakagawa M. Intelligent transportation systems: The role of third-generation mobile radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 38(9):144–151, September 2000.
- [138] M. Lott, R. Halfmann, E. Schulz, and M. Radimirsch. Medium access and radio resource management for ad hoc networks based on UTRA TDD. In *ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pages 76–86, Long Beach, USA, October 2001.
- [139] B. Hoh, M. Gruteser, H. Xiong, and A. Alrabady. Enhancing security and privacy in traffic-monitoring systems. *IEEE Pervasive Computing*, 5(4):38–46, October-December 2006.

-
- [140] UMTS Forum. *3G/UMTS Evolution: towards a new generation of broadband mobile services*, 1 edition, December 2006.
- [141] Z. Chang, G. Gaydadjiev, and S. Vassiliadis. Routing protocols for mobile ad-hoc networks: Current development and evaluations. In *Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing*, pages 489–494, Veldhoven, Holland, November 2005.
- [142] I. Broustis and M. Faloutsos. Routing in vehicular networks: Feasibility, modeling, and security. *International Journal of Vehicular Technology*, 2008:Article ID 267513, March 2008.
- [143] H. Alshaer and E. Horlait. An optimized adaptive broadcast scheme for inter-vehicle communication. In *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*, pages 2840–2844, Stockholm, Sweden, June 2005.
- [144] M.T. Sun, W.C. Feng, T.H. Lai, K. Yamada, H. Okada, and K. Fujimura. GPS-based message broadcasting for inter-vehicle communication. In *International Conference on Parallel Processing*, pages 279–286, Toronto, Canada, August 2000.
- [145] C. Maihofer. A survey of geocast routing protocols. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 6(2):32–42, April-June 2004.
- [146] T.D.C. Little and A. Agarwal. An information propagation scheme for VANETs. In *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 155–160, Vienna, Austria, September 2005.
- [147] J. Zhao and G. Cao. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. In *IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1–12, Barcelona, Spain, April 2006.
- [148] C. Tschudin, H. Lundgren, and E. Nordstrom. Embedding MANETs in the real world. *Lecture notes in computer science*, 2775(1):578–589, September 2003.
- [149] V. Gonzalez, A. Los-Santos, C. Pinart, and F. Milagro. Experimental demonstration of the viability of ieee 802.11b based inter-vehicle communications. In *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, Innsbruck, Austria, March 2008.
- [150] M. Jerbi, S.M. Senouci, and M. Al-Haj. Extensive experimental characterization of communications in vehicular ad hoc networks within different environments. In *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*, pages 2590–2594, Dublin, Ireland, April 2007.
- [151] J.P. Singh, N. Bambos, B. Srinivasan, and D. Clawin. Wireless LAN performance under varied stress conditions in vehicular traffic scenarios. In *Vehicular*

- Technology Conference Fall*, volume 2, pages 743–747, Vancouver, Canada, September 2002.
- [152] M. Jerbi, P. Marlier, and S.M. Senouci. Experimental assessment of V2V and I2V communications. In *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensors Systems*, pages 1–6, Pisa, Italy, October 2007.
- [153] M. Jerbi and S.M. Senouci. Characterizing multi-hop communication in vehicular networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 3309–3313, Las Vegas, USA, April 2008.
- [154] F. Hui and P. Mohapatra. Experimental characterization of multi-hop communications in vehicular ad hoc network. In *ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 85–86, Cologne, G., September 2005.
- [155] C. Perkins. *IP Mobility Support for IPv4*. IETF Network Working Group, August 2002. RFC3344.
- [156] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko. *Mobility Support in IPv6*. IETF Network Working Group, June 2004. RFC3775.
- [157] V. Devarapalli, R. Wakikawa, A. Petrescu, and P. Thubert. *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol*. IETF Network Working Group, January 2005. RFC3963.
- [158] T. Ernst and K. Uehara. Connecting automobiles to the internet. In *International Workshop on ITS Telecommunications*, pages 257–262, Seoul, South Korea, November 2002.
- [159] InternetCAR - internet connected automobile researchers. <http://www.sfc.wide.ad.jp/InternetCAR/>.
- [160] T. Ernst, K. Mitsuya, and K. Uehara. Network mobility from the internetcar perspective. *Journal on Interconnection Networks*, 4(3):329–344, September 2003.
- [161] M. Tsukada, T. Ernst, R. Wakikawa, and K. Mitsuya. Dynamic management of multiple mobile routers. In *IEEE Malaysia International Conference on Communications and IEEE International Conference on Networks*, pages 1108–1113, Kuala Lumpur, Malaysia, November 2005.
- [162] C. Ng, T. Ernst, E. Paik, and M. Bagnulo. *Analysis of Multihoming in Network Mobility Support*. IETF Network Working Group, October 2007. RFC4980.
- [163] C. Ng, P. Thubert, M. Watari, and F. Zhao. *Network Mobility Route Optimization Problem Statement*. IETF Network Working Group, July 2007. RFC4888.

-
- [164] C. Ng, F. Zhao, M. Watari, and P. Thubert. *Network Mobility Route Optimization Solution Space Analysis*. IETF Network Working Group, July 2007. RFC4889.
- [165] R. Wakikawa, K. Okada, R. Koodli, and A. Nilsson. Design of vehicle network: Mobile gateway for MANET and NEMO converged communication. In *ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pages 81–82, Cologne, Germany, September 2005.
- [166] M. Tsukada, O. Mehani, and T. Ernst. Simultaneous usage of NEMO and MANET for vehicular communication. In *Workshop on Experimental Evaluation and Deployment Experiences on Vehicular Networks*, Innsbruck, Austria, March 2008.
- [167] B. Williams. *The CALM Handbook*. International Organization for Standardization, United Kingdom, September 2004. Version 1.2.
- [168] C. Wang and B. Li. Peer-to-peer overlay networks: A survey. Technical report, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China, April 2003.
- [169] E.K. Lua, J. Crowcroft, M. Pias, R. Sharma, and S. Lim. A survey and comparison of peer-to-peer overlay network schemes. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 7(2):72–93, April-June 2005.
- [170] D. Doval and D. O’Mahony. Overlay networks: A scalable alternative for p2p. *IEEE Internet Computing*, 7(4):1089–7801, August 2003.
- [171] C. Abad, W. Yurcik, and Campbell R.H. A survey and comparison of end-system overlay multicast solutions suitable for network centric warfare. In *Battlespace Digitization and Network-Centric Systems*, pages 215–226, Orlando, USA, April 2004.
- [172] JXTA Community. <https://jxta.dev.java.net/>.
- [173] Sun Microsystems. *JXTA Technology: Creating Connected Communities*, 1 edition, February 2005.
- [174] B. Traversat, M. Abdelaziz, J.-C. Hugly, E. Pouyoul, and B. Yeager. *Project JXTA Virtual Network*. Sun Microsystems, Inc., Palo Alto, USA, October 2002.
- [175] M. Weiser. The computer for the 21st century. *Scientific American*, 265(3):94–104, September 1991.
- [176] D. Saha and A. Mukherjee. Pervasive computing: A paradigm for the 21st century. *Computer*, 36(3):25–31, March 2003.
- [177] G.D. Abowd and E.D. Mynatt. Charting past, present, and future research in ubiquitous computing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(1):29–58, March 2000.

-
- [178] M. Hazas, J. Scott, and J. Krumm. Location-aware computing comes of age. *Computer*, 37(2):95–97, February 2004.
- [179] R. Weinstein. RFID: A technical overview and its application to the enterprise. *IT Professional*, 7(3):27–33, June 2005.
- [180] R. Want. An introduction to RFID technology. *IEEE Pervasive Computing*, 5(1):25–33, January-March 2006.
- [181] M. Uschold and M Gruninger. Ontologies: Principles, methods and applications. *Knowledge Engineering Review*, 11(2):93–136, June 1996.
- [182] T.R. Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2):199–220, June 1993.
- [183] S. Bechhofer, F. Van-Harmelen, J. Hendler, I. Horrocks, D.L. McGuinness, P.F. Patel-Schneider, and L.A. Stein. *OWL web ontology language reference*. World Wide Web Consortium, 7 edition, February 2004.
- [184] I. Horrocks, P.F. Patel-Schneider, and F. Van-Harmelen. From shiq and rdf to owl: The making of a web ontology language. *Journal of Web Semantics*, 1(1):7–26, December 2003.
- [185] Jena A Semantic Web Framework for Java. <http://jena.sourceforge.net/>.
- [186] W. Emmerich, M. Aoyama, and J. Sventek. The impact of research on the development of middleware technology. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 17(19):1–48, August 2008.
- [187] J. Ventura-Traveset, L. Gauthier, F. Toran, C. De-Lesthievant, and Bedu J.Y. EGNOS status, performances and planed evolutions (2006-2010). In *European Navigation Conference*, Munich, Germany, July 2005.
- [188] M. Toledo, E. Gonzalez, F. Toran, and J. Ventura. Proposal of an internet-based EGNOS receiver: Architecture and demonstration of the SISNeT concept. In *ION GPS/GNSS 2003*, pages 1628–1641, Berlin, Germany, September 2003.
- [189] C. Busnadiago-Gutierrez and S. Gutierrez-Lanza. Navigator for blind people on a mobile phone. In *European Navigation Conference*, Manchester, United Kingdom, May 2006.
- [190] J. Lee, W. Chen, R. Onishi, and R. Vuyyuru. Vehicle local peer group based multicasting protocol for vehicle-to-vehicle communications. In *IEEE Workshop on Vehicle to Vehicle Communications*, Eindhoven, Holland, June 2008.
- [191] A. Alexiou, C. Bouras, and V. Igglesis. Performance evaluation of umts for mobile internet access. In *IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems*, pages 615–618, Volendam, Holland, October 2004.

-
- [192] V. Naumov, R. Baumann, and T Gross. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces. In *ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pages 108–119, Florence, Italy, May 2006.
- [193] A. Mahajan, N. Potnis, K. Gopalan, and A. Wang. Modeling VANET deployment in urban settings. In *ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 151–158, Chania, Greece, October 2007.
- [194] J. Landman and P. Kritzinger. Delay analysis of downlink ip traffic on UMTS mobile networks. *Performance Evaluation*, 62(1-4):68–82, October 2005.
- [195] N. Wisitpongphan, F. Bai, P. Mudalige, and O.K. Tonguz. On the routing problem in disconnected vehicular ad-hoc networks. In *IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 2291–2295, Anchorage, USA, May 2007.
- [196] P. Gupta and P.R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2):388–404, March 2000.
- [197] A. Agarwal, D. Starobinski, and T.D.C. Little. Exploiting downstream mobility to achieve fast upstream message propagation in vehicular ad hoc networks. In *Mobile Networking for Vehicular Environments*, pages 13–18, Anchorage, USA, May 2007.
- [198] M. Torrent-Moreno, P. Santi, and H. Hartenstein. Distributed fair transmit power adjustment for vehicular ad hoc networks. In *IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pages 479–488, Reston, USA, September 2006.
- [199] R. Litjens. The impact of mobility on umts network planning. *Computer Networks*, 38(4):497–515, March 2002.
- [200] G. Cugola and H. Jacobsen. Using publish/subscribe middleware for mobile systems. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(4):25–33, October 2002.
- [201] S. Chou, W. Hsieh, F.L. Gandon, and N.M. Sadeh. Semantic web technologies for context-aware museum tour guide applications. In *International Conference on Advanced information Networking and Applications*, pages 709–714, Washington, DC, USA, March 2005.
- [202] A. Muñoz, A. Vera, and A.F.G. Botia, J.A. Skarmeta. Defining basic behaviours in ambient intelligence environments by means of rule-based programming with visual tools. In *European Conference on Artificial Intelligence*, Riva de Garda, August/September 2006.

-
- [203] J. Cosmen-Schortmann, M. Azaola-Saenz, M.A. Martinez-Olague, and M. Toledo-Lopez. Integrity in urban road environments and its use in liability critical applications. In *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, pages 972–983, California, USA, May 2008.
- [204] D. Betaille, R. Toledo-Moreo, and J. Laneurit. Making and enhanced map for lane location based services. In *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 711–716, Beijing, China, October 2008.

Apéndice A

Cálculo de los Factores de Integridad SBAS

La finalidad de este apéndice es detallar el algoritmo utilizado en el cálculo de los factores de integridad del sistema de navegación a partir de SBAS. En el capítulo 4 se ofreció un resumen con los aspectos de relevancia en la adaptación del cálculo al caso del transporte por carretera. La ampliación expuesta en este apéndice corresponde en gran medida a las directrices dadas en [47], aunque muestra características concretas de la implementación realizada.

Para facilitar la comprensión del proceso, se realizará una explicación inicial del conjunto de operaciones que se llevan a cabo para el cálculo final de los parámetros HPL_{SBAS} y VPL_{SBAS} . Seguido a esto, se incluyen las operaciones que son necesarias para calcular las estimaciones de error debidas a las correcciones diferenciales, la ionosfera, la troposfera, y la recepción y procesamiento de la señal de los satélites en el receptor. En los pasos que se crean oportunos, se harán las aclaraciones pertinentes sobre las consideraciones tenidas en cuenta en la adaptación del algoritmo al entorno del transporte terrestre.

A.1. Obtención de HPL_{SBAS} y VPL_{SBAS}

En (A.1) y (A.2) se muestran las expresiones para obtener los valores HPL_{SBAS} y VPL_{SBAS} . En el caso del HPL_{SBAS} se debe diferenciar entre *modo de aproximación no preciso* (NPA) y *modo de aproximación preciso* (PA). Se ha optado por el modo de aproximación no preciso, dado que, por un lado, los requerimientos en el transporte terrestre no son tan estrictos como en ámbitos de aviación y, por otro, el funcionamiento de EGNOS no ha estado totalmente afianzado hasta hace muy poco, por lo que las consideraciones de retardos asociados al modo preciso pueden ser contraproducentes.

$$HPL_{SBAS} = \begin{cases} K_{H,NPA} \cdot d_{mayor} & \text{En ruta para modos NPA} \\ K_{H,PA} \cdot d_{mayor} & \text{En modo PA} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$VPL_{SBAS} = K_V \cdot d_U \quad (\text{A.2})$$

Los parámetros necesarios para el cálculo de estos valores se muestran en (A.3-A.7). d_{east}^2 y d_{north}^2 son las varianzas de las distribuciones que modelan el error cometido en los ejes este y norte, respectivamente. d_{EN} es la covarianza de la distribución que modela el error en la combinación de los ejes este y norte. d_U^2 , por su parte, es la varianza de la distribución usada para el caso del error cometido en el eje vertical.

$$d_{mayor} = \sqrt{\frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2}} + \sqrt{\left\langle \frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2} \right\rangle^2 + d_{EN}^2} \quad (\text{A.3})$$

$$d_{east}^2 = \sum_{i=1}^N s_{east,i}^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (\text{A.4})$$

$$d_{north}^2 = \sum_{i=1}^N s_{north,i}^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (\text{A.5})$$

$$d_{EN} = \sum_{i=1}^N s_{east,i} \cdot s_{north,i} \cdot \sigma_i^2 \quad (\text{A.6})$$

$$d_U^2 = \sum_{i=1}^N s_{U,i}^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (\text{A.7})$$

s_{east} , s_{north} y s_U son las derivadas parciales del error de la posición en las direcciones este, norte y vertical, respectivamente. La obtención de estos valores se realiza mediante el cálculo de la matriz mostrada en (A.8). Esta es la matriz de proyección usada en el cálculo de la posición por mínimos cuadrados. Los datos necesarios para formar las matrices necesarias en la operación que se puede observar en la parte derecha, aparecen descritos en (A.9) y (A.10). La primera de estas expresiones conforma el cálculo de cada una de las filas de la matriz de geometría (G), con información sobre cada uno de los satélites usados en la solución. La otra matriz necesaria es la de pesos (W), la cual es definida en base al modo de operación que se utiliza. De nuevo, y para ser coherentes, se opta por el modo de aproximación no preciso, por lo que la matriz W , que será la inversa de la mostrada en la expresión, será igualmente la matriz identidad.

$$S = \begin{bmatrix} s_{east,1} & s_{east,2} & \dots & s_{east,N} \\ s_{north,1} & s_{north,2} & \dots & s_{north,N} \\ s_{U,1} & s_{U,2} & \dots & s_{U,N} \\ s_{t,1} & s_{t,2} & \dots & s_{t,N} \end{bmatrix} = \langle G^T \cdot W \cdot G \rangle^{-1} \cdot G^T \cdot W \quad (\text{A.8})$$

$$G_i = [-\cos El_i \cdot \sin Az_i \quad -\cos El_i \cdot \cos Az_i \quad -\sin El_i \quad 1] = i^{th} \text{ fila de } G \quad (\text{A.9})$$

$$W^{-1} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} & \text{En modo NPA} \\ \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix} & \text{En modo PA} \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

En lo referente a la constante usada en el cálculo del HPL_{SBAS} , (A.11) indica el valor apropiado para el modo de operación escogido (el no preciso en el presente caso). Para VPL_{SBAS} , el valor es fijo.

$$K_H = \begin{cases} 6,18 & \text{En ruta para modos NPA} \\ 6,0 & \text{En modo PA} \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

$$K_V = 5,33 \quad (\text{A.12})$$

Finalmente, quedaría describir el modo de obtención de la varianza del error cometido en la obtención de la pseudo-distancia a cada satélite (σ_i^2). (A.13) muestra todos los errores que hay que considerar para llegar a esta estimación final. Las siguientes secciones explican la metodología seguida para obtener cada uno de ellos.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,air}^2 \quad (\text{A.13})$$

A.2. Cálculo de la Varianza del Error Debido a las Correcciones Lentas y Rápidas

Realmente, este error considera los residuales ocasionados por la aplicación de las correcciones lentas y rápidas. Es decir, tiene en cuenta los efectos que dichas correcciones intentan soslayar, y cuantifica la porción del error que no es rectificado. En (A.14) se muestran dos casos especiales a la hora de calcular este valor. El primero de los casos es utilizado cuando, a pesar de que todas las correcciones están siendo aplicadas correctamente, no se usa el modelo de degradación. En la implementación realizada, el modelo de degradación se considera que no está siendo usado cuando no se han recibido los mensajes Tipo 7 y Tipo 10. Estos mensajes contienen los parámetros de degradación.

$$\sigma_{i,flt}^2 = \begin{cases} [(\sigma_{i,UDRE}^2) \cdot (\delta UDRE) + 8m]^2 & \text{Sin modelo de degradación} \\ (60)^2 m^2 & \text{Alguna corrección no aplicada} \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

El caso general del cálculo de esta varianza se muestra en (A.15). Aquí, el parámetro RSS_{UDRE} (*root-sum-square UDRE*), presente en la información de degradación, distingue entre dos posibilidades de cálculo. $\sigma_{i,UDRE}$ es un parámetro de degradación de la corrección rápida, incluido en los mensajes Tipo 2-6 y Tipo 24. $\delta UDRE$ es un factor de escala sobre el parámetro $\sigma_{i,UDRE}$, que modela la diferente degradación de las correcciones rápidas en distintas áreas del planeta. Dicho valor es calculado a partir de los mensajes Tipo 27 recibidos. La formación provista por este mensaje permite modelar un conjunto de regiones en el planeta, a partir de las cuales se puede determinar la adecuada, en función de la posición del receptor. En caso de que esta información no esté disponible, $\delta UDRE$ tendrá valor 1. ε_{fc} es el parámetro de degradación para la información de corrección rápida. ε_{rrc} es el parámetro de degradación para la información de ratio de cambio de las correcciones rápidas. ε_{ltc} es el parámetro de degradación para las correcciones lentas. Finalmente, ε_{er} es el parámetro de degradación para navegación en modo no preciso (NPA).

$$\sigma_{i,flt}^2 = \begin{cases} [(\sigma_{i,UDRE}^2) \cdot (\delta UDRE) + \varepsilon_{fc} + \varepsilon_{rrc} + \varepsilon_{ltc} + \varepsilon_{er}]^2 & \text{Si } RSS_{UDRE} = 0 \\ [(\sigma_{i,UDRE}^2) \cdot (\delta UDRE)]^2 + \varepsilon_{fc}^2 + \varepsilon_{rrc}^2 + \varepsilon_{ltc}^2 + \varepsilon_{er}^2 & \text{Si } RSS_{UDRE} = 1 \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

ε_{fc} es calculado según se muestra en (A.16). a es el factor de degradación de la corrección rápida, determinado en el mensaje Tipo 7. t es la hora GPS actual en segundos. t_u es el momento de aplicación de la corrección, en caso de que se extraiga la información de degradación de los mensajes Tipo 2-5 y Tipo 24. Si se usa el mensaje Tipo 6 para tal menester, se debe atender al valor del índice UDREI incluido en este mensaje. En caso de observar un valor igual a 3 para UDREI, se usa igualmente el momento de aplicación de la corrección rápida. En otro caso, se usará la hora en la que se transmitió el primer bit del mensaje Tipo 6. Puesto que en la implementación realizada siempre son necesarios los mensajes de corrección rápida, la información de degradación siempre se extrae de ellos. Es por esto que siempre se usa el momento de aplicación de la corrección como t_u . Dicha hora es tomada como la hora de llegada del mensaje, tal y como se explica en [49]. Finalmente, t_{lat} es la latencia del sistema, determinada por el mensaje Tipo 7.

$$\varepsilon_{fc} = \frac{a \cdot (t - t_u + t_{lat})^2}{2} \quad (\text{A.16})$$

En (A.17) y (A.18) se describe el procedimiento usado para calcular ε_{rrc} . Dichas expresiones solamente se aplican cuando la corrección de ratio de cambio es distinta de 0. Si se diera el caso contrario, la degradación (ε_{rrc}) se consideraría 0. El factor

discriminante entre (A.17) y (A.18) es el valor de $IODF$. Dicho valor comprende la marca *Issue Of Data*, incluida en el propio mensaje de corrección rápida (Tipo 2-5). En caso de que $IODF$ tenga un valor distinto de tres para los mensajes actual y anterior¹ recibidos sobre el satélite estudiado, se aplica la primera expresión; en caso contrario se aplica la segunda. a es el factor de degradación de la corrección rápida, determinado en el mensaje Tipo 7. t es la hora GPS actual en segundos. I_{fc} está incluido en el mensaje de corrección rápida. Sin embargo, aquí se debe considerar el menor de dichos valores para todos los incluidos en el mensaje de corrección. B_{rrc} es un parámetro asociado a la estimación relativa de ruido y error de redondeo, que se obtiene del mensaje Tipo 10. $IODF_{actual}$ y $IODF_{previo}$ son los valores IODF de los mensajes actual y anterior. t_{of} y $t_{of,previo}$ son los momentos de aplicación de los mensajes de corrección. De nuevo, dichos instantes son tomados como la hora GPS de llegada de los mensajes.

$$\varepsilon_{rrc} = \begin{cases} 0 & Si (IODF_{actual} - IODF_{previo}) MOD 3 = 1 \\ \left(\frac{a \cdot I_{fc}}{4} + \frac{B_{rrc}}{\Delta t} \right) (t - t_{of}) & Si (IODF_{actual} - IODF_{previo}) MOD 3 \neq 1 \end{cases} \quad (A.17)$$

$$\varepsilon_{rrc} = \begin{cases} 0 & Si \left| \Delta t - \frac{I_{fc}}{2} \right| = 0 \\ \left(\frac{a \cdot |\Delta t - I_{fc}/2|}{2} + \frac{B_{rrc}}{\Delta t} \right) (t - t_{of}) & Si \left| \Delta t - \frac{I_{fc}}{2} \right| \neq 0 \end{cases} \quad (A.18)$$

ε_{ltc} es calculado según tres casos distintos. Dos tipos de cálculo son usados en el caso de que se trate de correcciones lentas aplicadas sobre satélites convencionales. En el caso de que se trate de satélites geostacionarios, se aplica un tercer tipo de procedimiento. El primero de los casos es aplicado cuando se usan las correcciones lentas a partir de mensajes Tipo 24 o 25 con información de ratio de cambio. Este caso está descrito en (A.19). t es la hora GPS actual en segundos. t_0 es el momento de aplicación de la corrección, incluido en el propio mensaje. $I_{ltc.v1}$ es el intervalo de actualización de las correcciones lentas en modo de ratio de cambio. Este parámetro está en el mensaje Tipo 10. $C_{ltc.lsb}$ es el máximo error de redondeo en la información sobre órbitas y el reloj de los satélites, y está determinado en el mensaje Tipo 10. $C_{ltc.v1}$ es el máximo error que se puede cometer al representar la información sobre el ratio de cambio de la corrección lenta.

$$\varepsilon_{ltc} = \begin{cases} 0 & Si t_0 < t < t_0 + I_{ltc.v1} \\ C_{ltc.lsb} + C_{ltc.v1} \cdot \max(0, t_0 - t, t - t_0 - I_{ltc.v1}) & Otro caso \end{cases} \quad (A.19)$$

El cálculo de ε_{ltc} , para el caso de las correcciones lentas sin información de ratio de cambio, se realiza conforme a (A.20). t es la hora GPS actual. t_{ltc} es la hora de transmisión del primer bit del mensaje de corrección, tomada de nuevo como el momento de llegada del mensaje. $I_{ltc.v0}$ es el intervalo mínimo de actualización de los

¹La obtención del mensaje de corrección rápida considerado como anterior, requiere un proceso de selección sobre una caché de los últimos recibidos, tal y como se describe en [47].

mensajes de corrección lenta, y está incluido en el mensaje Tipo 10. $C_{ltc.v0}$ es una cota del error que se comente cuando se aplica una corrección lenta, ya que dicha corrección se degrada con el tiempo.

$$\varepsilon_{ltc} = C_{ltc.v0} \left\lfloor \frac{t - t_{ltc}}{I_{ltc.v0}} \right\rfloor \quad (\text{A.20})$$

El último caso de cálculo de ε_{ltc} se usa cuando la pseudo-distancia a un satélite geoestacionario es considerada en la solución. Solamente debe aplicarse este procedimiento en caso de no disponer de corrección lenta para el satélite. La expresión a aplicar en este caso es (A.21). Como se puede comprobar, es muy similar al primero de los casos, salvo con parámetros propios del satélite geoestacionario. t es la hora GPS actual. t_0 es el momento de generación del mensaje de navegación recibido. Dicho valor está en el propio mensaje Tipo 9. I_{geo} es el intervalo de emisión de mensajes Tipo 9, y se encuentra en el Tipo 10. $C_{geo.lsb}$ es el error máximo que se produce por el redondeo usado al representar la información sobre la órbita y el reloj del satélite. $C_{geo.v}$ es el máximo error que se puede producir al notificar los ratios de cambio de la posición del satélite.

$$\varepsilon_{ltc} = \begin{cases} 0 & \text{Si } t_0 < t < t_0 + I_{geo} \\ C_{geo.lsb} + C_{geo.v} \cdot \max(0, t_0 - t, t - t_0 - I_{geo}) & \text{Otro caso} \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

El último valor que quedaría por calcular sería la degradación para el funcionamiento en modo NPA, ε_{er} . En (A.22) se indica el valor a considerar, dependiendo de si la validez de la corrección lenta o rápida ha expirado en modo preciso. C_{er} es el parámetro de degradación determinado en el mensaje Tipo 10.

$$\varepsilon_{er} = \begin{cases} 0 & \text{Si no se cumplen timeouts en modo preciso} \\ C_{er} & \text{Si alguna corrección ha expirado} \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

A.3. Cálculo de la Varianza del Error Ocasionado por las Correcciones en la Ionosfera

Los errores que se cometen al modelar el error ocasionado por el viaje de las señales por la ionosfera, se pueden calcular desde el punto de vista del modelo estándar de GPS, o mediante la información SBAS. Teniendo en cuenta que el software desarrollado posee una inicialización rápida, siempre se considera este último caso, puesto que en poco tiempo se consigue completar la información requerida sobre la ionosfera. El modelo GPS se puede consultar en [47].

El cálculo de σ_{UIRE}^2 se realiza según (A.23). F_{pp} es un factor de oblicuidad de la señal del satélite con respecto a la ionosfera, y que se aplica para escalar el error final. Dicho

factor se calcula según (A.24). R_e es el radio aproximado del elipsoide que representa a la tierra, considerado de 6378.1363 Km. h_I es la altura donde se encuentra la mayor densidad de electrones en la atmósfera. E es el ángulo de elevación del satélite.

$$\sigma_{UIRE}^2 = F_{pp}^2 \cdot \sigma_{UIVE}^2 \quad (\text{A.23})$$

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cdot \cos E}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{A.24})$$

En cuanto a la obtención de σ_{UIVE}^2 , el cálculo es más laborioso. Dicho factor es una interpolación del error que se comente en la zona en la que la señal del satélite atraviesa la ionosfera. Para hallarlo es necesario disponer del modelo de la ionosfera que transmite el SBAS a través de los mensajes Tipo 18 y 26. Dicho modelo está formado por una rejilla de puntos distribuidos por todo el planeta, que serán usados para interpolar en la posición exacta. El mensaje Tipo 18 provee información de máscara sobre los puntos de la rejilla sobre los que se enviará información de retardo de la ionosfera. Dicha información de retardo es enviada en los mensajes Tipo 26. Cuando el modelo se ha recibido completamente, es posible estimar el error que se comente en una determinada zona de la ionosfera, partiendo de una interpolación del retardo que se comente en determinados puntos de la rejilla.

En (A.25) se indica cómo calcular la interpolación del error para una zona de la ionosfera. La operación varía entre una interpolación a través de tres o de cuatro puntos de la rejilla. Si no estuviesen disponibles al menos tres puntos para realizar la interpolación, la corrección de la ionosfera no sería utilizada. W_n corresponde con las ecuaciones de pesos que se usan para la función de interpolación. Dichas funciones usan como parámetro la posición relativa del punto de paso de la señal del satélite por la ionosfera (*pierce point*), en el área que conforma la unión de los puntos de la rejilla. $\sigma_{n,ionogrid}^2$ es la varianza del error de la ionosfera para cada punto de la rejilla considerado.

$$\sigma_{UIVE}^2 = \begin{cases} \sum_{n=1}^4 W_n(x_{pp}, y_{pp}) \cdot \sigma_{n,ionogrid}^2 & \text{Si interpolación de 4 puntos} \\ \sum_{n=1}^3 W_n(x_{pp}, y_{pp}) \cdot \sigma_{n,ionogrid}^2 & \text{Si interpolación de 3 puntos} \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

Las funciones de peso (A.26-A.29) son usadas cuando se dispone de cuatro puntos a partir de los que realizar la interpolación. Las expresiones (A.30-A.32) corresponden con las funciones de peso usadas cuando se usan tres puntos. Las posiciones relativas dentro del área de interpolación se calculan según aparece en (A.33). En ella se distingue según la situación de la coordenada norte del *pierce point*. En (A.34-A.35) se muestra cómo calcular el desplazamiento en longitud (λ) y en latitud (ϕ), dentro del área de interpolación. λ_1 y λ_2 son la longitud de los puntos de interpolación al oeste y al este del *pierce point*, en radianes. ϕ_1 y ϕ_2 son la latitud de los puntos de interpolación al sur y al norte del *pierce point*, en radianes.

$$W_1 = x_{pp} \cdot y_{pp} \quad (\text{A.26})$$

$$W_2 = (1 - x_{pp}) \cdot y_{pp} \quad (\text{A.27})$$

$$W_3 = (1 - x_{pp}) \cdot (1 - y_{pp}) \quad (\text{A.28})$$

$$W_4 = x_{pp} \cdot (1 - y_{pp}) \quad (\text{A.29})$$

$$W_1 = y_{pp} \quad (\text{A.30})$$

$$W_2 = 1 - x_{pp} - y_{pp} \quad (\text{A.31})$$

$$W_3 = x_{pp} \quad (\text{A.32})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{pp} = \frac{\Delta\lambda_{pp}}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ y_{pp} = \frac{\Delta\phi_{pp}}{\phi_2 - \phi_1} \\ y_{pp} = \frac{|\phi_{pp}| - 85^\circ}{10^\circ} \\ x_{pp} = \frac{\lambda_{pp} - \lambda_3}{90^\circ} \cdot (1 - 2 \cdot y_{pp}) + y_{pp} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{IPP entre } N85^\circ \text{ y } S85^\circ \\ \text{IPP al norte de } N85^\circ \text{ o al sur de } S85^\circ \end{array} \quad (\text{A.33})$$

$$\Delta\lambda_{pp} = \lambda_{pp} - \lambda_1 \quad (\text{A.34})$$

$$\Delta\phi_{pp} = \phi_{pp} - \phi_1 \quad (\text{A.35})$$

Para la determinación del *pierce point* se usa (A.36-A.38). En ellas se obtiene la latitud y la longitud, respectivamente. ψ_{pp} es definido como el ángulo central de La Tierra entre la posición del usuario y la proyección terrestre del *pierce point*. A es el ángulo acimut del satélite desde la posición del usuario (ϕ_u, λ_u), medido desde el norte, en el sentido de las agujas del reloj. E es el ángulo de elevación del satélite con respecto a la posición del usuario. R_e es el radio aproximado del elipsoide de la Tierra, tomado como 6378.1363 km. h_I es la altura a la que se encuentra la máxima densidad de electrones en la atmósfera.

$$\phi_{pp} = \sin^{-1} (\sin \phi_u \cdot \cos \psi_{pp} + \cos \phi_u \cdot \sin \psi_{pp} \cdot \cos A) \quad (\text{A.36})$$

$$\lambda_{pp} = \begin{cases} \lambda_u + \pi - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \psi_{pp} \cdot \sin A}{\cos \phi_{pp}} \right) & \text{Si } \phi_u > 70^\circ \text{ y } \tan \psi_{pp} \cdot \cos A > \tan (\pi/2 - \phi_u) \\ & \text{o bien} \\ & \phi_u < -70^\circ \text{ y } \tan \psi_{pp} \cdot \cos (A + \pi) > \tan (\pi/2 + \phi_u) \\ \lambda_u + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \psi_{pp} \cdot \sin A}{\cos \phi_{pp}} \right) & \text{Otro caso} \end{cases} \quad (\text{A.37})$$

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + h_I} \cdot \cos E \right) \quad (\text{A.38})$$

El parámetro que faltaría por calcular es $\sigma_{n,ionogrid}^2$, que es la varianza del error cometido al modelar el retardo ionosférico en cada punto de interpolación de la rejilla. Para cada uno de ellos se debe aplicar (A.39). Aquí, RSS_{iono} es un parámetro *root-sum-square* disponible en el mensaje Tipo 10. σ_{GIVE} es el parámetro de error que se manda junto con el retardo de la ionosfera, en los mensajes Tipo 26. C_{iono_step} viene determinado en el mensaje Tipo 10, y es una cota máxima de la diferencia de retardo debido a la ionosfera en mensajes Tipo 26 sucesivos. t es la hora actual GPS. t_{iono} es el momento de la transmisión del primer bit del mensaje Tipo 26 asociado. Éste es tomado como la hora GPS de llegada del mensaje. C_{iono_ramp} es el ratio de cambio de las correcciones de la ionosfera, incluido en el mensaje Tipo 10. I_{iono} es la frecuencia mínima de envío de mensajes Tipo 26, y que se pueden encontrar igualmente en el mensaje Tipo 10.

$$\sigma_{ionogrid}^2 = \begin{cases} (\sigma_{GIVE} + \varepsilon_{iono})^2 & Si\ RSS_{iono} = 0 \\ \sigma_{GIVE}^2 + \varepsilon_{iono}^2 & Si\ RSS_{iono} = 1 \end{cases} \quad (A.39)$$

$$\varepsilon_{iono} = C_{iono_step} \left\lfloor \frac{t - t_{iono}}{I_{iono}} \right\rfloor + C_{iono_ramp} (t - t_{iono}) \quad (A.40)$$

El único aspecto que quedaría por explicar es la obtención de los puntos del grid usados para formar un área que contenga al *pierce point*, y que sirva para realizar la interpolación del error. Dicho procedimiento se puede encontrar en [47] y, básicamente, consta de un conjunto de operaciones para obtener aquellos puntos que rodean al *pierce point* en un área lo más pequeña posible.

A.4. Cálculo de la Varianza del Error Ocasionado por la Troposfera

El modelo para calcular el error residual que se comente cuando las señales de los satélites atraviesan la troposfera viene especificado en (A.41). En ella, el valor constante es el error vertical de la troposfera, y $m(E)$ es la función de mapeo de corrección de la troposfera, que toma como parámetro la elevación del satélite. Dicha función está expresada en (A.42).

$$\sigma_{i,tropo}^2 = (0,12 \cdot m(E))^2 \quad (A.41)$$

$$m(E) = \frac{1,001}{\sqrt{0,002001 + \sin^2(E)}} \quad (A.42)$$

A.5. Cálculo de la Varianza del Error Ocasionado por el Receptor

Para el cálculo de $\sigma_{i,air}$ es necesario considerar el tipo de receptor usado acorde con el estándar. Las clases de equipamientos considerados en [47] se dividen en cuatro. De ellas, la clase 1 obtiene un valor constante de $25 m^2$ para el error en cuestión. Para el resto de receptores se considera (A.43). La clase de equipamiento 1 soporta navegación en modo no preciso, y no considera las correcciones de la ionosfera; la clase 2 soporta también las correcciones de la ionosfera; la clase 3 incorpora, además, navegación en modo preciso; finalmente, la clase 4 soporta exclusivamente la navegación en modo preciso usando, obviamente, todas las correcciones posibles. Se considera que el hardware de posicionamiento de la tesis doctoral corresponde con la clase de equipamiento 2, con lo que será necesario aplicar (A.43).

Mientras que el cálculo del error ocasionado por el multi-camino de la señal desde los satélites ($\sigma_{i,multipath}$) se calcula con una expresión establecida, no ocurre así para la estimaciones σ_{noise} y σ_{divg} . El primero de estos valores considera los errores que se producen en los cálculos del receptor, y en la transmisión de las señales, por ruido térmico e interferencias. σ_{divg} estima los errores que se producen en el filtrado de las señales. El estándar establece unas cotas para la suma de estos dos parámetros, a partir de la elevación del satélite en cuestión. En (A.45-A.46) se indica el valor a considerar en dichos extremos, primero para el caso de satélites convencionales y después para los SBAS. Para la obtención de un valor acorde a la elevación real del satélite, se ha optado por realizar una interpolación lineal a partir de estas cotas, considerando que el nivel mínimo de señal está situado a los 5° de elevación y el máximo a los 90° .

$$\sigma_{i,air}^2 = \sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,multipath}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \quad (A.43)$$

$$\sigma_{i,multipath} = 0,13 + 0,53 \cdot e^{-E/10} \quad (A.44)$$

$$\sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \leq \begin{cases} 0,0225 & \text{Si el nivel de la transmisión es mínimo} \\ 0,0121 & \text{Si el nivel de la transmisión es máximo} \end{cases} \quad (A.45)$$

$$\sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \leq \begin{cases} 1,8 & \text{Si el nivel de la transmisión es mínimo} \\ 1,0 & \text{Si el nivel de la transmisión es máximo} \end{cases} \quad (A.46)$$

Apéndice B

Funcionamiento del Software de Soporte Extendido SBAS

El software de soporte SBAS descrito en el capítulo 4, se encuentra integrado en la plataforma de la OBU mediante un módulo OSGi de nivel medio, a modo de *middleware*; sin embargo, también es posible usarlo como programa independiente a través de la línea de comandos. Todas las capacidades que ofrece están disponibles mediante su invocación como servicio OSGi, o mediante la línea de comandos. Este apéndice describe brevemente las capacidades del programa, a la vez que explica cómo parametrizar su funcionamiento.

B.1. Receptores Soportados

El módulo SBAS Processor Utility hace uso de un servicio software de bajo nivel para acceder a la información del sensor GNSS. Sin embargo, cuando es utilizado como programa independiente, hace uso de una implementación propia de soporte para los diversos receptores utilizados en la tesis doctoral. Como se dijo en el capítulo 3, los receptores soportados son:

- Thales DG16.
- Novatel Millenium OEM3.
- Novatel Millenium OEM4.
- San Jose Navigation FV-21.
- Thales Lassen iQ.
- Thales GG24.

B.2. Requerimientos para el Uso del Software

Puesto que el software está implementado en Java, su ejecución es posible en cualquier arquitectura para la que exista una máquina virtual. Es necesaria, sin embargo, una librería para el acceso al puerto serie. Se han usado dos de ellas fundamentalmente, la propia implementación de Sun, llamada JavaComm, y la implementación que ofrece RXTX, que presenta sin duda mayores beneficios, puesto que está disponible para diversas arquitecturas, entre las que se encuentran UNIX, Windows, y Solaris. Esta última librería no requiere, por tanto, compilar el software nuevamente cuando se usa el programa en una plataforma distinta.

B.3. Modos de Ejecución del Programa

El software funciona a modo de comando típico de UNIX, de forma que es posible incluir diversos parámetros que definen la configuración deseada. Suponiendo que la máquina virtual, las librerías y las clases de la aplicación están situadas correctamente en el sistema, el programa se invoca con el formato siguiente:

```
java_sisnettrans.SisnetTrans [opciones] [modo_funcionamiento]
```

Tanto las opciones como el modo de funcionamiento son opcionales, existiendo una configuración que se ejecuta por defecto, tal y como se indica posteriormente. Cuando el software es usado dentro de la plataforma OSGi, las opciones y el modo de funcionamiento se especifican a través de argumentos de llamada. El conjunto de las opciones disponibles se incluye a continuación:

```
[opciones]
-help
-logout <nombre_fichero>
-test
-time <seg>
-configFile <nombre_fichero>
-central <IP>
```

La utilidad de cada una de estas opciones es la siguiente:

- help** Muestra la línea de llamada y los parámetros posibles. Esta opción no está disponible cuando el software es usado como módulo OSGi.
- logout <nombre_fichero>** Especifica un nombre para el fichero de *log* de salida. Por defecto, el fichero usado es *SisnetTrans.log*.
- test** El programa se ejecuta mostrando información de conversión y de navegación por pantalla. Por defecto esta opción está habilitada.

- time** <seg> Especifica un tiempo de funcionamiento en segundos, tras el cual el programa termina. Por defecto, este tiempo se establece a 3600 segundos. Esta opción no está disponible cuando el software es usado como módulo OSGi.
- configFile** <nombre_fichero> Indica el fichero de opciones del programa a usar, cuya estructura se explica posteriormente. Por defecto, el fichero usado es *SisnetTrans.properties*.
- central** <IP> Configura un servidor de seguimiento hacia donde mandar la posición periódicamente. Para ello se debe situar la dirección IP del servidor. Si no se indica lo contrario, esta opción está deshabilitada.

Con el modo de funcionamiento es posible establecer la configuración en la que se desea que el programa se ejecute. Solamente es posible usar uno de los siguientes modos simultáneamente:

```
[modo_funcionamiento]
-rtcm [opciones_rtc]
-loginput <nombre_fichero>
-sisnet
-egnos
-single
-auto
-egnosRcvInput
-egnosEgnosRcvInput
```

El significado de todos ellos es el siguiente:

- rtcm** [opciones_rtc] El programa realiza una conversión de mensajes desde RTCA DO-229C a RTCM SC-104, usando como fuente de mensajes EGNOS a SISNeT. El receptor se configura en modo diferencial, para que acepte las correcciones a través de puerto serie. Se calculan, además, los factores de integridad.
- loginput** <nombre_fichero> El funcionamiento es análogo a la opción de generación de RTCM estándar, pero utiliza un fichero de entrada de *log* para obtener la información de navegación y los mensajes EGNOS. El formato del fichero de *log* de entrada es el mismo que el que usa el programa para generar los de salida.
- sisnet** El programa recibe información de EGNOS a través de SISNeT, y manda los mensajes RTCA DO-229C a través del puerto serie. El receptor se configura en modo diferencial para que acepte SBAS a través del puerto serie, y los factores de integridad son calculados.

- egnos** El receptor se configura en modo SBAS y, aunque se generan mensajes RTCM a partir de SISNeT, estos no se mandan a través de los puertos locales. Los factores de integridad son calculados también.
- auto** El receptor se configura con SBAS y se monitoriza la integridad, según el modo anterior, pero cuando la posición obtenida no es diferencial, se comienzan a enviar los mensajes de corrección RTCM SC-104 por el puerto serie.
- single** El receptor se configura en modo GPS estándar, y no se mandan correcciones a través de los puertos locales ni se calculan los factores de integridad.
- egnosRcvInput** El receptor se configura según el modo **-egnos**, pero los mensajes RTCA DO-229C se extraen desde el propio receptor, en vez de recibirse desde SISNeT. No se generan correcciones RTCM, ya que el receptor ya está usando las correcciones SBAS.
- egnosEgnosRcvInput** Se configura el receptor en modo SBAS y se generan correcciones RTCM a partir de SISNeT, aunque no son mandadas al receptor. Además de esto, se arranca otro motor de procesamiento que usa los mensajes RTCA DO-229 extraídos del receptor, según el modo anterior. El comportamiento obtenido es el resultado de combinar los modos **-egnos** y **-egnosRcvInput**, obteniéndose dos logs de salida, uno para cada modo. Los factores de integridad se calculan de forma independiente para cada uno de los casos.

En la generación de mensajes RTCM es posible, además, indicar dos parámetros de funcionamiento alternativos, acerca de cómo tratar la generación de correcciones diferenciales de la ionosfera:

```
[opciones_rtcml]
-noIOcorr
-simulateIOcorr
```

El significado de estos parámetros es el siguiente:

- noIOcorr** No se mandan correcciones diferenciales sobre la ionosfera en mensajes específicos.
- simulateIOcorr** La información de corrección sobre la ionosfera se incluye en los mensajes de corrección diferencial convencionales.

Solamente se puede usar una de estas opciones y, en caso de no usar ninguna, se generarán mensajes RTCM Tipo 15 de corrección de los efectos de la ionosfera.

B.4. Fichero de Configuración Básica

La configuración básica del software se incluye a través de un fichero de configuración que se lee en el arranque. El conjunto de opciones que se incluyen en él se pueden observar en el siguiente ejemplo:

```
#_SISNeT_Data_Server_address
dsAddress=131.176.49.142

#_SISNeT_Data_Server_port
dsPort=7777

#_SISNeT_communication_timeout,_in_milliseconds
dsTimeout=5000

#_Login_for_SISNeT_connection
sisnetUser=XXXX

#_Password_for_SISNeT_connection
sisnetPasswd=XXXX

#_RTCM_reference_station_identifier
rtcmReferenceStationId=23

#_Interval_for_RTCM_type_9_message_generation,_in_milliseconds
rtcm9MessageInterval=10000

#_Interval_for_RTCM_type_15_message_generation,_in_milliseconds
rtcm15MessageInterval=30000

#_GPS_receiver_to_be_used
receiver=NovatelMilleniumOEM3Receiver

#_Receiver_port_to_send_the_log_commands
receiverLogCOMPort=1

#_Receiver_port_to_send_differential_correction_messages
receiverCorrectionCOMPort=2

#_Receiver_port_for_obtaining_the_SBAS_messages
receiverRawDataCOMPort=2

#_Host_port_to_be_used_to_send_log_commands
localLogCOMPort=COM1
```

```
#_Host_port_to_send_differential_correction_messages
localCorrectionCOMPort=COM5

#_Machine_port_to_receive_SBAS_messages_from_receiver
localRawDataCOMPort=COM5

#_Time_interval_to_ask_for_navigation_data_to_receiver
receiverPollingInterval=500

#_Time_to_wait_for_receiver_initialization,_in_milliseconds
receiverInitializationTimeout=200000

#_PRN_of_the_SBAS_satellite_to_be_used
waasSatellite=120

#_Connection_port_to_the_monitorization_central
centralPort=7776
```

Las opciones que incluye el fichero de configuración son las siguientes:

dsAddress Dirección IP del servidor SISNeT.

dsPort Puerto de conexión al servidor SISNeT.

dsTimeout Tiempo de espera máximo de contestación del servidor SISNeT, en milisegundos.

sisnetUser Usuario de conexión al servidor SISNeT.

sisnetPasswd Contraseña de conexión al servidor SISNeT.

rtcmReferenceStationId Identificador de la estación de monitorización emulada por la OBU, puesto que es el software el que genera las correcciones. Este valor se sitúa en los mensajes RTCM.

rtcm9MessageInterval Intervalo a esperar entre cada mensaje RTCM Tipo 9 generado por el programa.

rtcm15MessageInterval Intervalo a esperar entre cada mensaje RTCM Tipo 15 generado por el programa.

receiver El identificador del receptor que se desea utilizar.

receiverLogCOMPort El identificador del puerto del receptor usado para la comunicación con la OBU, y para el envío de datos de navegación.

receiverCorrectionCOMPort El identificador del puerto del receptor usado para enviar correcciones diferenciales en RTCM.

receiverRawDataCOMPort El identificador del puerto del receptor usado para enviar a la OBU mensajes en crudo de SBAS y GPS.

localLogCOMPort Puerto de la OBU usado para la comunicación con el receptor, y para la petición de datos de navegación.

localCorrectionCOMPort Puerto de la OBU usado para emitir mensajes de corrección RTCM.

localRawDataCOMPort Puerto de la OBU usado para recibir mensajes en crudo de GPS y SBAS desde el receptor.

receiverPollingInterval Intervalo a esperar entre cada petición de datos de navegación al receptor.

receiverInitializationTimeout Tiempo de inicialización máxima que se espera en la configuración inicial del receptor.

waasSatellite Número identificativo del satélite geostacionario SBAS usado.

centralPort Puerto usado por defecto para la conexión a una central de seguimiento.

Apéndice C

Formato de los Mensajes Usados en la Arquitectura de Comunicación

En este apéndice se describe el formato de los mensajes utilizados en la plataforma de comunicación propuesta en la tesis doctoral. La descripción de la arquitectura de comunicación queda detallada mayoritariamente en la sección 5.4, aunque existe una pequeña ampliación en la sección 6.3.

C.1. Generalidades en la Estructura de los Paquetes

La implementación realizada a partir del diseño del protocolo de comunicación entre los diferentes componentes de la arquitectura, considera el intercambio de mensajes codificados en ASCII, lo cual ha facilitado las labores de depuración y de codificación. La separación de los distintos campos de los mensajes se lleva a cabo mediante el carácter “,”. El campo de datos en los mensajes de notificación de eventos está situado al final del paquete, por lo que no existen problemas derivados del uso de esta técnica.

La aproximación escogida en la implementación del protocolo no se considera óptima, ya que pueden existir problemas de rendimiento derivados del uso de codificación ASCII, fundamentalmente. Una implementación más adecuada para la puesta en funcionamiento de la arquitectura de forma masiva, debería considerar tamaños de campo fijos y codificación en binario de los valores numéricos (al menos).

Los mensajes que involucran el intercambio de información de control, y los enviados entre elementos de la infraestructura, están incluidos dentro de datagramas TCP, mientras que los que portan los eventos que son transmitidos o recibidos por los vehículos, están empaquetados dentro de mensajes JXTA a través de una tubería de comunicación. La información transmitida dentro de un mensaje emitido por TCP es finalizada con un carácter nulo “\0”, mientras que para el caso de los JXTA, no es necesario marcar el final, ya que éstos se encuentran incluidos dentro de un paquete XML propio de JXTA.

Todos los mensajes tienen un campo común de identificación, que funciona como

cabecera, y que permite distinguir entre los diferentes tipos de mensajes. Además, los mensajes transmitidos mediante JXTA, amplían esta cabecera con información de navegación y de tipo de servicio, como se verá posteriormente.

C.2. Mensajes Utilizados entre el Vehículo y Group Server

Todos los campos de los que están compuestos los paquetes usados en la comunicación entre el vehículo y Group Server se ilustran en la Fig. C.1. A continuación se detalla la estructura de cada uno de ellos.

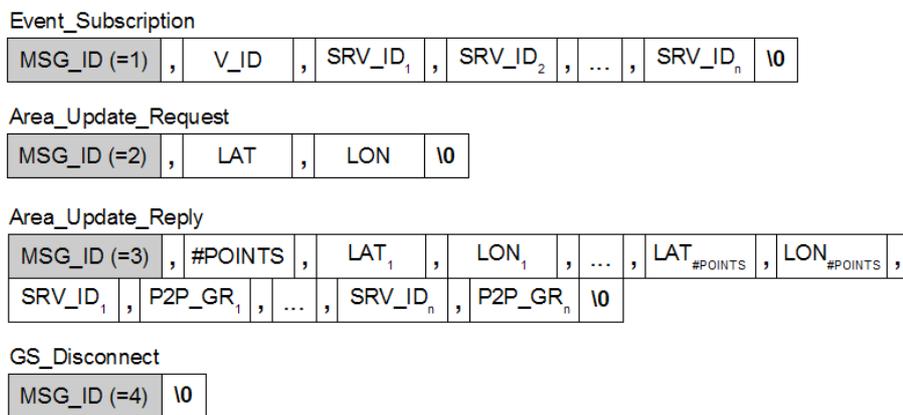


Figura C.1: Formato de mensajes en la comunicación Vehículo-Group Server

Event_Subscription Es utilizado para que el terminal del vehículo indique a Group Server que está interesado en participar en un determinado grupo de servicios. El emisor del mensaje es el terminal del vehículo. Los campos incluidos son los siguientes:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=1). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *V_ID*: Identificador del vehículo, representado mediante una cadena de texto que no puede contener el carácter separador “,”.
- *SRV_ID_n*: Identificador de servicio. Es un dato numérico entero de hasta 32 bits. Los identificadores de los servicios disponibles son devueltos en la conexión inicial del vehículo a la red, usando un mensaje *Area_Update_Reply*.

Area_Update_Request Este mensaje es enviado a Group Server por el vehículo para notificar un cambio de área de servicios, o establecer la conexión inicial a la red.

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=2). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *LAT*: Latitud, en grados, de la posición del vehículo. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *LON*: Longitud, en grados, de la posición del vehículo. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.

Area_Update_Reply Es enviado por Group Server como respuesta a un **Area_Update_Request**, en el traspaso de área de servicios del vehículo, o en la conexión inicial de éste a la red. Los campos incluidos son los siguientes:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=3). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *#POINTS*: Número de coordenadas (puntos) que conforman el polígono del área de servicios que se notifica en el mensaje. Es un número natural de hasta 31 bits.
- *LAT_n*: Latitud, en grados, de la *n*-ésima coordenada del polígono del área. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *LON_n*: Longitud, en grados, de la *n*-ésima coordenada del polígono del área. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *SRV_ID_n*: Identificador de servicio. Es un dato entero de hasta 32 bits. Los identificadores disponibles hasta el momento consideran los siguientes servicios: obras (1), accidente (2), avería (3), atasco (4), información meteorológica (5), información en carretera (6), información en túnel (7), y control de velocidad (8).
- *P2P_GR_n*: Identificador del grupo de comunicación P2P que se usa en el área en cuestión para el identificador de servicio emparejado. Se representa mediante una cadena de texto que no puede contener el carácter separador “,”.

GS_Disconnect Este mensaje es enviado por el vehículo para notificar a Group Server que no desea seguir perteneciendo a la red, por lo que se elimina también su suscripción a los servicios necesarios. El único campo que se incluye es el identificador de paquete:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=4). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.

C.3. Mensajes Utilizados entre Environment Server y Group Server

Todos los campos de los que están compuestos los paquetes que se usan en la comunicación entre Environment Server y Group Server se ilustran en la Fig. C.2. A

continuación se detalla la estructura de cada uno de ellos.

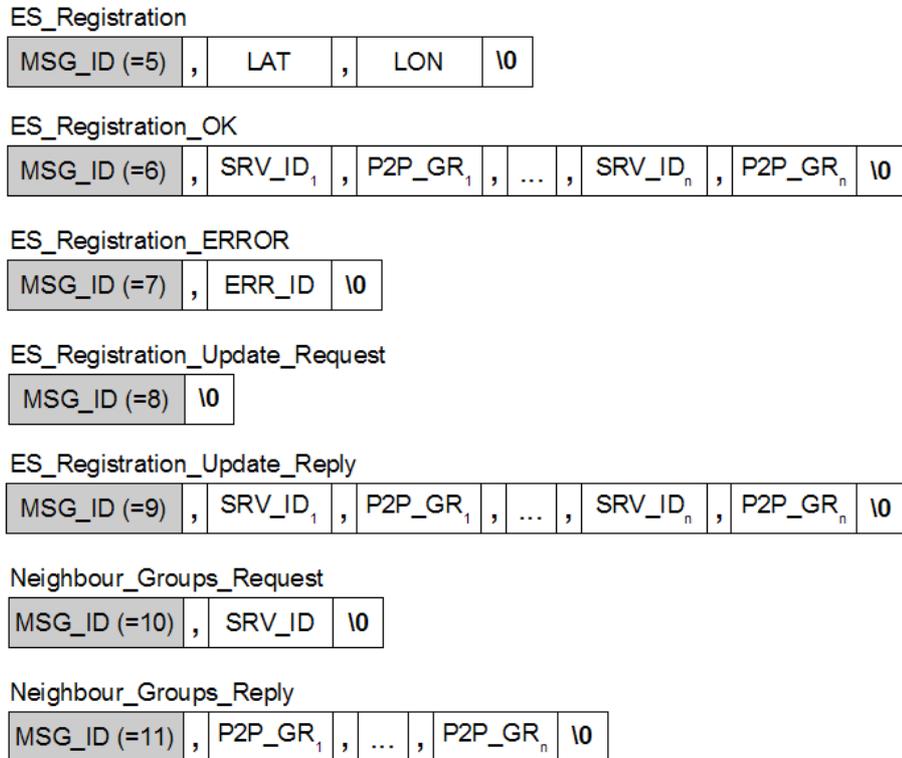


Figura C.2: Formato de mensajes en la comunicación Environment Server-Group Server

ES_Registration Cada Environment Server envía estos mensajes para registrarse con Group Server al inicio de su funcionamiento. Los campos considerados son:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=5). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *LAT*: Latitud, en grados, de la posición del Environment Server. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *LON*: Longitud, en grados, de la posición del Environment Server. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.

ES_Registration_OK Group Server responde con este mensaje si el registro de un Environment Server, con **ES_Registration**, es exitoso. Los campos incluidos son:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=6). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *SRV_ID_n*: Identificador de servicio. Es un dato entero de hasta 32 bits. Los identificadores disponibles hasta el momento consideran los siguientes

servicios: obras (1), accidente (2), avería (3), atasco (4), información meteorológica (5), información en carretera (6), información en túnel (7), y control de velocidad (8).

- *P2P_GR_n*: Identificador del grupo de comunicación P2P que se usa en el área en cuestión para el identificador de servicio emparejado. Se representa mediante una cadena de texto que no puede contener el carácter separador “,”.

ES.Registration.ERROR Este mensaje es devuelto por Group Server a un Environment Server cuando existe un problema en el registro de éste último. El único campo disponible es el de tipo de error:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=7). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *ERR_ID*: Identificador con el tipo de error. Por el momento, los tipos de error identificados son: servidor ya registrado (1), área no disponible para la localización (2), y error no definido (3).

ES.Registration.Update.Request Un Environment Server envía cada cierto tiempo un mensaje de actualización para soportar posibles cambios en los grupos de comunicación del área de servicios. Este mensaje no tiene ningún campo adicional, aparte del identificador:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=8). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.

ES.Registration.Update.Reply Group Server responde a los mensajes **ES.Registration.Update.Request** con este mensaje, para notificar cambios en los grupos de comunicación P2P del área de servicios. Los campos son equivalentes al mensaje **ES.Registration.OK**:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=9). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *SRV_ID_n*: Identificador de servicio. Es un dato entero de hasta 32 bits, y los posibles valores son los mismos indicados en el mensaje **ES.Registration.OK**.
- *P2P_GR_n*: Identificador del grupo de comunicación P2P que se usa en el área en cuestión para el identificador de servicio emparejado. Se representa mediante una cadena de texto que no puede contener el carácter separador “,”.

Neighbour_Groups.Request Este mensaje se usa en el mecanismo de reenvío de mensajes en Environment Server. Con él se piden los grupos de comunicación de las áreas adyacentes que pertenecen a un servicio. Los campos incluidos son:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=10). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *SRV_ID*: Identificador de servicio. Es un dato entero de hasta 32 bits, y los posibles valores son los mismos indicados en el mensaje *ES_Registration_OK*.

Neighbour_Groups_Reply Representa la respuesta a *Neighbour_Groups_Request*, y contiene los grupos de comunicación de las áreas adyacentes para el servicio en el que se desean reenviar mensajes. Los campos del mensaje son:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=11). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *P2P_GR_n*: Identificador del grupo de comunicación P2P que se usa en una de las áreas adyacentes para el identificador de servicio emparejado. Se representa mediante una cadena de texto que no puede contener el carácter separador “,”.

C.4. Mensajes Utilizados en la Notificación de Eventos

Todos los campos de los que están compuestos los paquetes usados en la notificación de eventos se ilustran en la Fig. C.3. A continuación se detalla la estructura de cada uno de ellos¹.

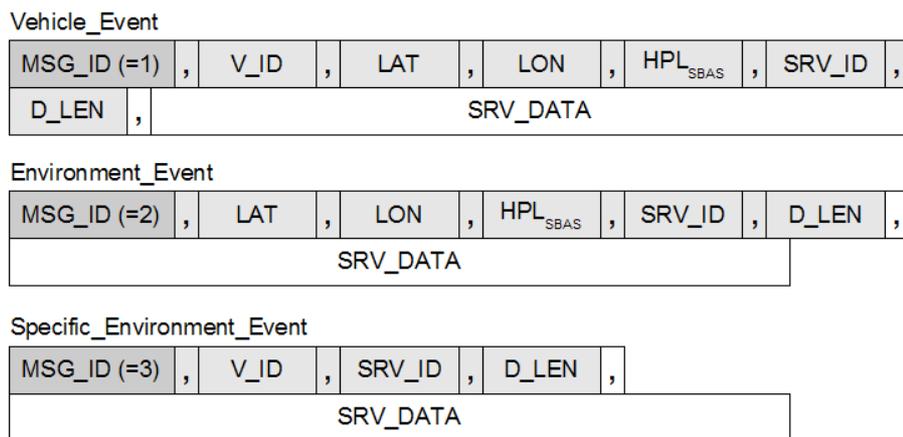


Figura C.3: Formato de mensajes en la notificación de eventos

¹Es importante remarcar de nuevo que estos mensajes se encapsulan en paquetes de la red P2P JXTA, por lo que los identificadores de paquete escogidos han sido distintos

Vehicle_Event Este mensaje es utilizado por los vehículos para lanzar eventos relativos a un servicio disponible en el área actual. Los campos utilizados son:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=1). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *V_ID*: Identificador del vehículo, representado mediante una cadena de texto que no puede contener el carácter separador “;”.
- *LAT*: Latitud, en grados, de la posición del vehículo que envía el evento. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *LON*: Longitud, en grados, de la posición del vehículo que envía el evento. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *HPL_{SBAS}*: Factor de integridad de la posición, en metros. Éste es calculado según la sección 4.4.
- *SRV_ID*: Identificador del servicio para el que se envía el mensaje. Es un dato entero de hasta 32 bits. Los identificadores disponibles hasta el momento consideran los siguientes servicios: obras (1), accidente (2), avería (3), atasco (4), información meteorológica (5), información en carretera (6), información en túnel (7), y control de velocidad (8).
- *D_LEN*: Longitud del campo de datos del mensaje, en bytes, codificado mediante un número natural de hasta 31 bits.
- *SRV_DATA*: Datos relativos al evento notificado en el mensaje, y propios de cada servicio.

Environment_Event Mensaje utilizado en las notificaciones de eventos realizadas desde un Environment Server, a los vehículos conectados a un servicio en el área. Estos mensajes son utilizados en el mecanismo de retransmisión de eventos, por lo que disponen de información de localización proveniente del vehículo origen. Esta información puede, no obstante, obviarse cuando se emiten mensajes procedentes de la infraestructura, dejando vacíos estos campos. El identificador del vehículo no es retransmitido, ya que esta información es de interés para la infraestructura (Environment Server). El total de los campos utilizados son:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=2). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *LAT*: Latitud, en grados, de la posición del vehículo que envió el evento. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *LON*: Longitud, en grados, de la posición del vehículo que envió el evento. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- *HPL_{SBAS}*: Factor de integridad de la posición, en metros. Éste es calculado según la sección 4.4.

- *SRV_ID*: Identificador del servicio para el que se envía el mensaje. Es un dato entero de hasta 32 bits. Los identificadores disponibles son los mismos que en el mensaje *Vehicle_Event*.
- *D_LEN*: Longitud del campo de datos del mensaje, en bytes, codificado mediante un número natural de hasta 31 bits.
- *SRV_DATA*: Datos relativos al evento notificado en el mensaje, y propios de cada servicio.

Specific_Environment_Event Este mensaje sirve para enviar un mensaje desde Environment Server hasta un vehículo concreto. Los campos disponibles son:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=3). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *V_ID*: Identificador del vehículo, representado mediante una cadena de texto que no puede contener el carácter separador “,”.
- *SRV_ID*: Identificador del servicio para el que se envía el mensaje. Es un dato entero de hasta 32 bits. Los identificadores disponibles son los mismos que en el mensaje *Vehicle_Event*.
- *D_LEN*: Longitud del campo de datos del mensaje, según un número de bytes codificado mediante un número natural de hasta 31 bits.
- *SRV_DATA*: Datos relativos al evento notificado en el mensaje, y propios de cada servicio.

C.5. Mensajes Utilizados entre el Vehículo e Internet Traffic Operation Server

Todos los campos de los que están compuestos los paquetes que se usan en la comunicación entre el vehículo e Internet Traffic Operation Server se ilustran en la Fig. C.4. A continuación se detalla la estructura de cada uno de ellos.

Area_Events_Request Este mensaje es utilizado por el vehículo en el cambio de área de servicios, para solicitar los eventos relacionados con las incidencias que están vigentes en la nueva área. Los campos incluidos son los siguientes:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=12). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- *#POINTS*: Número de coordenadas (puntos) que conforman el polígono del nuevo área de servicios. Es un número natural de hasta 31 bits.
- *LAT_n*: Latitud, en grados, de la *n*-ésima coordenada del polígono del área. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.

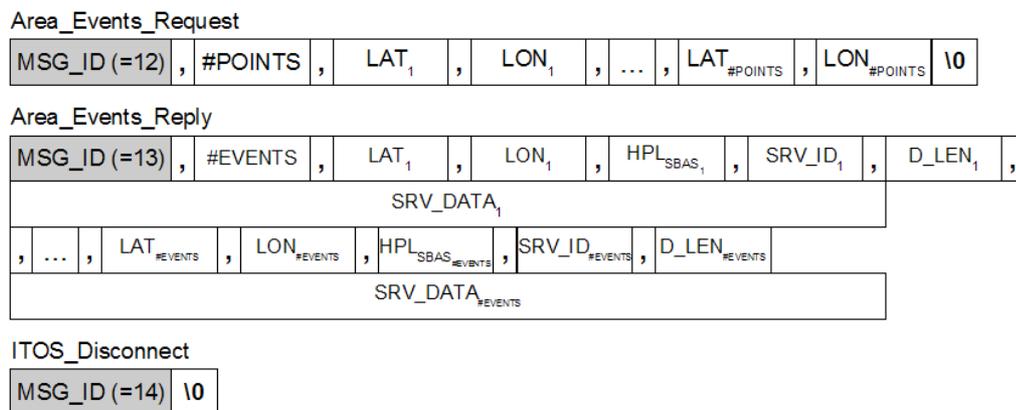


Figura C.4: Formato de mensajes en la comunicación Vehículo-Internet Traffic Operation Server

- LON_n : Longitud, en grados, de la n -ésima coordenada del polígono del área. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.

Area_Events_Reply Internet Traffic Operation Server responde a una solicitud **Area_Events_Request** con este mensaje. En él incluye los eventos relacionados con incidencias acaecidos en la zona especificada. Los campos incluidos son los siguientes:

- MSG_ID : Identificador del mensaje (=13). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.
- $\#EVENTS$: Número de eventos incluidos en el mensaje. Es un número natural de hasta 31 bits.
- LAT_n : Latitud, en grados, de la posición del evento n -ésimo. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- LON_n : Longitud, en grados, de la posición del evento n -ésimo. La codificación considera un valor real de hasta 64 bits.
- SRV_ID_n : Identificador de servicio del n -ésimo evento. Es un dato entero de hasta 32 bits. Los identificadores disponibles hasta el momento consideran los siguientes servicios: obras (1), accidente (2), avería (3), atasco (4), información meteorológica (5), información en carretera (6), información en túnel (7), y control de velocidad (8).
- D_LEN_n : Longitud del campo de datos del evento n -ésimo, según un número de bytes codificado mediante un número natural de hasta 31 bits.
- SRV_DATA_n : Datos relativos al evento n -ésimo.

ITOS_Disconnect Este mensaje es enviado por el vehículo para notificar a Internet Traffic Operation Server que no desea seguir realizando solicitudes de información

sobre eventos. El único campo que se incluye es el identificador de paquete:

- *MSG_ID*: Identificador del mensaje (=14). Este campo conforma un entero de hasta 32 bits.

