

UNIVERSIDAD DE DEUSTO

FACULTAD DE INGENIERÍA



TESIS DOCTORAL

**MIDDLEWARE PARA LA PLANIFICACIÓN
DINÁMICA Y ADAPTATIVA DE COMUNICACIONES
MULTIENLACE VEHÍCULO-TIERRA CON
REQUISITOS DE CALIDAD DE SERVICIO**

Autora

ITZIAR SALABERRIA LARRAURI

Director

ASIER PERALLOS RUIZ

BILBAO, JUNIO DE 2013

A mi familia.

Resumen

Las importantes inversiones en innovación tecnológica afrontadas por los operadores de transporte durante los últimos años han permitido generalizar la adopción de tecnologías inalámbricas que posibiliten la comunicación entre los vehículos y los centros de control de tráfico. Sin embargo, estas comunicaciones, que denominamos “vehículo-tierra”, siguen presentando una serie de retos relacionados con la disponibilidad e interrupción de la conectividad, cobertura y limitaciones de ancho de banda que han servido para motivar la realización de esta tesis.

Existen numerosos trabajos que a nivel de red abordan la optimización de las comunicaciones mediante la aplicación de técnicas de priorización de tráfico y control de la calidad de servicio. En esta tesis se propone un planteamiento diferente, instrumentalizando esta optimización a través del diseño de servicios de gestión de las comunicaciones que puedan ser proporcionados a nivel de capa de aplicación y desplegados en entornos de vehiculares.

El resultado es un middleware para la planificación y gestión dinámica de comunicaciones en el ámbito vehicular que incorpora capacidades innovadoras tales como combinar mecanismos de priorización y control de calidad de servicio, y realizar una gestión y monitorización continua del canal de comunicaciones, que posibilita la selección del enlace de red más adecuado en cada momento para llevar a cabo las comunicaciones, conmutando de enlace de forma transparente, de modo que las aplicaciones finales no vean interrumpida su comunicación. Como resultado, el sistema es capaz de optimizar el uso del ancho de banda disponible en la red, aumentando la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza más prioritaria. Además, el hecho de que haya sido diseñado a nivel de capa de aplicación, le confiere la flexibilidad suficiente para que su comportamiento pueda ser modificado y mejorado, especialmente a través de la integración de parámetros que recojan acontecimientos previos del sistema que a futuro le puedan dotar de capacidad de predicción y anticipación.

Todas estas bondades han sido validadas experimentalmente a través de una serie de pruebas en laboratorio realizadas bajo un conjunto de condiciones preestablecidas que reproducen condiciones de red y comunicaciones de escenarios de transporte reales. Concretamente se han llevado a cabo dos experimentos, centrándose el primero en la funcionalidad del sistema, y el segundo en la evaluación del rendimiento que aporta el middleware frente a otras soluciones adoptadas en la industria del transporte para la gestión de comunicaciones “vehículo-tierra”. Los resultados de los experimentos han demostrado que el sistema responde a los objetivos fijados en su diseño, optimizando el uso del ancho de banda disponible en la red, favoreciendo las comunicaciones más prioritarias, al mismo tiempo que éstas se llevan a cabo respetando siempre los requisitos de calidad de servicio fijados por las aplicaciones.

Abstract

The significant investments in technological innovation faced by transportation operators have enabled widespread adoption of wireless technologies in recent years, enabling communication between vehicles and traffic control centers. However, these communications, called "vehicle-to-ground", continue presenting challenges related to the availability and interruption of the connectivity, coverage and bandwidth limitations. These questions have motivated the realization of this PhD dissertation.

There are several studies that address network level communication optimization through the application of traffic prioritization and quality of service (QoS) control techniques. This thesis proposes a new approach, enabling the optimization by means of the design of communication management services that may be provided at the application layer and deployed in vehicular environments.

The result is a middleware for dynamic communication management in vehicular environments, which incorporates innovative capabilities such as the combination of prioritization and QoS control mechanisms. In addition, this system includes techniques for communications channel monitoring and management, which involves the selection of the most appropriate network link to carry out data transmissions. The system switches network links seamlessly so that applications do not detect communication disruptions. Consequently, the middleware is capable of optimizing the use of available bandwidth in the network, increasing the average transfer rate of the highest priority communications. Furthermore, as the system has been designed at application layer, it is flexible to modify and improve its performance, particularly by the integration of new parameters that enable to log its previous behavior, making system performance optimization possible based on predictive abilities.

All these advantages have been experimentally validated through several tests conducted in a laboratory under a set of preconfigured conditions. Specifically, we have conducted two experiments, one focused on the functionality of the system, and the other one focused on

performance evaluation by comparing the middleware with other solutions applied in the transportation industry for vehicle-to-ground communications management. The results obtained on both experiments were satisfactory. Therefore, the system fulfills the goals defined on its design, optimizing the use of available bandwidth in the network and favoring the highest priority requests, but the communications are always carried out in compliance with applications QoS requirements.

Agradecimientos

A Asier Perallos, por todo. Por haberme dado la oportunidad de trabajar en DeustoTech, e introducirme en el mundo de la investigación. Por empujarme en este proyecto, y su orientación e interés a lo largo de todo el proceso. Por dedicarme su tiempo, aun estando muy ocupado, ya que sin su criterio y opinión el resultado de este trabajo no hubiera sido el mismo.

A Jose Antonio Gorostiza y Roberto Pastor de EuskoTren por ser quienes me introdujeron en el ámbito de los sistemas ferroviarios, que durante los últimos ocho años han terminado ocupando gran parte de mi actividad en DeustoTech. Y a Iñigo Etxabe e Iñigo Odriozola de Datik por identificar una necesidad industrial real que a la postre ha servido para motivar la elaboración de esta tesis.

A mis compañeros de DeustoTech Mobility, por su generosidad estos últimos meses. Especialmente a Roberto Carballedo, con quien he trabajado más estrechamente estos años, y con quien he ido de la mano en los proyectos del sector ferrocarril, conocimiento que ha servido como punto de partida de esta tesis doctoral.

A Gorka Urquiola por su ayuda en la fase de experimentación, y a Hugo Landaluce, Asier Moreno y Eneko Osaba por echarme una mano durante esta última fase en la revisión de la memoria. Junto a ellos, a aquellos con los que tengo una relación más cercana y comparto más horas en DeustoTech: Ander Arambarri, Aitor Chertudi, Lucio Echebarria, Pablo Fernández y Asier San Nicolás, por hacer que el día a día sea tan agradable. Sin ellos todo hubiera sido mucho más complicado.

Y como no, a mi familia y amigos, especialmente a mi madre, Marisa, y a mis hermanos Xabi e Igor por su apoyo incondicional y su cariño. A Jorge Sánchez, por su paciencia estos últimos meses. Y a Ianire Bizkarra y Nerea Arizmendiarieta, por estar siempre ahí.

Eskerrik asko!

Tabla de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES	1
1.1 Definición del problema	2
1.2 Hipótesis y objetivos	4
1.2.1 Objetivos generales	4
1.2.2 Objetivos específicos y actividades.....	6
1.3 Metodología de la investigación.....	7
1.4 Estructura de la memoria	8
2. ESTADO DE LA TÉCNICA	11
2.1 Necesidades de las comunicaciones vehiculares	12
2.1.1 Arquitectura ITS cooperativa del ETSI	13
2.1.2 Comunicaciones inalámbricas multienlace	14
2.1.3 Arquitectura de comunicaciones en unidades embarcadas	15
2.1.4 Acceso a redes de banda ancha	16
2.1.5 Gestión de calidad de servicio.....	19
2.1.6 Middleware de comunicaciones	21
2.1.7 Mecanismos de seguridad	22
2.2 Optimización del uso de redes inalámbricas en entornos de movilidad	23
2.2.1 Regulación de tráfico en redes WiFi.....	24
2.2.2 Planificación de tráfico multienlace.....	27
2.2.3 Priorización basada en la diferenciación de tráfico	32

2.2.4	Acceso inteligente a redes heterogéneas	37
2.2.5	Gestión de tráfico y control de QoS en base a características de red	39
2.2.6	Selección dinámica de enlace basada en parámetros de QoS	41
2.3	Arquitecturas de comunicaciones en la industria del transporte	43
2.3.1	Proyecto SAFEDMI	43
2.3.2	Proyecto TRAINCOM	46
2.3.3	Proyecto de conectividad inalámbrica de EuskoTren	49
2.3.4	Proyecto BOSS	53
2.3.5	Proyecto e-Bus	55
3.	IDENTIFICACIÓN DE CARENCIAS Y OPORTUNIDADES DE MEJORA	59
3.1	Análisis de los distintos enfoques de optimización de redes	60
3.2	Análisis de las distintas arquitecturas de comunicaciones	62
4.	MIDDLEWARE DE COMUNICACIONES	65
4.1	Especificación de capacidades	66
4.1.1	Priorización de comunicaciones y control de la QoS	66
4.1.2	Gestión y monitorización del canal de comunicaciones	67
4.1.3	Regulación de la comunicación entre aplicaciones finales	68
4.1.4	Relación entre características del middleware y objetivos de la tesis	69
4.2	Arquitectura de comunicaciones “vehículo-tierra”	69
4.2.1	Máster de Comunicaciones Embarcado (MCE)	72
4.2.2	Máster de Comunicaciones de Tierra (MCT)	74
4.3	Diseño del sistema	76
4.3.1	Mecanismo para la gestión del canal	76
4.3.2	Mecanismo de priorización	81
4.3.3	Procedimiento de control de QoS	87
4.3.4	Protocolos de comunicación	89
4.4	Herramienta de administración y monitorización	98
4.4.1	Monitorización del estado de las comunicaciones	99

4.4.2	Consulta del estado de conectividad de los vehículos.....	100
4.4.3	Consulta del estado de los interfaces de red habilitados en el vehículo	100
4.4.4	Generación de estadísticas.....	101
4.4.5	Configuración.....	102
5.	EXPERIMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS	105
5.1	Estrategia de validación de la hipótesis.....	105
5.1.1	Validación de la primera parte de la hipótesis.....	106
5.1.2	Validación de la segunda parte de la hipótesis.....	107
5.2	Experimentación funcional.....	108
5.2.1	Escenario de prueba.....	108
5.2.2	Experimento y resultados	111
5.2.3	Análisis de los resultados.....	117
5.3	Experimentación comparativa	119
5.3.1	Sistemas de comunicación incluidos en el experimento.....	119
5.3.1	Escenario de prueba.....	122
5.3.2	Experimento y resultados	127
5.3.3	Análisis de los resultados.....	139
6.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO	147
6.1	Contribuciones	147
6.1.1	Motivaciones y objetivos.....	148
6.1.2	Capacidades del middleware de comunicaciones.....	150
6.2	Validación de la hipótesis.....	151
6.3	Líneas futuras de trabajo	153
6.4	Consideraciones finales.....	156

Índice de Figuras

Figura 1.1: Metodología de la investigación	7
Figura 2.1: Arquitectura ITS cooperativa del ETSI	13
Figura 2.2: Red embarcada con gateway inalámbrico multienlace para la conexión a Internet.....	15
Figura 2.3: Arquitectura para una solución de regulación de tráfico en redes WiFi	25
Figura 2.4: Modelo de gestión de tráfico basado en <i>agente/gestor</i>	26
Figura 2.5: Representación de fragmento de mapa de ancho de banda	30
Figura 2.6: Planificación de comunicaciones en el vehículo basada en mapas de tráfico	31
Figura 2.7: Arquitectura para priorización de comunicaciones “tren-tierra” con diferenciación de tráfico.....	33
Figura 2.8: Arquitectura para la comunicación ininterrumpida punto a punto basada en software libre	35
Figura 2.9: Arquitectura del sistema MIPGATE	37
Figura 2.10: Escenarios para comunicaciones inalámbricas con el DMI en el proyecto SAFEDMI	44
Figura 2.11: Arquitectura de comunicaciones inalámbrica (SAFEDMI)	45
Figura 2.12: Arquitectura de Comunicaciones TRAINCOM.....	47
Figura 2.13: Arquitectura TRAINCOM basada en tecnología Jini.....	48
Figura 2.14: Arquitectura de la plataforma de conectividad inalámbrica de EuskoTren.....	51
Figura 2.15: Arquitectura del proyecto BOSS.....	54
Figura 2.16: Arquitectura global de comunicaciones e-Bus.....	56
Figura 4.1: Arquitectura general del Middleware de Comunicaciones.....	72
Figura 4.2: Máster de Comunicaciones Embarcado.....	73
Figura 4.3: Medición de ancho de banda a través del middleware	74
Figura 4.4: Máster de Comunicaciones de Tierra.....	74
Figura 4.5: Módulos funcionales del MCT y del MCE, y su integración.....	76
Figura 4.6: Algoritmo de selección de enlace activo en el MCE	78
Figura 4.7: Procedimiento de cambio de enlace	80

Figura 4.8: Combinación de criterios de prioridad aplicados en el desarrollo del middleware	84
Figura 4.9: Priorización de comunicaciones en el MCE	85
Figura 4.10: Planificación de las comunicaciones "vehículo-tierra"	86
Figura 4.11: Planificación de comunicaciones vehículo-tierra desde el MCT.....	88
Figura 4.12: Comandos definidos en el protocolo entre el MCT y el MCE.....	91
Figura 4.13: Protocolo establecido para la comunicación con las aplicaciones	94
Figura 4.14: Flujos de transmisión vehículo a infraestructura de centro de control	97
Figura 4.15: Proceso de generación y servicio de peticiones	97
Figura 4.16: Monitorización del estado de las comunicaciones (en MCT)	99
Figura 4.17: Consulta del estado de conectividad de los vehículos (en MCT)	100
Figura 4.18: Consulta del estado de las interfaces de red (en MCE).....	101
Figura 4.19: Ancho de banda de las interfaces de red disponibles (en MCE).....	101
Figura 4.20: Generación de estadísticas (en MCT).....	102
Figura 4.21: Configuración (en MCT).....	102
Figura 5.1: Despliegue de las pruebas funcionales	109
Figura 5.2: Ruta de la medición de valores de ancho de banda	109
Figura 5.3: Valores de ancho de banda aplicados en la experimentación funcional.....	110
Figura 5.4: Valores de ancho de banda del enlace activo a lo largo de la experimentación funcional	112
Figura 5.5: Ancho de banda consumido por las comunicaciones a lo largo de la prueba	113
Figura 5.6: Inicio de la petición de prioridad baja	114
Figura 5.7: Pausa de la comunicación de prioridad baja por falta de ancho de banda	114
Figura 5.8: Priorización de la petición alta.....	115
Figura 5.9: Subida de ancho de banda que permite atender todas las comunicaciones.....	115
Figura 5.10: Cambio de enlace transparente	116
Figura 5.11: Despliegue de las pruebas comparativas.....	125
Figura 5.12: Valores de ancho de banda aplicados en la experimentación comparativa	126
Figura 5.13: Ancho de banda del enlace activo por el middleware a lo largo de la experimentación comparativa....	127
Figura 5.14: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (middleware)	128
Figura 5.15: Inicio de la comunicación de prioridad baja (middleware).....	129
Figura 5.16: Priorización de la comunicación de prioridad normal (middleware).....	129
Figura 5.17: Pausa petición de prioridad normal, y comunicación de prioridad baja completada (middleware).....	130
Figura 5.18: Inicio de la comunicación de prioridad normal por subida de ancho de banda (middleware)	130
Figura 5.19: Fin de la comunicación alta y ajuste de ancho de banda de la comunicación normal (middleware).....	131
Figura 5.20: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (sistema Linux)	132

Figura 5.21: Ancho de banda insuficiente para cubrir los requisitos de todas las comunicaciones (sistema Linux) ..	133
Figura 5.22: Subida de ancho de banda y ajuste de tasas de transferencia (sistema Linux)	133
Figura 5.23: Finalización de la comunicación de prioridad normal (sistema Linux)	134
Figura 5.24: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (sistema EuskoTren)	135
Figura 5.25: Comunicaciones alta y normal activas (sistema EuskoTren)	136
Figura 5.26: Inicio de la transmisión de la comunicación baja (sistema EuskoTren)	136
Figura 5.27: Comunicaciones alta, normal y baja activas (sistema EuskoTren)	137
Figura 5.28: Comunicación de prioridad baja completada (sistema EuskoTren)	137
Figura 5.29: Comunicación de prioridad normal completada (sistema EuskoTren)	138
Figura 5.30: Comunicación de prioridad alta activa (sistema EuskoTren)	138
Figura 5.31: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (modificación middleware)	144

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Actividades más relevantes y objetivo específico al que contribuyen.....	7
Tabla 2.1: Reglas para la selección de red.....	42
Tabla 2.2: Aplicabilidad de tecnologías inalámbricas en diferentes escenarios.....	44
Tabla 3.1: Mecanismos para la optimización del uso de las redes inalámbricas en entornos de movilidad.....	61
Tabla 3.2: Mecanismos empleados en los diferentes proyectos de la industria del transporte.....	63
Tabla 4.1: Relación de las características del middleware y los objetivos de la tesis.....	69
Tabla 4.2: Módulos funcionales del MCE y MCT.....	75
Tabla 4.3: Comandos relacionados con el establecimiento y cambios de enlace (protocolo MCT y MCE).....	92
Tabla 4.4: Comandos relacionados con la transmisión de datos (protocolo MCT y MCE).....	93
Tabla 4.5: Comandos para la gestión de las peticiones de las aplicaciones (protocolo MCT y MCE).....	93
Tabla 4.6: Comandos para la configuración remota del MCE (protocolo MCT y MCE).....	93
Tabla 4.7: Mensaje de confirmación (protocolo MCT y MCE).....	93
Tabla 4.8: Comandos de establecimiento de conexión (protocolo aplicaciones).....	95
Tabla 4.9: Comandos de gestión de las peticiones de las aplicaciones (protocolo aplicaciones).....	95
Tabla 4.10: Comandos relacionados con la transmisión de datos (protocolo aplicaciones).....	96
Tabla 4.11: Mensaje de confirmación (protocolo aplicaciones).....	96
Tabla 5.1: Características de las aplicaciones finales de la experimentación funcional.....	111
Tabla 5.2: Validación de la primera parte de la hipótesis.....	118
Tabla 5.3: Capacidades de los sistemas evaluados en la experimentación comparativa.....	123
Tabla 5.4: Características de las aplicaciones finales involucradas en la experimentación comparativa.....	126
Tabla 5.5: Comparativa de los tres sistemas que han formado parte de la experimentación.....	141
Tabla 5.6: Comparativa incluyendo una nueva prueba del middleware con un parámetro adicional.....	145

Capítulo 1

Introducción y Motivaciones

Los avances producidos dentro del área de las telecomunicaciones han permitido un desarrollo progresivo de sistemas basados en comunicaciones inalámbricas en diversos ámbitos, entre los que se incluye el transporte.

Son numerosos los trabajos de investigación que se centran en comunicaciones vehiculares permitiendo tanto el establecimiento de comunicaciones V2V (Vehículo a Vehículo) como V2I (Vehículo a Infraestructura), y en consecuencia el despliegue de sistemas y servicios que posibiliten, entre otras cosas, mayores niveles de seguridad en las carreteras, además de una gestión de tráfico mejorada [Sichitiu+08, Zhu+09].

Por otro lado, las empresas proveedoras de servicios de transporte están cada vez más interesadas en el establecimiento de sistemas de conectividad inalámbrica que les permita la comunicación remota con su flota de vehículos, mejorando su desempeño diario (gestión de flotas, explotación, seguridad, mantenimiento, diagnóstico, etc.), así como el servicio ofrecido a los usuarios del medio.

Así, el establecimiento de comunicaciones inalámbricas entre los vehículos y los centros de gestión (o de tierra) de estas compañías de transporte está facilitando el desarrollo y despliegue de nuevos servicios o aplicaciones de diferente naturaleza. Sin embargo, el establecimiento, mantenimiento y gestión de estas comunicaciones no es una tarea trivial, siendo necesaria la definición de una serie de mecanismos que permitan tanto gestionar la diferente naturaleza y necesidades de comunicación de las aplicaciones, como el estado cambiante de conectividad a las redes inalámbricas, dada la movilidad y por ende los cambios de ubicación del vehículo [Rovcanin+11].

En este sentido, y con el propósito de habilitar una conectividad vehicular inalámbrica continua, la tendencia es dotar al vehículo de diversas tecnologías de acceso inalámbrico, permitiendo una conectividad multienlace que posibilite las comunicaciones a través de diferentes medios, dependiendo del estado de la red y características de cada tecnología de comunicación [Ramesh+10, Sanmateu+02, Wu+02].

A la hora de gestionar este tipo de comunicaciones, interfieren diferentes aspectos relacionados con los requisitos propios de la información que se desea transmitir (volumen de información, tipo de datos, criticidad, tasa de transferencia mínima requerida, etc.), y con los diferentes escenarios de conectividad, que influyen directamente en las propiedades de red y, por tanto, en la respuesta que el sistema pueda dar a esas necesidades de comunicación de las aplicaciones [Brussel10].

En definitiva, el progreso tecnológico dentro del ámbito de las comunicaciones inalámbricas está permitiendo el desarrollo de nuevos tipos de aplicaciones y servicios en la industria del transporte. Por consiguiente, cada vez adquiere más importancia establecer mecanismos que den soporte dinámico a las necesidades de comunicación de estas aplicaciones [Martínez06a] de acuerdo a las características o propiedades cambiantes de las redes de acceso disponibles.

1.1 Definición del problema

Las comunicaciones vehiculares presentan una serie de problemas o retos relacionados con la disponibilidad e interrupción de la conectividad, cobertura, y limitaciones de ancho de banda [Marrero+08]. Además, dentro del ámbito del transporte se están desplegando aplicaciones de diferente naturaleza que presentan diferentes necesidades de comunicación [Bychkovsky+06, Deshpande+09, Eriksson+08, Ott+05]. Estas aplicaciones suelen compartir el medio de transmisión, compitiendo por el uso del ancho de banda [Fuehrer+07]. El problema surge cuando el ancho de banda disponible en la red es menor al ancho de banda demandado por estas aplicaciones. En estos casos se producen problemas de cuello de botella, o incluso la monopolización del ancho de banda por parte de ciertas aplicaciones [Gutierrez+10]. Además, dependiendo de la funcionalidad o cometido de estas aplicaciones, la transmisión de información de una de ellas puede ser más prioritaria que la de otra dada la criticidad de la información que transmite [Rosi+08].

Existen numerosos trabajos relacionados con la optimización de las comunicaciones, incluyendo la priorización de tráfico y control de calidad de servicio (Quality of Service, QoS). Sin embargo, estos trabajos suelen estar habitualmente centrados en las redes pero no tanto en las aplicaciones o en los servicios que hacen uso de dichas redes [Martínez06a]. Estos trabajos centrados en el nivel de red, suelen establecer mecanismos que permiten realizar un control de tráfico en base a la priorización de flujos de tráfico de acuerdo a su

origen. En esta tesis se propone un planteamiento más novedoso, invirtiendo el enfoque clásico, y centrando la solución en servicios de gestión de las comunicaciones que puedan ser proporcionadas a nivel de aplicación.

Por otro lado, muchas soluciones de priorización de tráfico están orientadas a redes cableadas, y no se ajustan a los cambios producidos en el estado y conectividad de las redes inalámbricas. En este sentido, en un entorno móvil como el vehicular, surge la necesidad de monitorizar en tiempo real las condiciones de red, permitiendo adaptar la planificación de las comunicaciones de forma dinámica, posibilitando a su vez un control de QoS adaptativo [Brussel10, Jeney+07, Martínez06a].

A nivel de software existen soluciones generalmente referenciadas con el término middleware, que permiten el despliegue de servicios distribuidos capaces de hacer que las aplicaciones se abstraigan de las cuestiones relacionadas con la gestión de las comunicaciones. Sin embargo, los middleware existentes aún no ofrecen mecanismos que garanticen la QoS, además de no gestionar y monitorizar el estado de las redes, permitiendo que las circunstancias de red influyan decisivamente en el rendimiento percibido por las aplicaciones [Martins+08, Martins12].

En lo que a conectividad inalámbrica vehicular se refiere, el establecimiento de conectividad continua que permita el acceso a Internet, y por consiguiente la comunicación de aplicaciones embarcadas con aquellas ubicadas en puntos fijos de la infraestructura de transporte, es posible a través de la combinación de diferentes tecnologías inalámbricas en el vehículo [Pareit+07, Fokum+10, Steuer+08]. En este sentido, se hace necesaria la habilitación de una serie de mecanismos para la gestión de dicha conectividad en movilidad, dado que el vehículo avanzará de un área de cobertura a otra, provocando cambios en las capacidades y disponibilidad de las diferentes redes de acceso dentro de alcance. Por tanto, teniendo en cuenta la influencia de los cambios de red en las comunicaciones de las aplicaciones, surge la necesidad de gestionar estos cambios de conectividad, sin que repercuta de forma negativa a la continuidad de las transmisiones de datos, produciendo interrupciones en las mismas.

Para hacer frente a este tipo de problemática y permitir el diseño de software conectado de forma ubicua en un entorno vehicular como el que se presenta, esta tesis aborda la necesidad de diseñar un sistema intermedio o middleware [Bishop+03, Gehlen+06, Navet+05, Martins12] que permita gestionar este tipo de cuestiones abstrayendo a las aplicaciones finales de los aspectos relacionados con el mecanismo de comunicaciones, así como establecer esquemas de priorización de las comunicaciones de acuerdo al estado de la red [Hwang+08], respondiendo a su vez a los requisitos de QoS [Hardy02, Hancock+04, Brun+06, Hablinguer04] de las aplicaciones (sobre todo en lo que a ancho de banda y su criticidad se refiere), incrementando así el rendimiento global del sistema [Ramesh+10].

1.2 Hipótesis y objetivos

De acuerdo a la problemática planteada anteriormente nace la propuesta de esta tesis, que se centra en las implicaciones que pueden tener las limitaciones de ancho de banda y la variabilidad de un entorno móvil a la hora de responder a la demanda de comunicaciones y los requisitos de QoS de las aplicaciones. Así, con el problema identificado, se define la siguiente hipótesis:

Hipótesis: “Es posible desarrollar un middleware de comunicaciones para entornos vehiculares, que teniendo en consideración criterios de calidad del servicio de las aplicaciones, monitorizando el estado de las redes para la selección del enlace más favorable en cada momento, y realizando una priorización dinámica y adaptativa de las peticiones de comunicación, sea capaz de optimizar el uso del ancho de banda disponible en la red, aumentando la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza más prioritaria”.

En consonancia con la hipótesis anterior, el objetivo fundamental de la tesis es *diseñar un middleware para la planificación y gestión dinámica de comunicaciones en el ámbito vehicular*, basado en la monitorización y gestión del estado de la red, adecuando el tráfico generado en base a la naturaleza y necesidades de las aplicaciones, aplicando un control de QoS, permitiendo así optimizar el uso de las capacidades de red disponibles.

Por tanto, en este trabajo se aborda la gestión de tráfico generado en las comunicaciones entre aplicaciones embarcadas en los vehículos y aquellas instaladas en puntos fijos de la infraestructura de las compañías de transporte, a los que nos referiremos en adelante como sistemas de tierra o centros de control. Siendo el objetivo final la optimización, a través de servicios middleware a nivel de aplicación, de la planificación de las comunicaciones en base a las capacidades de las redes inalámbricas dentro del alcance del vehículo, y las necesidades de comunicación y requisitos de QoS de las diferentes aplicaciones finales.

1.2.1 Objetivos generales

Las aportaciones y mejoras que propone esta tesis pueden identificarse a través de los requisitos generales definidos para el desarrollo del middleware de comunicaciones que se plantea, que son:

- **Respuesta a las necesidades de QoS demandadas por las aplicaciones.** Este sistema responderá a las demandas de comunicación de las aplicaciones de tierra y embarcadas de diferente naturaleza que precisen comunicarse de forma remota estableciendo lo que denominaremos comunicaciones vehículo-tierra. De esta

manera, el sistema indicará a las aplicaciones finales cuándo pueden iniciar el proceso de comunicación, estableciendo un ancho de banda adecuado para dicha comunicación de acuerdo al estado de conectividad del sistema, y los requisitos de QoS indicados por la aplicación demandante para cada comunicación.

Por tanto, la gestión de las comunicaciones se llevará a cabo de acuerdo a la demanda de comunicación de las aplicaciones y sus requisitos de QoS, y el estado de la red. Así, los cambios del estado de conectividad influirán directamente en las comunicaciones activas, permitiendo una gestión dinámica de las mismas.

En lo que a gestión de QoS se refiere, la idea es que se haga una asignación de ancho de banda a las diferentes comunicaciones de acuerdo a los requisitos establecidos por las aplicaciones involucradas, posibilitando ajustar los valores asignados dependiendo del ancho de banda total disponible en cada momento.

- **Priorización dinámica de las comunicaciones.** Para poder llevar a cabo la priorización de las comunicaciones, el sistema definirá una serie de parámetros (variables y estáticos) que permitirán determinar qué comunicaciones son más críticas, y teniendo en cuenta la situación de conectividad y el ancho de banda disponible, actuar en consecuencia a la hora de priorizarlas.

Los parámetros estáticos están relacionados con las necesidades de calidad del servicio y requisitos determinados por la naturaleza de las aplicaciones finales, y no varían a lo largo del tiempo.

Por otro lado, el sistema de priorización se retroalimentará de información correspondiente a comportamientos previos que almacenará en forma de históricos. De esta manera, el sistema tendrá en cuenta una serie de factores dinámicos (variables en el tiempo), permitiendo así reajustar los criterios aplicados en el mecanismo de priorización y optimizar así su funcionamiento.

- **Selección transparente del mejor enlace para las comunicaciones.** La arquitectura de comunicaciones propuesta establecerá varios tipos de interfaces de red inalámbricas para las comunicaciones, seleccionando la más favorable (en términos de ancho de banda) para llevar a cabo las transmisiones de datos. Esto permite maximizar la capacidad de comunicación y que haya una continuidad en las comunicaciones vehículo-tierra, siendo el cambio de enlace activo transparente para las aplicaciones finales.

1.2.2 Objetivos específicos y actividades

Los objetivos específicos de esta tesis, en consonancia con los objetivos definidos y con las acciones necesarias para la confirmación de la hipótesis enunciada, podrían agruparse en cuatro:

- **Definir y diseñar la arquitectura de comunicaciones [OE1].** Es decir, especificar todos los aspectos relacionados con la funcionalidad del sistema, tanto desde el punto de vista de la priorización de comunicaciones y gestión y monitorización de enlaces de red, como desde el punto de vista de la intercomunicación de subsistemas y protocolos.
- **Desarrollar el middleware de comunicaciones [OE2].** Se trata de implementar el software de la plataforma de comunicaciones propuesta. Así, el desarrollo contará con dos elementos que serán los encargados de la gestión de las comunicaciones vehículo-tierra, y un servicio adicional que permitirá la gestión y monitorización del estado de los diferentes enlaces de red disponibles.
- **Configurar el entorno de pruebas [OE3].** Se trata de configurar una serie de escenarios predefinidos que permitan evaluar el comportamiento del sistema, definiendo un conjunto de solicitudes de comunicación por parte de las aplicaciones y unas condiciones de red predeterminadas. Así, en este banco de pruebas se incluirán aplicaciones de diferente naturaleza (multimedia, de transferencia de documentos, posicionamiento, intercambio de mensajes, etc.) que son habituales en el ámbito del transporte, y que generarán diferentes tipos de tráfico. Además, se desarrollará un simulador de aplicaciones que permita generar peticiones de comunicación tanto desde el ámbito de tierra como desde el embarcado, permitiendo configurar diferentes parámetros de QoS y poder depurar así el funcionamiento del sistema. El objetivo es, por tanto, evaluar el comportamiento del sistema lanzando diferentes peticiones de comunicación y causando cambios en el estado de los enlaces de red con el fin de analizar si los resultados obtenidos son los esperados.
- **Evaluar los resultados del uso del sistema [OE4].** Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento del sistema se podrán evaluar los resultados obtenidos, valorando si éstos son los esperados, y probablemente hallar puntos de mejora que permitan optimizar el mecanismo de planificación y gestión dinámica de comunicaciones.

En cuanto a las actividades que posibilitarán la consecución de los objetivos generales y, por consiguiente, la validación de la hipótesis, la **Tabla 1.1** recoge algunas de las más representativas y su vínculo con el objetivo específico al que contribuyen. Cabe destacar que la información mostrada no pretende ser un exhaustivo plan del trabajo seguido en esta

tesis, la relación sin duda sería en ese caso mucho más extensa, sino tan solo mostrar algunas de las actividades más relevantes desde el punto de vista científico.

ACTIVIDADES	OBJ. ESP.
Establecimiento del mecanismo de priorización (criterios y mecanismo)	OE1
Definición del protocolo de comunicaciones vehículo-tierra	OE1
Diseño de la gestión y monitorización de los enlaces de comunicación	OE1
Definición del protocolo de comunicaciones con las aplicaciones finales	OE1
Desarrollo de la plataforma de comunicaciones	OE2
Desarrollo de la lógica de priorización de peticiones de comunicación	OE2
Desarrollo del servicio de monitorización de enlaces de red	OE2
Desarrollo de un simulador de aplicaciones finales	OE3
Diseño y configuración del entorno de pruebas	OE3
Ejecución de las pruebas en laboratorio	OE3
Evaluación de los resultados de las pruebas	OE4

Tabla 1.1: Actividades más relevantes y objetivo específico al que contribuyen

1.3 Metodología de la investigación

En esta sección se expone el método de trabajo seguido para cumplir con los objetivos marcados en esta tesis. De esta manera, tal como ilustra la **Figura 1.1**, el proceso de investigación seguido durante esta tesis puede organizarse en seis etapas que involucran una continua retroalimentación de conocimiento.

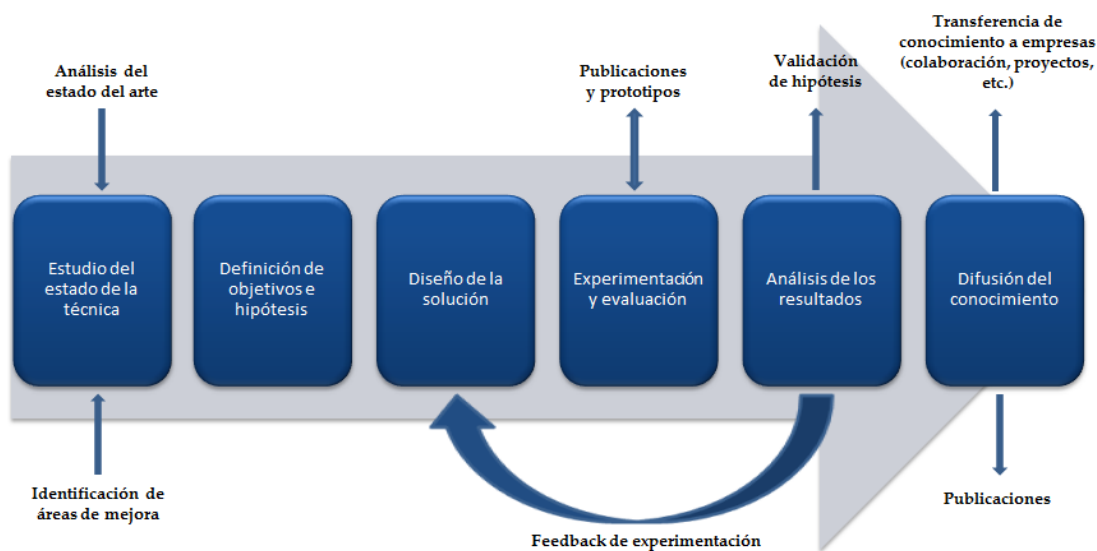


Figura 1.1: Metodología de la investigación

Así, la metodología que se ha definido para el desarrollo de la tesis se basa en los siguientes puntos:

1. Estudio del estado de la técnica, de tal manera que se tenga un conocimiento actualizado sobre el estado del arte en la materia, con el fin de detectar algunas limitaciones, necesidades u oportunidades de mejora presentes en el área de conocimiento en el que se entronca la tesis
2. Definición de objetivos e hipótesis, que constituirá el enlace de unión entre los problemas y la solución.
3. Diseño de la solución que solventa los problemas en los que se centra la tesis.
4. Experimentación y evaluación de la solución que permita medir de forma cuantitativa el resultado obtenido.
5. Validación con la comunidad científica, de tal forma que se determine la relevancia de la investigación
6. Adaptación de la solución de acuerdo a la retroalimentación obtenida desde la comunidad científica, y a los resultados de la experimentación.
7. Análisis de los resultados, permitiendo la validación de la hipótesis planteada.
8. Difusión del conocimiento obtenido durante todo el proceso de investigación en forma de producción científica, y transferencia de conocimiento a empresas beneficiarias de proyectos relacionados.

1.4 Estructura de la memoria

La presente memoria, la cual describe el trabajo de tesis realizado y el estudio previo del estado del arte, se encuentra estructurada en cinco capítulos cada uno de los cuales aborda los siguientes contenidos:

- El *primer capítulo*, el presente, ha proporcionado una visión superficial del estado general del ámbito de trabajo de la tesis, así como las motivaciones generales que han propiciado su realización. Se han identificado además los problemas que esta tesis pretende resolver, así como las características más relevantes de la solución propuesta, la hipótesis de trabajo de la tesis, los objetivos que guían su desarrollo y sus principales aportaciones.
- El *segundo capítulo* proporciona al lector una visión general del estado del arte correspondiente a las comunicaciones inalámbricas y a su aplicación en el transporte, concretamente en la habilitación de conectividad entre vehículos y

centros de gestión de la infraestructura de transporte en tierra. De esta forma, a lo largo de este capítulo se identifican una serie de necesidades a la hora de habilitar este tipo de comunicaciones vehiculares, se describen soluciones diseñadas para optimizar el uso de las redes inalámbricas en entornos de movilidad, así como una proyectos desarrollados en la industria del transporte que permiten habilitar este tipo de comunicaciones.

- El *tercer capítulo*, tras haber realizado un análisis del estado de la técnica, identifica las limitaciones de las soluciones analizadas, así como una serie de oportunidades de mejora que serán abordadas a lo largo de la tesis.
- El *cuarto capítulo* describe el middleware que nace de este trabajo de tesis. Primero se especifican las capacidades principales del mismo, para después profundizar en su diseño y arquitectura, así como en los algoritmos y mecanismos empleados en su desarrollo.
- El *quinto capítulo* aborda la experimentación como medio de validación de la hipótesis enunciada en la tesis. Se analiza la hipótesis, se describe el método de validación empleado y los experimentos realizados, para finalmente mostrar los resultados obtenidos que permiten concluir demostrando la veracidad o no de la misma.
- El *sexto capítulo* recoge finalmente las conclusiones de la tesis, y las líneas futuras de trabajo y mejora.

Capítulo 2

Estado de la Técnica

La comunidad investigadora del ámbito de las redes de comunicaciones vaticina que las futuras redes establecerán un entorno de acceso inalámbrico heterogéneo, que incluirá la coexistencia de múltiples tecnologías de acceso inalámbrico [Ramesh+10, Mendonca+12], y el uso de protocolos IP para el despliegue de servicios orientados al usuario.

Así, la tendencia es que las comunicaciones móviles se realicen a través del enlace de comunicación que sea más favorable en cada momento y lugar [Chander+11], dentro de un entorno de acceso a redes heterogéneas y complementarias como las WLAN (Wireless Local Area Networks), WiMax (Worldwide Inter operability for Microwave Access) y UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems), que pueden coexistir a su vez con redes satelitales [Wang+04, Vanem+03, Murray+03].

Es obvio que a través de una única tecnología de acceso no se puede garantizar ni una cobertura ubicua, ni una calidad de servicio óptima. Los dispositivos móviles tienen que cambiar de una tecnología de acceso a otra para mantener activa la conectividad de red y así poder responder a las necesidades de comunicación de los usuarios y aplicaciones. De esta manera, la gestión de cambios de enlace entre diferentes tecnologías de acceso radio es decisiva a la hora de proporcionar la estabilidad de las comunicaciones y la calidad de servicio [Ramesh+10]. De hecho, las redes de comunicaciones móviles están ya permitiendo el desarrollo de aplicaciones multimedia a través de protocolos que permiten la adaptabilidad de los servicios dependiendo de las características de red [Yao+10].

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta sección se hará un repaso al estado de la técnica en lo que a comunicaciones inalámbricas y su aplicabilidad en el transporte se refiere. Más concretamente, nos centraremos en las comunicaciones inalámbricas vehículo-infraestructura

(principalmente en la conectividad de los vehículos con los centros de gestión en tierra). Así, se identificarán una serie de carencias o puntos de mejora en las que se basa el desarrollo de esta tesis.

2.1 Necesidades de las comunicaciones vehiculares

Durante muchos años, las redes empleadas en los sistemas de transporte han constituido islas basadas en protocolos y medios físicos independientes [Benzi+05]. Actualmente, la existencia de múltiples alternativas de transmisión aportan un mayor ancho de banda a las comunicaciones [Felser05], pero ello no implica un mejor comportamiento en lo que a requisitos de interoperabilidad, temporales o propiedades de confiabilidad se refiere [Ernst+07].

Así, se observa una complejidad cada vez mayor en los contextos telemáticos que se plantean en el ámbito del transporte, con cada vez mayor número y heterogeneidad de dispositivos. Esta complejidad está motivada por el crecimiento continuo de los sistemas y la especificidad de las soluciones. Ante estas circunstancias, se demandan tecnologías que permitan una mayor interoperabilidad entre estas soluciones [Kurowski+12].

Por otro lado, el creciente interés en transmitir por el mismo medio físico tanto datos de control como tráfico multimedia, tal y como se describe en [Fuehrer+07], conlleva importantes implicaciones a la hora de gestionar las comunicaciones (especialmente dentro de entornos hostiles). Para ello, es fundamental el control de parámetros de calidad de servicio [Hancock+04, Brun+06].

En lo que a comunicaciones vehiculares se refiere, el desarrollo de sistemas de comunicación que permitirán a los vehículos compartir información los unos con los otros y con infraestructura de la carretera (V2V y V2I) promete proporcionar mayores niveles de seguridad en las carreteras y una gestión de tráfico mejorada [Sichitiu+08, Zhu+09]. Además, la habilitación de comunicaciones inalámbricas dentro de los vehículos permite a las compañías de transporte desplegar nuevos servicios que implican el intercambio de información con su flota de vehículos desde puntos concretos de la infraestructura de transporte (normalmente los centros de gestión o control).

Siguiendo con la problemática planteada en esta tesis, en esta sección se realizará un estudio de las necesidades que se presentan en las comunicaciones inalámbricas entre los vehículos y los puntos de la infraestructura de transporte en tierra, con el fin de desplegar servicios de diferente naturaleza que requieran la transmisión de información desde y hacia los vehículos.

2.1.1 Arquitectura ITS cooperativa del ETSI

En este contexto, conviene destacar la aparición, fuerte apoyo institucional e iniciativas de investigación puestas en marcha para el desarrollo de los futuros sistemas ITS cooperativos [PREDRIVE09, Koenders+08, Stübing+10], los cuales posibilitarán una notable mejora en la seguridad vial y una gestión más dinámica del tráfico gracias al intercambio de información V2V y V2I. Una de las principales iniciativas a nivel estatal para el desarrollo de los sistemas ITS cooperativos es el proyecto INTEL VIA [INTEL VIA12, Hernández+11], el cual se centra en la creación de un nuevo sistema de señalización vial inalámbrico que permita una gestión más dinámica y variable del tráfico de forma ubicua, y la implementación de una plataforma de comunicaciones vehiculares multi-tecnología de acuerdo a la arquitectura ITS (acrónimo de Intelligent Transportation Systems) cooperativa definida en el Comité Técnico ITS del ETSI (European Telecommunications Standards Institute) [ETSI09, ETSI10].

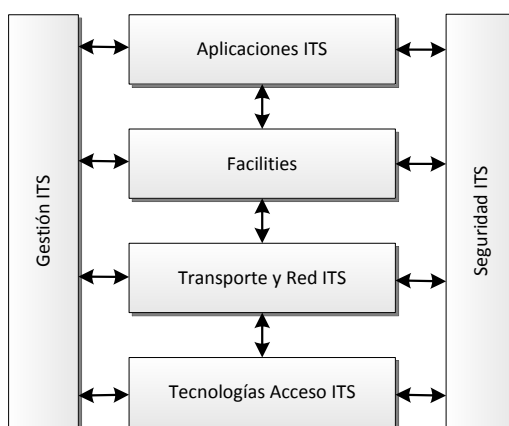


Figura 2.1: Arquitectura ITS cooperativa del ETSI

El Comité Técnico ITS del ETSI define la arquitectura software de cualquier tipo de estación ITS cooperativa. Esta arquitectura (**Figura 2.1**) es una adaptación del modelo de referencia OSI (Open System Interconnection), en la que la capa de tecnologías de acceso gestiona la capa física y de enlace, y la capa de red y transporte es la encargada de encaminar los paquetes hacia su destino. ETSI introduce una capa de *facilities* que incluye una serie de funcionalidades cuyo objetivo es dar soporte tanto a las aplicaciones cooperativas, como a las funciones de comunicación cooperativas integradas en las capas de acceso, red y transporte. Una de las principales funcionalidades de la capa de *facilities* es el LDM (Local Dynamic Map) que permite a cada vehículo disponer de información actualizada sobre su contexto vehicular. Por último, las capas transversales, relacionadas con la seguridad y la gestión de comunicaciones, pueden ofrecer sus servicios a todas las capas longitudinales. La arquitectura ITS cooperativa definida en el marco de ETSI considera la posibilidad de transmitir a través de diferentes tecnologías de acceso radio, así como emplear en la capa de red y transporte el protocolo IP o un protocolo de menor latencia para las comunicaciones vehiculares. En este contexto, es necesaria la progresiva implementación de las funcionalidades descritas en la capa de *facilities*,

así como conjuntos de aplicaciones y servicios independientemente de las tecnologías de comunicación empleadas.

2.1.2 Comunicaciones inalámbricas multienlace

Las redes inalámbricas vehiculares se han convertido en uno de los ámbitos de investigación más activos de los últimos años [C2C12, Festag+08], viéndose también como una solución comercial viable [Icomera12, PointShot12, NEMO12]. De esta manera, la aplicación de tecnologías inalámbricas en el transporte está posibilitando el despliegue de nuevos tipos de aplicaciones que están provocando cambios revolucionarios en los sistemas de transporte [Rosi+08].

Las capacidades de los dispositivos móviles están mejorando constantemente [Beeby07], permitiendo el acceso a Internet a través de diferentes tecnologías (GPRS/UMTS, WiFi, etc.). En el ámbito vehicular, se persigue que el vehículo tenga conectividad continua a Internet. Para ello, en [Pareit+07] asumen que es necesaria la combinación de varias tecnologías inalámbricas para conseguir dicha ubicuidad, empleando como caso de estudio trenes en movimiento que irán de un área de cobertura de una tecnología de acceso a otra.

Consecuentemente, a lo largo de los últimos años se ha explorado la aplicación de diferentes tecnologías inalámbricas para proporcionar conectividad a Internet desde los vehículos (GPRS/UMTS, WiFi, WiMAX, etc.) [Fokum+10, Steuer+08], existiendo soluciones híbridas que persiguen mantener el vehículo siempre conectado a través de la selección del mejor enlace de comunicación disponible [Gustafsson+03, Leijonhufvud01]. Así, en la literatura existen varios trabajos orientados a estudiar la proporción de conectividad continua ininterrumpida a Internet en vehículos en movimiento (por ejemplo en el ámbito ferroviario [Kita+09, Ahmad+08, Perera+06, Jooris+05]). En este sentido, se considera que las comunicaciones basadas en radio frecuencia son una alternativa prometedora para redes fijas inalámbricas locales (Wireless Local Area Networks, WLAN), sin embargo, su efectividad se encuentra limitada cuando el acceso se realiza desde vehículos en movimiento.

Por otro lado, independientemente del enfoque aplicado para lograr una conectividad inalámbrica vehicular, en todos los casos se requieren funciones sofisticadas para el acceso a la red [Ott+06], los cambios de enlace de comunicación, transmisiones de datos, autenticación, optimización de QoS, conexiones entre redes inalámbricas heterogéneas, etc. Esta funcionalidad debería estar localizada en un dispositivo de acceso dedicado [Rodríguez+04, Baig+04] que disponga de una interfaz por cada tipo de tecnología de acceso, seleccionando en todo momento el mejor enlace para las comunicaciones. Hay soluciones que incluso implementan un sistema de comunicaciones redundante con diversos medios que se utilizan (conmutando de uno a otro) intentando conseguir en todo momento una comunicación lo más

fiable, rápida y con el mínimo coste posible de acuerdo con las circunstancias de conectividad del momento [GMV08].

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, en lo que a conectividad inalámbrica se refiere, es importante recalcar que los vehículos mantienen conexiones inalámbricas a lo largo de su trayecto pasando del área de conectividad de una antena a otra, suponiendo una serie de retos en lo que a la continuidad y mantenimiento de conectividad se refiere. En esta línea, cabe mencionar la arquitectura de red FAMOUS (= Fast MOving USers) [Greve+05], diseñado para dar soporte al acceso de banda ancha a Internet a usuarios en entornos de movilidad, como es el vehicular.

2.1.3 Arquitectura de comunicaciones en unidades embarcadas

Tal como se ha indicado en la sección anterior, el establecimiento de una conectividad continua vehicular implica la necesidad de habilitar varias tecnologías de acceso, que combinadas permiten aumentar la disponibilidad de las comunicaciones en el vehículo, teniendo en cuenta diferentes escenarios de comunicación y requisitos que se den en un momento dado.

En este sentido, la **Figura 2.2** representa una red embarcada, básica en este tipo de soluciones. Esta red embarcada consiste habitualmente en una red LAN (cableada o inalámbrica) que se conecta a Internet a través de un gateway inalámbrico. El gateway puede utilizar diversas tecnologías de acceso (por ejemplo GPRS, UMTS, WiFi) a través de diferentes proveedores de servicio [Lan+07].

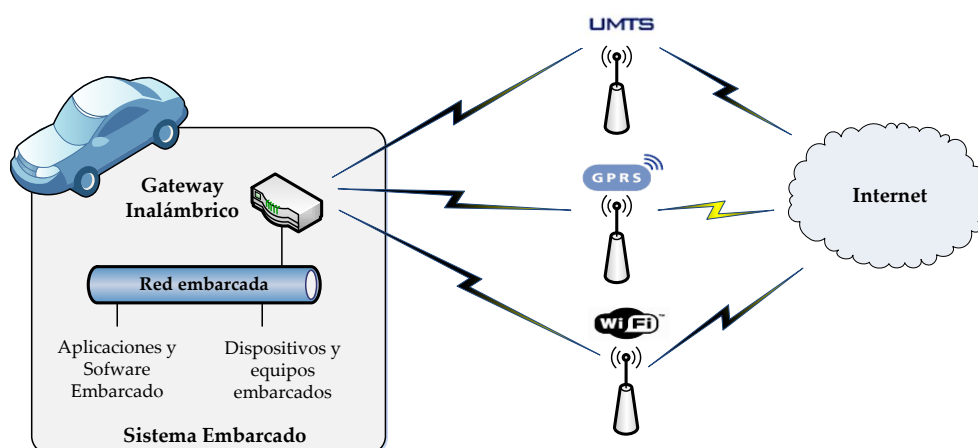


Figura 2.2: Red embarcada con gateway inalámbrico multitenlace para la conexión a Internet

En lo que a escenarios de comunicación se refiere, tomando como referencia el vehículo, se pueden identificar los siguientes escenarios de comunicación [SAFEDMI12]:

- **Dominio inalámbrico de corto alcance:** se trata de situaciones en las que el vehículo se encuentra estacionado (en una estación, cochera, taller,...) y por consiguiente se pueda permitir una comunicación de corto alcance con el vehículo, dotando por ejemplo a las estaciones de redes WiFi, permitiendo comunicaciones de banda ancha en aquellos momentos en que el vehículo esté situado en el área de cobertura.

La instalación de equipamiento inalámbrico en estaciones u otras ubicaciones de la infraestructura de transporte, permite la transmisión de cantidades voluminosas de datos cuando el vehículo se encuentre dentro del área de cobertura (como puede ser información multimedia de seguridad o datos de mantenimiento del vehículo almacenados en el sistema embarcado) en un periodo corto de tiempo mientras éste se encuentra estacionado.

- **Dominio inalámbrico de largo alcance:** se trata de situaciones en las que el vehículo se encuentra ubicado en zonas de no cobertura de redes inalámbricas instaladas en determinados puntos de la infraestructura de transporte (estaciones, cocheras, garajes, etc.), de forma que haya que recurrir a comunicaciones basadas en tecnologías móviles (o de mayor alcance) como puede ser GPRS.
- **Dominio embarcado:** es independiente de la ubicación del vehículo (conexión con el equipo o sistema embarcado a través del móvil, PDA, portátil,...). Puede implicar el uso de la misma tecnología inalámbrica para la conexión que en el dominio de corto alcance. Se trata así de poder establecer comunicación intravehicular con el sistema embarcado o viceversa en el vehículo “in situ” ya sea de forma inalámbrica o de forma cableada.

Esta tesis se centra en la gestión y priorización de comunicaciones entre los vehículos y los sistemas de tierra, permitiendo la conectividad del vehículo tanto dentro de dominios de corto alcance (cuando se encuentre dentro de áreas de cobertura de puntos de acceso WiFi habilitados en la infraestructura de transporte) como del dominio de largo alcance (cuando se encuentre en movimiento y fuera del dominio de corto alcance).

2.1.4 Acceso a redes de banda ancha

El uso de tecnologías inalámbricas ha permitido habilitar conectividad remota con los vehículos posibilitando a las compañías de transporte agilizar tareas tales como el mantenimiento o diagnóstico de su estado y tareas relacionadas con la gestión de flotas [Gronbaek08].

Dada la popularidad adquirida por el acceso Internet móvil, ha habido un creciente interés en los últimos años en la medición y caracterización del comportamiento de las redes de banda ancha móviles desde vehículos en movimiento [Jan+09, Ormont+08, Tso+10, Tso+09, Yao+08,

Derkson+06, Yao+11]. Así, a la hora de evaluar la experiencia del usuario a través de redes de banda ancha en movilidad en términos de rendimiento TCP, se puede determinar que:

- El uso de un único proveedor de red de banda ancha móvil puede provocar que haya numerosas interrupciones en el servicio, los cuales pueden ser reducidos drásticamente a través de la suscripción a múltiples proveedores (los apagones de servicio de los diferentes proveedores no están altamente relacionados).
- La ruta que haga el vehículo tiene más efecto en la experiencia de ancho de banda recibido que la hora del día en la que se haga un trayecto.
- La velocidad del vehículo por sí mismo no tiene un efecto determinante en el rendimiento TCP. Es factible alcanzar un alto rendimiento TCP aun viajando a una velocidad de 130 Km/h.

Por otro lado, existen escenarios de conectividad intermitente, donde el vehículo se conecta temporalmente a las redes WLAN IEEE 802.11 que encuentre a su alcance. La idea es que el vehículo se conecte a puntos de acceso habilitados a lo largo de la carretera o vía donde circula, o en puntos propios de la infraestructura de la compañía de transporte (estaciones, cocheras, garajes, etc.). Sin embargo, los puntos de acceso WLAN IEEE 802.11 no facilitan una conectividad de red continua; su limitación de alcance implica periodos de desconexión cuando el usuario se desplaza de una ubicación a otra. En esta línea, existen enfoques híbridos que persiguen mantener al usuario continuamente conectado a la red más favorable dentro de su alcance (*always best connected* [Gustafsson+03, Leijonhufvud01]) combinando el acceso a diferentes proveedores de servicio para maximizar la conectividad, y así mejorar el ratio de datos alcanzable, minimizando a su vez el coste [Rodriguez+04, Zittebart+03]).

En este punto cabe mencionar que la difusión de puntos de acceso IEEE 802.11 (WiFi) en casas y diferentes ámbitos de negocio ha permitido incrementar de una forma considerable la cobertura de Internet inalámbrico en áreas densamente pobladas [Vidales+09]. Esos puntos de acceso desplegados en esas áreas urbanas de forma abierta permiten la conectividad a Internet a los equipos que se encuentren en movimiento dentro de los vehículos. En este sentido, existen investigaciones que pretenden evaluar qué posibilidades ofrecen este tipo de acceso a red, y si puede ser adecuado o no para ciertos tipos de aplicaciones [Bychkovsky+06].

De esta manera, motivado por la posibilidad de obtener conectividad WiFi desde vehículos en movimiento, hay un interés en estudiar la transmisión de contenidos dentro de este tipo de escenarios en áreas urbanas [Deshpande+09, Eriksson+08, Ott+05]. Se trata por tanto de poder realizar tanto descargas (canciones, videos, mapas, datos de tráfico, etc.), como cargas de contenidos (todo tipo de información generada y almacenada dentro de vehículo) gracias a la habilitación de puntos de acceso inalámbrico WiFi que sean accesibles desde los vehículos.

Así, la transmisión de contenidos a través de este tipo de escenarios hace frente principalmente a tres retos [Deshpande+09]:

1. **Latencia en el establecimiento de la conexión.** Suele ser alta dados los retardos en el descubrimiento de puntos de acceso, proceso de conexión y obtención de dirección IP vía DHCP.
2. **Importancia de una buena estrategia de selección de la red.** Puede que existan varios puntos de acceso dentro del alcance del vehículo a lo largo de su trayecto, y es importante seleccionar el mejor punto de acceso para conectarse y realizar las transferencias. Los clientes WiFi regulares seleccionan el punto de acceso que ofrezca mayor señal para conectarse, y hasta que no pierda conectividad con esa red no analizan la posibilidad de conectarse a otra red mejor. Esta forma de proceder da buenos resultados en entornos de oficina o de hogar, pero no es una buena opción en entornos de movilidad vehicular, dado que hace que se pierda la oportunidad de conectarse a redes que ofrezcan mejores características de conectividad (tanto a nivel de señal como de ancho de banda disponible).
3. Se requiere una **estrategia de transmisión de datos adecuada**, dado que el acceso vehicular a redes WiFi se caracteriza por la frecuencia de desconexiones y pérdidas de enlace. Estas cuestiones degradan el comportamiento de las comunicaciones TCP, e impactan en el comportamiento de las aplicaciones. Para aliviar este tipo de problemas, una de las opciones suele ser el uso de protocolos de transporte sin conexión como UDP [Eriksson+08, Ott+05].

Por tanto, las nuevas tecnologías aplicadas en el transporte, además de permitir desplegar nuevos servicios tanto en los centros de “tierra” como en el vehículo, permiten ofrecer soporte inalámbrico para realizar cargas o subidas de software y descarga de datos [Gronbaek08]. Para ello, es necesario contar con la disponibilidad del enlace de comunicaciones.

Así, un sistema de comunicaciones que permita conectar los vehículos con los sistemas de centro de control implican una serie de retos significantes [Brussel10], que son causados principalmente por el comportamiento dinámico de los canales de comunicación, dados los cambios de conectividad producidos por el movimiento de los vehículos, los cuales complican a su vez la provisión de calidad de servicio de los diferentes flujos de información [Jeney+07].

Investigaciones previas [Lannoo+07, Verstrepen+10] sugieren el uso simultáneo de diferentes tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas (satélite, redes inalámbricas de área local, redes de operadoras móviles) para proporcionar la disponibilidad de una conectividad continua vehículo a infraestructura de centro de control. El enlace satelital se podría usar como el canal principal de comunicación, utilizando las redes públicas 2G/3G como respaldo. Por otro lado, la comunicación WiFi sería aplicada en espacios donde el vehículo se encuentre estacionado un determinado periodo de tiempo (estaciones, cocheras, talleres, etc.).

La presente tesis tiene en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, permitiendo seleccionar en cada momento el enlace de red considerado como mejor (de acuerdo al ancho de banda disponible) para las comunicaciones.

2.1.5 Gestión de calidad de servicio

El concepto de QoS (acrónimo en inglés de calidad de servicio, *Quality of Service*) [Aurrecoechea+02, Seitz03] abarca tanto a las tecnologías de red como a las aplicaciones que hacen uso de esas redes. Sin embargo, tradicionalmente el concepto de QoS y los diversos mecanismos desarrollados para garantizar esa QoS ha sido abordado desde el punto de vista de las redes.

El concepto de QoS, presente en la mayoría de las aplicaciones telemáticas, se puede definir como: “el conjunto de características tanto cuantitativas como cualitativas de un sistema distribuido necesarias para alcanzar las funcionalidades requeridas por una aplicación” [Hardy02]. En general, es la capacidad de un elemento de red (aplicación, servidor, conmutador) de asegurar que su tráfico y los requisitos de los servicios previamente establecidos puedan ser satisfechos. Además, dado que intervienen todas las capas y elementos de la red, también suele definirse como un conjunto de tecnologías que permiten manejar los efectos de la congestión de tráfico optimizando los diferentes recursos disponibles, en lugar de aumentar continuamente la capacidad de los mismos [Martínez06a].

En lo que a comunicaciones inalámbricas se refiere, el entorno inalámbrico es muy hostil para medidas de QoS debido a su variabilidad en el tiempo. Por otro lado, los usuarios, aplicaciones y sistemas finales solicitan servicios de comunicación con garantías de QoS específicas. En este sentido, se pueden identificar varios factores básicos para determinar las propiedades de QoS [Hablinger04]:

- El ancho de banda requerido.
- El retardo que se produce en la transmisión de datos.
- La fiabilidad de las comunicaciones.

Por otro lado, los servicios desplegados en el transporte demandan cada vez más ancho de banda. Éste es el caso de las aplicaciones multimedia, que requieren un gran ancho de banda para asegurar un cierto nivel de QoS. En una red en la que los terminales comunican además de información multimedia, tráfico de datos tradicional, se produce un efecto importante: si se selecciona un conjunto de prioridades erróneo, ni el tráfico multimedia ni el tradicional obtienen un buen rendimiento. Por tanto, a veces es mejor asignar una mayor prioridad a transacciones de datos tradicionales que involucren la transmisión de cantidades pequeñas de

datos, normalmente más urgentes dado que este tipo de comunicaciones no requiere mucho tiempo y dejan pronto libre el canal para las aplicaciones multimedia.

Así, debido a sus propiedades y las limitaciones que provocan, integrar aplicaciones multimedia en esas redes supone un reto en términos de ancho de banda requerido para ofrecer esos servicios con una QoS aceptable. De esta manera, con el propósito de dar soporte a múltiples tipos de aplicaciones con diferentes requisitos de QoS, las estrategias eficientes de gestión de recursos, reserva de ancho de banda y control de admisión juegan un rol muy importante [Hwang+08].

Por lo tanto, para ofrecer una buena experiencia de usuario, es necesario garantizar un buen mecanismo de QoS en la arquitectura de red. De acuerdo a los estudios realizados por IETF (Internet Engineering Task Force) [IETF12] para Internet, básicamente existen dos tipos de mecanismos posibles de control de QoS: reserva de recursos y asignación de prioridades [Martínez06a]. La reserva de recursos consiste en que los extremos no transmiten información hasta no tener asegurados los requisitos de QoS preestablecidos [Greenfield98, Gac+00, Wang+00]. Por otro lado, la asignación de prioridades consiste en la reordenación que los nodos de la red hacen en sus colas internas en función de etiquetas de prioridad que están directamente relacionadas con el tipo de tráfico y sus requisitos de QoS.

Por parte de IEEE existen áreas de investigación específicas de QoS en redes inalámbricas como 802.11e, 802.16.e [Lim+09], y por parte de IETF en protocolos de red (DiffServ [Blake+98], IntServ [Braden+94], RSVP [Wroclawski99]). Asimismo, existen trabajos de investigación enfocados a la QoS en redes heterogéneas [Fokum+10]. Sin embargo, las características de redes inalámbricas cambiantes debido a la movilidad del vehículo y el uso de diferentes tecnologías inalámbricas genera aún retos importantes en este ámbito [Brussel10]. Además, los requisitos de las aplicaciones embarcadas pueden cambiar dado el hecho de que el número de usuarios/clientes y servicios puede variar rápidamente. Por tanto, debido al estado cambiante de la red a lo largo del tiempo, es necesario definir un mecanismo de control de QoS dinámico que se adapte a los cambios de estado de la red. Así, la idea es que el sistema tenga conocimiento del estado de la red, de forma que haga un control dinámico de que las comunicaciones se estén realizando en base a sus requisitos de QoS, por ejemplo en lo que a ancho de banda se refiere.

Además, el rápido crecimiento de las tecnologías de red está provocando también un creciente desarrollo de sistemas de banda ancha, convirtiendo el ancho de banda en la propiedad de la red más importante. Así, la reserva de ancho de banda para garantizar la QoS es un problema fundamental en las redes de comunicaciones, sobre todo en aquellos casos en los que el ancho de banda demandado excede al ancho de banda disponible en la red, o cuando éste varía rápidamente. Este hecho produce que haya comunicaciones que no pueden servirse, o bien no

cumplen las condiciones de QoS que requieren. Es por ello que los mecanismos de QoS están obteniendo cada vez más relevancia.

En este sentido, en lo que a priorización de comunicaciones se refiere, existen heurísticas diseñadas para la reserva de ancho de banda y priorización de flujos de tráfico de acuerdo a las peticiones de comunicación realizadas por las aplicaciones [Drarwadkar+01]. También se han definido estándares como IEEE 802.11e y IEEE 802.11p que proporcionan directrices para la priorización de paquetes de tráfico. Sin embargo, si bien existen investigaciones que adoptan estos estándares, aún queda trabajo por hacer para que sean aplicados de manera eficaz [Karagiannis+11].

En esta tesis se abordarán conceptos de QoS en comunicaciones vehiculares, gestionando las comunicaciones entre las aplicaciones finales embarcadas y en los centros de control, teniendo en cuenta sus requisitos, e implementando mecanismos de reserva de ancho de banda que permita garantizar que las comunicaciones se realicen en base a sus necesidades. Por tanto, el requerimiento principal de QoS considerado en esta tesis es el ancho de banda.

2.1.6 Middleware de comunicaciones

Tal como se ha ido mencionando anteriormente, el progreso tecnológico en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas está permitiendo el desarrollo de nuevos tipos de aplicaciones y servicios. En este sentido, cada vez tiene más importancia establecer mecanismos que den soporte dinámico a los requisitos cambiantes de las aplicaciones y servicios.

Para hacer frente al reto de diseñar software en sistemas móviles distribuidos es esencial la disposición de un middleware [Bishop+03, Gehlen+06]. El propósito del middleware es abstraer a las aplicaciones de la complejidad del sistema distribuido y del mecanismo de comunicaciones, así como mejorar la QoS proporcionado por los protocolos de comunicación a través de mecanismos y servicios adicionales [Nave+05].

Hay mucho trabajo de investigación en sistemas middleware [Henning+04, OMG02, Schmidt99, Ginis+04, Steinberg04]. Sin embargo, la integración de ciertos tipos de servicios, el despliegue y gestión de aplicaciones con requisitos de comunicación en tiempo real, y la QoS siguen presentando limitaciones [Martins+08, Martins12]. Aún hay retos que resolver con respecto a la gestión de QoS, las diferentes necesidades de comunicación en tiempo real de las aplicaciones, y la configuración, monitorización y gestión del estado de las redes, especialmente en un ámbito de movilidad como es el del transporte.

En lo que al ámbito vehicular se refiere, se han producido avances considerables no sólo en lo relativo a sistemas electrónicos, también en el software embebido en los sistemas embarcados [Leohold04, Leen02]. En este sentido, diseñar este tipo de sistemas supone cada vez más

dificultades, demandando nuevos mecanismos de diseño tanto desde el punto de vista del hardware como del software. Por tanto, dentro de este ámbito, cobra cada vez más importancia establecer comunicaciones eficientes que permitan transmisiones de datos de alta velocidad (especialmente en sistemas que requieren altas tasas de transmisión), proporcionando mejor comportamiento en tiempo real en términos de tiempos de respuesta, utilización de ancho de banda y retardos en las comunicaciones [Keskin09].

En este sentido, Sahin Albayrak et al. presentan un enfoque middleware [Albayrak+08] para la gestión de comunicaciones remotas de aplicaciones desplegadas de forma distribuida, teniendo en cuenta no solo las necesidades de comunicación de la red, sino también el estado de conectividad de las redes inalámbricas que se encuentren al alcance. La idea en este caso es que las comunicaciones de las aplicaciones se gestionen en base al conocimiento del estado de la red, y a su vez, la configuración de la red pueda ser establecida de acuerdo a las necesidades de comunicación que presenten las aplicaciones. Sin embargo, si bien a través de este middleware se establecen mecanismos de QoS y monitorización del estado de las redes que se encuentren dentro del alcance, no establece ningún tipo de mecanismo adicional de priorización o planificación de comunicaciones que permita optimizar el uso de las capacidades de red en base a la diferente naturaleza y criticidad de la información intercambiada por las aplicaciones. Estos aspectos serán abordados en el presente trabajo de tesis.

2.1.7 Mecanismos de seguridad

Si bien en esta tesis no se profundiza en aspectos relacionados con la seguridad, es un tema que siempre está presente en cualquier sistema de comunicaciones. El despliegue de nuevos servicios distribuidos en el ámbito vehicular está motivando problemas desde el punto de vista de la seguridad, debidos a nuevos ataques externos a estos sistemas con intenciones maliciosas [Weimerskirch+06]. Por tanto, las comunicaciones vehiculares precisan el establecimiento de mecanismos de seguridad que permitan proteger el sistema de irrupciones externas no autorizadas [Schweppe+10].

Asegurar la seguridad y privacidad de las comunicaciones inalámbricas vehiculares es un reto complicado. En parte, esto es debido a que algunas necesidades como la *privacidad* frente a la *responsabilidad* y la *seguridad* frente a la *eficiencia* entran frecuentemente en conflicto [Schweppe+10].

Existen trabajos concernientes a diferentes aspectos de la seguridad y privacidad de las redes vehiculares, identificando retos en esta área, describiendo diferentes tipos de ataques, ofreciendo sugerencias sobre las soluciones, y proponiendo diferentes mecanismos de seguridad [Papadimitratos+06a].

Así, se definen una serie de requisitos de seguridad generales adoptados por las diferentes soluciones, dependiendo del tipo de sistema que componen y las características de las aplicaciones:

- **Autenticación e integridad de los mensajes:** protección de los mensajes de cualquier alteración, debiendo el receptor corroborar quién es el emisor del mensaje. En cuanto a la integridad, no implica necesariamente la identificación del emisor del mensaje.
- **No repudio de mensajes:** el emisor del mensaje no puede negar el haber enviado dicho mensaje.
- **Control de acceso:** los permisos de acceso a los diferentes servicios se determinan a través de una serie de políticas. Como parte del control de acceso, la autorización establece los permisos que tienen los diferentes nodos de red para realizar diferentes acciones.
- **Confidencialidad del mensaje:** el contenido de un mensaje sólo puede mostrarse a quien tenga autorización para ello.
- **Privacidad y anonimato:** los sistemas de comunicación vehiculares no deben revelar o permitir el acceso a información privada de personal y usuarios. Dado que éste es un requerimiento muy general y un requisito dentro de un área más amplia de ocultación de información, se identifica un requisito más concreto dentro de las redes vehiculares, que es el anonimato [Papadimitratos+06b].
- **Disponibilidad:** los protocolos y servicios deben mantenerse operacionales aun en presencia de fallos, sean maliciosos o benignos. Esto implica la necesidad de abordar cuestiones relacionadas con la tolerancia a fallos, además de la seguridad.
- **Identificación de responsabilidad:** capacidad del sistema de identificar los autores de las diferentes acciones dentro del sistema en caso de conflicto.

Por tanto, los protocolos de comunicación aplicados en el ámbito vehicular suelen ser personalizados para que ofrezcan capacidades para mantener un cierto nivel de seguridad [Schweppe+10]. Así, dependiendo de la aplicación, con el propósito de habilitar un control sobre aspectos como la autenticidad, integridad y confidencialidad, será necesario establecer diferentes niveles de cifrado criptográfico, intentando introducir en el sistema la mínima sobrecarga posible dada su influencia en el coste del sistema.

2.2 Optimización del uso de redes inalámbricas en entornos de movilidad

En esta sección se hará una descripción de una serie de enfoques o soluciones que permiten la optimización del uso de redes inalámbricas, tanto desde el punto de vista de gestión de redes

y cambios de enlace, como desde el punto de vista de la QoS y priorización de comunicaciones.

2.2.1 Regulación de tráfico en redes WiFi

En esta sección se describe una solución propuesta por los autores Domingo Marrero, Elsa M. Macías y Álvaro Suárez [Marrero+08] cuyo propósito es combinar un mecanismo de control de admisión con un mecanismo de regulación de tráfico para datos multimedia en redes WiFi.

Se trata de regular o priorizar tráfico generado por estaciones o dispositivos inalámbricos en áreas de cobertura WiFi en base al ancho de banda disponible en la red. Si bien el trabajo de tesis doctoral que nos ocupa propone una solución que abarca más de un tipo de enlace de red, la problemática resuelta por estos autores presenta fundamentos muy similares.

En lo que a las redes WiFi se refiere, han experimentado un crecimiento espectacular en los últimos años. Como resultado, se han utilizado para el acceso a servidores multimedia localizados en redes cableadas. Sin embargo, la disponibilidad de ancho de banda real en las redes WiFi comerciales actuales es limitada. Así, para incrementar el rendimiento global del sistema cobra importancia la aplicación de un sistema de control de admisión [Epstein+00, Ramesh+10].

Teniendo en cuenta estas limitaciones, en esta solución se abordan una serie de problemas y retos, comunes con este trabajo de tesis, que son:

- **Interrupciones intermitentes del servicio:** los usuarios de redes WiFi pueden verse sujetos a interrupciones y contaminación de datos a causa, por ejemplo, de señales ajenas.
- **Ancho de banda limitado:** todos los usuarios que se comunican a través del punto de acceso comparten el ancho de banda y existe un límite con respecto a la cantidad de dispositivos que pueden comunicarse por medio de un solo punto de acceso. Además, ese límite puede ser menor para algunos puntos de accesos que para otros, según el uso del ancho de banda de cada terminal de trabajo.
- **Falta de cobertura:** al diseñar una red inalámbrica, primero se debe conocer el área de cobertura del punto de acceso inalámbrico. En el caso de redes WiFi la cobertura llega hasta aproximadamente 100 metros desde el punto de acceso.
- **Diferentes prioridades de la información intercambiada:** las estaciones inalámbricas que deseen intercambiar contenidos prioritarios deben lidiar con las estaciones inalámbricas que desean transmitir tráfico de menor prioridad.

La idea básica es que, dependiendo del servicio solicitado, el punto de acceso pueda denegar el acceso a la red si el ancho de banda requerido no está garantizado, o por el contrario, conceda el acceso reduciendo la tasa de transferencia de la nueva estación asociada o el ratio de algunos ya asociados previamente.

Así, esta solución está compuesta básicamente por dos diferentes entidades: el gestor situado en el punto de acceso y los agentes situados en las estaciones inalámbricas.

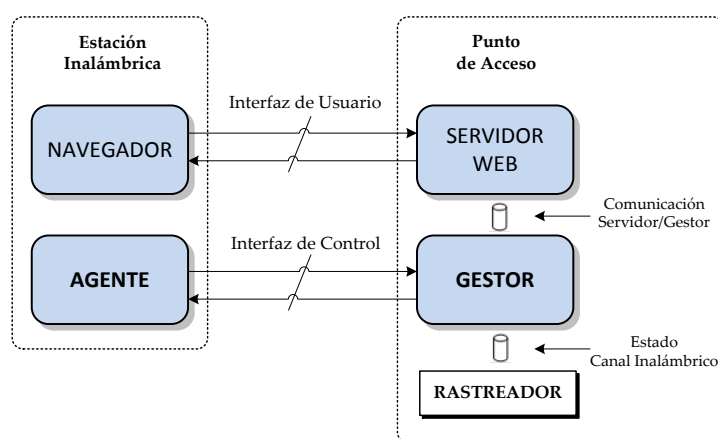


Figura 2.3: Arquitectura para una solución de regulación de tráfico en redes WiFi

La Figura 2.3 representa la arquitectura del software de la solución, que consiste básicamente en los siguientes elementos:

- **Servidor Web:** cuando una estación inalámbrica entra en un área de cobertura de un punto de acceso, el usuario puede realizar peticiones a un Servidor Web estándar, a través de una serie de parámetros de Navegador Web, para ser autorizado para la comunicación. Básicamente, una vez que la estación inalámbrica se encuentre asociada, su usuario especifica el tipo de tráfico que generará tras el proceso de asociación. La información se envía a través de la interfaz de usuario.
- **Agente/Gestor:** se trata de un modelo basado en agentes para establecer dinámicamente la tasa de tráfico para todas las estaciones inalámbricas asociadas. Habrá tantos agentes como estaciones inalámbricas, y por lo tanto un agente funcionando en cada estación (Figura 2.4). El gestor y cada agente se comunican a través de la interfaz de control enviando mensajes que contienen información útil para el mecanismo descrito, como puede ser la tasa de transferencia de datos que el agente debe establecer en un momento dado.
- **Rastreador:** se trata de un demonio cuyo cometido es monitorizar las comunicaciones. Obtiene información del canal de comunicaciones que es utilizado por el gestor para establecer la tasa de transferencia para cada estación. También monitoriza los puertos

utilizados por cada estación inalámbrica y las estaciones que se encuentran transmitiendo, bloqueando las comunicaciones que vienen de estaciones asociadas que usan puertos no permitidos.

Por tanto, es el *gestor* quien decide si el servicio solicitado puede ser garantizado, o si por el contrario, se debe aplicar algún tipo de regulación de tráfico para la nueva estación inalámbrica, o para las estaciones que se encuentran actualmente conectadas a la red. Por ejemplo, si el servicio seleccionado tiene mayor prioridad en comparación con el tipo de tráfico que está siendo transmitido por las estaciones inalámbricas actuales, se reduce la tasa de tráfico para dichas estaciones.

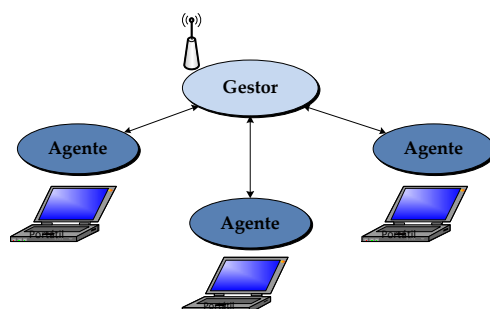


Figura 2.4: Modelo de gestión de tráfico basado en *agente/gestor*

Una vez que la estación inalámbrica comienza la transmisión de datos, el gestor comprobará regularmente que el agente se esté ejecutando, y que el ratio de datos impuesto al servicio seleccionado se esté llevando a cabo. Si no es así, las comunicaciones de datos no son enviados por el punto de acceso.

El *agente* establece la tasa de datos a nivel de MAC para su estación utilizando las funciones de *control de tráfico* [LARTC12] implementados por el sistema operativo Linux que permite definir diferentes tipos de políticas, clasificación de tráfico, regulación de tasas de transferencia, etc. En la versión preliminar, solamente se aplicó el *Token Bucket Filter (TBF)* [LARTC12] para restringir el ratio de datos MAC.

Para calcular la tasa de transferencia óptima para cada estación, es necesario saber el ancho de banda inalámbrico disponible. En este caso se ha utilizado la aplicación *iperf* [NLANR/DAST12] para obtener este valor. De esta manera, el ancho de banda disponible en la red será distribuido entre las diferentes estaciones inalámbricas de acuerdo a su prioridad. Por otra parte, en este punto se podrían considerar otras técnicas dinámicas de distribución de tráfico, tal y como se llevará a cabo en la solución propuesta en el presente trabajo de tesis.

2.2.2 Planificación de tráfico multienlace

A la hora de realizar la planificación de tráfico a través de la conectividad de diferentes enlaces inalámbricos hay diferentes aspectos que son importantes considerar. La uniformidad de las redes WWAN (Wireless Wide Area Networks) no está garantizada. Al contrario que las redes cableadas, en las que el ancho de banda es relativamente estable, el ancho de banda de las redes WWAN experimentado por los usuarios móviles está determinado principalmente por la calidad de la señal correspondiente a la ubicación y las dinámicas de carga de la red en cada periodo de tiempo [Derksen+06, Tso+09, Janf+09]. Las fluctuaciones de ancho de banda durante el recorrido realizado por el vehículo pueden comprometer seriamente la QoS experimentada por las aplicaciones de red [Tso+09].

Así, a la hora de llevar a cabo una planificación de tráfico a través de diferentes enlaces inalámbricos, el ancho de banda real ofrecido por dichos enlaces es un parámetro que cobra mucha importancia.

En esta sección se hará una breve descripción de diferentes enfoques de monitorización de ancho de banda, y a continuación se planteará el uso de mapas de ancho de banda, y su aplicabilidad en la optimización de la planificación de comunicaciones multienlace vehículo-infraestructura.

2.2.2.1 Monitorización de ancho de banda

La monitorización del ancho de banda de los diferentes enlaces de comunicación se pueden llevar a cabo a través de dos diferentes enfoques:

- **Closed-loop Scheduling:** se basa en un mecanismo feedback que se adapta a las fluctuaciones de ancho de banda del enlace de red. Por cada enlace WWAN se monitorizan de forma pasiva sus condiciones, permitiendo estimar los valores de ancho de banda y ajustar la carga de tráfico asignada en los enlaces. La idea es que cuando se detecte una sobrecarga en cualquiera de los enlaces se haga una replanificación de las comunicaciones.

Proveedores comerciales de redes embarcadas emplean este tipo de planificadores [Karlsson+02], aunque los detalles exactos son propietarios y no se encuentran disponibles gratuitamente. Sin embargo, a pesar de su habilidad para evaluar las condiciones actuales de red, esos planificadores pueden ser lentos a la hora de reaccionar a las frecuentes variaciones de ancho de banda de las WWAN entre ubicaciones sucesivas en un escenario vehicular de alta movilidad.

- **Open-loop Scheduling** [Yao+09]: es un mecanismo que no monitoriza las condiciones de la red en tiempo real, y por tanto, es incapaz de adaptarse a los cambios de ancho de banda de los enlaces de red. Por ejemplo, el planificador podría estimar el típico ancho de banda de cada enlace utilizando estadísticas de ancho de banda proporcionadas por los proveedores. Se debe tener en cuenta que estas estimaciones son independientes de la ubicación. Como resultado, el planificador siempre ejecuta la reserva de los flujos de tráfico de acuerdo a los valores de ancho de banda fijos estimados para las diferentes ubicaciones. Como resultado, es capaz de ajustarse a las variaciones de ancho de banda y en consecuencia, obtener un mejor comportamiento del sistema.

2.2.2.2 Planificación en base a mapas de ancho de banda

Una de las tendencias dentro del ámbito de la planificación o gestión de comunicaciones en entornos de movilidad es la aplicación de mapas de ancho de banda que permitan mejorar la QoS. En este sentido, existen soluciones basadas en mapas de ancho de banda para gestionar redes en ámbitos de movilidad como el transporte.

2.2.2.2.1 Mapas de ancho de banda

La localización tiene una influencia importante en el ancho de banda real que puedan ofrecer las redes inalámbricas. Además, dado que los vehículos cambian continuamente de ubicación, la computación vehicular móvil se enfrenta a la posibilidad de variaciones significantes en el ancho de banda de la red.

Las observaciones de ancho de banda realizadas previamente en una ubicación determinada son mejor indicativo del ancho de banda real experimentado en esa ubicación comparado con los valores que puedan calcularse para esa ubicación a lo largo de la ruta del vehículo. Por tanto, esto implica que el conocimiento de valores de ancho de banda previos pueden ayudar a las aplicaciones móviles a prever las fluctuaciones de ancho de banda inminentes a lo largo del trayecto realizado por un vehículo, y así llevar a cabo acciones proactivas. Los estudios también determinan que la hora del día también tiene influencia en el ancho de banda móvil, aunque el factor dominante sea la ubicación.

Los *mapas de ancho de banda* se definen para almacenar el comportamiento y valores previos, relacionando las redes existentes en la carretera con la media de ancho de banda obtenida para cada una de estas redes gracias al almacenamiento de valores de observaciones previas en históricos. Estos valores son obtenidos realizando mediciones repetidas en una misma zona. Así, estos mapas ofrecen información del tipo: “si estás cerca de la intersección entre la calle A y la calle B, puedes esperar un ancho de banda medio de 1,2 Mbps por parte de la red A”.

Varios aspectos de sistemas de comunicaciones embarcados como el control de admisión, captura previa de datos, programación *multihoming*, y aplicaciones como *streaming* y conferencia de video, pueden beneficiarse de esa información.

En este sentido, organizaciones independientes (por ejemplo [RootWireless12]) proporcionan actualmente mapas de cobertura a nivel de calles de redes WWAN y WiFi. Estos mapas suelen estar perfilados por las mediciones realizadas por smartphones voluntarios que ejecutan aplicaciones específicas de medición. Suelen estar disponibles de forma gratuita en línea, y proporcionan una comparación objetiva de las diferentes compañías de red, sirviendo para asesorar a los clientes a la hora de seleccionar una compañía u otra.

Varios estudios empíricos [Derksen+06, Tso+09, Janf+09] han investigado el comportamiento del ancho de banda de las redes WWAN en un escenario vehicular. Una observación común es que el ancho de banda de estas redes se deteriora significativamente debido a la movilidad vehicular.

Existen trabajos [Nicholson+08, Pang+09] que proponen perfilar el comportamiento de puntos de acceso WiFi de la carretera utilizando observaciones históricas. Así, examinando el perfil de los puntos de acceso “visibles” y accesibles en una ubicación determinada, la idea es que el dispositivo móvil seleccione el “mejor” punto de acceso para asociarse con él y optimizar así las decisiones de transferencia de datos.

En cuanto a la recogida de muestras de ancho de banda, ésta puede llevarse a cabo a través de herramientas de medición tanto activas como pasivas:

- **Medición activa.** Se trata de una arquitectura cliente-servidor en el que el cliente puede ser desplegado en un dispositivo móvil (sistema embarcado en el vehículo, teléfono móvil, etc.). El servidor por su parte puede ser situado en un establecimiento del proveedor del servicio WWAN.

La ventaja de la medición activa es la habilidad de controlar el proceso de medición (cambiando por ejemplo la frecuencia de medición). La desventaja es que se crea una sobrecarga en la red. Sin embargo, el uso de ancho de banda de las pruebas puede reducirse ajustando adecuadamente una serie de parámetros [Yao+08].

- **Medición pasiva.** En este tipo de medición se instala un cliente simple en el dispositivo móvil. Este cliente tiene como cometido monitorizar la actividad de la red a través de las diferentes interfaces de red [Lai+01], pudiendo así inferir el ancho de banda.

Dado que las técnicas pasivas no inyectan tráfico en la red, no producen sobrecarga. Sin embargo, la medición solo se puede realizar en este caso cuando hay actividad de

red, lo que provoca que se tenga solo un pequeño control del conocimiento de ancho de banda.

De esta manera, la idea es que las muestras de ancho de banda recogidas (usando cualquiera de las dos técnicas de medición) sean etiquetadas con las correspondientes coordenadas de ubicación, indicando también la fecha y hora, y almacenados en un repositorio permitiendo así su posterior procesamiento.



Figura 2.5: Representación de fragmento de mapa de ancho de banda

2.2.2.2.2 Caso de estudio: optimización de comunicaciones vehículo a infraestructura

En esta sección se describe un estudio de aplicación de estos mapas [Yao+12]. Así, a través de este estudio se demuestra que los mapas de ancho de banda pueden mejorar la QoS ofrecida por un sistema de comunicaciones o *gateway* embarcado en un vehículo que se encuentra equipado con varias interfaces WWAN. La estrategia es que los gateway de comunicaciones vehiculares hagan un uso inteligente de la información de ancho de banda a la hora de tomar decisiones de planificación de tráfico.

Basándose en los mapas de ancho de banda descritos, los autores que proponen este mecanismo para la mejora de la gestión de las comunicaciones móviles, citan como ejemplo una aplicación cuyo propósito es aplicar esta técnica para optimizar las comunicaciones vehículo a infraestructura de centro de control.

Esta solución pretende mejorar la QoS ofrecida desde el ámbito embarcado a través del uso de múltiples interfaces de red WWAN que permiten la conexión a Internet. Para ello, proponen la interacción entre el planificador de tráfico embarcado con los mapas de tráfico para aplicar esa información a la hora de tomar decisiones de balanceo de carga de acuerdo con la ubicación del vehículo y la información de ancho de banda estimada y recogida en los mapas de tráfico.

En la sección 2.1.3 se mostraba la representación de la típica red de comunicaciones embarcada (**Figura 2.2**). Así, dentro de la red LAN embarcada se suelen conectar varios dispositivos de usuario (de forma inalámbrica o no). Un Router Móvil (RM) conecta a su vez la red embarcada LAN a Internet usando (típicamente) múltiples servicios WWAN para una mayor capacidad y fiabilidad en las comunicaciones. El RM y el Agente Local (AL) gestionan de forma transparente la movilidad de la red embarcada utilizando los protocolos básicos NEMO [Devaparalli+05].

De acuerdo al protocolo básico NEMO, todo el tráfico entrante se dirige a través del AL tal como se muestra en la **Figura 2.6**. Por tanto, el AL es responsable de planificar todos los flujos de tráfico entrantes individuales (sesiones de usuario). De una manera similar, el RM se encarga de planificar todos los flujos de datos salientes. Una decisión de planificación que no se adapte a las subyacentes condiciones de ancho de banda de los enlaces WWAN puede provocar la asignación de una gran cantidad de tráfico a uno de los enlaces desaprovechando a su vez la capacidad de otros enlaces. En el primer caso, un tráfico excesivo puede generar congestión en las comunicaciones, incrementando el retardo y causando la pérdida de paquetes. En el segundo caso, no se hace un uso óptimo de la capacidad del enlace. Por tanto, las decisiones de planificación generadas por el gestor de tráfico son cruciales para la QoS ofrecida por las redes embarcadas. Sin embargo, dado que a lo largo del trayecto del vehículo el ancho de banda disponible de los enlaces WWAN puede variar significativamente de un segmento de la carretera a otro, se presenta el reto de optimizar dinámicamente la gestión de la reserva de ancho de banda para los distintos flujos de comunicación que se vayan generando.

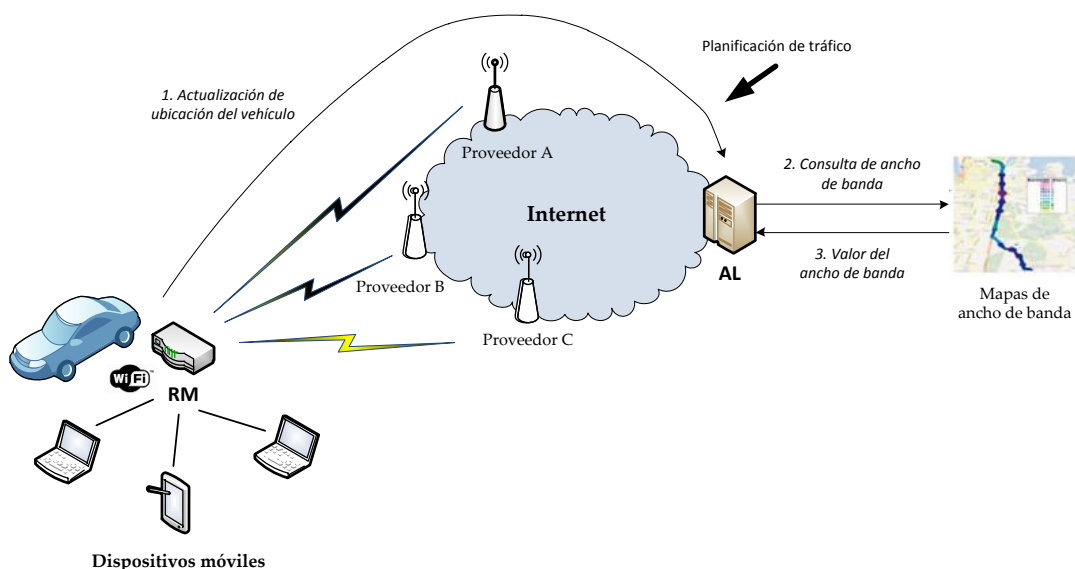


Figura 2.6: Planificación de comunicaciones en el vehículo basada en mapas de tráfico

La filosofía de la solución planteada por estos autores se puede aplicar a través de diferentes algoritmos de planificación. En este caso se optó por usar un algoritmo de planificación basado en flujos de tráfico [Guo+04]. Así, en el contexto de una red embarcada, el número de flujos de tráfico asignados a cada enlace de red es una proporción del ancho de banda del recorrido punto a punto entre el AL y el RM. Dado que el último salto de enlace WWAN es el que provoca el cuello de botella en la comunicación, el ancho de banda en el enlace WWAN es el que determina el ancho de banda punto a punto.

Por tanto, la planificación de tráfico en este caso se ejecutará cuando se produzcan los siguientes eventos: (1) cambio del ancho de banda del enlace WWAN, (2) entrada de un nuevo flujo de tráfico en el sistema, o (3) salida de un flujo de datos existente.

La **Figura 2.6** resume la idea planteada. Se trata de aplicar la información de ancho de banda específica de las ubicaciones a través de mapas de ancho de banda junto con un planificador de tráfico. Cuando el vehículo informe de un cambio de ubicación, el AL consulta los mapas de ancho de banda para el enlace WWAN. De esta manera, el planificador de tráfico (en este caso *closed-loop scheduling*) replanificará los flujos de tráfico de acuerdo de los valores de ancho de banda actualizados.

2.2.3 Priorización basada en la diferenciación de tráfico

En esta sección se describen dos soluciones enfocadas a mejorar la QoS de las comunicaciones vehículo a infraestructura de centro de control a través de la diferenciación de tráfico. Se trata de priorizar las comunicaciones a través de la clasificación de tipos de servicios de acuerdo a las características de los mismos, al tipo de tráfico generado y a sus requisitos de QoS. Ambas soluciones plantean la aplicación de mecanismos de etiquetado o marcado de paquetes a nivel de red, permitiendo la priorización de flujos de datos procedentes desde diferentes aplicaciones.

2.2.3.1 Arquitectura para la priorización de comunicaciones “tren-tierra”

Los autores de esta solución [Rovcanin+11] proponen una arquitectura modular para el control de las comunicaciones tren-tierra (Train-to-Wayside-Control-System, TWCS) [Pareit+12]. El sistema define dos elementos, uno en tierra (Wayside Control Equipment, WCE) y otro en la parte embarcada (Mobile Control Equipment, MCE). Estos dos elementos se encargan de gestionar y priorizar las comunicaciones a través de la diferenciación de flujos de tráfico.

En esta solución, la diferenciación de tráfico se realiza entre conexiones fiables (por ejemplo conexiones TCP) y conexiones para *streams* no fiables (por ejemplo UDP), dado que presentan

diferentes requisitos. El propósito es ofrecer una experiencia de conectividad optimizada dentro del sistema de comunicaciones tren-tierra (TWCS), priorizando niveles de importancia respecto a las características de los flujos de datos (por ejemplo la baja latencia), manejo del tráfico de acuerdo al ancho de banda disponible, etc. Todos estos aspectos hacen referencia a la QoS del sistema.

La funcionalidad del mecanismo de QoS correspondiente al TWCS se divide lógicamente en los siguientes módulos funcionales: Marker, SLA Enforcer, Shaper y Scheduler (**Figura 2.7**). Estos elementos se presentan como parte de la arquitectura de priorización de comunicaciones de este sistema.

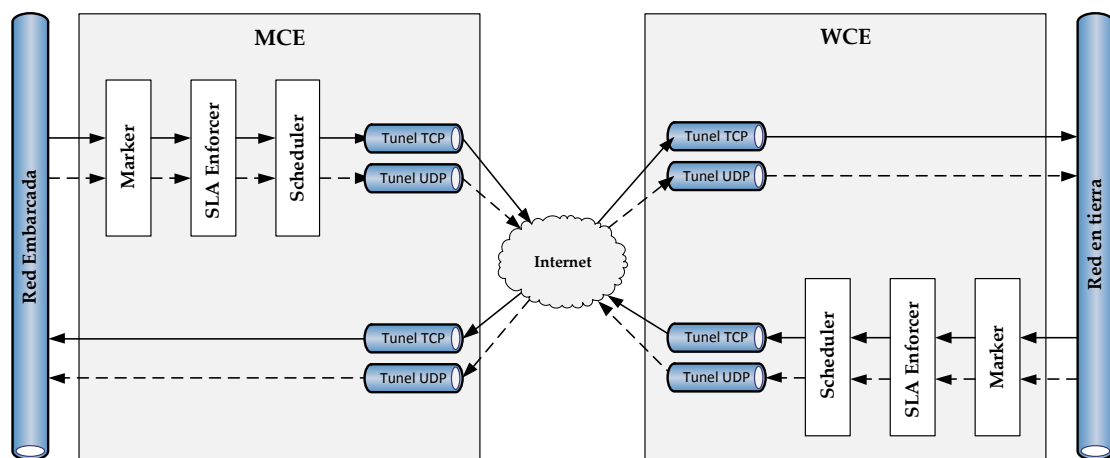


Figura 2.7: Arquitectura para priorización de comunicaciones “tren-tierra” con diferenciación de tráfico

El proceso correspondiente al mecanismo de control de la QoS en este caso sería el siguiente:

1. El *Marker* marca los flujos de paquetes con una clase de servicio y prioridad utilizando la arquitectura DiffServ [Blake+98], de acuerdo a diferentes servicios y sus características de flujo, de forma que el tráfico se clasifica en base a un conjunto limitado de clases de servicio que son tratados de diferente manera.
2. Una vez que el *Marker* etiqueta los paquetes, estos entran en el *SLA Enforcer*.

El SLA (Service Level Agreement) es un contrato escrito entre un proveedor de servicio y su cliente con objeto de fijar el nivel acordado para la calidad de dicho servicio. El SLA puede, por ejemplo, restringir el tipo de servicios que a un dispositivo se le permite utilizar. Dentro de esta arquitectura, todos los dispositivos que están sujetos al mismo SLA se ponen en una VLAN (Virtual Local Area Network) diferente. De esta manera, la identificación SLA se indica en la cabecera del VLAN.

Así, el SLA Enforcer asegura que todos los flujos que pertenecen al mismo SLA (se puede utilizar una VLAN por SLA) cumplen las estipulaciones de SLA (por ejemplo el

máximo ratio de ancho de banda, volumen de datos, etc.). Además, el SLA Enforcer retirará todos aquellos flujos de datos que pertenezcan a una clase de servicio cuyos requisitos no pueda cumplir (control de admisión).

3. A continuación, el *Shaper* amolda todos los flujos a la capacidad disponible del enlace inalámbrico tren-tierra. Cuando se alcanzan todos los requisitos, el paquete se envía por los enlaces.
4. Por último, el *Scheduler* configura la transmisión de los flujos a los enlaces apropiados, considerando la clase de servicio de cada flujo (por ejemplo el requisito de baja latencia para la VoIP).

Como próximo paso en este trabajo, los propios autores indican la necesidad de diseñar un mecanismo que permita cambiar dinámicamente las políticas de etiquetado de paquetes de acuerdo al estado actual de las comunicaciones, el estado del enlace inalámbrico, y el número de flujos de transmisión y sus prioridades. Se trataría de dar un paso más allá que permitiera garantizar la QoS en un entorno móvil como es el transporte.

Por último, mencionar que aunque los autores proponen esta solución para el ámbito ferroviario, su aplicación puede extenderse perfectamente a todo tipo de comunicación vehículo-tierra.

2.2.3.2 Priorización de comunicaciones ininterrumpidas multienlace

En esta sección se describe una solución planteada con el propósito de responder al objetivo de implantar un sistema capaz de mantener una conectividad continua vehículo-tierra, a través de la utilización de múltiples enlaces de comunicación física, ofreciendo además garantías de QoS, y priorizando el tráfico de datos en función de la demanda de comunicación de las aplicaciones [Urquiola+12].

Así, la base de esta solución es establecer un mecanismo de comunicaciones vehículo-tierra independiente de protocolo empleado a nivel de enlace, cuyas principales características son:

- **Alta disponibilidad:** habilitación de más de un enlace de comunicaciones inalámbrico en cada vehículo para poder intercambiar datos con la infraestructura de centro de control. La idea es que el sistema utilice en todo momento el enlace físico disponible que mejores prestaciones ofrezca a las aplicaciones que necesiten comunicarse con el centro de control, de forma que las transmisiones de datos se realicen en tiempo real, siempre que sea posible.
- **Calidad de servicio:** definición de una serie de procedimientos de conexión que permita la reserva de un ancho de banda determinado para una comunicación

concreta, teniendo en cuenta el ancho de banda permitido por el enlace físico seleccionado como activo (el más favorable para las comunicaciones).

Para ello, en esta solución se ha recurrido a un sistema basado en una distribución de GNU/Linux, utilizando herramientas de software libre diseñadas para esta plataforma y combinándolas a fin de obtener el resultado deseado. De esta manera, el proyecto se basa en una configuración de un sistema operativo diseñado para multitud de plataformas y que es capaz de ejecutarse en máquinas con unas especificaciones técnicas bastante reducidas, lo que amplía la gama de productos en los que se puede llevar a cabo su implantación.

La arquitectura global de comunicaciones (**Figura 2.8**) de esta solución está compuesta por dos componentes principales: el Máster de Comunicaciones Embarcado (MCE) en el vehículo, y el Máster de Comunicaciones de Tierra (MCT) en el centro de control o de tierra.

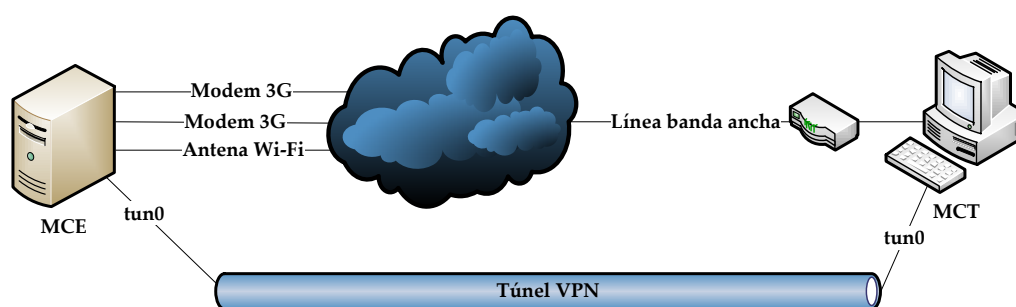


Figura 2.8: Arquitectura para la comunicación ininterrumpida punto a punto basada en software libre

El MCE dispone de varios enlaces físicos de comunicación inalámbrica para poder conectarse con tierra. Para llevar a cabo las comunicaciones, el MCE selecciona el enlace que considera más favorable en cada momento (de acuerdo al ancho de banda ofrecido). Por otro lado, uno de los objetivos perseguidos a la hora de diseñar esta solución era que el cambio de enlace no provocara interrupciones en las comunicaciones que se encontrarán en curso. Así, dado que el cambio de enlace activo debe ser transparente para las aplicaciones que se estén comunicando, esta solución establece una VPN host a host, permitiendo la creación de un túnel a modo de interfaz virtual que utilizarán las aplicaciones para comunicarse con el otro extremo. De esta forma, cuando se cambie el enlace activo, el software encargado de gestionar la VPN gestionará la recepción o envío de paquetes por la nueva ruta sin que afecte a la continuidad de las comunicaciones de las aplicaciones finales.

Además de ofrecer continuidad o disponibilidad en las comunicaciones, esta solución realiza una gestión de QoS y priorización de las comunicaciones. Para ello, en combinación con la utilización de VPN, se establece un mecanismo de filtrado de paquetes aplicando las utilidades *Iptables* [Kleinman10] y *Traffic Control* [LARTC12], que se encuentran disponibles en cantidad de distribuciones de GNU/Linux.

Iptables pertenece al framework Netfilter [Netfilter12] y es el firewall por defecto utilizado en GNU/Linux. En este caso, se utiliza su módulo de marcado de paquetes, mediante el cual se le añade una marca a cada paquete de datos que vaya a ser redirigido hacia la VPN, ya sea proveniente de una subred o del mismo equipo. Esta clasificación se hace en función del puerto por el que se vaya a redirigir cada uno de los paquetes, pudiendo clasificar así los paquetes de datos de cada una de las diferentes aplicaciones que se ejecutan en la plataforma.

Traffic Control, del paquete de utilidades Iproute2 [Hubert02], se encarga de gestionar las disciplinas de cola, que son las que priorizan el tráfico de salida. Es decir, después de realizar el marcado de paquetes de datos por parte de Iptables, Traffic Control se encarga de asociar cada una de las marcas a una prioridad y gestionar los límites superiores e inferiores de utilización de ancho de banda.

Se trata, por tanto, de una solución compuesta a través de la utilización y combinación de diferentes herramientas software que ofrece el sistema operativo Linux. Sin embargo, estas herramientas en principio están diseñadas para su aplicación en entornos de oficina o redes fijas. Aquí se propone su utilización en un entorno de comunicaciones móviles, pudiendo ser mejorada u optimizada para que responda de una forma más eficiente a los aspectos que influyen en un entorno móvil como son, por ejemplo, la cobertura y el ancho de banda.

En este sentido, tal como se ha mencionado anteriormente, el propósito de esta solución es seleccionar o activar el mejor enlace (el más favorable de acuerdo a los valores de ancho de banda que ofrece) en cada momento para llevar a cabo las comunicaciones. Sin embargo, las herramientas ofrecidas por Linux están diseñadas para hacer el cambio de enlace bien cuando se pierde conectividad del enlace activo, o bien ejecutando un comando propio del sistema operativo que permite hacer el cambio al enlace que se indique. Además, el sistema operativo realiza una priorización de enlaces de comunicación de forma predefinida (por tipo), por lo que si se desconecta el más prioritario se intentará establecer conexión a través del segundo más prioritario, y así sucesivamente.

Por tanto, con el propósito de aplicar esta solución para establecer una conectividad vehículo-tierra continua que permita seleccionar el enlace que mejores características ofrezca en cada momento, sería necesario desarrollar una herramienta software adicional que se encargara de monitorizar el estado y el ancho de banda de los diferentes enlaces inalámbricos, indicando en cada momento al sistema operativo qué enlace establecer como activo. El desarrollo de una herramienta software que implemente este comportamiento será acometido en el presente trabajo de tesis.

2.2.4 Acceso inteligente a redes heterogéneas

Tanto los avances en microelectrónica, como la demanda de acceso ubicuo por parte de los usuarios han sido determinantes para la evolución que han sufrido las tecnologías de comunicación inalámbrica. Estas tecnologías han posibilitado el acceso de usuarios a aplicaciones y servicios de forma ubicua a través de la introducción de redes y dispositivos que implementan el enfoque “*Always Best Connected*” [Gustafsson+03, Leijonhufvud01]. Esto permite el desarrollo de un gran abanico de soluciones en diferentes ámbitos, siendo el del transporte uno de los beneficiados de este tipo de aplicaciones y servicios.

En esta línea nace MIPGATE [Steuer+08], un gateway de conectividad móvil para el despliegue de aplicaciones vehiculares haciendo uso de redes heterogéneas. Consiste básicamente en una serie de unidades autónomas de comunicación que mantienen conexión con las diferentes tecnologías de acceso inalámbrico que se encuentren disponibles, y un mecanismo de toma de decisiones que permite cambiar de un enlace de red a otro que ofrezca mejores condiciones de forma inteligente. Además, utiliza información de contexto adicional que permite optimizar el proceso de toma de decisiones.

La **Figura 2.9** muestra la arquitectura del sistema MIPGATE.

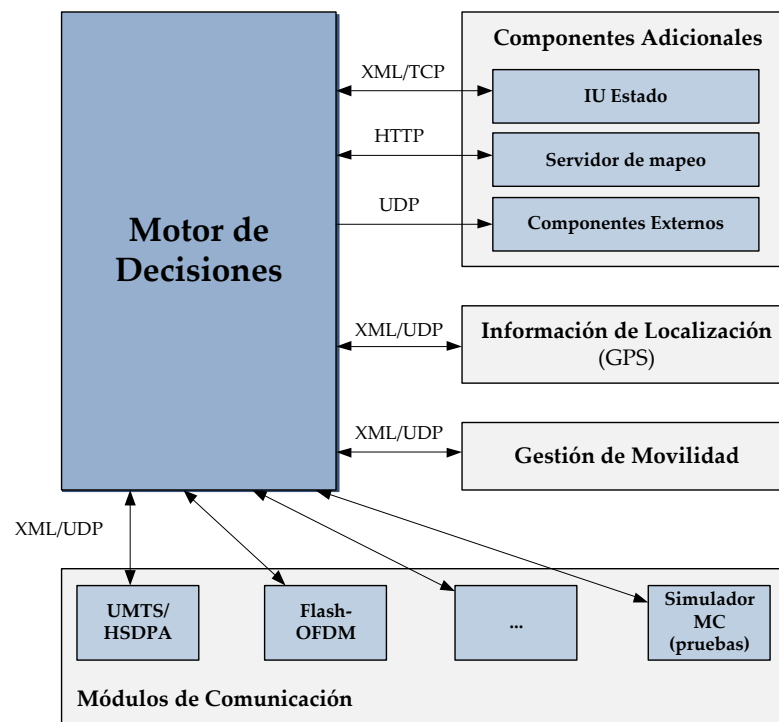


Figura 2.9: Arquitectura del sistema MIPGATE

El elemento principal del sistema es el *Motor de Decisiones* (MD). El MD es responsable de la agregación de la información de las diferentes redes de acceso disponibles. En base a esa

información y la configuración del sistema, el MD toma las decisiones de transmisión de datos. Por otro lado, el MD se integra a través de una capa de abstracción con el componente del sistema que es responsable de la *gestión de la movilidad*, que permite la integración de diferentes soluciones de gestión de cambio de enlace sin alterar el código del MD.

Así, el MD toma las decisiones de selección de red en base a los siguientes parámetros y condiciones:

- Disponibilidad del enlace.
- Intensidad de la señal, calidad de la señal, y valores históricos de esos valores (cambios a lo largo del tiempo).
- Ancho de banda teórico disponible.
- Conectividad de la capa de transporte (TCP/UDP) y calidad de esa conexión (tiempos de ida y vuelta (RTT), los umbrales para la pérdida máxima permitida de los paquetes de control, etc.).

Se pueden implementar varios protocolos de gestión de movilidad para soportar la migración sin fisuras entre diferentes redes de acceso durante el uso del servicio (por ejemplo MIPv4 [Perkins02], MIPv6 [Johnson+04], SIP [Rosenberg+02], HIP [Henderson07]). En este caso se ha implementado e integrado una pila IPv4 móvil que soporta NAT transversal [Johnson+04]. La red de telefonía móvil para los dispositivos conectados a MIPGATE se encamina a través del túnel Mobile IPv4.

El sistema MIPGATE implementa una serie de *Módulos de Comunicación* (MC) como componentes separados e independientes (un MC por cada tecnología de acceso a la red). Estos MC son responsables del establecimiento y terminación autónoma de las conexiones de red y la monitorización de esas redes. Los MC proporcionan al MD información homogeneizada sobre los parámetros de las correspondientes conexiones de red (disponibilidad, estado de la conexión, intensidad y calidad de la señal, ancho de banda teórico, latencia de la red, etc.).

Cada MC actúa como capa de abstracción para ocultar las complejidades específicas de la tecnología y proporcionar al MD una interfaz generalizada. Se han propuesto soluciones similares [IEEE_P802.21, Teraoka+07] que se encuentran aún en proyecto. En el caso de MIPGATE se ha desarrollado un protocolo y formato propio de mensajes. Así, el proceso interno de comunicación entre los componentes del sistema (MD, MC, Gestión de Movilidad, GPS) se basa en un protocolo basado en XML, donde se intercambia información a través de UDP.

Además, el sistema está provisto de *información de localización (GPS)*, que se incorpora a través de una capa de abstracción, y puede integrarse con otros *componentes adicionales*. Así, con una interfaz de estado (*IU Estado*) que se conecta con el MD vía TCP, el usuario puede monitorizar el estado actual del sistema. Esta interfaz permite el control remoto en términos de selección de red, pudiendo ser utilizado para lanzar comunicaciones desde aplicaciones externas. Adicionalmente, este sistema ofrece un servicio opcional de mapeo geográfico que puede alimentarse de datos reales a través de HTTP. Este servicio adicional puede ser usado por ejemplo para optimizar el envío de los diferentes casos de emergencia a las ambulancias.

Se trata por tanto de un gateway que establece un mecanismo de selección de enlace de comunicación en base a parámetros de calidad de la conexión, y una serie de criterios predeterminados de priorización, de forma que si hay varios enlaces de comunicación disponibles para las comunicaciones se seleccione aquel establecido como más prioritario. De esta manera, a través de MIPGATE se puede establecer una comunicación prácticamente continua, sin interrupciones considerables, gracias al mecanismo de cambio de enlace que implementa. Sin embargo, cabe destacar que uno de los parámetros influyentes en ese cambio (notificado por el MC al MD), es el valor de ancho de banda disponible teóricamente para un enlace determinado. Por tanto, este sistema podría ser optimizado, por ejemplo, si el MC en vez de notificar un valor de ancho de banda teórico, notificara el ancho de banda que realmente se encuentra disponible a través de un enlace de red determinado, permitiendo a través de una monitorización continua del mismo mejorar a su vez el rendimiento global de las comunicaciones. Este tipo de estrategias serán abordadas en el presente trabajo de tesis.

2.2.5 Gestión de tráfico y control de QoS en base a características de red

A continuación se describirá una solución que fue planteada en la tesis doctoral de Ignacio Martínez Ruiz [Martínez06a] con el propósito de contribuir al modelado de control de tráfico y QoS en aplicaciones para entornos de telemedicina. Ese tipo de aplicaciones están basadas en el tratamiento de todo tipo de información clínica relativa a un paciente, incluyendo datos almacenados en formatos específicos de distinta naturaleza. Este hecho hace necesario adecuar el diseño de las comunicaciones a las necesidades de este ámbito.

Teniendo en cuenta este tipo de cuestiones, se aborda la gestión de las comunicaciones desde dos vertientes complementarias: la naturaleza y características de la información a transmitir, y el comportamiento y variabilidad de las redes que la transportan.

Con el gran incremento en el número de redes, conexiones y equipos que se han de comunicar entre sí, han surgido múltiples iniciativas para caracterizar y modelar tanto el tráfico que circula por estas redes como los parámetros que definen sus prestaciones y rendimiento [Fang+03].

Además, se plantea la necesidad de ofrecer QoS con respecto al transporte de datos de las aplicaciones. A este concepto de QoS se le añade otro fundamental, el tipo de servicio (Type of Service, ToS), que identifica las diferentes clases de información intercambiada por cada aplicación generadora de tráfico. Así, la estrategia es que para cada ToS se haga un reparto óptimo de los recursos de red disponibles en función de las necesidades particulares, permitiendo definir una serie de parámetros de QoS para caracterizar cada servicio y tipo de red [Hardy02].

Esta perspectiva de seguimiento de las prestaciones de los servicios de usuario implica nuevas herramientas capaces de medir la QoS, pero migrando el control hacia los extremos de la red (*end-to-end*) [Huard+96]. De esta forma, con la monitorización de valores extremo a extremo, es posible adaptar los parámetros de las aplicaciones (por ejemplo las tasas de compresión y transmisión) para que la información transmitida se adecue a las características de la red [Yener01]. En definitiva, tal como el autor de esta tesis afirma, tanto la información asociada a los servicios, como la variabilidad de las redes que las soportan y la imposibilidad de controlarlas de forma exacta, requiere de un conocimiento detallado y una caracterización de modelos extremo a extremo.

En cuanto a escenarios de movilidad concretos en los que este planteamiento haya sido aplicado se contempla un escenario que permite la atención de urgencias y emergencias estableciendo comunicaciones inalámbricas (GPRS o UMTS) entre las ambulancias y los hospitales. La problemática aquí reside en las necesidades de comunicación de los diferentes servicios embarcados (señales biomédicas, videoconferencia, imagen de alta resolución, etc.), y las capacidades ofrecidas por un canal de alta variabilidad, con limitaciones de ancho de banda y, probablemente, con prestaciones que no se mantienen uniformes.

Por lo tanto, en el trabajo que acabamos de describir se proponen métodos de control de QoS que permiten ajustar las características de cada tipo de servicio a los recursos disponibles. Así, a partir del mismo se abren una serie de cuestiones relacionadas precisamente con la problemática trabajada en esta tesis doctoral, tal como se puede observar en la siguiente línea de investigación propuesta por el autor [Martínez06a]:

“A partir de estos resultados obtenidos, se han propuestos métodos de control de QoS que permiten ajustar las características de cada ToS a los recursos disponibles. Este método abre una interesante línea de trabajo para desarrollar algoritmos adaptativos y métodos de control interactivos que realicen este ajuste de forma dinámica. La idea fundamental consiste en monitorizar en tiempo real las condiciones de la red, recibir medidas feed-back de las variables de interés, y en función de estas medidas y según los umbrales de QoS específicos, modificar los valores óptimos de los parámetros característicos de cada ToS. En esta misma línea, y para poder llevar a cabo este proceso, sería muy útil añadir a la herramienta diseñada la posibilidad de monitorización y procesado en tiempo real. Esto permitiría introducir los

valores monitorizados como entradas a la herramienta, y los árboles de decisión y diagramas de estado como algoritmos de selección dinámica para ofrecer control de QoS adaptativo.”

La presente tesis doctoral abordará varias de las líneas futuras de investigación planteadas por este autor.

2.2.6 Selección dinámica de enlace basada en parámetros de QoS

En las comunicaciones móviles de cuarta generación (4G) [Eijk+03] coexistirán varias tecnologías, complementándose las unas con las otras. En este sentido, la selección del mejor enlace para las comunicaciones es un reto de cara a las comunicaciones del futuro. Varios investigadores [Fodor+03, Yiping+07, Chung+08, Yiping+08] proponen diferentes soluciones para alcanzar una conectividad bajo el enfoque “*Always Best Connected*” (ABC) [Gustafsson+03, Leijonhufvud01], que pretende la selección del mejor enlace de red disponible para las comunicaciones en cada momento.

En este apartado se describe un trabajo [Chander+11] que desarrolla un mecanismo de selección de enlace de comunicaciones inalámbrica basado en agentes, a través de la implementación del enfoque ABC.

A la hora de establecer cuál es el “mejor” enlace, intervienen diferentes aspectos tales como los requisitos propios del usuario, seguridad, tráfico actual de la red, y la intensidad de la señal de la red inalámbrica. El propósito de la solución ABC que se presenta en este apartado es proporcionar a los usuarios finales de QoS, definida ésta por medio de una serie de parámetros. Además de estos parámetros, la selección de red también depende del tipo de servicio (como navegación por Internet, datos de voz, video, etc.) que ofrece, que depende de una serie de factores como el coste del servicio, ratio de datos, intensidad de la señal, tráfico actual de la red, etc.

El mecanismo que estos autores proponen es una solución basada en agentes, que asigna a cada red un índice en base al peso o valor asignado a los parámetros de QoS y una serie de factores adicionales relacionados con los requisitos del usuario final. Así, el sistema establece un agente por cada red disponible, y calcula la suma de todos los valores asignados a los parámetros de una red particular, que el sistema puntuará entre 0 y 1. Un máximo de puntuación de la red (es decir, 1) será la mejor red disponible, mientras que una red que obtenga un valor inferior al umbral (<0.5) será ignorado. De forma similar una red que tenga un valor igual a cero será inmediatamente descartada.

De esta manera, cada agente sigue un conjunto de reglas a la hora de evaluar y puntuar cada red, que en este caso se basará en los siguientes parámetros: (a) coste del servicio, (b) ratio de

transferencia de datos, (c) movilidad del nodo móvil, (d) intensidad de la señal, (e) tráfico actual de la red, (f) seguridad y (g) consumo de batería.

La **Tabla 2.1** hace una relación de las reglas mencionadas, y el valor que asignaría el agente a cada parámetro dependiendo del estado y las características de la red.

Valor (V)	Coste del Servicio (A)	Ratio de Transferencia de Datos (B)	Movilidad del Nodo (C)	Intensidad de la Señal (D)	Tráfico de Red (E)	Seguridad (F)	Consumo de Batería (G)
1,0	Cero	11 mbps – 100 mbps	Estático	Excelente	Uno o muy pocos usuarios	Completa	Muy poco
0,75	Muy bajo	2 mbps – 11 mbps	Caminando	Alto	Moderado	Alta	Poco
0,50	Moderado	128 kbps – 2 mbps	--	Bueno	Alto	Moderada	Moderado
0,25	Alto	< 128 kbps	--	Bajo	Muy alto	Baja	Considerable
0,0	Excesivo	--	Alta movilidad	Nulo	Ninguno	Ninguna	Muy considerable

Tabla 2.1: Reglas para la selección de red

A través de los parámetros anteriores, se puntúa cada una de las redes disponibles. Algunos factores tienen un impacto mayor, mientras que otros influyen menos en la decisión de selección de red. De esta manera, a la hora de puntuar una red determinada, el agente computa la suma de los valores asignados a cada uno de los parámetros, tal como indica la siguiente formula,

$$ABC = \sum_{i=1}^n V_i$$

donde n representa el número de parámetros considerados, y V_i representa el valor correspondiente a cada uno de los parámetros.

Por tanto, lo que a través de este trabajo se propone es, en definitiva, una lógica de selección de enlaces basada en agentes, que implementando el enfoque ABC permita seleccionar en cada momento como activa para las comunicaciones la red que mejor satisfaga los requisitos de QoS y preferencias de los usuarios.

Este trabajo de tesis también aborda la selección de red basada en una serie de parámetros, siendo en este caso el ancho de banda real disponible ofrecido por cada una de las redes el parámetro que más peso tiene a la hora de decidir el enlace activo.

2.3 Arquitecturas de comunicaciones en la industria del transporte

En esta sección se hará una breve descripción de algunas arquitecturas inalámbricas existentes y que se considera relevante mencionar, ya que han servido como base para determinar las tendencias descritas previamente. Se trata de soluciones desarrolladas con carácter industrial, realizadas con el propósito de ser desplegadas en la industria del transporte para responder a necesidades detectadas dentro de las compañías de este ámbito.

2.3.1 Proyecto SAFEDMI

SAFEDMI [Gronbaek08, Ceccarelli+08, SAFEDMI12, Bondavalli+09], acrónimo de *Safe Driver Machine Interface*, es un proyecto europeo que pretende mostrar la viabilidad del uso de enlaces inalámbricos (reemplazo de cables) en escenarios relacionados con cargas de software para la configuración de sistemas embarcados y descarga de datos para la realización de operaciones de diagnóstico.

El propósito general de este proyecto es aplicar comunicaciones inalámbricas seguras para facilitar procedimientos operacionales y reducir costes de mantenimiento en el ámbito ferroviario, diseñando comunicaciones inalámbricas seguras para la transmisión de datos desde y hacia la interfaz hombre-máquina (Driver Machine Interface, DMI), que es parte del sistema de control de un tren. Se trata por tanto de dotar el DMI de capacidad de comunicación inalámbrica.

Los sistemas automáticos de control de tráfico en el ferrocarril se basan en sistemas de tierra y embarcados. El aumento de tráfico de trenes y la expansión de líneas ferroviarias de alta velocidad están exigiendo cada vez mayor nivel de seguridad en los sistemas control de tráfico. Con el propósito de asegurar la compatibilidad e interoperabilidad entre los sistemas de control de tráfico europeos, nació el programa ERTMS (European Rail Traffic Management System) [ERTMS12] para proporcionar unos requisitos funcionales y no-funcionales únicos. Así, el sistema ERTMS incluye un controlador DMI para el sistema de control de tráfico embarcado.

Una de las limitaciones de los DMI es la necesidad de una conexión física para poder llevar a cabo tareas de configuración o actualización de software. En este sentido, se considera que la mejor solución es la introducción de tecnologías inalámbricas, ya que permite la configuración y actualización del software del DMI sin llevar a cabo ninguna operación mecánica. Además,

las tecnologías inalámbricas no sólo suponen una manera más rápida para llevar a cabo el mantenimiento, también ofrecen la posibilidad de establecer centros de mantenimiento que puedan realizar las tareas de actualización del software DMI y recoger información (por ejemplo información periódica de diagnóstico) enviada desde el DMI [Salaberria+12a].

El objetivo del proyecto SAFEDMI es, por tanto, diseñar y desarrollar un sistema DMI que sea capaz de:

- *Reducir la complejidad de hardware y costes implementando mecanismos de seguridad software.*
- *Integrar interfaces inalámbricas de comunicación seguras para propósitos de configuración, descarga de software y firmware y diagnóstico.*

El uso de la interfaz inalámbrica de SAFEDMI prevé las siguientes dos operaciones: *mantenimiento*, resultando en carga de ficheros, y *diagnóstico*, resultando en descargas de porciones menores de datos desde el DMI periódicamente o por petición. La carga y descarga de ficheros para la configuración pueden ejecutarse en los siguientes tres escenarios (**Figura 2.10**): (1) dominio de rango corto, (2) dominio de largo alcance y (3) dominio embarcado (ver apartado 2.1.3).

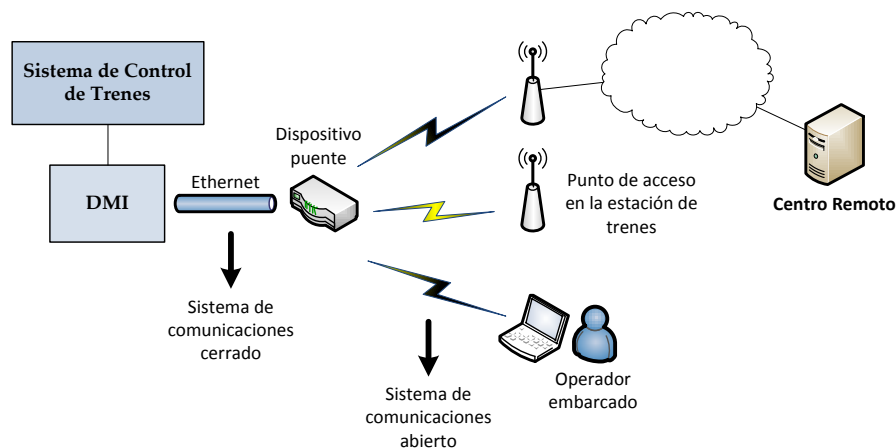


Figura 2.10: Escenarios para comunicaciones inalámbricas con el DMI en el proyecto SAFEDMI

En cuanto al desarrollo, se quiso seleccionar una tecnología de comunicaciones inalámbrica madura, comúnmente disponible en el mercado.

	OPERADOR EMBARCADO	RANGO CORTO	RANGO LARGO
Mantenimiento	WLAN 802.11	WLAN 802.11	WiMax
Diagnóstico	ZigBee, Bluetooth, WLAN 802.11	Bluetooth, WLAN 802.11	WiMax, GPRS, UMTS

Tabla 2.2: Aplicabilidad de tecnologías inalámbricas en diferentes escenarios

La aplicabilidad de la tecnología de comunicación dependerá de su habilidad para proporcionar las tasas de transmisión necesarias. Un problema importante con el uso de bandas de frecuencia sin licencia, tales como 802.11x, es obviamente la existencia de interferencias, y el acceso compartido al medio inalámbrico. Si estos aspectos provocan el bloqueo de los servicios, el cambio a otra interfaz de comunicación puede resolver este problema. El uso de múltiples enlaces de comunicación inalámbricas incrementa el coste del sistema, pero puede ayudar a mejorar mucho la disponibilidad de conectividad inalámbrica.

En la línea de la solución planteada en esta tesis, para el desarrollo de este proyecto se considera el uso de diversas tecnologías inalámbricas (UMTS, WiMAX, WLAN 802.11) dependiendo del escenario de aplicación, proporcionando redundancia gracias al uso de múltiples interfaces, que también incluyen un enlace cableado como solución de respaldo. Este enlace cableado es necesario en casos en los que la conexión inalámbrica no se pueda establecer, o no pueda ejercer la tasa de transferencia requerida.

En cuanto a su arquitectura, SAFEDMI en sí mismo se compone de tres elementos: el DMI, el *Dispositivo Puente* (DP) y los dispositivos periféricos. El objetivo del DP es permitir la conexión del DMI a dispositivos externos (**Figura 2.11**). Con el propósito de separar las funciones relacionadas con la seguridad del resto en el componente DMI, SAFEDMI propone dividir el sistema DMI en dos subsistemas: (1) el propio DMI (DMI/SUB1) y (2) un dispositivo puente (DP/SUB2) conectado al DMI vía Ethernet.

La **Figura 2.11** representa la pila de protocolos y los flujos de tráfico entre los subsistemas.

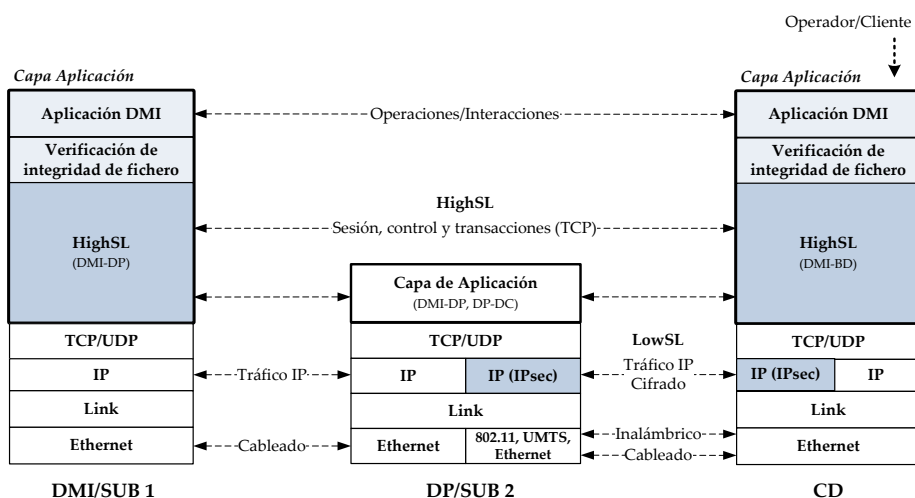


Figura 2.11: Arquitectura de comunicaciones inalámbrica (SAFEDMI)

Dado que el propósito del dispositivo puente es permitir que el DMI se conecte a dispositivos externos para realizar operaciones de configuración o diagnóstico, tiene dos interfaces de red: uno (cableado) para conectarse con el DMI; y otro (inalámbrico) para conectarse remotamente

con el *Centro de Distribución* (CD), entendiéndose como CD un computador de un operador embarcado o un centro remoto que sea un punto final de comunicación [SAFEDMI07].

Por tanto, el DP tiene las siguientes funciones:

- Gestión de la mayoría de las funciones de adquisición de recursos relacionadas con el establecimiento y mantenimiento de las comunicaciones.
- Reducción de la carga de procesamiento del DMI.
- Protección criptográfica de las comunicaciones inalámbricas.
- Actúa como firewall y entidad responsable de la aplicación de las políticas de tráfico, reduciendo así el impacto de equipamiento defectuoso y ataques maliciosos.

En lo que a la verificación de la integridad de los datos se refiere, este sistema establece que dicha verificación se haga a nivel de aplicación.

En cuanto a la capa de seguridad, se presenta en la pila de protocolos de todos los dispositivos involucrados en la comunicación (DMI, DP y CD) (**Figura 2.11**). Esta capa de seguridad está a su vez dividida en dos subcapas: (1) *Low Safety Layer* (LowSL) ubicado en el centro de CD y el DP, y (2) *High Safety Layer* (HighSL) ubicado en el centro de CD y en el DMI. Esta división viene motivada por la clasificación de requisitos de comunicación en dos niveles: comunicaciones a nivel de aplicación y transmisión de mensajes a través de sistemas de comunicaciones inalámbricas abiertos.

Por tanto, la subcapa LowSL se responsabiliza de proporcionar una conexión segura entre el DP y el CD. A su vez, el cometido del HighSL es garantizar una conexión punto a punto segura y confiable, habilitando diferentes acciones de control de sesiones y recuperación ante fallos. A todo esto, se le añaden los requisitos de comunicación de las aplicaciones, que se traducen en la introducción de soporte para diferentes clases de tráfico motivados por la representación de diferentes requisitos y niveles de integridad.

Se trata por tanto de un sistema que habilita comunicaciones con el vehículo en dominios de corto y largo alcance. Sin embargo, no aplica ningún mecanismo de priorización ni control de calidad del servicio, centrándose más bien en aspectos relacionados con la seguridad en la transmisión de información.

2.3.2 Proyecto TRAINCOM

El proyecto TRAINCOM [TrainCom+04, Gatti02, Gatti03] es un proyecto de investigación que fue parcialmente financiado por la Comisión Europea bajo el programa 1998-2002 de "*Information Society Technology*". El propósito del proyecto era especificar y desarrollar un

sistema de comunicaciones para las aplicaciones telemáticas en el ámbito ferroviario, integrando la red embarcada, enlaces de radio 2G y 3G, y tecnologías Internet. Así, se considera un tren como un grupo de dispositivos conectados a través de una red, que actúa como un usuario móvil que ejecuta una serie de servicios tales como información para el usuario, identificación del tren y gestión de flota. El tren se conecta al centro de control a través de una serie de conexiones inalámbricas y es capaz de cambiar dinámicamente de enlace de conexión en función de los requisitos de ancho de banda solicitados por el “servicio”.

El proyecto TRAINCOM se basa en los resultados obtenidos de un proyecto previo, el proyecto ROSIN [Umiliacchi+97], donde uno de los objetivos fue establecer comunicaciones inalámbricas “tren-tierra”.

El propósito de TRAINCOM era por tanto desarrollar un sistema de comunicaciones “tren-tierra” fiable, ofreciendo acceso remoto ubicuo a equipamiento embarcado integrando nuevas tecnologías disponibles:

- Red embarcada tipo TCN o FIP o posiblemente otra solución de bus embarcado.
- Enlace radio (basado en GSM o GSM-R, cuando esté disponible) entre tren y tierra.
- Protocolos de más alto nivel y lenguajes de Internet (TCP-IP, HTTP, XML, JAVA, JINI, etc.) para el enrutamiento, formato y entrega de mensajes [Nieva+01].
- La interfaz entre la red embarcada e Internet (llamada RoGate en el proyecto).
- La infraestructura de tierra (servidores de comunicación, servidores de nombre, servidores de aplicaciones), para soportar la necesidad de comunicación y servicios.

La **Figura 2.12** muestra la arquitectura de comunicaciones de este proyecto, cuyo punto clave está en la interoperabilidad del sistema y los protocolos de comunicación de las aplicaciones.

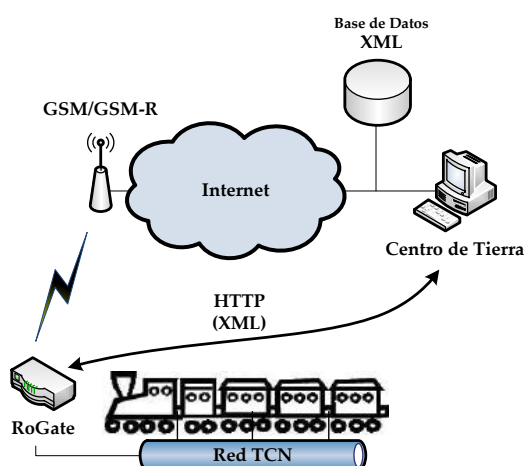


Figura 2.12: Arquitectura de Comunicaciones TRAINCOM

Por otro lado, la infraestructura de comunicaciones de TRAINCOM pretende ser “abierta” y no restringida a una implementación de enlace de radio específica (por ejemplo GSM, WLAN) o red embarcada de tren (por ejemplo TCN, FIP). Además, cabe mencionar que todos los datos que maneja este sistema están definidos en formato XML.

2.3.2.1 Componentes de la plataforma de comunicaciones

La **Figura 2.13** muestra los componentes principales del sistema y su interrelación. El sistema se compone del gateway embarcado (RoGate) en el tren, y de los segmentos de tierra (RoGs), el servidor de nombres (RoNS) y los clientes (RoClient) en tierra.

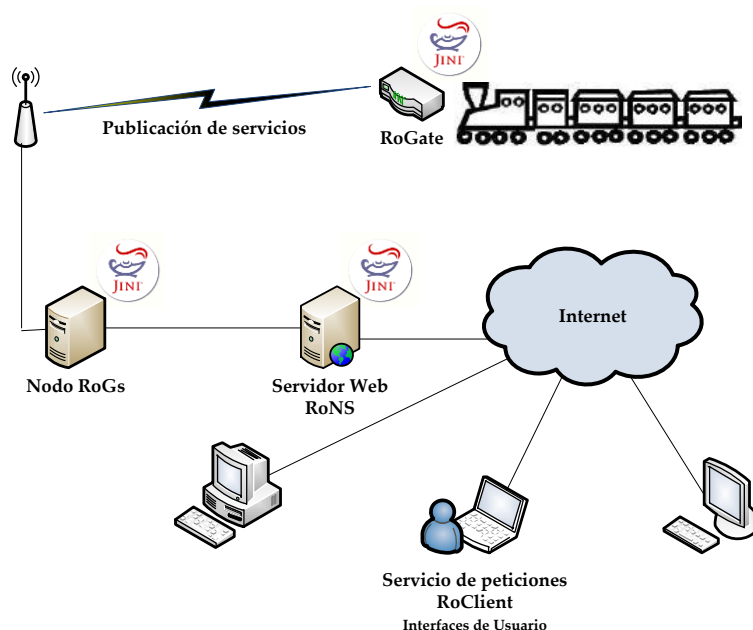


Figura 2.13: Arquitectura TRAINCOM basada en tecnología Jini

El RoGate es el dispositivo embarcado en el tren que implementa la interfaz entre el ámbito embarcado y el de tierra, a través de un conjunto de tecnologías inalámbricas, permitiendo conmutar de uno a otro “sobre la marcha” dependiendo de las necesidades de comunicación que presenten los servicios desplegados (multimedia, alarmas, mensajes, etc.). Desde el enfoque de tierra, RoGate es el punto de acceso del tren, y representa al tren dentro de la red. Por otro lado, en lo que a su implementación se refiere, RoGate implementa las interfaces del servicio de búsqueda y descubrimiento del API Jini [Nieva+00].

El RoGs constituye el enlace de comunicaciones de tierra para los diferentes miembros de una comunidad (o conjunto de equipos y usuarios), pudiendo haber más de un nodo RoGs en el sistema (uno por cada estación de tierra). Cada RoGs se encargará de gestionar los aspectos

relacionados con el estado de conectividad y comunicación con los trenes, así como la demanda de servicio y comunicaciones solicitados por parte de los usuarios.

El propósito del sistema de tierra compuesto por los elementos RoGs, RoNS y RoClient era desarrollar modelos, funciones y módulos básicos para dar respuesta a los futuros procesos innovadores de comunicación tren-tierra, demostrando así el potencial de las tecnologías desarrolladas en el proyecto.

Se trata por tanto de un proyecto que despliega una plataforma de comunicaciones diseñada a nivel de aplicación, haciendo uso de diferentes tecnologías de comunicación e Internet en la misma línea que la propuesta en el trabajo doctoral que nos ocupa. Sin embargo, si bien el sistema contempla el cambio de enlace de comunicación inalámbrico tren-tierra al que se considere más favorable en cada momento de acuerdo a las necesidades de ancho de banda de los servicios, dicho sistema pudiera ser mejorado a través de, por ejemplo, la aplicación de mecanismos de priorización de tráfico y QoS.

2.3.3 Proyecto de conectividad inalámbrica de EuskoTren

La compañía ferroviaria vasca EuskoTren ha invertido estos últimos años en la renovación de su material móvil (trenes) implicándose también en la innovación tecnológica, permitiendo incorporar nuevos sistemas de seguridad y fiabilidad.

Dentro de la innovación tecnológica de EuskoTren, se encuentra un proyecto que define una arquitectura de conectividad inalámbrica [Salaberria+09, Gutierrez+10], que habilita un canal de comunicaciones inalámbrico de propósito general entre el tren y el centro de control en tierra de forma que las aplicaciones o servicios que se desplieguen se desentiendan de todos los aspectos relacionados con la gestión de las comunicaciones remotas: establecimiento y cierre de las conexiones, gestión del estado de conectividad, priorización en la transmisión de información de diferente naturaleza y diferentes niveles de criticidad, etc.

2.3.3.1 Características de la plataforma

El propósito de esta plataforma de comunicaciones es dar respuesta a las necesidades de comunicación de información entre las aplicaciones del tren y las que se encuentran en el centro de tierra [Salaberria+12b]. Su diseño está basado en el hecho de que la transmisión de información intercambiada entre las aplicaciones finales puede tener más o menos urgencia. Es decir, existe información que precisa ser transmitida en el momento en que se genera, como puede ser el caso de la información de posicionamiento o alarmas de algún elemento crítico para el funcionamiento del tren. Por otro lado, hay información menos urgente cuya transmisión puede ser pospuesta y no sea necesario su envío una vez generada, como pueden

ser las imágenes del CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) del interior del tren, o los ficheros de audio utilizados por el hilo musical. Además, habitualmente la información urgente o prioritaria suele tener un volumen muy pequeño comparado con la información no prioritaria.

Por este motivo, la arquitectura de comunicaciones propuesta diferencia dos tipos de comunicaciones:

- **Comunicaciones “ligeras”:** este tipo de comunicación es la que permite el intercambio de información prioritaria y de pequeño volumen (del orden de Kbytes) que precisa ser transmitida en el momento de su generación [Perallos+12, Carballido+10].
- **Comunicaciones “pesadas”:** hay información muy voluminosa o que no es prioritaria, y por lo tanto no es necesario que se transmita y procese en tiempo real. Para este tipo de información se definen las comunicaciones “pesadas” que involucran la transmisión de grandes cantidades de información (del orden de Mbytes) [Salaberria+12a].

Al igual que se diferencian dos tipos de comunicaciones, también se distinguen dos medios de transmisión, uno por cada tipo de comunicación descrita anteriormente. De esta manera, las comunicaciones “pesadas” se realizan a través de la tecnología WiFi mientras que para las comunicaciones “ligeras” se ha seleccionado la tecnología GPRS/UMTS/HSPA [Gatti02], que permite una comunicación inmediata haciendo uso de los medios de comunicación ofrecidos por los proveedores de telefonía sin tener que realizar ningún tipo de instalación de elementos de infraestructura física.

La elección de las tecnologías WiFi y GPRS/UMTS/HSPA no garantiza la disponibilidad de cobertura para la comunicación en el 100% de los casos (por ejemplo, no suele haber cobertura GPRS/UMTS/HSPA en muchos túneles o zonas montañosas a menos que los operadores de telefonía instalen antenas específicas), pero se considera suficiente para las necesidades de comunicación que demandan los servicios que serán desplegados sobre la arquitectura, ya que combinando las tecnologías WiFi y GPRS/UMTS/HSPA, se puede decir que prácticamente se puede alcanzar el 100% de la cobertura, puesto que los trenes realizan recorridos conocidos, es decir, las vías son fijas. Pese a que la elección tecnológica inicial se ha decantado por las tecnologías WiFi y GPRS/UMTS/HSPA, como la arquitectura estará basada en estándares, EuskoTren contempla una futura migración a otras tecnologías (en principio TETRA), que podrían aumentar la cobertura de comunicación acercándola al 100%.

2.3.3.2 Arquitectura de la plataforma

Las comunicaciones ligeras se basan en tecnologías móviles, por lo que están habilitadas de manera continua, siempre que el tren se encuentre en áreas de cobertura móvil. En este sentido, dadas las diferencias de cobertura que presentan las distintas operadoras de telefonía

móvil con respecto a la calidad de señal en diferentes áreas geográficas, EuskoTren equipa cada una de sus terminales con dos tarjetas móviles pertenecientes a diferentes operadoras, trabajando uno como enlace de comunicación primario, y el otro como secundario. La idea es reducir el problema de falta de cobertura, cambiando de un enlace de comunicación a otro de acuerdo a la disponibilidad de cobertura.

En lo que a comunicaciones pesadas se refiere, EuskoTren ha habilitado puntos de acceso WiFi en puntos de la infraestructura ferroviaria donde el tren vaya a estar estacionado durante un cierto periodo de tiempo (estaciones, cocheras, etc.), permitiendo así realizar estas cargas/descargas de información sin perder la conectividad durante periodos suficientemente prolongados.

La **Figura 2.14** representa la arquitectura de la plataforma de conectividad de EuskoTren. En ella se pueden diferenciar las comunicaciones ligeras (en rojo) y pesadas (en verde), así como los sistemas de tierra y embarcados, cada uno de ellos con su red de equipos y aplicaciones.

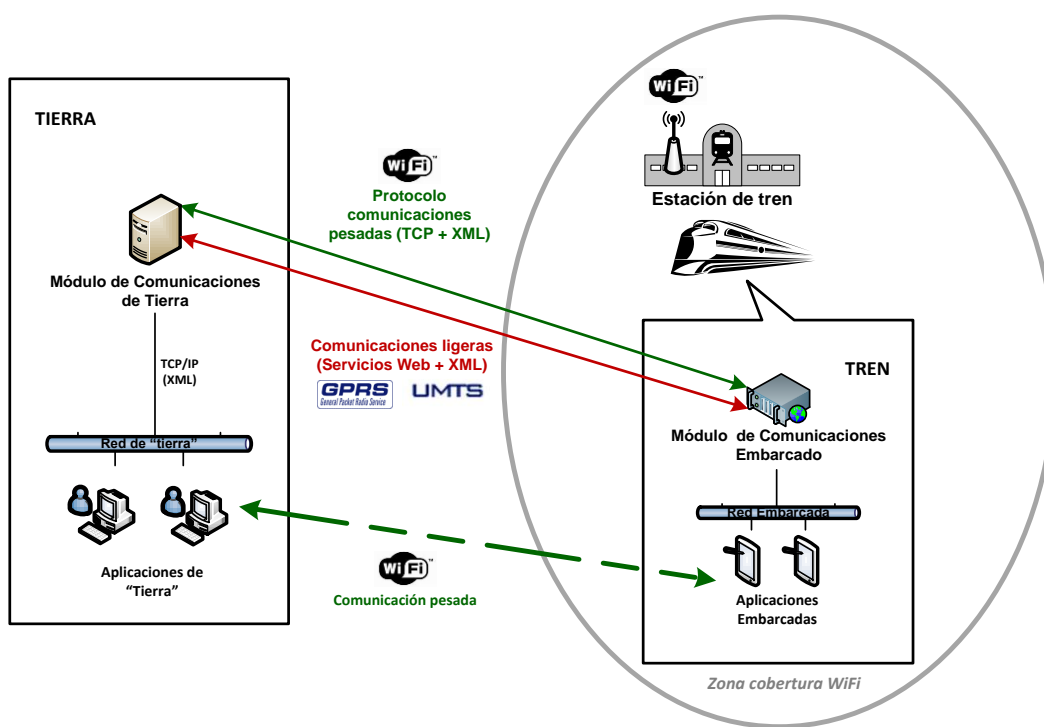


Figura 2.14: Arquitectura de la plataforma de conectividad inalámbrica de EuskoTren

Para la gestión de las comunicaciones tren-tierra, este sistema define dos elementos: el Módulo de Comunicaciones de Tierra (MCT) en el centro de control, y el Módulo de Comunicaciones Embarcado (MCE) en el tren.

2.3.3.2.1 Gestión de las comunicaciones ligeras

Tal como se puede observar en la **Figura 2.14**, las comunicaciones ligeras se realizan a través de servicios web intercambiando mensajes XML. En estos mensajes se indica la aplicación origen y destino de la información, además del contenido de lo que se quiere transmitir de forma codificada, permitiendo el intercambio de información independientemente de la naturaleza de la misma (datos binarios, texto, etc.).

Así, cada vez que una aplicación final, sea en tierra o en el tren (ya que la comunicación es bidireccional), quiera transmitir un contenido, se comunica con el módulo de comunicaciones correspondiente a través de un protocolo definido, y el MCT y MCE se encargan de llevar a cabo la comunicación y hacer llegar a la aplicación destino la información transmitida desde la aplicación origen.

2.3.3.2.2 Gestión de las comunicaciones pesadas

Las comunicaciones pesadas se realizan en puntos de la infraestructura ferroviaria (garajes, cocheras, estaciones) donde se instalan puntos de acceso inalámbrico (WiFi en este caso). La problemática aquí está en que un punto de acceso WiFi ofrece un ancho de banda limitado, habiendo demandas de comunicación desde los sistemas embarcados de diferentes trenes en un mismo momento, provocando problemas de cuello de botella y la monopolización de ancho de banda por parte de una comunicación determinada. Para dar respuesta a este tipo de problemas, la solución de comunicaciones inalámbricas de EuskoTren define un mecanismo de priorización que permite arbitrar las comunicaciones pesadas.

Tal como se muestra en la **Figura 2.14**, las comunicaciones pesadas se dividen en dos flujos diferentes: (1) el flujo de comunicación entre el MCT y el MCE, y (2) el flujo de comunicación entre las aplicaciones finales de tierra y embarcado. La conexión entre MCT y MCE se establece una vez que el tren entra en el área de cobertura, siendo su propósito el intercambio de información en forma de mensajes entre ambos módulos para gestionar y arbitrar las comunicaciones pesadas. De esta manera, en base a una serie de prioridades definidas, el sistema toma decisiones sobre qué comunicación se puede llevar a cabo en cada momento. Así, una vez que se procede a atender una comunicación, se notifica a las aplicaciones involucradas que pueden establecer conexión e iniciar la transmisión de datos correspondiente. Es en este momento cuando se establece ese segundo tipo de flujo del que se mencionaba, el flujo de comunicación entre la aplicación final de tierra y embarcada. Cabe mencionar, que en este caso el sistema no se encarga de gestionar esa comunicación final, sino que se establece una conexión directa entre las aplicaciones finales, sin la intervención de intermediario alguno. Es decir, en este caso el MCT y MCE solo intervendrán en las cuestiones relacionadas con la priorización de las comunicaciones y resolución de temas relacionados con el direccionamiento IP de los trenes, indicando cuáles de las comunicaciones pueden iniciarse,

y tomar las medidas oportunas si estas fallan (por ejemplo dando paso a la siguiente comunicación más prioritaria).

Se trata por tanto de una gestión de las comunicaciones que establece un mecanismo de priorización o arbitraje, y evita el colapso del canal inalámbrico, atendiendo siempre primero a aquellas solicitudes de comunicación consideradas más prioritarias. Asimismo, este sistema no aplica ningún mecanismo de QoS en la comunicación final, ya que no interviene en la misma. De hecho, no se hace ningún tipo de monitorización del estado del canal más allá del estado de conectividad del tren, no realizando ningún tipo de gestión de aspectos como el ancho de banda.

Por otro lado, como restricción de esta solución, se puede mencionar que las comunicaciones pesadas solo pueden llevarse a cabo por iniciativa de las aplicaciones de tierra. Además, aplicando este esquema, solamente se permite habilitar una comunicación por punto de acceso inalámbrico en cada momento.

2.3.4 Proyecto BOSS

Tradicionalmente, las operaciones relacionadas con el mantenimiento o diagnóstico del estado de los vehículos se han realizado una vez que el vehículo se encuentra estacionado, lo que evita que se puedan llevar a cabo acciones correctivas en tiempo real. Del mismo modo, las operaciones de video vigilancia que se aplican en las estaciones no se han podido aplicar en el ámbito vehicular dada la carencia de medios de transmisión eficientes. Por otro lado, la creciente demanda de unidades de video vigilancia móvil por parte de los usuarios finales y autoridades públicas [EC01, IAU06], implica el uso de sistemas de comunicación inalámbrica de banda ancha para poder realizar la transmisión de video al centro de control. En este contexto, es importante desarrollar herramientas automatizadas para la asistencia de tareas de monitorización en el centro de control, permitiendo discriminar qué contenido debe o no ser transmitido y con qué prioridad, dadas las limitaciones de ancho de banda que ofrecen los enlaces inalámbricos.

Aunque existen sistemas que permiten soluciones tanto de video análisis [Velasin+04] como de gestión de recursos inalámbricos [Moniak+07], la problemática de diseñar una solución que permita la comunicación punto a punto y que gestione la QoS, además de otros elementos de la transmisión, se encuentra aún abierta.

BOSS [BOSS12, Lamy-Bergot+09, Jeney+07, Sanz+08], acrónimo de *“onBoard wireless Secured video Surveillance”*, es un proyecto soportado por la Unión Europea bajo el programa Celtic/Eureka. Se trata pues de un desarrollo tecnológico en el que participan las compañías francesas Thales, Alstom, Sncf, Inrets, y la Universidad Pierre et Marie Curie (Upmc); las

compañías belgas Multitel y Barco-Silex; las húngaras BME (Budapest University) y Egroup; y las españolas Telefónica e Ineco.

El propósito del proyecto BOSS es diseñar, desarrollar y validar un sistema eficiente de comunicaciones de banda ancha entre vehículos de transporte público (en este caso el tren) y el centro de gestión en tierra con garantías de QoS. La idea es crear un sistema que permita llevar a cabo el despliegue de funcionalidades avanzadas en el ámbito embarcado y servicios adicionales que incluyan soluciones para incrementar la seguridad de los pasajeros (video vigilancia), supervisión y mantenimiento predictivo/preventivo, diagnóstico remoto, así como el acceso a Internet desde los vehículos.

El desarrollo del proyecto BOSS se inició en el 2006 y tuvo fin en el 2009. Las pruebas del mismo se realizaron en un entorno real gracias a la colaboración de la compañía ferroviaria española Renfe.

2.3.4.1 Arquitectura y características

Garantizar la QoS en red es un reto, especialmente en entornos heterogéneos y dinámicos. El proyecto BOSS estudia y propone un framework punto a punto que gestiona la QoS que puede aplicarse tanto a redes fijas como ad-hoc, proporcionando un sistema de comunicaciones que permite el desarrollo de nuevas aplicaciones en el ámbito del transporte.

Las principales características de este framework se centran en la definición de políticas de QoS y técnicas de priorización de flujos en cada una de las subredes.

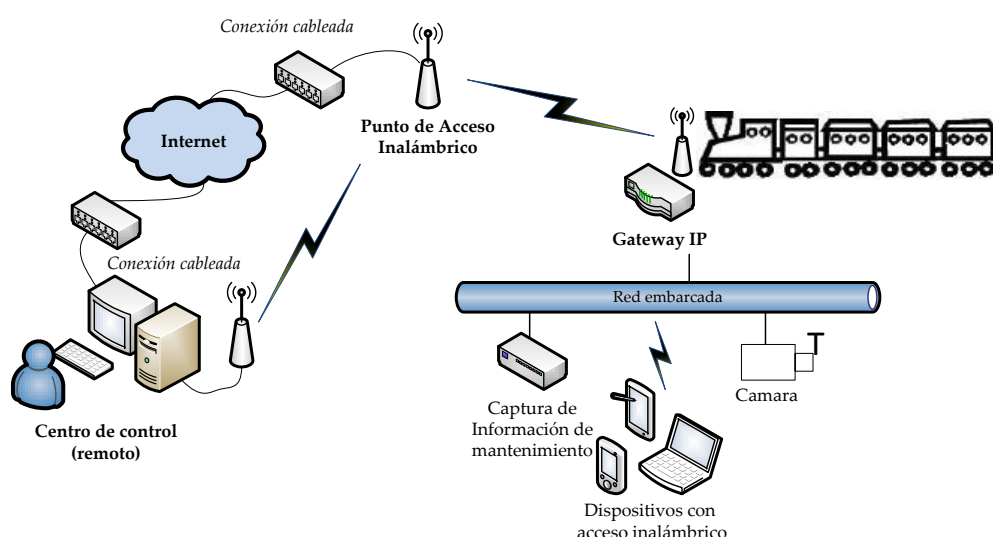


Figura 2.15: Arquitectura del proyecto BOSS

Así, el proyecto BOSS desarrolla una arquitectura dedicada que permite la interconexión entre el ámbito vehicular y el ámbito del centro de tierra a través de un gateway IP único. Además,

tal como se puede observar en la representación de la arquitectura que muestra la **Figura 2.15**, el gateway embarcado permite interconectar dispositivos y equipos de acceso cableado e inalámbrico.

En lo que a tecnologías de comunicación inalámbrica se refiere, la comunicación tren-tierra se puede dar a través de diferentes tipos de redes inalámbricas (GSM-R, GPRS, UMTS, WiMAX y WLAN). Además, la arquitectura de este proyecto está diseñada para seleccionar el enlace de red inalámbrico más adecuado en cada momento para realizar la transmisión de datos al centro de control. Para ello, se realiza una monitorización de la calidad de los enlaces inalámbricos disponibles para la comunicación tren-tierra.

Por otro lado, cabe mencionar que, para realizar la gestión de cambios de enlace, el proyecto aplica una solución propuesta por los socios del proyecto [Jeney+09] que consiste en hacer una gestión de redes heterogéneas basada en conocimiento de comportamientos históricos e información de posicionamiento GPS. Esto permite al sistema predecir cuándo se van a producir los cambios de enlace, para de esta forma optimizar las comunicaciones, reduciendo la pérdida de paquetes y eliminando casi totalmente la latencia producida durante dichos cambios de enlace.

En trabajo de esta tesis propone un middleware de comunicaciones con muchos puntos en común con el proyecto BOSS. Sin embargo, la principal diferencia está en que la solución de la tesis centra su funcionalidad en la limitación de ancho de banda que ofrecen las diferentes redes. De esta manera, el middleware de la tesis, además de monitorizar la calidad y el estado de los diferentes enlaces disponibles, basa su comportamiento en los valores de ancho de banda real disponibles en cada una de las redes, que influirán tanto en la selección de enlace, como en la priorización y asignación de tasas de transferencia a las comunicaciones, realizando así una gestión de las comunicaciones dinámica.

2.3.5 Proyecto e-Bus

El plan general para la evolución del sistema de billeteaje de Madrid a otro basado en tarjetas inteligentes (proyecto BIT), establecía un hito, en enero de 2007, en el que la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (en adelante EMT) debía aceptar el nuevo soporte TMI 2 (Tarjeta de Memoria Inteligente), además de los títulos de transporte que se irían emitiendo en los emisores Sube-T (Tarjeta Inteligente de doble interfaz que utiliza sistema operativo), billetes sin contacto (billete con circuito integrado capaz de almacenar e intercambiar datos a través de un interfaz de radio frecuencia ISO14443) y por supuesto el resto de los títulos con el soporte magnético actual [EMT08].

La implantación de este sistema conllevaba necesidades adicionales y actuaciones en validadores, expendedoras, terminales de inspección, y protocolos de comunicaciones, al exigir el modelo una importante capacidad de proceso, memoria y comunicaciones que sobrepasaban las posibilidades de los equipamientos embarcados, de las instalaciones de cocheras y de la propia capacidad de tratamiento de la información de los sistemas informáticos de EMT. Consecuentemente, EMT debía adaptar su sistema global de Tecnologías de la Información y Comunicación, actualizando, entre otros, el equipamiento embarcado, los terminales de inspección y las propias aplicaciones informáticas y de comunicaciones.

Así, se propuso una arquitectura diseñada para ser una solución flexible, modular y escalable, permitiendo la integración de los dispositivos y sistemas existentes, pero estando abierta a la incorporación, en el futuro, de otros módulos y componentes que en su momento se consideren de utilidad para mejorar la eficiencia de la explotación y, por consiguiente, el servicio al usuario.

2.3.5.1 Concepto e-Bus

Esta arquitectura pretende ir más allá, convirtiendo al autobús en una estación de trabajo independiente dentro de la red local de EMT. Surge así el concepto e-bus [Martínez06b], patentado por EMT en colaboración con las empresas participantes en su ejecución. Para ello, ha sido necesaria la introducción de nuevas tecnologías de comunicación, permitiendo la comunicación entre el centro de control en tierra, y los vehículos.

Este sistema habilita los vehículos de equipamiento embarcado que dota a los mismos de conectividad inalámbrica a través de dos tipos de enlaces de comunicación con tierra: (1) enlaces móviles (GPRS, UMTS) y (2) enlaces radio (en este caso WiFi).

La siguiente **Figura 2.16** representa la arquitectura global de comunicaciones de este sistema:

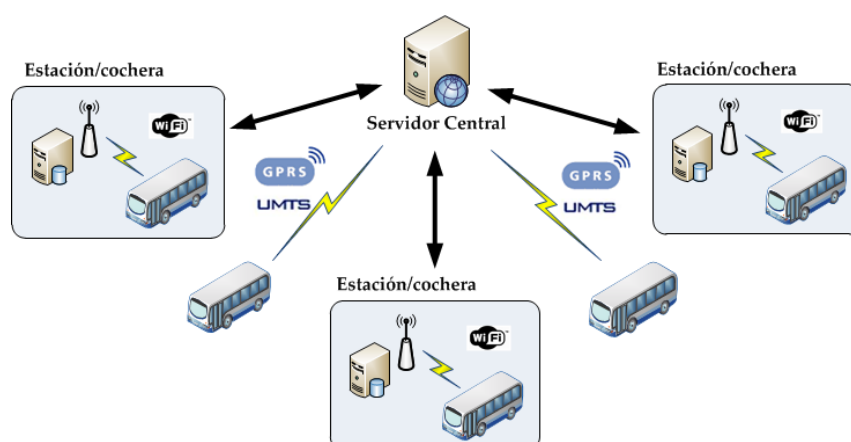


Figura 2.16: Arquitectura global de comunicaciones e-Bus

De esta manera, para el intercambio de datos bus-cochera existen redes WiFi en cada una de las cocheras con los puntos de acceso necesarios para absorber todo el tráfico generado por las descargas de datos de validaciones, reconfiguración de las aplicaciones de transportes, actualización de listas negras, descarga de datos de los sistemas embarcados, etc.

Por otro lado, se habilitan las comunicaciones móviles para permitir la transmisión de información cuando el vehículo se encuentre fuera del área de cobertura de estos puntos de acceso WiFi.

Por tanto, en lo que a la gestión de las comunicaciones inalámbricas se refiere, este proyecto contempla la carga y descarga de datos dentro de áreas de cobertura WiFi, tal que en el proyecto de conectividad de EuskoTren (ver apartado 2.3.3). Así, en este caso se genera la misma problemática planteada en la solución de EuskoTren, es decir, el ancho de banda demandado por las aplicaciones embarcadas en los vehículos que se encuentren dentro del área de cobertura de un punto de acceso puede exceder al ancho de banda ofrecido en punto de acceso WiFi. En consecuencia, surgen problemas de cuello de botella, o incluso la monopolización de ancho de banda por parte de algunas de las aplicaciones. Además, hay comunicaciones que son más críticas que otras, por lo que debieran tener diferente preferencia a la hora de ser atendidas.

En este sentido, para poder solventar la problemática relacionada con el ancho de banda, en el proyecto e-Bus se ha optado por la instalación de los puntos de acceso necesarios dentro de las cocheras para poder absorber todo el tráfico generado. Sin embargo, en lo que a gestión de comunicaciones inalámbricas se refiere, este sistema podría ser mejorado aplicando un mecanismo que permita priorizar las comunicaciones teniendo en cuenta parámetros relacionados con la QoS.

En cuanto a la disponibilidad de las comunicaciones, sería deseable una cobertura completa de banda ancha que permitiera una comunicación permanente bidireccional entre el autobús y el centro de control.

Capítulo 3

Identificación de Carencias y Oportunidades de Mejora

A la hora de definir el ámbito en el que se centra el presente trabajo de tesis, se han tomado como punto de partida una serie de trabajos precedentes. Algunos de estos trabajos han servido como base a la hora de diseñar diferentes funcionalidades o mecanismos incluidos en la arquitectura de comunicaciones que se presenta como trabajo doctoral. Otras soluciones descritas, en cambio, han contribuido al desarrollo de la tesis porque presentan limitaciones o exponen necesidades que motivan o justifican su desarrollo e interés.

De esta manera, teniendo en cuenta las cuestiones mencionadas a lo largo del capítulo 2, se pueden identificar una serie de *problemas* a ser abordados en la gestión de comunicaciones inalámbricas en movilidad:

- *Interrupciones* intermitentes del servicio por falta de cobertura.
- Limitaciones de *ancho de banda*.
- Diferentes *prioridades* y volúmenes de datos generados por diferentes aplicaciones.

Para poder hacer frente a estos problemas, surge la necesidad de crear un sistema intermedio o *middleware*, que sea el encargado gestionar las comunicaciones inalámbricas que posibilitan el intercambio de información entre aplicaciones de tierra y aquellas aplicaciones embarcadas en el vehículo. Este sistema intermedio tendrá que dar respuesta a los aspectos previamente enumerados.

Por otro lado, a lo largo del capítulo 2, también se han podido detectar una serie de *capacidades* que un sistema de comunicaciones inalámbrico aplicado a este ámbito debiera

poseer para ofrecer una gestión de comunicaciones que optimice el uso de los recursos de red disponibles, dando respuesta al mismo tiempo a las necesidades de comunicación de las diferentes aplicaciones de acuerdo a sus requisitos de QoS. De este modo, muchas de éstas corresponden con limitaciones o puntos de mejora de los trabajos y proyectos analizados en el estado de la técnica, que están directamente relacionados con los objetivos de la tesis:

- a) *Priorización dinámica* de tráfico en base a las necesidades de comunicación de las aplicaciones finales en cada momento, y el estado del canal de comunicaciones.
- b) *Control de QoS* en base a los recursos de red disponibles, donde el ancho de banda demandado por las aplicaciones adquiere el principal protagonismo.
- c) *Gestión del canal* de comunicaciones a través de la monitorización de su estado, seleccionando el mejor enlace en cada momento para las comunicaciones, de forma que dicho cambio de canal se haga de una manera transparente para las aplicaciones que se encuentren transmitiendo, evitando interrupciones en la comunicación, en la medida de lo posible.

3.1 Análisis de los distintos enfoques de optimización de redes

De acuerdo a estos aspectos, en la **Tabla 3.1** se incluye una relación de los mecanismos aplicados para la monitorización del canal, priorización, control de QoS y gestión de cambios de enlace en cada uno de los enfoques de optimización de uso de redes inalámbricas en entornos de movilidad que se han descrito previamente en la sección 2.2.

	PRIORIZACIÓN	CONTROL DE QoS	GESTIÓN DEL CANAL
Regulación de tráfico en redes WiFi	<ul style="list-style-type: none"> - Dinámica - Criterios de priorización estáticos - Control de admisión - Nivel de red 	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en ancho de banda - Ajuste adaptativo del ancho de banda asignado 	<ul style="list-style-type: none"> - Monoenlace - Monitorización del estado del canal - Cálculo de ancho de banda
Planificación de tráfico multienlace		<ul style="list-style-type: none"> - Basado en ancho de banda - Ajuste adaptativo del ancho de banda asignado 	<ul style="list-style-type: none"> - Multienlace - Monitorización del estado del canal - Cálculo de ancho de banda - Selección del mejor enlace - Balanceo de carga (tráfico por varios enlaces a la vez)

	PRIORIZACIÓN	CONTROL DE QoS	GESTIÓN DEL CANAL
Priorización basada en la diferenciación de tráfico	<ul style="list-style-type: none"> - Estático - Criterios de priorización estáticos - Nivel de red 	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en ancho de banda - Ajuste adaptativo del ancho de banda asignado 	<ul style="list-style-type: none"> - Multienlace - Conmutación de enlaces transparente
Acceso inteligente a redes heterogéneas			<ul style="list-style-type: none"> - Multienlace - Monitorización del estado del canal - Ancho de banda teórico - Selección del mejor enlace - Cambio de enlace transparente - Búsqueda de conectividad continua
Gestión de tráfico y control de QoS en base a características de red		<ul style="list-style-type: none"> - Reparto de recursos de red por tipo de servicio - Ajuste de los parámetros de las aplicaciones (por ejemplo el ancho de banda) 	<ul style="list-style-type: none"> - Monoenlace - Monitorización del estado del canal
Selección de enlace dinámica basada en parámetros de QoS			<ul style="list-style-type: none"> - Multienlace - Monitorización del estado del canal - Criterios de QoS para la selección del mejor enlace

Tabla 3.1: Mecanismos para la optimización del uso de las redes inalámbricas en entornos de movilidad

Tal como se puede observar en la **Tabla 3.1**, en lo que a control de QoS se refiere, el ancho de banda es un factor clave. Sin embargo, hay enfoques que no hacen una regulación dinámica de QoS teniendo en cuenta los valores reales de la disponibilidad de ancho de banda para las comunicaciones. Es en este punto donde se aplican las técnicas o mecanismos de gestión del canal de comunicación. Para poder llevar a cabo un control de QoS dinámico de acuerdo a las fluctuaciones de ancho de banda, es necesario el establecimiento de mecanismos que permitan monitorizar el estado del canal, y tener un conocimiento en tiempo real del ancho de banda disponible en cada uno de los enlaces de red establecidos en el sistema. Si revisamos la tabla anterior, se puede observar que no todos los enfoques hacen una gestión

dinámica del canal. Además, las limitaciones de ancho de banda y los requisitos de QoS de las aplicaciones, y por ende, las necesidades de ancho de banda de las mismas, hacen necesario el establecimiento de un mecanismo de priorización de tráfico o de las comunicaciones. En este sentido, algunos de los enfoques aplican una priorización estática, preestablecida por una serie de políticas que permiten priorizar en base a la diferenciación de tipo de tráfico según su criticidad.

Así, teniendo en cuenta estos aspectos, ninguno de los enfoques propone un sistema que establezca mecanismos de QoS y priorización dinámica, a la vez que una gestión del canal en tiempo real que implique el cálculo de ancho de banda, y una gestión de múltiples enlaces de comunicación que permita seleccionar en cada momento el mejor enlace inalámbrico para las comunicaciones.

3.2 Análisis de las distintas arquitecturas de comunicaciones

En esta misma línea, la **Tabla 3.2** incluye una relación entre las arquitecturas de comunicación presentadas en la sección 2.3, diseñadas con carácter industrial para el establecimiento de comunicaciones inalámbricas en el transporte, con respecto a los mecanismos de priorización de tráfico, control de QoS y gestión del canal de comunicaciones que implementan.

	PRIORIZACIÓN	CONTROL DE QOS	GESTIÓN DEL CANAL
Proyecto SAFEDMI			- Multienlace
Proyecto TRAINCOM		- Basado en ancho de banda	- Multienlace - Criterios de QoS para la selección del mejor enlace
EuskoTren (comunicaciones ligeras)			- Multienlace
EuskoTren (comunicaciones pesadas)	- Dinámica - Control de admisión - Criterios de priorización estáticos - Nivel de aplicación		- Monoenlace - Monitorización del estado del canal

	PRIORIZACIÓN	CONTROL DE QOS	GESTIÓN DEL CANAL
Proyecto BOSS	<ul style="list-style-type: none"> - Dinámica - Criterios de priorización estáticos y dinámicos (predictivo) - Nivel de aplicación 	<ul style="list-style-type: none"> - Políticas de QoS 	<ul style="list-style-type: none"> - Multienlace - Monitorización del estado del canal - Selección del mejor enlace - Cambios de enlace predictivos (basados en históricos de ancho de banda en diferentes ubicaciones) - Búsqueda de conectividad continua
E-Bus			<ul style="list-style-type: none"> - Monoenlace (WiFi o GPRS/UMTS dependiendo del escenario de comunicación)

Tabla 3.2: Mecanismos empleados en los diferentes proyectos de la industria del transporte

Analizando dicha tabla, se puede observar que ninguno de estos proyectos establece un sistema de comunicaciones que priorice las comunicaciones de forma dinámica, a la vez que realiza un control de QoS basado en la disponibilidad real de ancho de banda, parámetro que a su vez el sistema conoce por realizar una gestión del canal, a través de la monitorización de la conectividad de los diferentes enlaces de acceso disponibles, y la medición del ancho de banda disponible por cada uno de ellos de forma continua. Son precisamente todas estas cuestiones las que se quieren cubrir con el desarrollo del middleware propuesto en esta tesis.

Capítulo 4

Middleware de Comunicaciones

Una vez analizados los diferentes enfoques y soluciones existentes, y teniendo una visión general del estado de la técnica en esta temática, a través de esta tesis se propone un middleware de comunicaciones para el ámbito vehicular que combina mecanismos de QoS y priorización dinámica, a la vez que una gestión del canal en tiempo real que implica la monitorización continua de su ancho de banda, así como una gestión de enlaces de comunicación que permite seleccionar en cada momento el enlace inalámbrico más favorable para las comunicaciones.

Este enfoque se centra en las necesidades de calidad de servicio y prioridad de la información a transmitir de las aplicaciones, posibilitando una planificación adaptativa de las comunicaciones que permita ajustarlas y gestionarlas dinámicamente en base a los citados requisitos de las aplicaciones, el conocimiento del estado de la red, y el comportamiento previo del sistema. Todo ello permitirá refinar y optimizar la gestión de las comunicaciones, permitiendo también que una misma aplicación pueda generar tráfico de diferente naturaleza y prioridad. Además, el sistema establece un mecanismo que permite gestionar los enlaces de comunicación, de forma que las transmisiones de datos se realicen a través del enlace de red que mejores prestaciones ofrezca en cada momento, sin que dichos cambios de enlace interfieran en la continuidad de las transmisiones que se encuentren activas.

De esta manera, este sistema permite que sean las aplicaciones las que establezcan las propiedades de cada una de las comunicaciones que quieran llevar a cabo, en lugar de tener una serie de políticas de priorización preestablecidas.

Con el fin de habilitar una plataforma para el ámbito vehicular que posibilite el establecimiento de comunicaciones vehículo-tierra en las condiciones antes mencionadas, en esta tesis se propone un sistema software, o más concretamente, un middleware de comunicaciones que cubra los objetivos establecidos en la sección 1.2.1: (1) dar respuesta a las necesidades de QoS demandadas por las aplicaciones, (2) establecer mecanismos de priorización dinámica de las comunicaciones y (3) selección transparente del mejor enlace para las comunicaciones.

A lo largo de este capítulo se describirá de forma más detallada el diseño del sistema de comunicaciones planteado. Para empezar se identificarán las capacidades principales del middleware. A continuación se describirán la arquitectura de comunicaciones “vehículo-tierra”. Después, se detallará el diseño del sistema. Para finalizar, se indicarán las principales funciones de la herramienta de administración y monitorización que incluye el middleware desarrollado.

4.1 Especificación de capacidades

En este apartado se describen las principales capacidades de este middleware de comunicaciones, que son: (1) la priorización de las comunicaciones y control de QoS, (2) la gestión y monitorización del canal de comunicaciones, que implica la selección del medio físico más adecuado a utilizar en cada momento para llevar a cabo las transmisiones de datos de forma transparente para las aplicaciones finales, y (3) la regulación de la comunicación entre aplicaciones finales.

4.1.1 Priorización de comunicaciones y control de la QoS

El mecanismo de priorización que establece este middleware de comunicaciones está diseñado para aprovechar el ancho de banda real disponible, optimizando el uso de la red, y respetando al mismo tiempo los requisitos de QoS de las comunicaciones iniciadas desde diferentes tipos de aplicaciones. En un escenario en el que el ancho de banda disponible sea inferior a la suma del demandado por diferentes aplicaciones, el sistema dará paso primero a aquellas comunicaciones que sean más prioritarias, y cuyos requisitos de ancho de banda mínimos puedan ser cubiertos, de tal forma que la transmisión de información crítica tenga más preferencia ante otra información que necesite menos “inmediatez” a la hora de ser transmitida.

Una de las características principales de este sistema es que una misma aplicación puede generar distintos tipos de tráfico, con diferentes necesidades de comunicación, y diferente nivel de prioridad. Es decir, a través de este sistema, serán las propias aplicaciones las que

indiquen al middleware los requisitos de comunicación (criticidad, ancho de banda mínimo requerido, etc.) de cada una de las comunicaciones que se quieran llevar a cabo.

El mecanismo de priorización está basado en una serie de criterios que se describirán más adelante en este mismo capítulo. Estos criterios permitirán establecer un orden sobre las demandas de comunicación que se realicen en un momento dado desde diferentes aplicaciones con respecto a un mismo vehículo. La idea es, que una vez establecido el orden de prioridad de las comunicaciones, siguiendo este mismo orden se atiendan primero aquellas más prioritarias, que a su vez vean cumplidas sus necesidades de ancho de banda de acuerdo al ancho de banda real disponible en el canal de comunicaciones establecido con el vehículo en cuestión.

En cuanto al control de QoS se refiere, este sistema está diseñado para ajustar el ratio de transferencia de las comunicaciones de acuerdo a sus requisitos mínimos. Además, el sistema modifica dicha asignación en los casos en los que la disponibilidad de ancho de banda por el medio físico permita llevar a cabo una asignación superior al solicitado inicialmente por las aplicaciones para llevar a cabo esas comunicaciones.

4.1.2 Gestión y monitorización del canal de comunicaciones

Este middleware está basado en la disponibilidad de múltiples enlaces de red para llevar a cabo las comunicaciones, lo que permite que el sistema sea más robusto en cuanto a la disponibilidad de las comunicaciones. Además, desarrolla un mecanismo de monitorización de las comunicaciones, que permite al sistema tener un conocimiento continuo sobre el estado de conectividad de las diferentes interfaces de red. Adicionalmente, este sistema se integra con un servicio de cálculo de ancho de banda, que permite tener un conocimiento continuo sobre la disponibilidad de ancho de banda por cada enlace.

Este sistema determina en cada momento un enlace de red para llevar a cabo las comunicaciones (lo que de aquí en adelante denominaremos como “enlace activo”). Este enlace será el que se considere más favorable en cada momento de acuerdo a su estado de conectividad y los valores de ancho de banda real ofrecidos. Así, en este sistema se considera el ancho de banda el parámetro más importante a la hora de seleccionar el enlace de red por el cual se llevarán a cabo las comunicaciones.

En lo que al cálculo de ancho de banda se refiere, el servicio desarrollado para dicho propósito implementa su medición tanto de forma pasiva como de forma activa (ver apartado 2.2.2.2.1). La medición activa requiere de generación de tráfico en la red, con la sobrecarga que eso supone, dado que este proceso consume ancho de banda. Teniendo en cuenta este hecho, la medición activa se ha diseñado para el cálculo de ancho de banda de

aquellos enlaces que no sean el activo, e incluso del activo en caso de que no haya comunicaciones en curso, y no haya actividad por este canal. Por el contrario, en caso de que haya comunicaciones en curso a través del enlace activo, se aplicará la medición pasiva para dicho canal. La medición pasiva consiste en monitorizar la actividad de la red pudiendo así estimar el ancho de banda sin inyectar tráfico de red adicional.

Una vez calculados los valores de ancho de banda de los diferentes enlaces (tanto del activo como del resto de enlaces disponibles), el sistema selecciona aquél que considera el más adecuado para llevar a cabo las comunicaciones. En este sentido, uno de los requisitos que persigue el diseño de este sistema es que estos cambios de enlace se realicen de forma que no afecten a las comunicaciones vehículo-tierra que se encuentren en curso. Es decir, se pretende que un cambio de enlace (ya sea porque el sistema selecciona otro por considerarlo más favorable, o bien por pérdida de conectividad del que se había establecido como activo) no afecte en la continuidad de las comunicaciones, de forma que las conmutaciones de enlace sean *transparentes* desde el punto de vista funcional de las aplicaciones finales (en el apartado 4.3.1.3 se profundizará más sobre este tema).

En este punto, cabe mencionar que el proceso propio del cálculo de ancho de banda no entra dentro del ámbito de la tesis, y por tanto los mecanismos empleados en este trabajo podrían ser mejorados aplicando otro tipo de algoritmos y técnicas más avanzadas (en el apartado 4.2.1.1 se describirá qué técnicas se han empleado en este caso para llevar a cabo la medición de ancho de banda).

4.1.3 Regulación de la comunicación entre aplicaciones finales

El cometido final de este sistema es establecer un mecanismo que permita el despliegue de servicios en el ámbito vehicular, de forma que las aplicaciones finales se abstraigan de toda la problemática relacionada con la gestión de las comunicaciones vehículo-tierra en movilidad. Este middleware de comunicaciones implementa una serie de protocolos independientes de plataforma, que permite la integración de servicios externos cuya funcionalidad implique el intercambio de información entre aplicaciones instaladas en los vehículos y en puntos fijos en tierra.

Por tanto, en lo que al intercambio de información entre las aplicaciones finales en los vehículos y las correspondientes en la infraestructura de centro de control se refiere, este middleware ofrece las siguientes funcionalidades:

- Comunicación bidireccional continua entre aplicaciones de tierra y embarcadas permitiendo generar nuevos servicios digitales con garantías de calidad de servicio.

- Intercambio de información de diferente naturaleza (multimedia, texto, bytes, etc.) entre aplicaciones finales.
- Transparencia en la resolución de las comunicaciones para las aplicaciones finales, de forma que se abstraigan de los aspectos relacionados con el proceso de gestión del canal de comunicaciones, tales como el establecimiento de las mismas en movilidad a través de diferentes enlaces.

4.1.4 Relación entre características del middleware y objetivos de la tesis

El propósito de este apartado es relacionar los objetivos de la tesis con las diferentes características de este middleware de comunicaciones. Para ello, se ha optado por introducir la **Tabla 4.1**, que permite representar esta relación de una manera sintetizada.

OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS
Middleware de comunicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Protocolo de comunicaciones para las aplicaciones - Abstracción de la gestión del canal
Respuesta a las necesidades de QoS demandadas por las aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Control de la calidad del servicio en base al ancho de banda - Ajuste adaptativo del ancho de banda asignado
Priorización dinámica de las comunicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Criterios de priorización - Control de admisión de peticiones - Respuesta dinámica
Selección transparente del mejor enlace para las comunicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Multienlace - Monitorización continua del estado del canal - Cálculo del ancho de banda - Conmutación de enlaces transparente - Conectividad continua - Selección del enlace que mejores prestaciones ofrezca

Tabla 4.1: Relación de las características del middleware y los objetivos de la tesis

Estas características, las cuales serán materializadas a través de la arquitectura y diseño del sistema que se presentará en los apartados 4.2 y 4.3, dotan al middleware de comunicaciones de una serie de capacidades que serán validadas a lo largo del capítulo 5, de forma que sirvan para verificar el cumplimiento de la hipótesis definida en esta tesis.

4.2 Arquitectura de comunicaciones “vehículo-tierra”

La arquitectura de este sistema está compuesta por dos elementos software; uno situado en tierra (Máster de Comunicaciones de Tierra, MCT), y el otro embarcado en los vehículos

(Máster de Comunicaciones Embarcado, MCE). El MCT y el MCE (de cada uno de los vehículos) interactúan continuamente con el propósito de gestionar y controlar las comunicaciones entre cada vehículo y la infraestructura de centro de control (tierra). Así, estos elementos interactúan para llevar a cabo las siguientes funcionalidades:

- **Selección de enlace activo.** A la hora de establecer comunicaciones vehículo-tierra, el MCT y el MCE pueden comunicarse entre ellos a través de diferentes enlaces de red. En cuanto a la selección del enlace activo, es el MCE quien se encarga de ello basándose en la información del estado de conectividad de los enlaces y las mediciones de ancho de banda realizadas a través de un servicio adicional implementado por el sistema. Así, este Servicio de Medición de Ancho de Banda (SMAB), permite tener en todo momento conocimiento del ancho de banda disponible en cada uno de los enlaces de red habilitados en el vehículo.

Una vez seleccionado el enlace activo, el MCE envía una notificación al MCT, que tendrá conocimiento en todo momento de cuál es el enlace activo (enlace por el cual se comunica con el MCE), y el ancho de banda disponible para realizar las comunicaciones en ambas direcciones (vehículo-tierra y tierra-vehículo).

Por tanto, el SMAB monitoriza continuamente el estado de todos los enlaces de red habilitados desde el vehículo para las comunicaciones, y el MCE conmuta de un enlace a otro cuando se produce uno de los dos siguientes casos: (1) pérdida de conectividad en el enlace activo o (2) mediciones de ancho de banda realizadas por el SMAB que indican que otro enlace es mejor (mayor ancho de banda) que el establecido como activo. En estos dos casos, el cambio de enlace se produce de forma transparente para las aplicaciones finales, que no detectan interrupciones en la conexión si el cambio de enlace se produce mientras se encuentran transmitiendo datos.

En este punto es importante mencionar que este sistema siempre selecciona un único enlace como activo para las comunicaciones (el más favorable en cuanto a ancho de banda disponible). De este modo, todas las comunicaciones se realizarán siempre a través de este canal (sea WiFi, GSM/GPRS/UMTS, Tetra, etc.) independientemente de la disponibilidad de otros canales físicos de forma simultánea.

- **Gestión de la priorización de peticiones de comunicación.** El objetivo es priorizar las comunicaciones vehículo-tierra en base a una serie de criterios de forma que la transmisión de información crítica tenga más prioridad que otra información que necesite menos “inmediatez” a la hora de su transmisión. Por tanto, esta plataforma propone una serie de criterios de priorización de peticiones de comunicación divididos en dos categorías: (1) criterios estáticos y (2) criterios dinámicos. Los criterios estáticos están relacionados con requisitos QoS como el nivel de prioridad de la

información, ancho de banda mínimo requerido, o el orden cronológico en el que se han producido las peticiones. Por otro lado, los criterios dinámicos son factores variables relacionados con cómo han acontecido en el pasado transmisiones de comunicaciones similares o el estado del entorno en que éstas se han producido anteriormente (duración media de un vehículo dentro del área de cobertura de un punto de acceso determinado, duración media para llevar a cabo una comunicación de una aplicación particular a unos ratios de datos determinados, valores de ancho de banda capturados previamente a lo largo de un trayecto conocido, zonas de cobertura de redes inalámbrica, etc.), que el sistema recoge en forma de histórico. Así, combinando estas dos categorías de criterios, el sistema calcula un valor numérico que representa la aptitud de una petición para ser servida. Una vez calculado este valor, se utiliza para discernir a qué comunicaciones se puede dar paso o no, y priorizar las mismas en el tiempo. Así, con el propósito de ejecutar la priorización de peticiones, este sistema implementa una serie de colas (ver apartado 4.3.2.1.3) donde se ordenan dichas peticiones en base al vehículo al que corresponden y ese valor numérico (prioridad).

Por tanto, el propósito es que este middleware reconfigure la forma de priorizar las comunicaciones dependiendo de su comportamiento a lo largo del tiempo, buscando siempre la mejor configuración posible basada en la retroalimentación del sistema.

- **Protocolo de control vehículo-tierra.** El MCT y el MCE de cada vehículo se comunican e interactúan intercambiando comandos para establecer el enlace activo, y gestionar la priorización de peticiones de comunicación realizadas tanto por aplicaciones finales de tierra como embarcadas (ver apartado 4.3.4.1).
- **Gestión y control de comunicaciones entre aplicaciones finales.** El middleware de comunicaciones tiene como propósito habilitar la comunicación de las aplicaciones embarcadas en los vehículos y de aquellas instaladas en tierra de una forma más eficiente. De esta manera, cuando una aplicación intenta iniciar una nueva comunicación realiza una petición de comunicación al middleware (al MCE o MCT, según corresponda). Después, el sistema toma una decisión sobre qué comunicaciones prioritarias pueden ser atendidas de forma concurrente de acuerdo a las limitaciones de ancho de banda del enlace activo, los parámetros de priorización y los requisitos de QoS indicados por las aplicaciones para cada una de las comunicaciones. Así, una vez que el sistema da paso a una petición de comunicación, ajusta el ratio de datos asignado a dicha comunicación en base a sus requisitos de QoS, la disponibilidad de ancho de banda del enlace activo y las peticiones de comunicación que se encuentren en curso simultáneamente. Además, el sistema está diseñado para poder asignar más ancho de banda del mínimamente

requerido para una comunicación, siempre y cuando la disponibilidad de ancho de banda y los requisitos de las comunicaciones que estén en curso lo permitan.

De acuerdo a los conceptos descritos previamente, la **Figura 4.1** representa la arquitectura general del middleware de comunicaciones vehículo-tierra objeto de este trabajo de tesis:

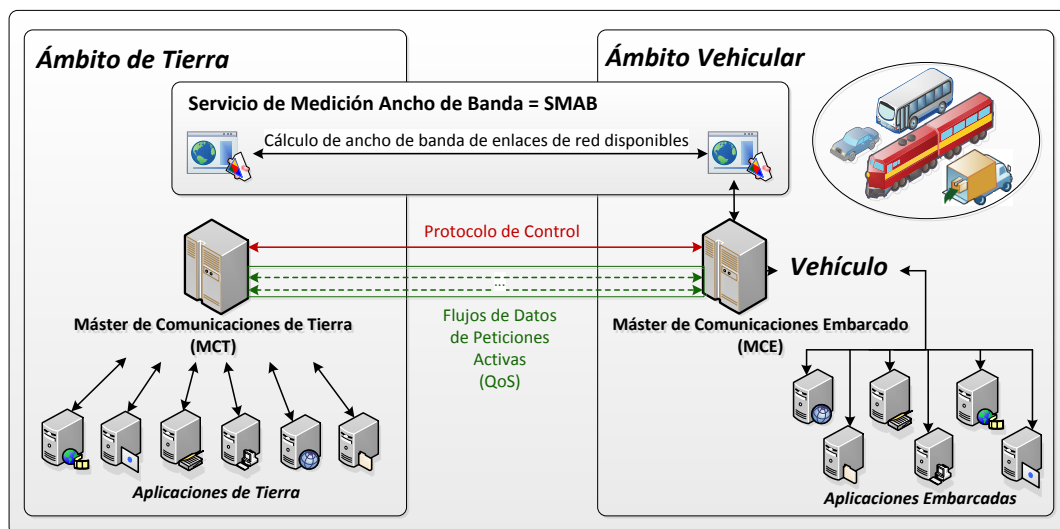


Figura 4.1: Arquitectura general del Middleware de Comunicaciones

A lo largo de los siguientes apartados se describirán más detalladamente los elementos principales de la arquitectura (el MCT y el MCE), así como los diferentes módulos funcionales y el Servicio de Medición de Ancho de Banda (SMAB) que componen el middleware de comunicaciones.

4.2.1 Máster de Comunicaciones Embarcado (MCE)

El MCE es un elemento software que irá embarcado en cada uno de los vehículos en los que se habilite la comunicación a través de este middleware. Cada vehículo dispondrá de un equipo hardware dotado de una serie de interfaces de red que permitan una conectividad multienlace con la parte de este sistema ubicada en tierra, y gestionada por el MCT.

La **Figura 4.2** muestra los diferentes módulos que componen el MCE, así como la relación o la dirección del flujo de información entre éstos. Así, el MCE está compuesto por cuatro módulos funcionales: (1) gestión de enlaces físicos, (2) protocolo MCT-MCE, (3) planificación de comunicaciones embarcadas y (4) protocolo MCE y aplicaciones finales.

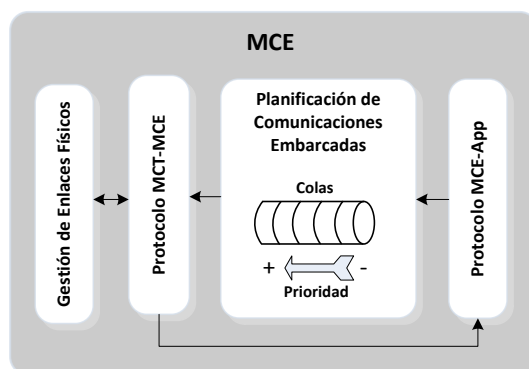


Figura 4.2: Máster de Comunicaciones Embarcado

4.2.1.1 Medición de ancho de banda

El cálculo de ancho de banda que implementa este sistema se lleva a cabo a través de dos técnicas (ver apartado 2.2.2.2.1 del estado de la técnica):

- **Cálculo de ancho de banda activo:** se trata de una medición llevada a cabo a través de una arquitectura cliente-servidor mediante la generación de tráfico que permite valorar el ancho de banda que ofrece un enlace de red determinado.

En este caso las mediciones de ancho de banda activas se llevarán a cabo a través de un servicio adicional implementado por el sistema, el SMAB.

- **Cálculo de ancho de banda pasivo:** este tipo de medición se lleva a cabo a través de la monitorización de la actividad de la red, pudiendo así inferir el ancho de banda. Esta técnica de medición no inyecta tráfico en la red, por lo que no produce sobrecarga. Sin embargo, sólo puede realizarse cuando haya actividad en la red, lo que permite la estimación de ancho de banda de forma aproximada.

El cálculo de ancho de banda pasivo será implementado en este caso a través del MCE, que es el elemento que gestiona el canal y los cambios de enlace, y además maneja el tráfico que se genera a través del middleware desde el punto de vista embarcado.

Así, la **Figura 4.3** muestra cómo se integra el SMAB con el MCE. Dado que el SMAB es un servicio cliente-servidor, está compuesto por dos elementos software, uno instalado en tierra, y el otro en el ámbito embarcado. De esta manera, cuando el MCE requiere que se lleve a cabo el cálculo de ancho de banda de ciertos enlaces de forma activa, interactúa con este servicio indicándole la información de estos enlaces.

Por otro lado, la medición pasiva se lleva a cabo desde el propio MCE para estimar el ancho de banda del enlace activo sin inyectar tráfico adicional en el canal, ya que se trata del enlace a través del cual el sistema ejecuta las comunicaciones, y por tanto dirige el tráfico de datos

de las aplicaciones. Sin embargo, en caso de que no haya actividad por el enlace activo (requisito necesario para llevar a cabo la medición pasiva), la medición de ancho de banda del enlace activo también se llevará a cabo a través del SMAB.

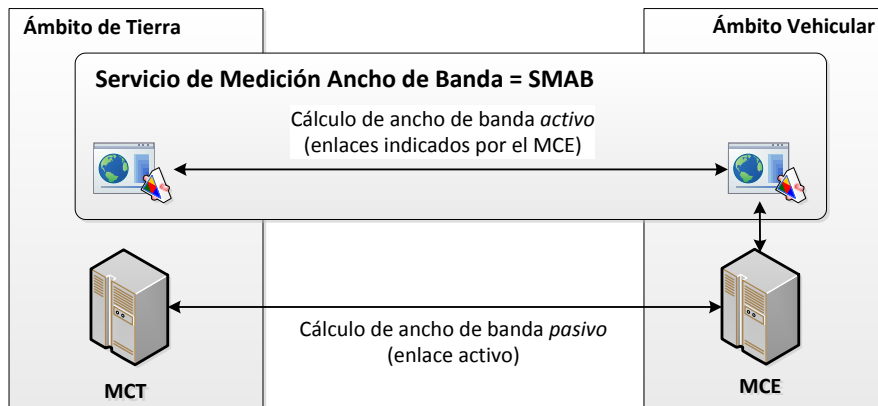


Figura 4.3: Medición de ancho de banda a través del middleware

4.2.2 Máster de Comunicaciones de Tierra (MCT)

El MCT es el elemento software del sistema que irá instalado en la parte de tierra. Teniendo en cuenta que este middleware está ideado para el despliegue de nuevos servicios digitales en el ámbito del transporte, la idea es que el MCT se instale en un punto fijo dentro de la infraestructura de transporte (habitualmente centro de gestión o control).

El MCT, además de gestionar las peticiones de comunicación de las aplicaciones finales ubicadas en tierra, es el elemento que tiene un conocimiento global de todas las peticiones de comunicación del sistema (incluidas las embarcadas), y por tanto el elemento que toma las decisiones de planificación y control de las mismas.

La **Figura 4.4** muestra los diferentes módulos que componen el MCT, así como la relación o la dirección del flujo de información entre éstos.

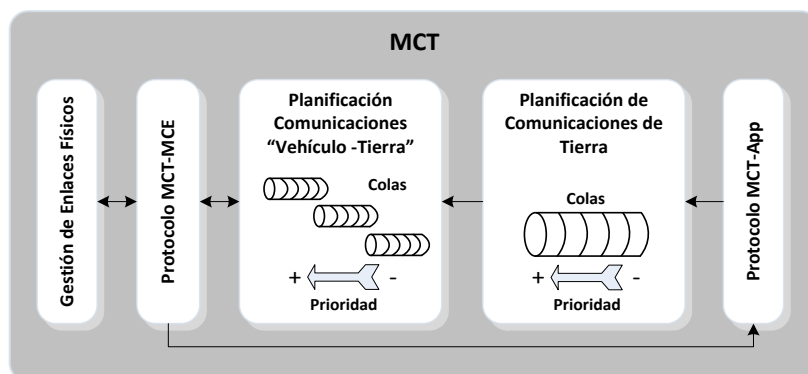


Figura 4.4: Máster de Comunicaciones de Tierra

Por tanto, los módulos o funcionalidades que componen el MCT son: (1) gestión de enlaces físicos, (2) protocolo MCT-MCE, (3) planificación de comunicaciones “vehículo-tierra”, (4) planificación de comunicaciones de tierra, y (5) protocolo MCT con las aplicaciones finales.

A modo de síntesis, la **Tabla 4.2** recoge los diferentes módulos funcionales que forman parte del middleware de comunicaciones, describe su función, y el elemento de la arquitectura donde se implementa. Estas cuestiones serán profundizadas a lo largo del apartado 4.3 de la memoria.

MÓDULO	FUNCIÓN	ELEMENTO ARQUITECTURA
Gestión de enlaces físicos	Monitorizar el estado de los diferentes enlaces físicos de comunicación seleccionando el mejor enlace para las comunicaciones (MCE), y conocer cuál es el enlace activo en cada caso para cada vehículo (MCT)	MCE y MCT
Protocolo MCT y MCE	Establecer un protocolo entre el MCE y el MCT para habilitar y arbitrar las comunicaciones “vehículo-tierra”	MCE y MCT
Planificación comunicaciones embarcadas	Priorización de las peticiones de comunicación generadas por las aplicaciones embarcadas, de forma que se pueda notificar al MCT sobre las peticiones de comunicación más prioritarias generadas en un determinado vehículo	MCE
Planificación comunicaciones de tierra	Gestión de las peticiones de comunicación generadas por las aplicaciones de tierra, notificando al gestor de peticiones de comunicación “vehículo-tierra” sobre aquellas peticiones más prioritarias que se puedan atender de acuerdo a las restricciones de comunicación del enlace activo	MCT
Planificación de comunicaciones “vehículo-tierra”	Arbitración de las comunicaciones “vehículo-tierra”, priorizando las peticiones de comunicación generadas tanto en tierra como en el ámbito embarcado de cada uno de los vehículos.	MCT
Protocolo aplicaciones finales	Integración de las aplicaciones finales, permitiendo el envío y recepción de información desde y hacia estas aplicaciones a través del middleware	MCE (aplicaciones embarcadas) y MCT (aplicaciones de tierra)

Tabla 4.2: Módulos funcionales del MCE y MCT

Finalmente, la **Figura 4.5** muestra de forma conceptual la arquitectura del sistema, donde se representan los diferentes módulos que complementan tanto al MCE como al MCT, y la

disponibilidad de múltiples enlaces de red para llevar a cabo las comunicaciones, así como el establecimiento del más favorable para las comunicaciones (en la ilustración sería un enlace WiFi).

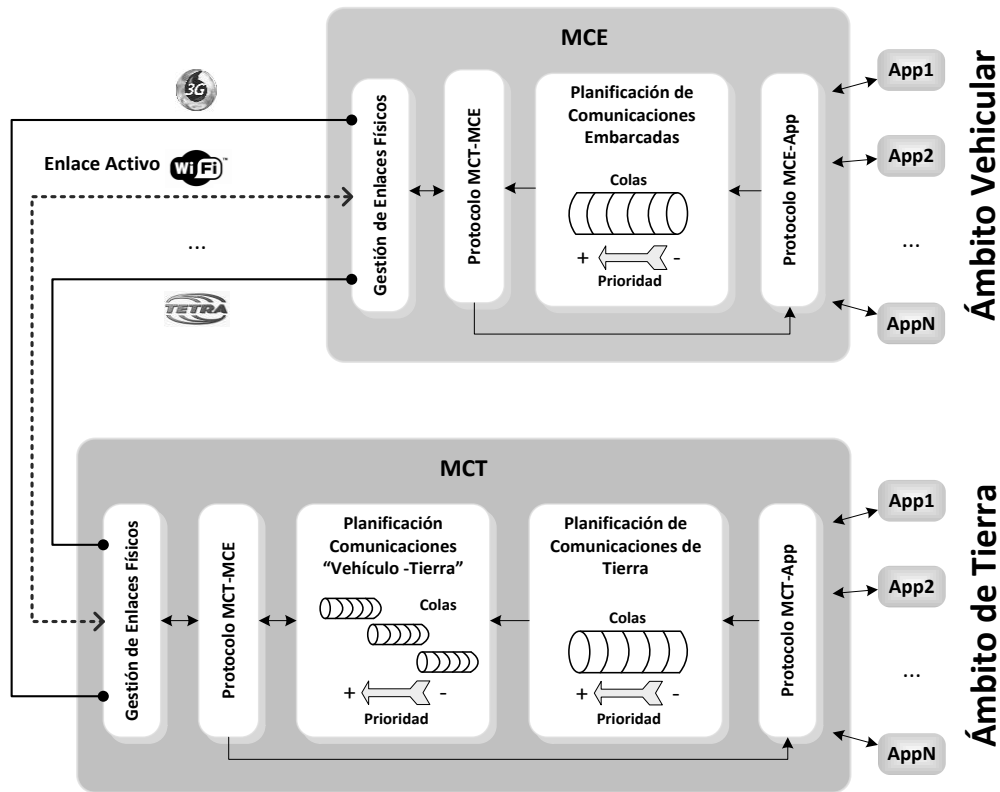


Figura 4.5: Módulos funcionales del MCT y del MCE, y su integración

4.3 Diseño del sistema

A lo largo de este apartado se presentará el diseño de los distintos mecanismos incorporados al sistema con el fin de dar soporte a sus principales capacidades. A saber: (1) la gestión del canal, (2) la priorización de peticiones de comunicación de las aplicaciones, (3) el control de QoS en base al ancho de banda, y (4) los protocolos de comunicación establecidos para habilitar las comunicaciones vehículo-tierra.

4.3.1 Mecanismo para la gestión del canal

El middleware de comunicaciones presentado en este trabajo de tesis doctoral se basa en la existencia de diferentes enlaces físicos de comunicación, de forma que una combinación de dichos medios físicos independientes pueda ofrecer una conectividad continua vehículo a infraestructura de centro de control para dar respuesta a las necesidades de comunicación de

las aplicaciones. Para ello, dependiendo del estado de cada uno de esos medios y el ancho de banda ofrecido por los mismos, la plataforma ha sido diseñada para hacer uso en cada momento del enlace que mejores prestaciones ofrezca.

En este apartado se indicarán los criterios en los que se basa el sistema para realizar la selección de enlace. Se explicará en qué consiste la monitorización del estado del canal, y la forma que tiene el sistema de conmutar de un enlace físico de red a otro sin que la continuidad de las comunicaciones se vea afectada (de forma transparente para las aplicaciones).

4.3.1.1 Criterios de selección del medio físico de transmisión

El encargado de la selección del enlace activo es el MCE, ya que es el elemento del sistema que conoce el estado de conectividad del vehículo con respecto a todos los enlaces de red establecidos. Así, el MCE tiene conocimiento continuo del estado de conectividad de todos los enlaces físicos de red establecidos en el vehículo, y además, gracias al servicio SMAB (ver apartado 4.2.1.1), tiene conocimiento del ancho de banda que ofrece cada uno de ellos en cada momento.

A la hora de realizar esta selección, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Estado de conectividad de los enlaces (cobertura).
- Ancho de banda ofrecido por cada enlace disponible.

De esta manera, el sistema seleccionará siempre como enlace activo aquel que mejor ancho de banda ofrezca. Por tanto, tal y como está diseñado el sistema, todas las comunicaciones que se generen se servirán siempre por el canal establecido como activo (sea WiFi, GSM/GPRS, Tetra, etc.), independientemente de la disponibilidad simultánea de otros enlaces de red.

4.3.1.2 Monitorización del estado del canal

Cuando se hace referencia a la monitorización del estado del canal, se hace referencia al proceso por el cual se tiene conocimiento continuo sobre qué enlaces físicos de red están habilitados, y ofrecen a su vez conectividad en cada momento por cuestiones relacionadas con la cobertura. Se trata pues de un proceso continuo implementado por el sistema que se complementa con un servicio adicional (ver apartado 4.2.1.1) desarrollado como parte del middleware y cuyo cometido es medir la disponibilidad de ancho de banda de los enlaces físicos que ofrezcan conectividad en un momento dado.

Por tanto, este sistema examina de forma continua qué enlaces están disponibles para llevar a cabo las comunicaciones, y el ancho de banda que ofrece cada uno de ellos, seleccionando el enlace que mejores prestaciones presente para llevar a cabo las comunicaciones vehículo-tierra.

La **Figura 4.6** muestra de forma esquemática el proceso que sigue este sistema a través del MCE a la hora de seleccionar el enlace activo.

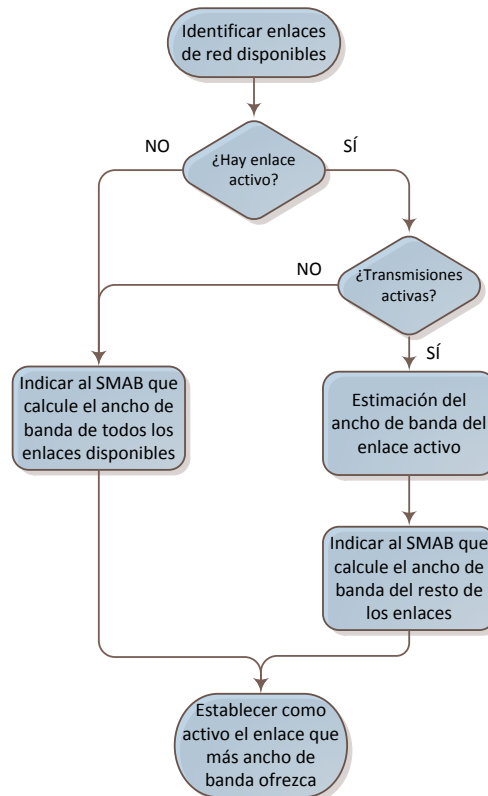


Figura 4.6: Algoritmo de selección de enlace activo en el MCE

Primero el MCE identifica los enlaces de red que se encuentran disponibles de forma física dentro del ámbito embarcado en el vehículo. A partir de aquí se pueden dar dos circunstancias:

- 1) **No hay enlace activo.** Si el sistema no tiene establecido ningún enlace activo, el MCE invoca el SMAB para que lleve a cabo el cálculo de ancho de banda de todos los enlaces disponibles. Una vez obtenidos los valores de ancho de banda de estos enlaces, el sistema define como activo aquél que ofrezca más ancho de banda.
- 2) **Hay enlace activo.** Si el sistema ya tiene establecido un enlace activo, pero sin embargo no hay ninguna transmisión de datos en curso, es decir, no hay ninguna aplicación comunicándose a través del middleware, el procedimiento que se sigue es igual que en el caso en que no hay enlace activo. En cambio, en el caso en que haya

transmisiones de datos en curso, el middleware no ejecuta la medición del ancho de banda para todos los enlaces de la misma manera. Es aquí donde cobran sentido las mediciones de ancho de banda de forma activa y pasiva que se describen más detalladamente en el apartado 4.2.1.1.

De esta manera, en caso de que ya haya un enlace establecido como activo, y además haya comunicaciones activas, el cálculo de ancho de banda del enlace activo se realizará de forma estimada (cálculo de ancho de banda pasivo) en base al comportamiento del sistema en lo que a uso de la red se refiere, de forma que no se genere sobrecarga de tráfico en el canal de comunicaciones establecido por el enlace activo. Por otro lado, el ancho de banda del resto de los enlaces se llevará a cabo a través del SMAB (cálculo de ancho de banda activo).

Una vez obtenidos los valores de ancho de banda de todos los enlaces, el sistema seleccionará el que mejores prestaciones ofrezca.

En este punto es importante mencionar que cuando la selección de enlace activo tiene como consecuencia un cambio de enlace, el sistema establece un margen de ancho de banda entre el enlace que se encuentra ya activo y el nuevo, para determinar si la diferencia de ancho de banda entre ambos enlaces es suficientemente relevante como para llevar a cabo dicho cambio. Se trata por tanto de un valor configurable en el sistema, definido con el propósito de que cuando haya varios enlaces con un ancho de banda muy parejo el sistema no esté cambiando de enlace continuamente.

4.3.1.3 Gestión de cambios de enlace transparente

Tal como se ha ido indicando a lo largo de la memoria, una de las características principales de este sistema es su capacidad para realizar conmutaciones de enlace de forma que no afecte a la continuidad de las comunicaciones, y sean transparentes para las aplicaciones finales.

En cuanto al establecimiento de las comunicaciones, este middleware es un sistema desarrollado a nivel de aplicación, cuyas comunicaciones se llevan a cabo a través de TCP/IP. Por tanto, el hecho de realizar un cambio de enlace supone que el sistema debe establecer un nuevo canal por el que se redirigirán las comunicaciones (tanto las transmisiones de datos entre aplicaciones finales, como los mensajes de protocolo vehículo-tierra intercambiados por el propio sistema).

Así, el cambio de enlace a través de este sistema se puede producir por dos causas: (1) el sistema valora que otro enlace disponible es más favorable que el establecido como activo, ó (2) se produce una pérdida de conectividad del enlace activo.

La **Figura 4.7** muestra el procedimiento que sigue el middleware cuando se produce un cambio de enlace para que dicho cambio sea transparente para las aplicaciones.

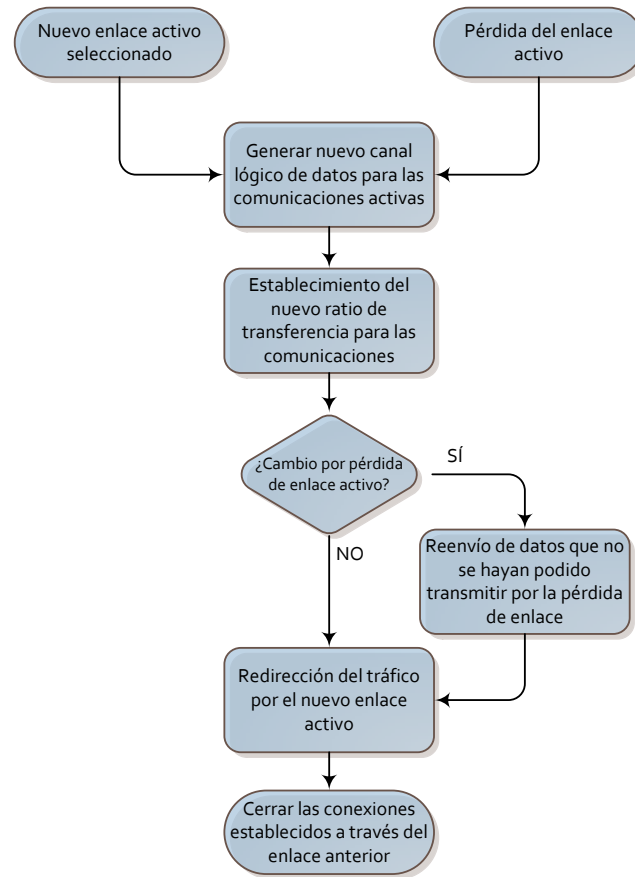


Figura 4.7: Procedimiento de cambio de enlace

Cuando un cambio de enlace a otro más favorable se produce en un momento en el que haya comunicaciones vehículo-tierra activas entre aplicaciones finales, lo primero que hace el sistema es crear un nuevo canal lógico de datos para cada una de las comunicaciones a través de este nuevo enlace (ver apartado 4.3.4). Una vez generado el nuevo canal, el sistema establece por cada comunicación el nuevo ratio de comunicaciones establecido para cada uno de ellos, de acuerdo a la disponibilidad de ancho de banda (aquí se ejecutarán los mecanismos de priorización y gestión de ancho de banda que se describen en los apartados 4.3.2 y 4.3.3). El siguiente paso es por lo tanto redirigir las comunicaciones a este nuevo canal, y una vez redirigidas, cerrar todas las conexiones que había establecidas por el canal previo.

Sin embargo, el cambio de enlace no sólo se produce cuando el sistema determina que otro de los enlaces disponibles es más favorable. Otra causa de cambio de enlace es la pérdida de conectividad del enlace activo. Cuando este hecho se produce, el sistema está preparado para seleccionar otro enlace como activo (aquel que esté disponible y mejores prestaciones

ofrezca), a través del cual se redirigirán las comunicaciones. En estas circunstancias, el sistema está preparado para gestionar esa pérdida de enlace y restablecer las comunicaciones, controlando que todos los datos transmitidos desde la aplicación origen lleguen a su destino. Para ello, el sistema mantiene una serie de cachés, que permiten controlar qué datos han sido recibidos correctamente desde el otro extremo de la comunicación, y realizar los reenvíos pertinentes en caso necesario.

4.3.2 Mecanismo de priorización

En este apartado se describirá la forma en que la plataforma propuesta resuelve la problemática de priorización de peticiones de comunicación realizadas por las aplicaciones finales. Este mecanismo se basa en una serie de criterios que permitirán otorgar a cada petición un índice de prioridad que establezca el orden en que se deberían servir las comunicaciones demandadas por las aplicaciones.

4.3.2.1 Criterios de priorización

La priorización de peticiones de comunicación a través de este middleware se basa en una serie de criterios catalogados en dos categorías:

- **Criterios estáticos:** están relacionados con requisitos de calidad del servicio determinados por las aplicaciones finales que no varían en el tiempo.
- **Criterios dinámicos:** son factores variables relacionados directamente con las comunicaciones o funcionamiento previo del sistema.

En las siguientes subsecciones se describirán cuáles son los criterios estáticos y dinámicos considerados por este middleware.

4.3.2.1.1 Criterios estáticos

En esta versión del middleware de comunicaciones se han considerado los siguientes criterios estáticos:

- **Prioridad a nivel de aplicación.** Dependiendo de la criticidad o inmediatez requerida en el intercambio de información “vehículo-tierra” correspondiente a una aplicación/servicio, las aplicaciones indicarán cuál es el nivel de prioridad requerido para cada una de sus comunicaciones (indicación de la prioridad en las peticiones de comunicación). En este sentido, se definen cuatro niveles de prioridad:
 - Crítica
 - Alta

- Normal
- Baja
- **Ancho de banda mínimo requerido.** Dependiendo de la naturaleza de las aplicaciones, sus necesidades de ancho de banda serán diferentes. Por ejemplo, una aplicación multimedia necesita disponer de más ancho de banda para cubrir sus requisitos de calidad de servicio, mientras que la tasa de transmisión de una aplicación que intercambie otro tipo de información menos voluminosa será posiblemente bastante inferior. Por tanto, cada petición de comunicación llevará asociado un parámetro que indique el ancho de banda mínimo necesario para cubrir los requisitos de calidad de servicio de esa comunicación.
- **Fecha y hora.** Las comunicaciones con un mismo nivel de prioridad otorgado por las aplicaciones solicitantes se ordenarán en base a su antigüedad. Por tanto se considera más crítica una petición de comunicación en base a su fecha y hora de generación para evitar aumentar los retardos en las transmisiones.

4.3.2.1.2 Criterios dinámicos

En lo que a criterios dinámicos se refiere, esta primera versión del middleware incluye el siguiente criterio dinámico:

- **Reintentos de comunicación.** Si una vez que el middleware da paso a una comunicación, ésta falla, por el motivo que sea, el sistema contabilizará el número de reintentos que se hayan producido a nivel de petición. De esta manera, esta variable repercutirá en la priorización de peticiones que tengan el mismo nivel de prioridad, de forma que el sistema penalice aquellas peticiones que hayan fallado antes de que hayan podido completarse, ante aquellas que no hayan fallado.

Si bien en un principio se ha incorporado este único criterio dinámico, una posible mejora del sistema está en la incorporación de servicios de geo-localización en el vehículo (GPS) para la generación de históricos del comportamiento previo del sistema, de forma que permita añadir nuevos criterios dinámicos de priorización. A continuación se indican a modo de ejemplo algunos criterios dinámicos que en el futuro pudieran ser incorporados en el sistema:

- **Ancho de banda habitual en una ubicación determinada.** Como futuro trabajo se plantea la aplicación de mapas de ancho de banda para la optimización del sistema (ver apartado 2.2.2.2.1). Si bien éste no es un parámetro que aplique el sistema a la hora de ordenar las peticiones en base a su prioridad, sí que tiene un efecto directo en las comunicaciones que realmente se vayan a servir en cada momento. Por tanto, repercute de forma directa en la priorización de las transmisiones de datos correspondientes a las peticiones.

- **Media de volumen de datos generado por una aplicación para completar una transmisión de un cierto nivel de prioridad.** Este parámetro es de utilidad en los casos en los que haya una serie de peticiones que tengan el mismo nivel de prioridad, pero difieran en el volumen de datos que transmiten. En este caso, el sistema puede decidir dar prioridad a aquellas peticiones que transmitan menos volumen de información, y por tanto requieran menos tiempo de transmisión, ante otras que requieran más tiempo. De esta manera, el sistema mantendría una serie de históricos que permitieran valorar el volumen de datos generado habitualmente por una aplicación para completar peticiones de un cierto nivel de prioridad.

4.3.2.1.3 Combinación de los criterios de prioridad

Como ya se ha comentado, en esta primera versión del desarrollo la priorización se ha establecido a través de cuatro criterios: (1) la prioridad a nivel de aplicación, (2) el ancho de banda mínimo requerido, (3) la fecha y hora de generación de la petición, y (4) los reintentos de comunicación que se hayan podido producir hasta poder completar cada petición.

En base a estos criterios, el sistema ordena las peticiones en una serie de colas, de forma que sean atendidas en base a su prioridad (esto será descrito de forma más detallada en el siguiente apartado 4.3.2.2).

Así, los criterios de priorización se combinan en dos pasos:

- 1) El sistema ordena las peticiones correspondientes a un mismo vehículo en una cola de acuerdo a los criterios de prioridad indicada por la aplicación (crítica, alta, normal o baja), la fecha y hora en la que se ha producido dicha petición, y los reintentos de comunicación que se hayan podido producir para cada una de las peticiones.
- 2) Una vez ordenadas las peticiones, el sistema seleccionará en cada momento, en función del criterio de ancho de banda mínimo requerido, qué peticiones más prioritarias se pueden atender (ver apartado 4.3.3 para más detalle).

La **Figura 4.8** muestra de forma gráfica la forma que tiene el sistema de combinar los criterios según el primer paso. De esta manera, el sistema agrupa las peticiones por la prioridad indicada por las aplicaciones que las generan, y dentro de un mismo grupo de prioridad, vuelve a agrupar y ordenar las peticiones en base al número de reintentos que hayan tenido, dando más prioridad a aquellas peticiones que no hayan tenido ningún reintento. Así, las peticiones correspondientes a un mismo nivel de prioridad a nivel de aplicación, y el mismo número de reintentos, tendrán asignado un mismo nivel de prioridad, por lo que se ordenarán por fecha y hora.

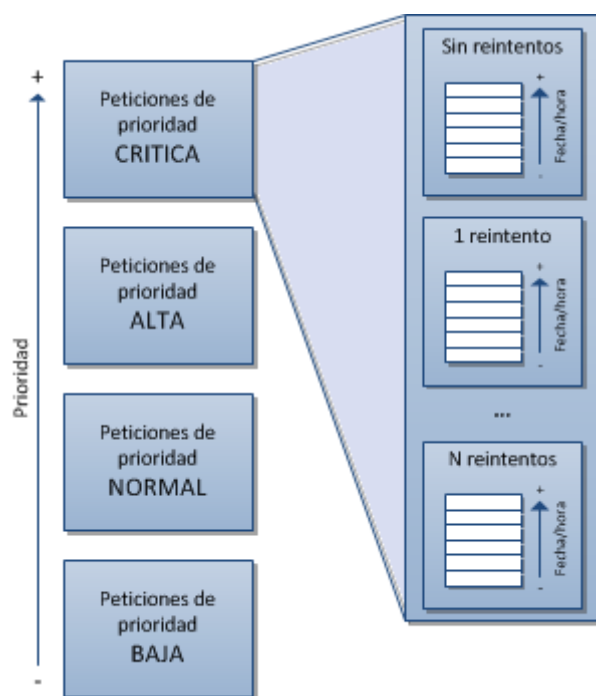


Figura 4.8: Combinación de criterios de prioridad aplicados en el desarrollo del middleware

En este punto, cabe mencionar que aunque esta primera aproximación del sistema se basa en cuatro criterios de prioridad, las futuras versiones pudieran incluir más criterios (tanto estáticos como dinámicos) que a la hora de priorizar las comunicaciones se evaluarían de la misma forma que los reintentos de comunicación. Es decir, las peticiónes se ordenarían primero en base a la criticidad indicada por las aplicaciones, y después por el resto de criterios (aplicados al mismo nivel), ordenados por fecha y hora (dentro de un mismo nivel de prioridad se sirve primero aquella petición que haya sido generada antes).

Por tanto, este sistema ofrece flexibilidad para la introducción de nuevos parámetros que doten al sistema de más inteligencia a la hora de gestionar la priorización de las comunicaciones, sobre todo con la aplicación de criterios dinámicos que permiten la retroalimentación del sistema en base a comportamientos anteriores, de forma que sea capaz de aprender y de optimizar su comportamiento gracias a esta información. De esta manera, el conjunto de criterios seleccionado para llevar a cabo la experimentación (en el capítulo 5) pudiera ser ampliado y refinado. No obstante, ése no es el objeto de la tesis.

4.3.2.2 Priorización de peticiónes basada en colas

El MCE dispondrá de *una cola* de peticiónes de comunicación en el que se irán ordenando las solicitudes de comunicación en base a los criterios de priorización mencionados anteriormente. Esta cola se irá actualizando de acuerdo tanto a las nuevas peticiónes que

lleguen desde las aplicaciones embarcadas, como a aquellas comunicaciones que hayan sido servidas, y por tanto se vayan eliminando de dicha cola.

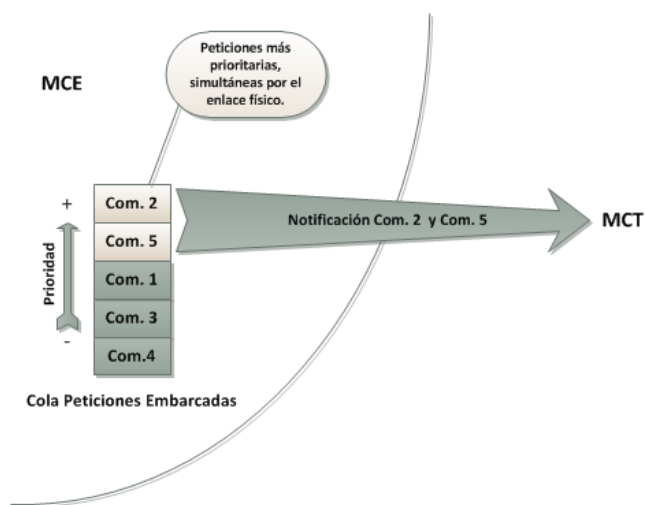


Figura 4.9: Priorización de comunicaciones en el MCE

De acuerdo a las restricciones inherentes al enlace físico activo y los cambios de ordenación de las peticiones de comunicación embarcadas en la cola, el MCE notificará al MCT sobre las peticiones más prioritarias realizadas por las aplicaciones embarcadas, que pudieran idealmente ser servidas de manera simultánea a través del enlace físico activo. Por tanto, cada vez que cambie el enlace activo o el orden de las peticiones en la cola, y en caso de que la lista de comunicaciones prioritarias notificadas al MCT cambie, el MCE tendrá que ir informando sobre estos cambios al MCT.

En este punto, cabe mencionar además, que el ancho de banda real disponible puede variar a lo largo del periodo en el que un enlace físico determinado se establezca como el activo debido a los cambios de ubicación de los vehículos. Este cambio de ancho de banda será detectado por el MCE, que notificará al MCT sobre cuál es el ancho de banda real ofrecido por el enlace físico activo. Sin embargo, a la hora de notificar las solicitudes de comunicación embarcadas más prioritarias, el MCE no tendrá en cuenta el ancho de banda real ofrecido por el canal, sino que siempre notificará la lista de solicitudes más prioritarias que se pudieran servir en el mejor de los casos (100% del ancho de banda teórico del canal activo disponible).

Por su lado, el MCT gestiona *una serie de colas*, de forma que sea capaz de priorizar y arbitrar las peticiones de comunicación generadas tanto en tierra como en el ámbito embarcado relativas a un determinado vehículo.

La **Figura 4.10** representa de forma visual cómo el MCT gestiona las peticiones de comunicación a nivel de vehículo, disponiendo de una cola de peticiones ordenadas por prioridad para cada uno de los vehículos, de forma que se establezcan comunicaciones

bidireccionales, donde las comunicaciones pueden iniciarse tanto desde aplicaciones del ámbito embarcado (a través del MCE) como desde aplicaciones ubicadas en el sistema de tierra (a través del MCT).

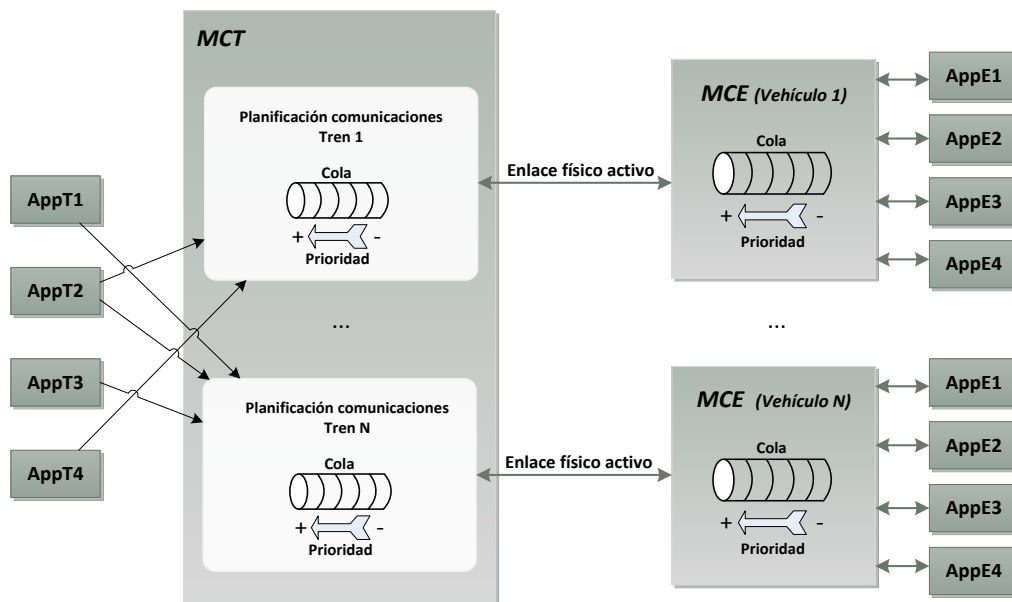


Figura 4.10: Planificación de las comunicaciones "vehículo-tierra"

Así, el sistema además de priorizar las solicitudes de comunicación realizadas por las aplicaciones, determina qué solicitudes se atenderán en cada momento. Para ello, teniendo en cuenta que el responsable final de arbitrar el tráfico es el MCT, el sistema lleva a cabo las siguientes tareas:

- **Planificación de las solicitudes embarcadas:** de acuerdo a las características del enlace de comunicaciones activo, el MCE prioriza las peticiones de comunicación generadas desde las aplicaciones embarcadas, y planifica aquellas que pueden ser atendidas de forma simultánea a través del canal de acuerdo a las necesidades de ancho de banda de dichas solicitudes (necesidades de QoS), y la disponibilidad del canal en el mejor de los casos (suponiendo que la disponibilidad del ancho de banda es de un 100%). Una vez realizada esta planificación, el MCE notifica al MCT sobre esas peticiones de comunicación embarcadas más prioritarias que pudieran ser atendidas concurrentemente por el canal activo.
- **Planificación de las solicitudes "vehículo-tierra":** el MCT es el responsable de priorizar y planificar las solicitudes, combinando aquellas notificadas por el MCE de cada vehículo, con las solicitudes de comunicación realizadas por las aplicaciones de tierra con respecto a ese mismo vehículo. Por tanto, el MCT realiza una planificación de solicitudes por cada uno de los vehículos que se integran con el middleware de comunicaciones.

- **Activación de comunicaciones en base al ancho de banda disponible:** una vez priorizadas las peticiones de comunicación de cada vehículo, el MCT valora qué solicitudes se pueden atender de forma simultánea en un momento dado, sirviendo siempre aquellas más prioritarias, pero teniendo en cuenta que se dispone de un ancho de banda limitado para hacerlo. Además, dependiendo de la calidad de la señal recibida desde el vehículo implicado, el ancho de banda real ofrecido por el canal puede variar, influyendo en las comunicaciones que se puedan estar atendiendo en un momento dado.

4.3.3 Procedimiento de control de QoS

En apartados anteriores se ha descrito la forma en la que el middleware prioriza las peticiones de comunicación de las aplicaciones. Tal como se ha podido observar, el mecanismo de priorización en este caso está estrechamente ligado al ancho de banda demandado por las aplicaciones, y el ancho de banda que dispone el sistema a la hora de resolverlas.

En esta sección se hará hincapié en la forma en que este sistema lleva a cabo la asignación de ancho de banda a aquellas comunicaciones que estén en curso en un momento dado.

Así, el procedimiento de control de ancho de banda, y por tanto, de QoS de las comunicaciones, se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- 1) El sistema prioriza las peticiones de comunicación correspondientes a un mismo vehículo en base a los criterios de priorización descritos en el apartado 4.3.2.1.
- 2) Una vez ordenadas las peticiones en base a su prioridad, el sistema valora qué peticiones prioritarias se pueden atender de forma simultánea en base a la disponibilidad de ancho de banda. De esta manera, el middleware dará paso a aquellas peticiones más prioritarias que puedan ser atendidas respetando sus necesidades mínimas de ancho de banda (calidad del servicio).
- 3) Una vez seleccionadas las peticiones más prioritarias que se puedan atender de forma concurrente, el sistema valora si la suma del ancho de banda mínimo requerido por estas peticiones es inferior al disponible, ya que el sistema siempre asigna el 100% del ancho de banda disponible entre las comunicaciones que se estén llevando a cabo en cada momento. Así, en los casos en los que el ancho de banda demandado sea inferior al disponible, el sistema realizará una asignación proporcional a la demanda realizada por cada petición.

A modo de ejemplo, la **Figura 4.11** muestra dos situaciones representativas en la planificación de comunicaciones vehículo-tierra gestionadas por el MCT, en base a su demanda de ancho de banda:

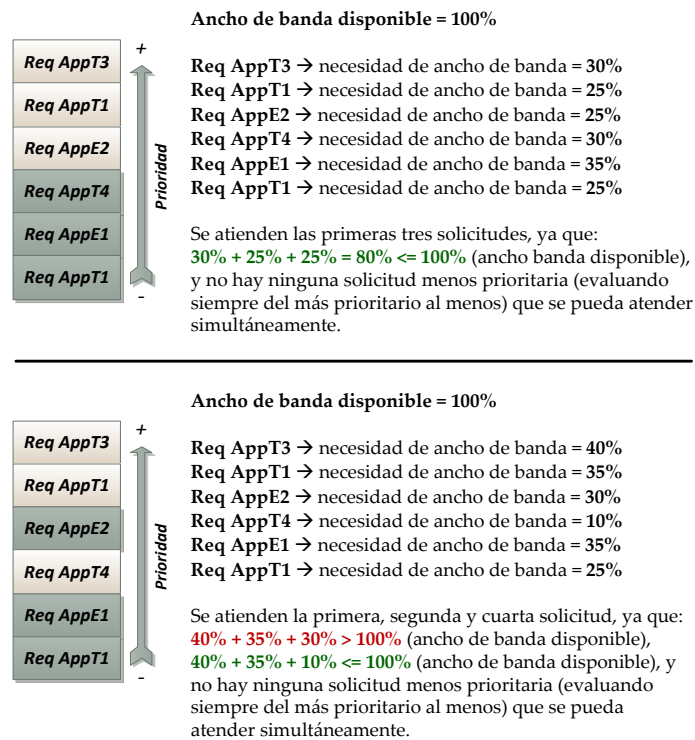


Figura 4.11: Planificación de comunicaciones vehículo-tierra desde el MCT

Ambas situaciones muestran seis peticiones de comunicación, realizadas por diferentes aplicaciones, ordenadas por prioridad. Además, en cada caso se indica el ancho de banda mínimo requerido por cada una de las peticiones (en el ejemplo se trabaja con porcentajes a la hora de valorar el ancho de banda).

En la primera situación, si se cuantifica la disponibilidad de ancho de banda en 100%, se puede apreciar el porcentaje que demanda cada una de las peticiones con respecto al total disponible. De esta manera, el sistema empieza a valorar las peticiones comenzando desde la más prioritaria. Así, en este caso el sistema puede atender las tres primeras peticiones, que demandan el 80% del ancho de banda disponible. Sin embargo, aunque en este caso aún quede un 20% de disponibilidad de ancho banda sin asignar, no es suficiente para poder atender ninguna otra petición más, dado que sus requerimientos mínimos son superiores a este valor. De esta manera, el sistema en este caso daría paso a las tres peticiones más prioritarias, y ese 20% de ancho de banda adicional sería asignado de forma proporcional a los requerimientos mínimos indicados para cada petición.

En la segunda situación de la **Figura 4.11**, el sistema empezaría valorando qué peticiones puede atender en este caso, empezando como siempre por la más prioritaria. En este caso hay suficiente ancho de banda para atender a las dos peticiones más prioritarias, ocupando un 75% del ancho de banda disponible, quedando un 25% sin asignar. Sin embargo, si bien la tercera petición más prioritaria no puede ser atendida en este caso (ya que demanda un 30% del ancho de banda), el sistema sí puede dar paso a la siguiente petición más prioritaria que demanda un 10% del ancho de banda total. Así, en este caso, el middleware daría paso a las dos peticiones más prioritarias, y a esta otra, que es la siguiente petición más prioritaria que puede ser atendida respondiendo a los requisitos de QoS fijados por las aplicaciones. Por tanto, el ancho de banda mínimo requerido por estas tres peticiones sería en este caso del 85%, siendo el 15% restante asignado de forma proporcional (como en el caso anterior) entre las mismas.

4.3.3.1 Control de asignación de ancho de banda

Una vez narrada la forma en la que el sistema prioriza y determina el ancho de banda que le será otorgado en cada momento a cada comunicación, a continuación se concreta cómo hace el sistema para que las comunicaciones se lleven a cabo de acuerdo al ancho de banda que les haya sido otorgado.

Las comunicaciones mediante este sistema se establecen a través del modelo de protocolo de red TCP/IP. Por tanto, las transmisiones de datos se llevan a cabo a través de sockets TCP. Con el propósito de poder limitar la tasa de transferencia para que cada comunicación no consuma más ancho de banda del otorgado, el sistema controla el tráfico que genera cada comunicación (a través de los socket) segundo a segundo, regulando la transmisión para que el volumen de datos transmitido no supere la tasa de transferencia otorgada a la comunicación.

De esta forma, cuando el ancho de banda asignado a una comunicación cambia, el sistema está capacitado para regular el tráfico de acuerdo a dicho ajuste. Por otro lado, en caso de que una petición de comunicación deje de ser prioritaria, y no pueda ser atendida, el sistema cierra el canal de conexión TCP correspondiente a dicha comunicación (ver apartado 4.3.4.2), por lo que la transmisión de datos correspondiente a esa petición queda pospuesta hasta el momento en que pueda volver a ser atendida de nuevo.

4.3.4 Protocolos de comunicación

Para la implementación del sistema planteado, es necesario definir una serie de protocolos que permitan realizar intercambios de comandos e información tanto entre las aplicaciones finales y su respectivo máster de comunicaciones (ya sea en tierra o en el ámbito

embarcado), como entre el MCT y el MCE, permitiendo un esquema completo de comunicaciones “vehículo-tierra”.

Así, tanto entre las aplicaciones y la plataforma de comunicaciones, como entre el MCT y el MCE se definen dos tipos de flujos de información:

- **Flujo de control:** se trata del canal establecido para el intercambio de mensajes de control (ver apartados 4.3.4.1 y 4.3.4.2).
- **Flujo de datos:** a la hora de servir una comunicación solicitada por una aplicación, se genera un canal lógico para que dicha aplicación intercambie información. Por tanto, el MCT y el MCE establecerán un canal lógico de datos entre la aplicación origen y la aplicación destino, transparente a su funcionalidad, que permita a estas aplicaciones intercambiar información de forma directa (sin procesamiento intermedio de los datos) de acuerdo al ancho de banda reservado y asignado para ello.

A lo largo de este apartado se indicará qué tipo de mensajes definen el protocolo de comunicaciones de este middleware, tanto en el protocolo establecido entre el MCT y el MCE, como en el definido para la integración de aplicaciones finales externas.

4.3.4.1 Comunicación vehículo a tierra (MCE-MCT)

Para dar respuesta a las necesidades de intercambio de información “vehículo-tierra” que implementa el sistema, el protocolo establecido entre el MCT y el MCE define mensajes cuyo cometido es llevar a cabo la siguiente funcionalidad:

- Notificación por parte del MCE al MCT sobre el **enlace físico activo** en cada caso.
- Notificación de **peticiones de comunicación**. El MCE notifica al MCT las comunicaciones prioritarias generadas en el ámbito embarcado que podrían ser atendidas de forma simultánea de acuerdo con las condiciones de ancho de banda ofrecidas por el medio en cada momento. En esta notificación, entre otras cosas, se indica cuál es el ancho de banda requerido por las aplicaciones que han solicitado la comunicación. Esta notificación se lleva a cabo cada vez que:
 - Se cambia el enlace de comunicación activo.
 - Se reordena la cola de peticiones embarcada, sea por la llegada de nuevas peticiones prioritarias que hagan que las peticiones notificadas anteriormente al MCT ya no sean las más prioritarias, o por la conclusión de una comunicación relacionada con una petición dada (esa petición se encontraría servida y se extraería de la cola).

- Notificación para indicar el **inicio/parada de comunicaciones**. El MCT notifica al MCE cuando puede dar paso a las peticiones de comunicación realizadas en el ámbito embarcado, en base a la priorización de dichas peticiones en tierra respecto a ese vehículo.

En esta activación de peticiones de comunicación, el MCT además de indicar al MCE a qué peticiones puede dar paso, le indica cuál es el ancho de banda reservado para dicha petición, permitiendo un ajuste del ancho de banda flexible de acuerdo al estado del enlace físico.

- Notificación de **cambios de asignación de ancho de banda** a una comunicación determinada, dado que se contempla que la asignación del ancho de banda sea flexible de acuerdo al uso que se esté realizando sobre el enlace físico.
- **Configuración remota de los MCE**. El sistema está diseñado para posibilitar la configuración remota de los MCE desde tierra (a través del MCT), permitiendo así, por ejemplo, cambiar los parámetros o reglas de priorización a la hora de seleccionar el canal o enlace físico activo.

En la **Figura 4.12** se especifican de forma gráfica los tipos de mensajes intercambiados entre el MCT y el MCE que permitan completar la funcionalidad y el cometido del middleware de comunicaciones.

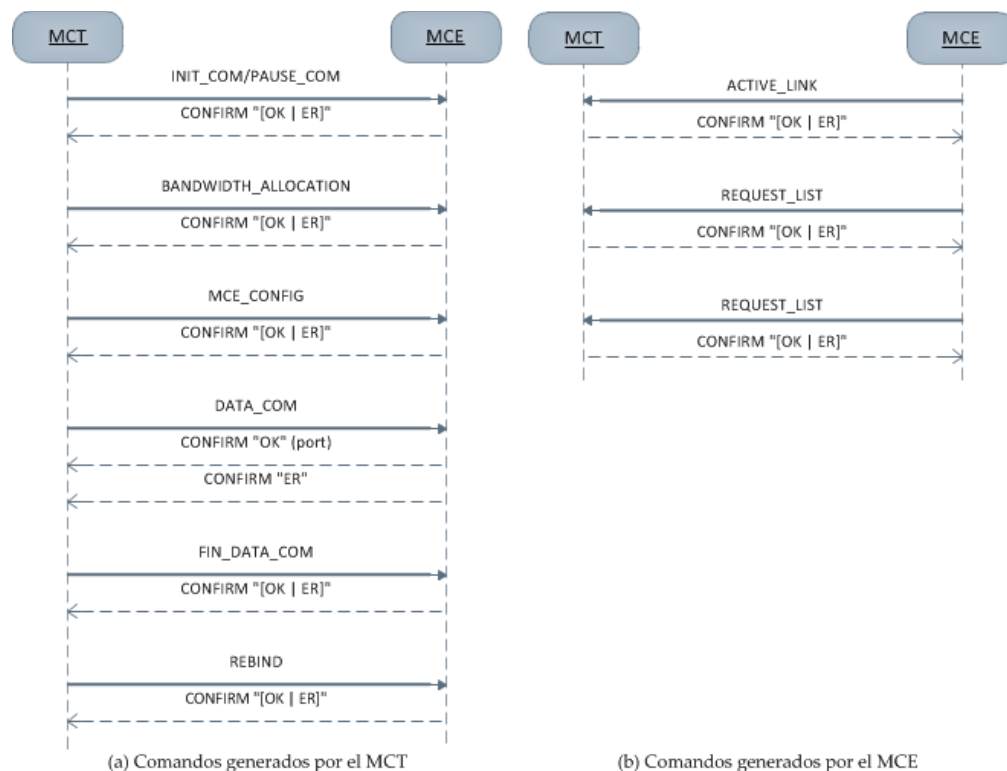


Figura 4.12: Comandos definidos en el protocolo entre el MCT y el MCE

En las siguientes tablas se describen cada uno de estos comandos y sus parámetros, organizando los comandos en diferentes tablas de acuerdo a su función.

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
ACTIVE_LINK	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador del vehículo involucrado. - Causa que ha provocado el cambio de enlace (establecimiento de un enlace mejor o pérdida del activo) - Identificador del enlace activo, y tipo de enlace físico (WiFi, GPRS, etc.). - Ancho de banda disponible. - Disponibilidad de otros enlaces de comunicación, además del activo. 	Notificación del MCE al MCT de cuál es el enlace activo en cada momento, así como su disponibilidad de ancho de banda.
REBIND	<ul style="list-style-type: none"> - Causa por la que se ha producido el cambio de enlace activo. - Identificador de la petición. - Nuevo puerto por el que el MCT establece la comunicación con el MCE para atender esta petición. 	Este comando se genera para el procesamiento del cambio de enlace transparente, de forma que se genere un nuevo canal lógico de datos para una comunicación que esté en curso.

Tabla 4.3: Comandos relacionados con el establecimiento y cambios de enlace (protocolo MCT y MCE)

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
INIT_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición embarcada. - Puerto por el que el MCT establece la comunicación con el MCE para atender esta petición. - Ancho de banda asignado a esta petición. 	A través de este comando el MCT indica al MCE cuándo una aplicación embarcada puede iniciar la transmisión correspondiente a una petición embarcada.
PAUSE_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición embarcada. 	Cuando una petición embarcada deja de ser prioritaria, el MCT indica al MCE que gestione la pausa de esa comunicación.
DATA_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicación destino de la comunicación. - Identificador de la petición de comunicación embarcada. 	Cuando se sirva una petición de comunicación generada desde tierra, a través de este comando, se indica al MCE que indique a la aplicación destino que se prepare para recibir datos.

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
FIN_DATA_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición originada en tierra. 	Cuando una comunicación de datos iniciada en tierra se detiene, ya sea porque se pasa a atender una petición más prioritaria, o porque la comunicación se haya completado, el MCT envía este comando al MCE para completar el procesamiento del cierre del canal lógico de datos establecido.

Tabla 4.4: Comandos relacionados con la transmisión de datos (protocolo MCT y MCE)

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
REQUEST_LIST	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador del vehículo. - Lista de peticiones y sus parámetros (aplicación origen y destino, prioridad, ancho de banda mínimo requerido, y la fecha y hora de generación) - Lista de aplicaciones embarcadas que se encuentran conectadas al sistema. 	El MCE notifica al MCT la lista de peticiones generadas en el ámbito embarcado que son más prioritarias, y que pudieran ser servidas a través del enlace activo de forma simultánea en cada momento.
BANDWIDTH_ALLOCATION	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición embarcada. - Ancho de banda asignado. 	Cuando el middleware establece otro valor de ancho de banda para una comunicación embarcada, le envía este comando al MCE para que gestione dicho ajuste.

Tabla 4.5: Comandos para la gestión de las peticiones de las aplicaciones (protocolo MCT y MCE)

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
MCT_CONFIG	<ul style="list-style-type: none"> - Lista de tipos de interfaces de red, indicando si habilitarlos o no. 	Comando a través del cual se habilita la configuración remota de los MCE.

Tabla 4.6: Comandos para la configuración remota del MCE (protocolo MCT y MCE)

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
CONFIRM	<ul style="list-style-type: none"> - Indicador de éxito o error. - Dependiendo del mensaje al que corresponde, podrá tener diferentes parámetros adicionales. 	Todos los mensajes tendrán una respuesta en forma de confirmación.

Tabla 4.7: Mensaje de confirmación (protocolo MCT y MCE)

4.3.4.2 Comunicación con las aplicaciones finales

En lo que a la integración de las aplicaciones con el middleware de comunicaciones se refiere, este sistema define un protocolo para la interacción con las aplicaciones finales (tanto en tierra como en el ámbito embarcado), a través del intercambio de una serie de mensajes diseñados para llevar a cabo las siguientes funciones:

- **Conexión/desconexión** de las aplicaciones al canal de comunicaciones, así como su **autenticación**.
- Generación de **peticiones de comunicación** indicando el ancho de banda mínimo requerido para garantizar la QoS, así como el nivel de prioridad o criticidad de la información que se pretende transmitir.
- Indicación de **inicio/parada de transmisión** de información relacionada con una petición de comunicación determinada a las aplicaciones finales.
- Indicación del **fin de la comunicación** por parte de las aplicaciones para que el sistema sea capaz de saber cuándo una petición de comunicación ha sido servida de forma satisfactoria, liberando el ancho de banda reservado y reasignándolo de acuerdo a los mecanismos de priorización y gestión de ancho de banda establecidos.
- Posibilidad de **cancelar peticiones** de comunicación previamente realizadas por parte de las aplicaciones.

La **Figura 4.13** muestra de forma gráfica los comandos que el middleware intercambia a través del protocolo establecido con las aplicaciones, así como su respuesta, tanto en tierra como en el ámbito embarcado.

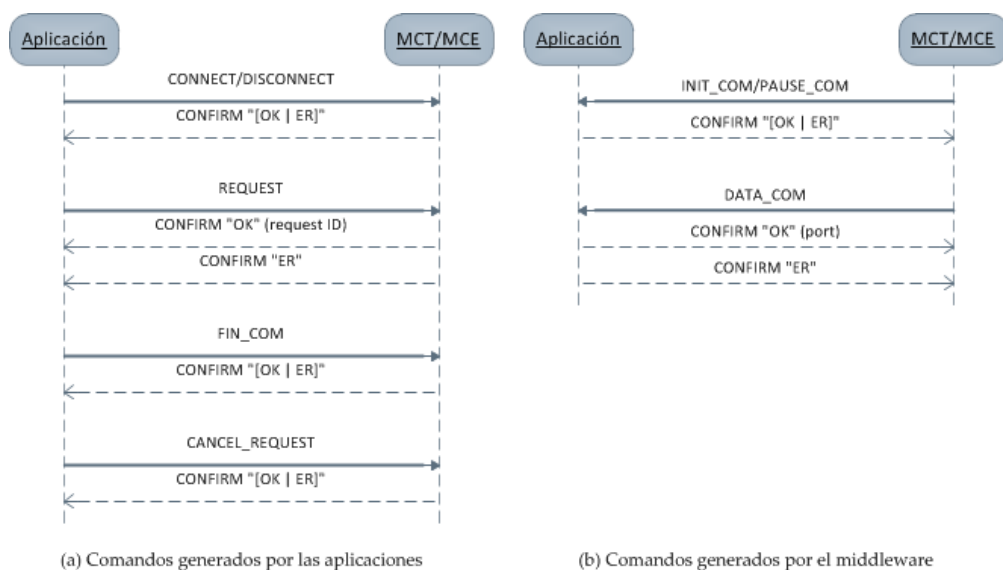


Figura 4.13: Protocolo establecido para la comunicación con las aplicaciones

En las siguientes tablas se organizan los comandos de este protocolo de acuerdo a su función, y se hace una descripción de cada uno de ellos, indicando sus parámetros.

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
CONNECT	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador o nombre de la aplicación que se conecta/desconecta. - Dirección IP a través de la cual se conecta/desconecta la aplicación. 	Comando a través del cual las aplicaciones finales se identifican en el middleware al conectarse.
DISCONNECT	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador o nombre de la aplicación que se conecta/desconecta. - Dirección IP a través de la cual se conecta/desconecta la aplicación. 	Comando generado por las aplicaciones a la hora de desconectarse.

Tabla 4.8: Comandos de establecimiento de conexión (protocolo aplicaciones)

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
REQUEST	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la aplicación origen de la información. - Identificador de la aplicación destino. - Identificador del vehículo al que va dirigida la petición (en caso de que sea generado en “tierra”). - Prioridad de la comunicación. - Ancho de banda mínimo requerido para asegurar la calidad del servicio. 	Cuando una aplicación quiere establecer comunicación a través del middleware, envía una petición de comunicación a través de este comando.
FIN_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición de comunicación completada. 	Cuando la transmisión de datos correspondiente a una petición haya sido completada, la aplicación final originaria se lo indica al middleware a través de este comando.
CANCEL_REQUEST	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición de comunicación que se quiere cancelar. 	Las aplicaciones finales podrán eliminar o cancelar las peticiones de comunicación realizadas previamente a través de este mensaje.

Tabla 4.9: Comandos de gestión de las peticiones de las aplicaciones (protocolo aplicaciones)

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
INIT_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición de la comunicación atendida. - Puerto por el que se tiene que comunicar la aplicación final con el respectivo Máster de Comunicaciones (MCT o MCE) para la transmisión de información (necesario para el establecimiento del canal lógico de datos. 	El middleware indica a las aplicaciones cuándo pueden iniciar una comunicación correspondiente a una petición determinada.
PAUSE_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición de comunicación pausada. 	En caso de que una petición deje de ser prioritaria, el middleware indica a la aplicación que haya generado dicha petición que pause la comunicación.
DATA_COM	<ul style="list-style-type: none"> - Identificador de la petición. 	Cuando se sirva una petición de comunicación generada desde el otro extremo de la comunicación (ámbito de tren o tierra), a través de este comando, se indica a la aplicación destino que se prepare para recibir datos

Tabla 4.10: Comandos relacionados con la transmisión de datos (protocolo aplicaciones)

COMANDO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
CONFIRM	<ul style="list-style-type: none"> - Indicador de éxito o error. - Dependiendo del mensaje al que corresponde, podrá tener diferentes parámetros adicionales. 	Todos los mensajes tendrán una respuesta en forma de confirmación.

Tabla 4.11: Mensaje de confirmación (protocolo aplicaciones)

4.3.4.3 Transmisión de datos vehículo tierra

Tal como se ha mencionado anteriormente, tanto entre las aplicaciones y la plataforma de comunicaciones, como entre el MCT y MCE, se definen dos tipos de flujos de información: (1) flujo de control y (2) flujo de datos.

La **Figura 4.14** muestra un escenario en el que el MCT, una vez planificadas las solicitudes de comunicación “vehículo-tierra” indica a través del flujo de control (línea continua etiquetada en rojo) a las aplicaciones AppT1 y AppT3 que pueden comunicarse.

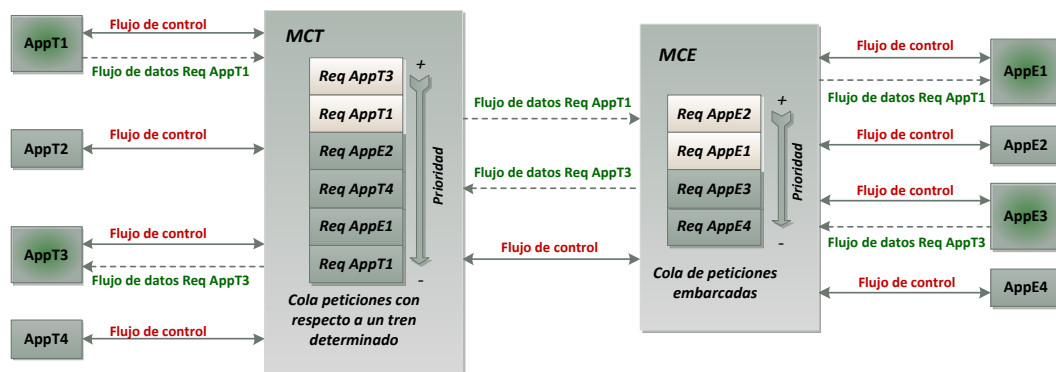


Figura 4.14: Flujos de transmisión vehículo a infraestructura de centro de control

La información generada en la aplicación origen viaja en forma de bytes desde el origen hasta el destino (líneas discontinuas etiquetadas en verde), y a través de la plataforma de comunicaciones (MCT y MCE), sin que dicha información sea procesada por ningún elemento intermedio.

A modo de ejemplo, la **Figura 4.15** ilustra el proceso de generación y servicio de peticiones de comunicación, desde que son generadas por las aplicaciones (una aplicación de tierra en el caso del ejemplo):

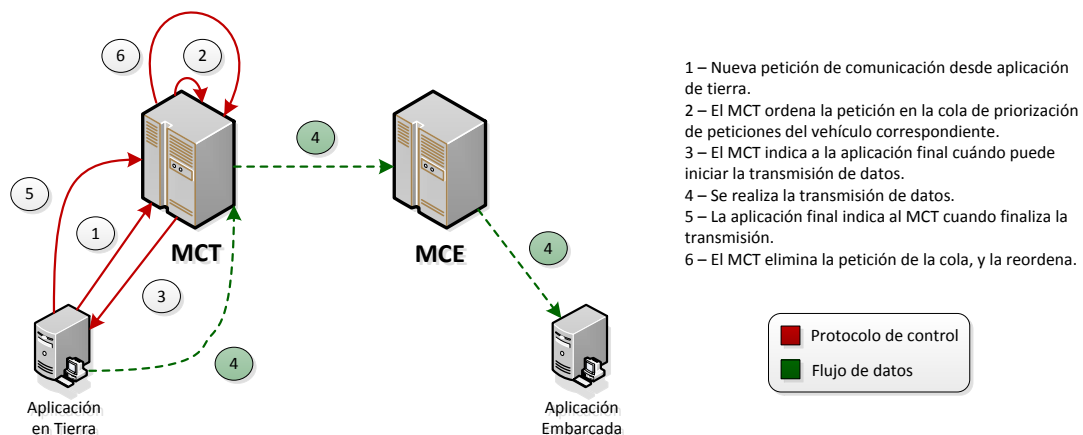


Figura 4.15: Proceso de generación y servicio de peticiones

Cuando una aplicación desea comunicarse con una aplicación ubicada en el otro extremo de la comunicación (vehículo o tierra), envía una petición de comunicación al middleware (al MCE en caso de una aplicación embarcada, y al MCT en caso de una aplicación de tierra). En este momento, el middleware toma una serie de decisiones, que estarán fundamentadas en el ancho de banda disponible en el canal, las comunicaciones que se encuentren en curso o activas en ese momento, y los requisitos establecidos para estas comunicaciones por parte de las aplicaciones. Por tanto, en base a las condiciones que se den en un momento dado, el middleware determinará si esa nueva petición puede ser atendida, o si por el contrario tiene

que ser pospuesta para servirse más adelante. En el momento que se den las condiciones para que dicha petición sea atendida, el middleware establece un canal de comunicaciones de datos lógico por el cual se canalizarán los datos correspondientes a esta petición desde la aplicación origen a la aplicación destino. Es entonces cuando el middleware indica a la aplicación que ha generado la petición que puede iniciar la comunicación.

A través de este canal lógico de datos, el middleware realiza un control de tasa de transferencia, de forma que la comunicación correspondiente a una petición se realice en base al ancho de banda que le haya sido asignado, controlando así que cada comunicación consuma como máximo el ancho de banda que le haya sido otorgado en base a sus requisitos de calidad del servicio.

Una vez que la comunicación se haya completado, la aplicación origen indica al máster de comunicaciones correspondiente (MCT o MCE) que la transmisión de datos concerniente a esa petición ha finalizado. En este momento, el middleware actúa en consecuencia, eliminando esta petición de sus colas de priorización, y tomando las decisiones oportunas de gestión de tráfico.

4.4 Herramienta de administración y monitorización

El desarrollo del middleware de comunicaciones incluye una herramienta de administración y monitorización del sistema, que habilita dos aplicaciones (una en tierra y la otra en el ámbito embarcado) con las siguientes funciones:

- Monitorización del estado de las comunicaciones.
- Consulta del estado de conectividad de las aplicaciones.
- Consulta del estado de conectividad de los vehículos.
- Consulta del estado de los interfaces de red habilitados en el vehículo.
- Generación de estadísticas.
- Configuración.

La aplicación de administración del MCT permite al usuario consultar el estado del sistema, tanto desde el punto de vista de la conectividad vehicular, como de las comunicaciones que se estén llevando a cabo. Además, incluye una serie de funcionalidades adicionales, que permiten tanto la configuración del sistema, como la generación de estadísticas. Para ello, la aplicación habilita una serie de pestañas, que permiten al usuario acceder a esas funcionalidades.

Por su parte, la aplicación administrativa del MCE ofrece prácticamente las mismas funcionalidades que la del MCT, con la diferencia de que éste además incluye información sobre las interfaces de red disponibles, y el ancho de banda que estos ofrecen.

En los siguientes apartados se mostrarán las pantallas más representativas correspondientes a las principales funcionalidades de estas aplicaciones (la del MCT y la del MCE).

4.4.1 Monitorización del estado de las comunicaciones

La **Figura 4.16** muestra la interfaz de usuario correspondiente a la monitorización de las comunicaciones desde el MCT.

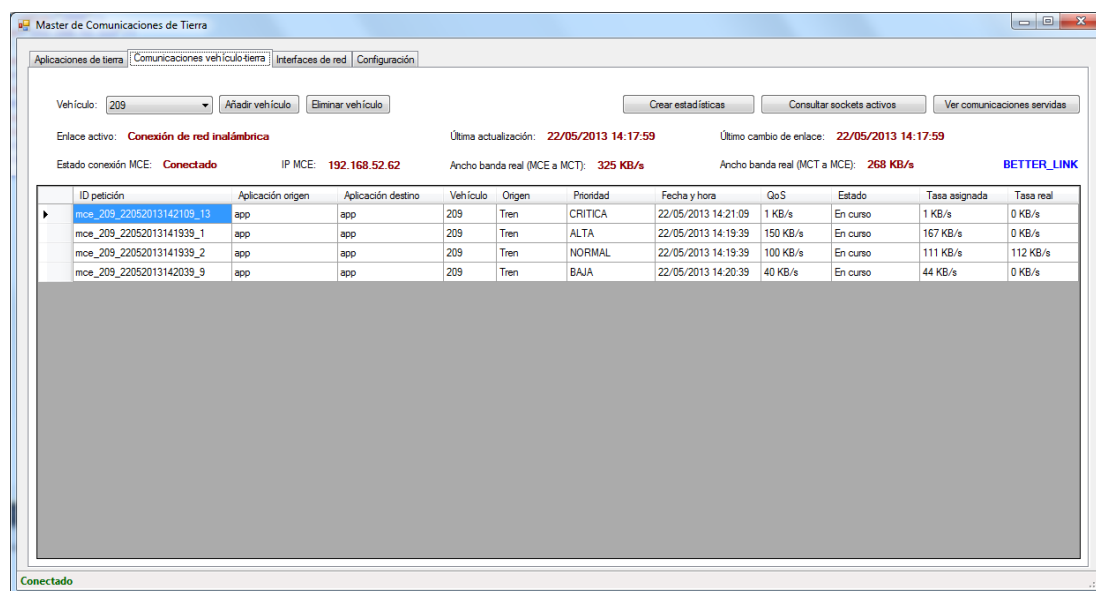


Figura 4.16: Monitorización del estado de las comunicaciones (en MCT)

A través de esta pantalla el usuario puede consultar el estado de las comunicaciones en cada uno de los vehículos, así como cuál es el enlace activo y su ancho de banda. En el caso concreto de esta captura, se visualiza el estado de las comunicaciones con respecto al vehículo 209, mostrando al usuario la siguiente información:

- **Enlace activo**

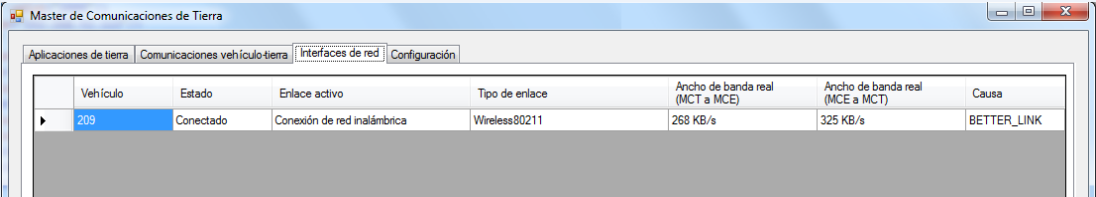
Se muestra información sobre cuál es el enlace activo, su dirección IP remota (la del MCE), y la disponibilidad de ancho de banda a través de este enlace, así como la fecha y hora de su establecimiento, y la fecha y hora de la actualización de los valores de ancho de banda. Además, a través de esta interfaz también se indica la causa por la que se ha establecido este enlace como activo, que pueden ser tres:

- NEW_LINK: indica que antes de establecer este enlace activo no había conectividad entre el MCT y el MCE. Es decir, no se ha producido un cambio de enlace.
 - BETTER_LINK: indica que el cambio de enlace se ha producido porque el sistema determina que hay otro enlace más favorable.
 - LINK_LOST: indica que el cambio de enlace se produce por pérdida de conectividad por el activo.
- **Comunicaciones activas**

A través de la tabla que incorpora la interfaz, se muestran las comunicaciones vehículo-tierra (generadas tanto por aplicaciones de tierra como por las embarcadas) que no se hayan completado, así como su estado. De esta manera, por cada una de las peticiones se muestra la siguiente información: identificador que da el sistema a la petición, aplicación final origen y destino, vehículo al que corresponde, su prioridad a nivel de aplicación, fecha y hora en la que se ha producido la petición, sus requerimientos mínimos de ancho de banda, el estado en el que se encuentra (en *curso* si es prioritaria y está transmitiendo, o *pendiente* si no), el ancho de banda asignado por el sistema a esa comunicación, y la tasa de transferencia a la que se está llevando a cabo realmente.

4.4.2 Consulta del estado de conectividad de los vehículos

A través de la siguiente pantalla, es posible que desde el ámbito de tierra se consulte el estado de conectividad de los vehículos en cuanto a cuál es el enlace activo en cada momento, su disponibilidad de ancho de banda, así como la causa por la que se ha establecido ese enlace (NEW_LINK, BETTER_LINK, LINK_LOST).



Vehículo	Estado	Enlace activo	Tipo de enlace	Ancho de banda real (MCT a MCE)	Ancho de banda real (MCE a MCT)	Causa
209	Conectado	Conexión de red inalámbrica	Wireless80211	268 KB/s	325 KB/s	BETTER_LINK

Figura 4.17: Consulta del estado de conectividad de los vehículos (en MCT)

4.4.3 Consulta del estado de los interfaces de red habilitados en el vehículo

A partir de la aplicación administrativa situada en el MCE, es posible consultar cuál es el enlace activo en cada momento y el tráfico de datos que se está produciendo por ese canal en

cada momento (ver **Figura 4.18**), además de las características de cada uno de los enlaces habilitados, y el ancho de banda que ofrecen en cada momento cada uno de ellos (ver **Figura 4.19**).

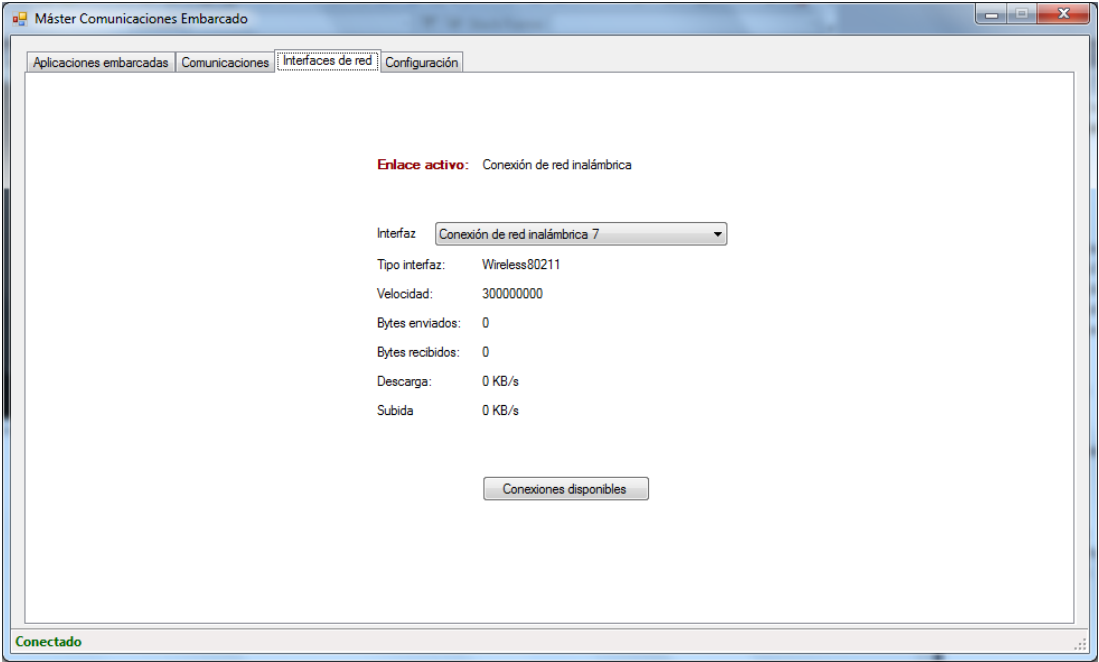


Figura 4.18: Consulta del estado de las interfaces de red (en MCE)

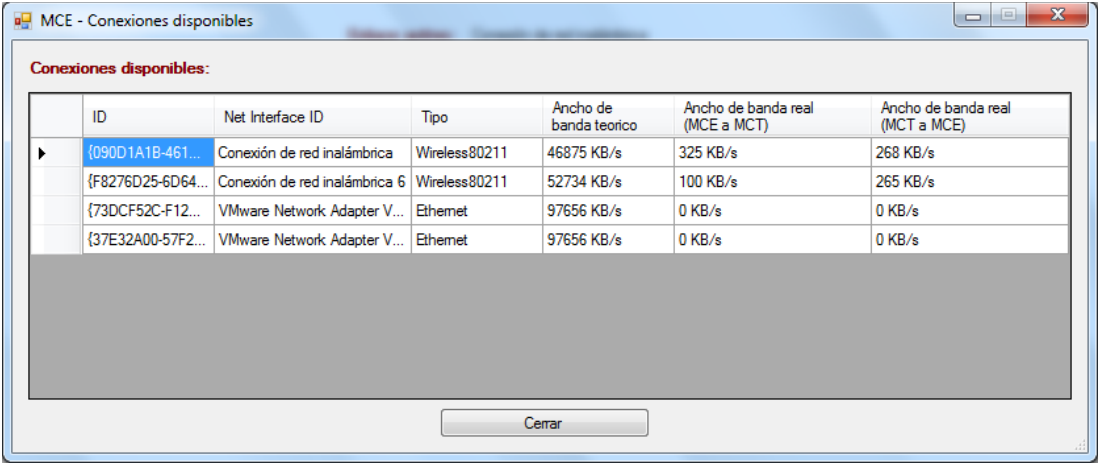


Figura 4.19: Ancho de banda de las interfaces de red disponibles (en MCE)

4.4.4 Generación de estadísticas

Esta aplicación permite exportar la información de las comunicaciones que se hayan llevado a cabo a través del sistema mediante la generación de ficheros Excel. Así, a través de estos ficheros se posibilita consultar tanto información del enlace activo (por ejemplo el ancho de

banda ofrecido por el enlace activo en cada momento), como el ancho de banda consumido por cada una de las aplicaciones en cada instante de tiempo (su tasa de transferencia).

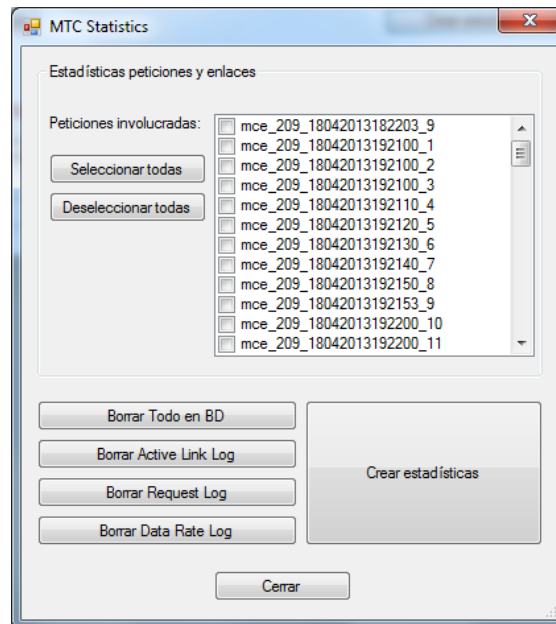


Figura 4.20: Generación de estadísticas (en MCT)

4.4.5 Configuración

La Figura 4.21 muestra la pantalla a través de la cual se realiza la configuración del MCT, y la configuración remota de los tipos de interfaces de red que se habilitarán en los vehículos para llevar a cabo las comunicaciones.

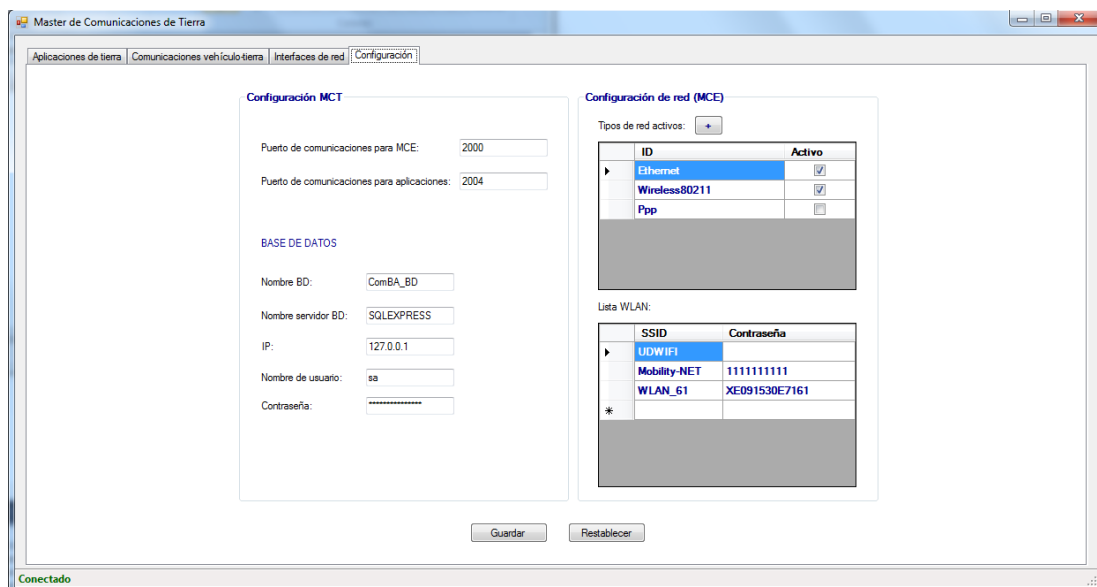


Figura 4.21: Configuración (en MCT)

Además, si bien esta primera versión del sistema sólo permite la configuración remota de los enlaces de red habilitados en los MCE, en una futura versión pudieran ser añadidos más parámetros que ahora mismo se configuran desde el propio MCE.

Capítulo 5

Experimentación y Validación de la Hipótesis

Una de las etapas características de cualquier método de investigación es la validación de la hipótesis planteada al inicio del trabajo. La naturaleza de la hipótesis y del propio trabajo de investigación determinará el empleo de unos medios de validación u otros. En muchos casos, la realización de experimentos, considerando diversas modalidades (con participación de usuarios o sin ellos, basados o no en análisis estadísticos, formales o no formales, en laboratorio o en entorno real, así como un largo etcétera), constituirá una opción adecuada.

El propósito del presente capítulo es precisamente mostrar los instrumentos que han sido empleados para la validación de la hipótesis planteada en esta tesis doctoral, seleccionando y justificando las estrategias de verificación más apropiadas, describiendo a su vez las actividades y experimentos realizados. Para finalizar, se mostrarán los resultados y conclusiones obtenidas de la experimentación, demostrando la veracidad de la hipótesis.

5.1 Estrategia de validación de la hipótesis

En el caso de la presente tesis, se considera que la opción de validación más adecuada es la experimentación en laboratorio. Dentro de una investigación, los experimentos en laboratorio constituyen una técnica cuantitativa aplicada para comprobar el comportamiento de un determinado fenómeno bajo unas condiciones establecidas. Se llevan a cabo en un entorno artificial creados por el investigador, donde las condiciones pueden ser controladas. Su principal objetivo es por tanto verificar una teoría o hipótesis, o bien deducir (generalizar)

nuevo conocimiento a partir de una muestra particular extraída en unas condiciones específicas.

Así, dado que la hipótesis planteada en la tesis es el elemento de referencia para el diseño de los experimentos y la derivación de las conclusiones, se vuelve a incluir a continuación (ver apartado 1.2).

Hipótesis: “Es posible desarrollar un middleware de comunicaciones para entornos vehiculares, que teniendo en consideración criterios de calidad del servicio de las aplicaciones, monitorizando el estado de las redes para la selección del enlace más favorable en cada momento, y realizando una priorización dinámica y adaptativa de las peticiones de comunicación, sea capaz de optimizar el uso del ancho de banda disponible en la red, aumentando la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza más prioritaria”.

Esta hipótesis se puede dividir en dos partes: por un lado en torno a las características del middleware propiamente dicho, y por otro, al final de la misma, en torno a los resultados o beneficios reportados. Por tanto, a la hora de validar esta hipótesis, se ha dividido la experimentación en dos partes, centrando la primera en la funcionalidad del sistema, y la segunda en la evaluación del rendimiento que aporta dicho sistema frente a otras soluciones adoptadas en la industria del transporte para la gestión de comunicaciones vehículo-tierra.

5.1.1 Validación de la primera parte de la hipótesis

La primera parte de la hipótesis se centra en las capacidades de la solución middleware desarrollada, que se encuentran directamente relacionadas con los objetivos y aportaciones planteadas en los capítulos iniciales de esta tesis (ver apartado 1.2.1). La validación de estas capacidades se puede llevar a cabo evaluando el comportamiento del propio sistema, de forma que se justifique la validez de cada una de las características citadas en la parte inicial de la hipótesis:

- Un *middleware de comunicaciones para entornos vehiculares* posibilita la conectividad entre las aplicaciones embarcadas en los vehículos y aquellas ubicadas en los centros de control (o sistemas de tierra), abstrayendo a éstas de la problemática que supone manejar todo el proceso de establecimiento y gestión de las conexiones inalámbricas en un entorno dinámico y cambiante como es el vehicular.
- El concepto de *calidad del servicio* hace referencia en general a la capacidad de un elemento de red (aplicación, servidor, conmutador) de asegurar que su tráfico y los

requisitos de los servicios previamente establecidos puedan ser satisfechos. En este sentido, el cumplimiento de la QoS para una aplicación puede controlarse a través del empleo de mecanismos que permiten la priorización de tráfico y garantías de ancho de banda mínimos requeridos. En este punto, la disponibilidad de ancho de banda en la red es un factor que adquiere especial importancia.

- La *selección del enlace más favorable* consiste en seleccionar el mejor enlace de red disponible para llevar a cabo las comunicaciones en un entorno *multienlace*. Se trata de maximizar la continuidad de la conectividad combinando el acceso a diferentes proveedores de servicio, de forma que se maximice el ancho de banda disponible para las comunicaciones. Para ello, el sistema realiza una *monitorización del estado de las redes* que consiste en tener conocimiento continuo sobre el estado de las redes de acceso inalámbricas que están disponibles.
- *Priorización dinámica y adaptativa* de las peticiones de comunicación de las aplicaciones. El carácter dinámico del método de priorización aplicado viene dado por la capacidad del sistema de responder a las diferentes situaciones que se den y que puedan influir en las comunicaciones que las aplicaciones finales estén llevando a cabo (ya sea por cambios del estado de conectividad de la red, ancho de banda disponible, o las necesidades de comunicación que vayan teniendo las aplicaciones). Por tanto, el sistema es dinámico si es capaz de dar respuesta a este tipo de factores en el momento que se produzcan.

Por otro lado, el sistema es adaptativo, si además de dar respuesta dinámica a los factores que afecten a las comunicaciones activas, es capaz de adaptar su funcionamiento de acuerdo a estos factores (por ejemplo a través del ajuste de la tasa de transferencia de las comunicaciones).

En base a estas características, es necesario llevar a cabo una evaluación funcional del middleware para probar el cumplimiento de esta primera parte de la hipótesis. Esta experimentación será descrita en el apartado 5.2.

5.1.2 Validación de la segunda parte de la hipótesis

Por otro lado, la parte final de la hipótesis se centra en los beneficios o bondades que aporta el middleware, que concretamente son la *optimización del uso del ancho de banda disponible*, y el correspondiente *aumento de la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza más prioritaria*. Para validar esta parte de la hipótesis se plantean una serie de pruebas experimentales que permitan comparar los resultados de uso de este sistema con respecto a otros sistemas existentes.

Las pruebas en este caso se centrarán primero en cuestiones relacionadas con la priorización y control de ancho de banda de las comunicaciones, de forma que permita valorar si el middleware optimiza realmente el uso del ancho de banda disponible respondiendo a su vez a los requisitos mínimos de ancho de banda de las comunicaciones para responder a sus necesidades de QoS; y segundo, en cuestiones relacionadas con el tratamiento dado a aquellas comunicaciones más críticas, que debieran recibir un trato más prioritario por parte del sistema, lo que permite un aumento de la tasa de transferencia media de las comunicaciones más prioritarias. Estas pruebas se describen en el apartado 5.3.

5.2 Experimentación funcional

En este apartado se describen los resultados de un conjunto de pruebas funcionales que permitirán la validación de la hipótesis en cuanto al cumplimiento de requisitos generales y características funcionales del middleware.

Para llevar a cabo esta experimentación, se ha definido un escenario de prueba. Se trata de definir un escenario preconfigurado donde se establecerá previamente qué comunicaciones se realizarán a lo largo de la prueba, y cuáles serán las condiciones de red a las que tendrá que enfrentarse el middleware. Así, el escenario de prueba incluye una serie de aplicaciones finales que generan diferente tipo de tráfico (multimedia, binarios, texto, etc.) que son habituales en los sistemas de transporte, así como condiciones de red predefinidas.

Por lo tanto, el objetivo es evaluar el comportamiento del sistema lanzando una serie de peticiones de comunicación desde diferentes aplicaciones finales con diferentes requisitos de comunicación y QoS, causando a su vez cambios en el estado de los enlaces de red disponibles para llevar a cabo las comunicaciones, de forma que sea posible evaluar si el comportamiento del middleware es el esperado o no.

5.2.1 Escenario de prueba

El banco de pruebas está compuesto por un ordenador portátil representando el sistema vehicular, y un PC que representa el sistema de tierra. En cuanto a la configuración de la red, se ha instalado un router inalámbrico que permite establecer conectividad entre ambos equipos, simulando la conectividad vehículo-tierra (**Figura 5.1**). Además, dado que el middleware desarrollado es multienlace, se ha dotado al equipo portátil que representa el sistema embarcado con dos enlaces de red. A través de una herramienta software que permite regular el ancho de banda, se puede configurar el valor ofrecido por cada uno de los enlaces a lo largo de la prueba.

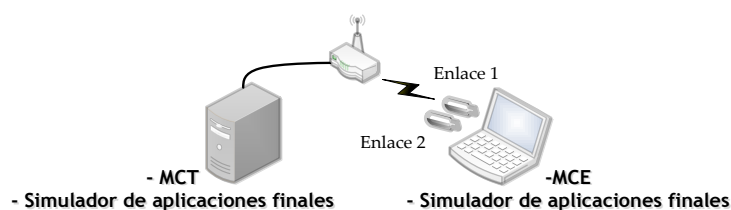


Figura 5.1: Despliegue de las pruebas funcionales

Una vez desplegado el escenario, el siguiente paso es configurar la planificación de la prueba, tanto en cuanto a valores de ancho de banda ofrecidos por los enlaces (herramienta de limitación de ancho de banda), como las peticiones de comunicación generadas por las aplicaciones (simulador de aplicaciones).

5.2.1.1 Configuración de ancho de banda

En una situación real, el vehículo se mueve de un área de cobertura a otra, percibiendo cambios en las condiciones de conectividad y los valores de ancho de banda de las redes de acceso. Así, con la intención de que el escenario de prueba refleje una situación real de conectividad, se han realizado mediciones de ancho de banda de dos enlaces 3G pertenecientes a diferentes compañías telefónicas (Orange y Movistar) a lo largo de una ruta. A la hora de seleccionar la ruta se tuvo en cuenta que fuera un trayecto en el que hubiera fluctuaciones de ancho de banda. La **Figura 5.2** muestra la ruta de la prueba, que tiene como punto de salida la Universidad de Deusto en Bilbao, y llega hasta la playa de Sopelana.

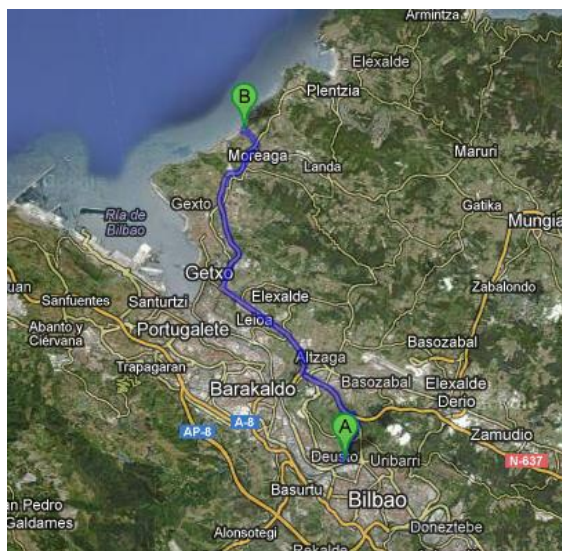


Figura 5.2. Ruta de la medición de valores de ancho de banda

Una vez medidos estos valores, el siguiente paso ha sido trasladarlos al escenario de prueba. Para ello se ha recurrido a una herramienta software externa (NetLimiter [NetLimiter12]) que permite limitar los valores de ancho de banda de diferentes tarjetas de red disponibles

en un equipo. Esta herramienta permite además planificar los valores de ancho de banda de los enlaces a lo largo del tiempo, minuto a minuto. Por tanto, una vez hechas las mediciones de ancho de banda, se han estimado los valores medios de cada enlace por minuto, de forma que esos valores puedan ser aplicados para simular un escenario lo más próximo a la realidad dentro del escenario de prueba definido para la experimentación. De esta manera, la **Figura 5.3** muestra los valores de ancho de banda otorgados a los dos enlaces de red a lo largo de nueve minutos de prueba.

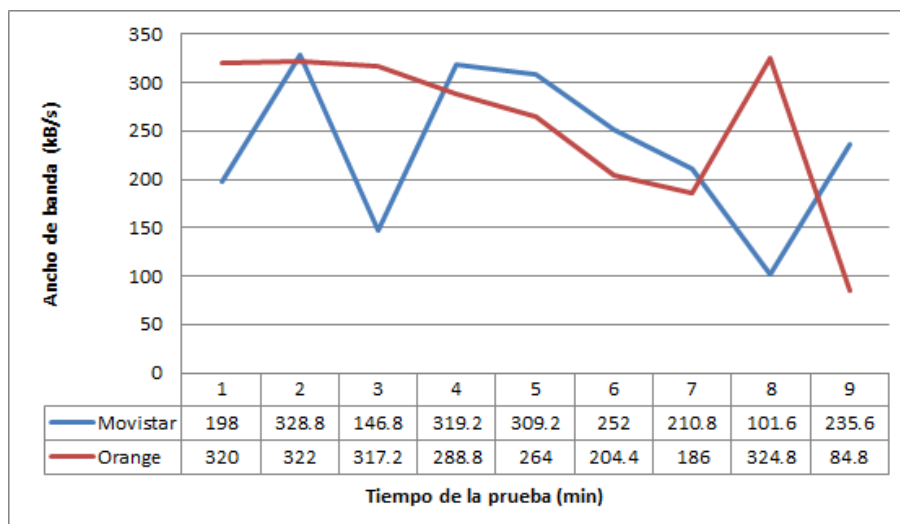


Figura 5.3: Valores de ancho de banda aplicados en la experimentación funcional

5.2.1.2 Configuración del conjunto de aplicaciones de prueba

La selección del conjunto y tipo de aplicaciones para llevar a cabo la experimentación ha sido realizada en base al conocimiento adquirido gracias a la participación en proyectos, colaborando con diferentes operadoras ferroviarias y proveedores de tecnología en el sector [Perallos+12, Salaberria+12a]. Por tanto, este middleware se ha evaluado simulando el tráfico que generan las aplicaciones que requieren comunicaciones vehículo-tierra y que habitualmente se despliegan en este tipo de entornos.

La **Tabla 5.1** muestra las aplicaciones seleccionadas para llevar a cabo la experimentación. En ella, se indican cuatro tipos de servicios, sus requisitos de ancho de banda (parámetro de QoS) y el nivel de prioridad de la información transmitida.

Para poder llevar a cabo los experimentos, se ha desarrollado un simulador de aplicaciones que simula el tráfico generado por las aplicaciones. Esta herramienta permite planificar el tipo de peticiones que se generarán a lo largo del tiempo, indicando la prioridad de las mismas, el ancho de banda mínimo requerido, y el momento de su lanzamiento.

	PRIORIDAD	ANCHO DE BANDA MÍNIMO	MINUTO DE LANZAMIENTO
Posicionamiento	Crítica	1 kB/s	Cada 10 segundos durante toda la prueba
CCTV tiempo real	Alta	150 kB/s	Minuto 1
CCTV en diferido	Normal	100 kB/s	Minuto 1
Descarga log aplicaciones	Baja	40 kB/s	Minuto 2

Tabla 5.1: Características de las aplicaciones finales de la experimentación funcional

Así, la experimentación comienza con el lanzamiento de peticiones de comunicación de las aplicaciones CCTV en tiempo real (prioridad alta), y CCTV en diferido (prioridad normal). Las peticiones de comunicación correspondientes al servicio de posicionamiento (prioridad crítica) se generan de forma periódica (cada 10 segundos), de forma similar a una situación real. Además, durante la prueba, en el segundo minuto se ha planificado el lanzamiento de una petición de comunicación correspondiente a la descarga de log de aplicaciones (prioridad baja). Por tanto, el experimento se basará en la generación de cuatro tipos de tráfico con diferentes niveles de criticidad, y diferentes necesidades de ancho de banda para cumplir con sus requisitos de QoS, centrados en este caso en el parámetro de ancho de banda.

5.2.2 Experimento y resultados

Una vez programados los valores de ancho de banda y las peticiones de comunicación de las aplicaciones, se han ejecutado las pruebas. A continuación se describen los resultados obtenidos de dichas pruebas, así como su aportación en la validación de la hipótesis.

5.2.2.1 Ancho de banda enlace activo

Como se indicó en el capítulo 4, el middleware de comunicaciones de esta tesis se compone de dos elementos software: el Máster de Comunicaciones de Tierra (MCT) y el Máster de Comunicaciones Embarcado (MCE); así como un Servicio de Medición de Ancho de Banda (SMAB).

El MCE, haciendo uso del SMAB, tiene conocimiento continuo del estado de conectividad de los diferentes enlaces de red que se encuentran disponibles en el vehículo, y de la disponibilidad de ancho de banda que ofrece cada uno de ellos para llevar a cabo las comunicaciones. De acuerdo a esa información, el MCE selecciona en cada momento el enlace que sea más favorable para llevar a cabo las comunicaciones, conmutando de un

enlace a otro. De esta manera, el MCE notifica al MCT cuál es el enlace activo, así como el ancho de banda disponible para llevar a cabo la planificación y gestión de las comunicaciones activas.

La **Figura 5.4** ilustra el ancho de banda del enlace activo notificado por el MCE al MCT a lo largo de la prueba. Además, con el propósito de representar los cambios de enlace que se han producido, la gráfica diferencia los valores de ancho de banda de los dos enlaces, representando los valores correspondientes al enlace de Orange en rojo, y los de Movistar en azul. Así, observando este gráfico, se puede comprobar cómo a lo largo de la prueba se han producido cinco cambios de enlace.

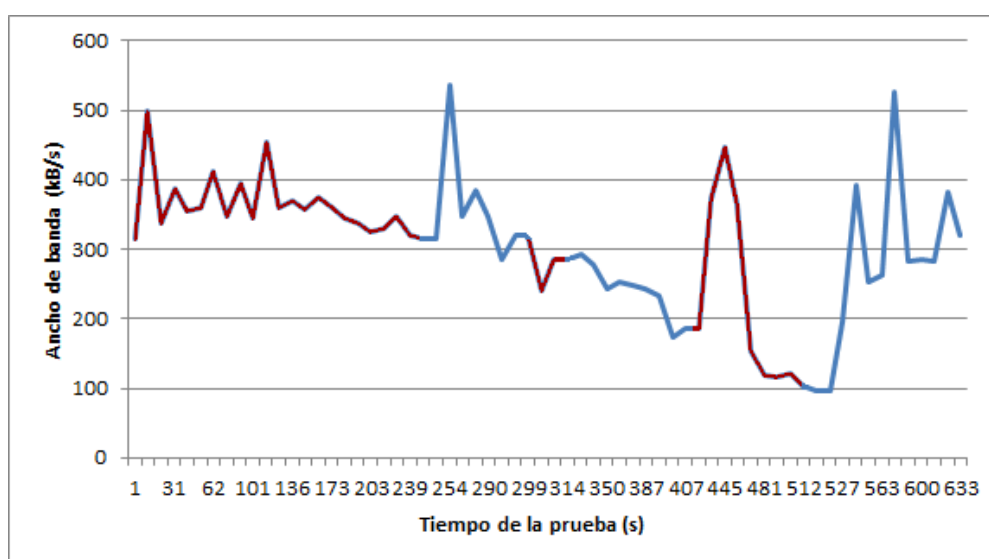


Figura 5.4: Valores de ancho de banda del enlace activo a lo largo de la experimentación funcional

Por tanto, en base a estos valores de ancho de banda, el middleware gestiona y planifica las peticiones de comunicación realizadas desde las aplicaciones finales. Si el ancho de banda demandado por las peticiones de comunicación de las aplicaciones es mayor que el ancho de banda ofrecido por el enlace activo, el middleware selecciona las peticiones más prioritarias que se puedan llevar a cabo simultáneamente en cada momento, pausando aquellas que son menos prioritarias hasta que las condiciones cambien y puedan ser atendidas.

5.2.2.2 Gestión de las comunicaciones

A lo largo de esta sección, se irán describiendo diferentes situaciones que se han dado en la planificación y priorización de las comunicaciones a lo largo del experimento. Todas ellas permiten validar el correcto funcionamiento del middleware desde diferentes perspectivas. La experimentación funcional completa tiene una duración de nueve minutos. A la hora de representar los resultados, se mostrarán una serie de gráficos, en los que el eje horizontal

representará el segundo de prueba, y el eje vertical el ancho de banda en kilobytes por segundo.

La **Figura 5.5** muestra el ancho de banda consumido por cada aplicación a lo largo de toda la prueba, donde la prioridad alta corresponde al servicio de transmisión de CCTV en tiempo real, la prioridad normal corresponde a la aplicación de descarga de CCTV en diferido, y la baja a la descarga de log generados por las aplicaciones embarcadas en el vehículo. Si bien el escenario definido también incluye un servicio de posicionamiento, a la hora de representar los resultados será obviado, ya que consume muy poco ancho de banda (1kB/s cada 10 segundos) si lo comparamos con lo que consumen los otros tipos de servicio, y los valores de ancho de banda manejados, por lo que no resulta representativo en este caso. Sin embargo, cabe mencionar que estos mensajes de posicionamiento se han llevado a cabo de forma correcta a lo largo de la prueba, y dado que es un servicio de prioridad crítica, su transmisión ha sido priorizada a lo largo de toda la prueba.

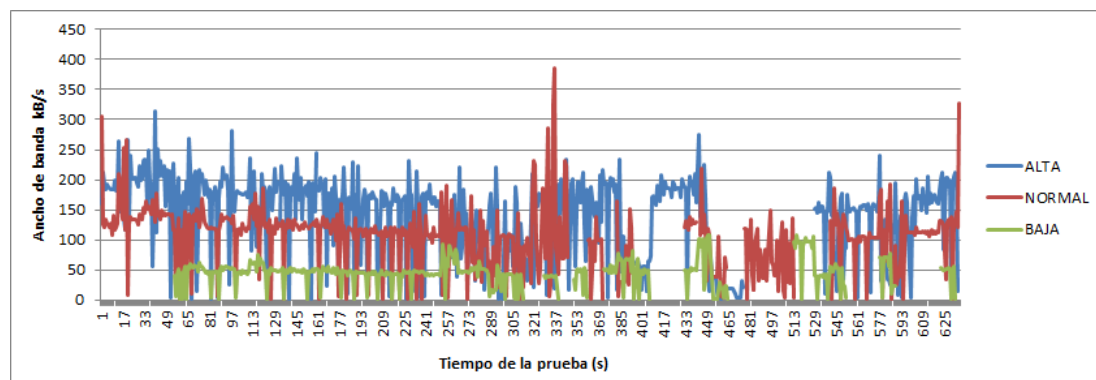


Figura 5.5: Ancho de banda consumido por las comunicaciones a lo largo de la prueba

La **Figura 5.6** muestra el intervalo de tiempo entre el segundo 44 y 67 de la prueba. A lo largo de este periodo el ancho de banda ofrecido por el enlace activo es superior a 350 kB/s, por lo que cuando se lanza la petición de comunicación correspondiente a la descarga de log (prioridad baja), el enlace activo tiene capacidad para seguir atendiendo las dos comunicaciones que ya estaban activas correspondientes a los servicios de CCTV en tiempo real y diferido (prioridades alta y normal), y dar paso también a la de descarga de log. Además, como el ancho de banda disponible es mayor que la suma del total requerido por los tres servicios, el middleware adapta la tasa de transferencia asignada a las comunicaciones, otorgándole a cada una de ellas más ancho de banda del mínimamente requerido, y en proporción a las necesidades de cada una de ellas. Por ejemplo, si observamos en la gráfica el ancho de banda consumido por la comunicación de prioridad baja, veremos que transmite a unos 50 kB/s cuando el ancho de banda mínimo requerido por este servicio ha sido de 40 kB/s.

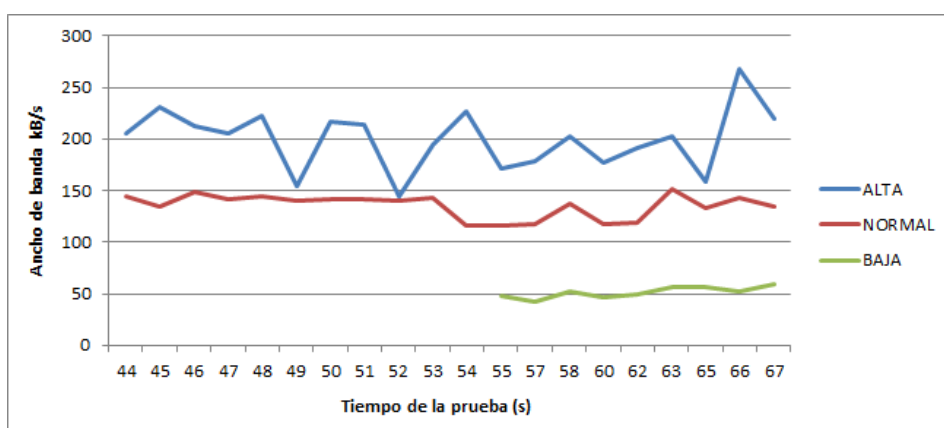


Figura 5.6: Inicio de la petición de prioridad baja

La **Figura 5.7** muestra el intervalo de tiempo entre el segundo 299 y 327 de prueba, donde se produce la situación de que el ancho de banda ofrecido por el enlace activo es menor que el ancho de banda demandado por las tres comunicaciones en curso. Si observamos la **Figura 5.4** después del segundo 311 en ancho de banda del enlace activo baja, obteniendo valores por debajo de 290 kB/s que es el ancho de banda mínimo requerido para poder atender las tres comunicaciones de forma simultánea. Dado que no hay ancho de banda suficiente para que las tres comunicaciones se atiendan con garantías de QoS, y la comunicación menos crítica es la de descarga de log (prioridad baja), el middleware pausa esa comunicación dando prioridad a las otras dos, y adaptando el ancho de banda de los mismos al ancho de banda disponible en proporción a lo demandado por cada uno de ellos.

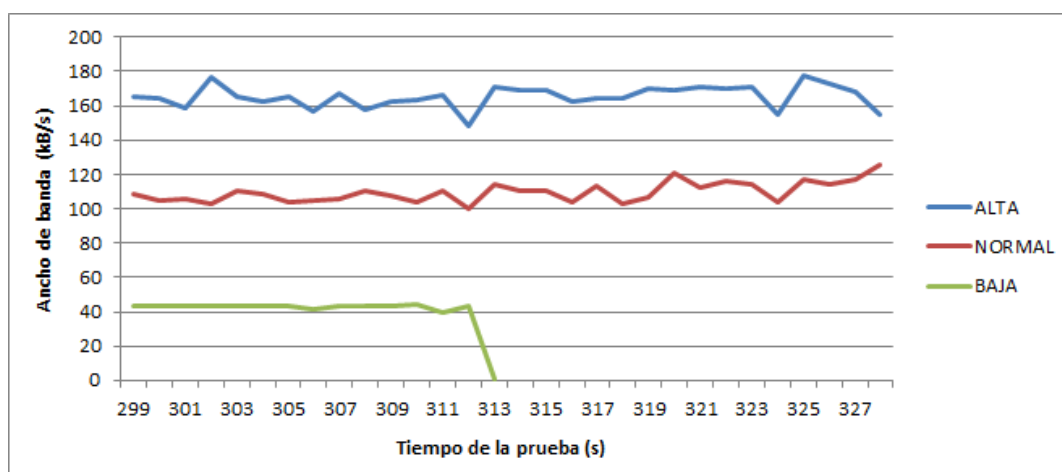


Figura 5.7: Pausa de la comunicación de prioridad baja por falta de ancho de banda

La gráfica de **Figura 5.8** muestra una situación representativa a la hora de ver cómo el middleware prioriza siempre la comunicación más crítica cuando los valores de ancho de banda así lo provocan. En el segundo 368 el ancho de banda toma valores de alrededor 250 kB/s, por lo que el middleware tiene pausada la petición menos crítica, la baja. Sin embargo, unos segundos más tarde, el ancho de banda disponible disminuye, por lo que ya no hay

suficiente para atender los requisitos mínimos de la petición alta y normal. Por ello, el middleware pausa una de las dos, la menos prioritaria, la normal (descarga de CCTV en diferido). No obstante, la capacidad de ancho de banda si cubre las necesidades de comunicación de la petición más prioritaria (la alta), y la petición baja de forma simultánea. Así, a lo largo de este intervalo de tiempo, hay fluctuaciones de ancho de banda que hacen que el middleware priorice de forma dinámica las comunicaciones, adaptando la tasa de transferencia de éstas en base al ancho de banda disponible, y sus requisitos de QoS.

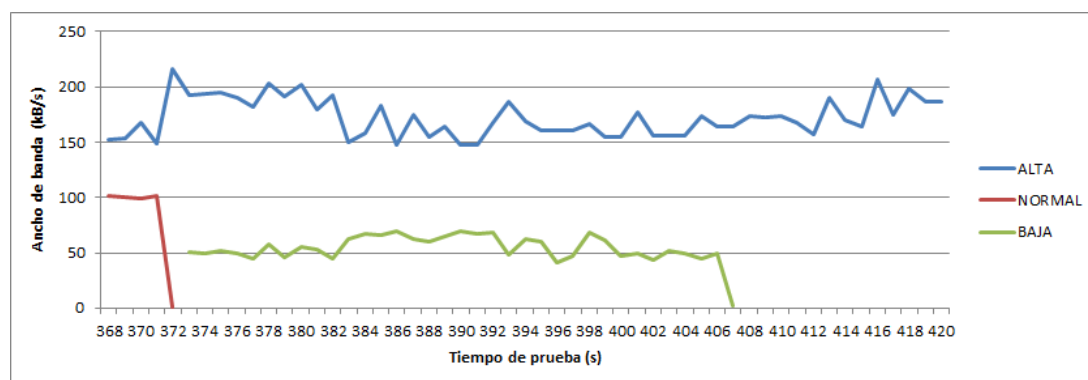


Figura 5.8: Priorización de la petición alta

Para finalizar, la **Figura 5.9** representa una situación en la que la disponibilidad de ancho de banda sube de 180 kB/s a 370 kB/s. Así, el middleware en este caso pasa de priorizar la petición de prioridad alta, a dar paso a las tres comunicaciones activas.

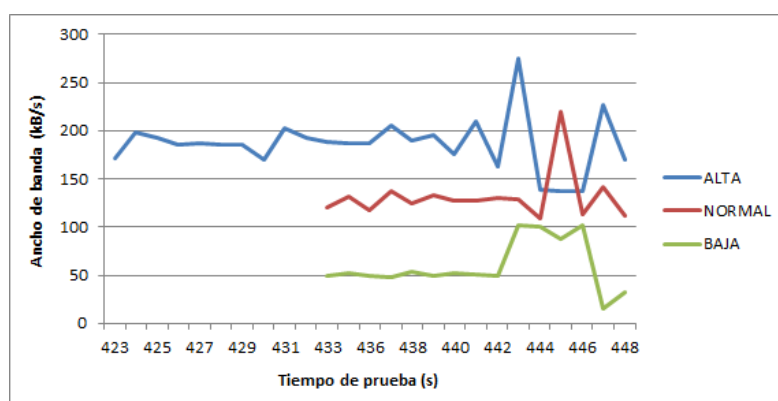


Figura 5.9: Subida de ancho de banda que permite atender todas las comunicaciones

5.2.2.3 Selección de enlace activo

Una de las características principales de este middleware es que a través de la monitorización continua del estado de la red y mediciones de ancho de banda real por cada uno de los enlaces disponibles, permite establecer como activo el enlace más favorable, sin que dichos cambios se perciban desde las aplicaciones que se encuentren comunicando

(cambios de enlace transparente). En este apartado se pretende demostrar que efectivamente este middleware actúa de esta manera.

En lo que a la selección del enlace más favorable se refiere, teniendo en cuenta los valores de ancho de banda definidos para los enlaces en el escenario de prueba (ver **Figura 5.3**), a lo largo de la prueba se debieran producir tres cambios de enlace, en los minutos 4, 8 y 9. En la **Figura 5.4** se pueden identificar cinco cambios de enlace. Tres de ellos se producen en los momentos esperados (con el cumplimiento de los minutos 4, 8 y 9 de la prueba), demostrando que efectivamente el sistema responde a los cambios de ancho de banda de los diferentes enlaces, seleccionando siempre el más favorable. Sin embargo, a lo largo del minuto 5 se produce un cambio de enlace que no debería producirse si tenemos en cuenta la definición del escenario de la experimentación funcional. No obstante, como el ancho de banda del enlace activo se calcula de forma pasiva, de manera estimada según el tráfico generado por las aplicaciones, los valores obtenidos no dejan de ser una aproximación. Por tanto, en situaciones en las que los enlaces tengan valores de ancho de banda parejos, se pueden producir cambios de enlace. En el caso de la prueba, a lo largo del minuto 5, el middleware produce un cambio de enlace, y al de pocos segundos vuelve a cambiar el enlace al que estaba, a modo de rectificación.

En este punto, cabe mencionar que en el sistema puede configurarse la diferencia de ancho de banda que tiene que haber entre el enlace activo y el alternativo, para que se produzca un cambio de enlace. De esta manera se evita que se produzcan cambios de enlace de forma continua cuando los valores de ancho de banda de los diferentes enlaces son muy parejos.

En lo que al cambio de enlace transparente se refiere, si revisamos la **Figura 5.4**, podemos observar que en el segundo 239 de la prueba se produce un cambio de enlace activo. La **Figura 5.10** muestra la tasa de transferencia de cada una de las comunicaciones en el periodo de tiempo en que dicho cambio se produce. Como se puede observar, las aplicaciones han seguido transmitiendo normalmente, sin que se hayan producido interrupciones en la comunicación.

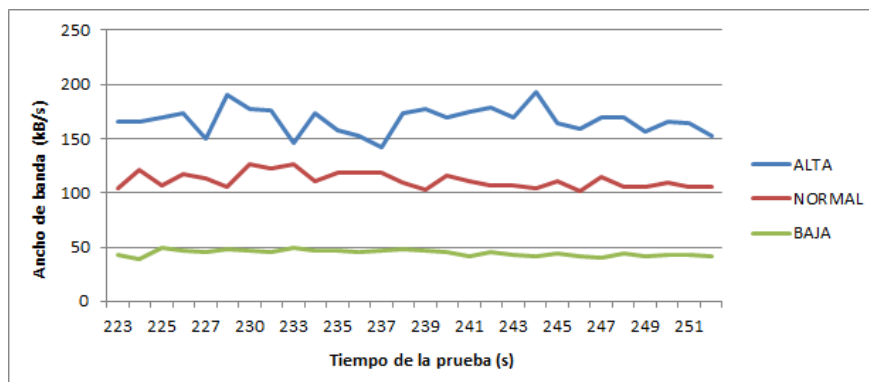


Figura 5.10: Cambio de enlace transparente

5.2.3 Análisis de los resultados

Los resultados de las pruebas descritas a lo largo de esta sección 5.2 permiten validar el cumplimiento de los requisitos funcionales del middleware fruto de este trabajo de tesis. Tomando como referencia la estrategia de validación de la hipótesis definida en el apartado 5.1, a través de estos resultados, es posible comprobar el cumplimiento de los objetivos y las características citadas en la primera parte de la hipótesis:

- **Consideración de criterios de QoS de las aplicaciones**

En el apartado 5.2.2.2 se detallan una serie de situaciones que se han dado a lo largo de este experimento en la gestión y priorización de las comunicaciones a través del middleware, donde el parámetro principal a la hora de llevar a cabo esta priorización es el ancho de banda, que es el requerimiento principal de calidad de servicio considerado en esta tesis.

Por tanto, este middleware lleva a cabo *reservas de ancho de banda* para las diferentes comunicaciones que se estén en curso, siempre respetando las necesidades de ancho de banda demandadas por las aplicaciones a la hora de comunicarse. De esta manera, queda demostrado que este middleware da paso a las comunicaciones dando garantías de cumplimiento del ancho de banda mínimo requerido por las mismas, garantizando que siempre transmitan respetando sus requisitos mínimos de QoS, posponiendo su ejecución en caso contrario, hasta que dichos requisitos puedan ser cubiertos.

- **Selección del enlace más favorable en cada momento**

Se puede afirmar que el middleware realiza una *monitorización del estado de las redes* (ver apartado 5.2.2.1), ya que tiene conocimiento continuo sobre qué enlaces ofrecen conectividad con el sistema de tierra en cada momento (en base a la cobertura). Además, este middleware implementa un servicio adicional que permite calcular y estimar en todo momento los valores de ancho de banda real disponible en cada uno de los enlaces.

A lo largo del apartado 5.2.2.3 se ha demostrado que este middleware está capacitado para funcionar en un entorno *multienlace*, de forma que a través de la monitorización del estado de conectividad de las diferentes redes de acceso, y el *cálculo de la disponibilidad de ancho de banda* por cada una de ellas, selecciona en cada momento aquél que mejores prestaciones ofrezca. Además, también se ha demostrado que la conmutación de un enlace a otro se realiza de forma transparente para las aplicaciones que se encuentra comunicando, que no perciben cortes en la comunicación.

Por tanto, queda validado que el middleware selecciona en cada momento el enlace más favorable de acuerdo a criterios de ancho de banda.

- **Priorización dinámica y adaptativa de las peticiones de comunicación**

El contenido del apartado 5.2.2.2 pretende describir la forma en la que el sistema funciona a la hora de priorizar las comunicaciones. Así, a través de los resultados obtenidos en las pruebas, se demuestra que el sistema responde de forma dinámica y adaptativa a los cambios circunstanciales que se dan en el sistema, ya sea por la entrada de nuevas peticiones de comunicación desde las aplicaciones finales, o bien por cambios en el estado de los enlaces de red que influyen en el ancho de banda disponible para llevar a cabo las comunicaciones.

Estas pruebas han permitido validar también esta característica del sistema contemplada en la hipótesis.

Por tanto, a través de estas pruebas funcionales podemos dar por validados los requisitos contemplados en la primera parte de la hipótesis. A continuación se añade la **Tabla 5.2** que permite ver claramente la relación entre los objetivos de la tesis, las capacidades indicadas en la hipótesis, y las evidencias que han servido para validar cada una de estas capacidades.

OBJETIVO	HIPÓTESIS	EVIDENCIA	
Middleware de comunicaciones vehículo-tierra	Middleware de comunicaciones para entornos vehiculares	Diseño del sistema (ver apartado 4.1.4)	✓
Respuesta a las necesidades de QoS demandadas por las aplicaciones	Consideración de criterios de QoS de las aplicaciones	Apartado 5.2.2.2	✓
Priorización dinámica de las comunicaciones	Priorización dinámica y adaptativa de las peticiones de comunicación	Apartado 5.2.2.2	✓
Selección transparente del mejor enlace para las comunicaciones	Selección del enlace más favorable en cada momento	Apartado 5.2.2.1 Apartado 5.2.2.3	✓

Tabla 5.2: Validación de la primera parte de la hipótesis

5.3 Experimentación comparativa

En este apartado se describirán una serie de pruebas experimentales realizadas comparando diferentes sistemas de comunicación vehicular que se están aplicando en la industria del transporte para posibilitar las comunicaciones vehículo-tierra. Así, a través de los resultados obtenidos en las citadas pruebas se pretende demostrar las bondades y beneficios aportados por el middleware, que quedan además recogidas en la hipótesis de trabajo planteada en esta tesis.

5.3.1 Sistemas de comunicación incluidos en el experimento

Para realizar esta experimentación se han seleccionado dos de las soluciones incluidas en el capítulo 2 de esta memoria, correspondiente al estado de la técnica:

- **Sistema para la priorización de comunicaciones ininterrumpidas multienlace (ver el apartado 2.2.3.2)**

Se trata de una solución basada en software libre de uso extendido que establece una serie de mecanismos que permiten la priorización de tráfico y control de la QoS. Así, su aplicación en las pruebas permitirá desarrollar una comparativa frente al middleware planteado en esta tesis respecto a los dos aspectos citados.

- **Proyecto de conectividad inalámbrica de EuskoTren (ver el apartado 2.3.3)**

La selección de este segundo sistema viene dada por ser una solución industrial implantada que, del mismo modo que el middleware de la tesis, implementa un sistema de conectividad a nivel de capa de aplicación y que permite el establecimiento de comunicaciones vehículo-tierra. Este sistema no establece ningún mecanismo de control de calidad de servicio de las aplicaciones, sin embargo, su aplicación en las pruebas servirá para comparar la solución que se presenta en esta tesis con otra que actualmente se encuentra implantada en una compañía ferroviaria.

A continuación se incluirá una breve descripción de las dos soluciones, haciendo hincapié en sus aspectos en común con el middleware planteado, y algunas de sus limitaciones.

5.3.1.1 Sistema de priorización de comunicaciones ininterrumpidas multienlace

Se trata de una solución enfocada a mejorar la QoS de comunicaciones a través de la diferenciación de tráfico, con el propósito de establecer un mecanismo de comunicaciones vehículo-tierra independiente del protocolo empleado a nivel de enlace. Este sistema está basado en una distribución de GNU/Linux, utilizando herramientas de software libre diseñadas para esta plataforma y combinándolas con el fin de obtener un sistema cuyo enfoque es similar a un router, permitiendo que las posibles alteraciones de enrutamiento de

paquetes, así como el enlace por el que se esté transmitiendo en cada momento sea transparente para las aplicaciones instaladas en el sistema embarcado de un vehículo.

Todas estas utilidades que componen esta solución han sido desarrolladas y se mantienen por una amplia comunidad de usuarios, lo cual asegura que se trata de un software con una baja tasa de errores. Por tanto, el mecanismo de priorización y QoS para gestionar el ancho de banda asignado a las aplicaciones que se emplea en esta solución constituye una alternativa contrastada.

En cuanto a la gestión de enlaces de red se refiere, en este caso se realizan a nivel de sistema operativo, tal como se hace en un entorno de escritorio Linux. Las herramientas ofrecidas por Linux están diseñadas para cambiar de enlace bien cuando se pierde conectividad del enlace activo, o bien ejecutando un comando propio del sistema operativo que permite hacer el cambio al enlace que se indique. Además, el sistema operativo realiza una priorización de enlaces de comunicación de forma predefinida (por tipo) por lo que si se desconecta el más prioritario se intentará establecer conexión a través del segundo más prioritario, y así sucesivamente.

A través de esta solución no se establece a priori ningún mecanismo de monitorización y gestión de enlace que permita que las comunicaciones se realicen siempre por el enlace disponible que mejores prestaciones ofrezca. Sin embargo, constituye una alternativa en lo que a priorización y control de calidad de servicio se refiere, que es el aspecto en el que nos centraremos en este caso. De este modo, la presencia de esta solución en la experimentación permite comparar el comportamiento de una solución orientada a nivel de red con el de la solución generada en este trabajo de tesis.

5.3.1.1 Proyecto de conectividad inalámbrica de EuskoTren

Este trabajo es fruto de la inversión de la compañía ferroviaria EuskoTren en proyectos de innovación. Se trata de una plataforma de comunicaciones que está siendo actualmente desplegada y testada dentro de la infraestructura de la compañía, coincidiendo con la llegada de la nueva serie 900 de trenes puestos en servicio en julio de 2012, que son el resultado del desarrollo tecnológico e innovador que EuskoTren inició en agosto de 2009.

Los nuevos trenes están preparados para realizar, básicamente, tres acciones fundamentales para la operación centralizada: (1) almacenamiento de datos, (2) envío de datos en tiempo real, y (3) carga y descarga vía WiFi de los contenidos cuando lleguen a estaciones término, cocheras y talleres. Esto último va a permitir una mejora importante en la explotación ferroviaria, a través de la descarga de todos los contenidos (por ejemplo, los generados por el CCTV).

A través del proyecto de conectividad de EuskoTren se habilita un canal de comunicaciones inalámbrico de propósito general entre el tren y el centro de control en tierra, dando respuesta a las necesidades de comunicación de información entre las aplicaciones finales de alguno de los dos extremos, diferenciando dos tipos de comunicaciones: (1) comunicaciones ligeras, y (2) comunicaciones pesadas (ver apartado 2.3.3.1).

Las *comunicaciones ligeras* establecen una conectividad tren-tierra *continua* haciendo uso de comunicaciones móviles. De esta manera, el vehículo en este caso está dotado de dos enlaces de comunicación correspondientes a dos proveedores de servicios móviles diferentes, estableciendo uno de ellos como primario, y el otro como secundario (configuración estática), de forma que cuando no haya conectividad por el primario (por falta de cobertura, etc.) el secundario sirva como respaldo. Esto es debido a que las diferentes compañías de telecomunicaciones generan sus propios mapas de cobertura, por lo que de esta manera se cubre un área de cobertura mayor que aplicando un solo enlace correspondiente a un único proveedor de servicio.

En este punto, cabe mencionar algunas características de este tipo de comunicaciones que es importante tener en consideración por su influencia en los resultados de los experimentos:

- Han sido diseñadas para transmitir pequeños volúmenes de información, que pueden corresponderse a alarmas, posicionamiento del vehículo, mensajes para el maquinista, etc.
- Se llevan a cabo mediante la definición de un protocolo que define una serie de mensajes XML intercambiados a través de HTTP. De esta manera, el contenido transmitido e intercambiado entre las aplicaciones finales se encapsula y codifica dentro del propio mensaje XML.
- De acuerdo a los criterios tenidos en cuenta a la hora de diseñar este tipo de comunicaciones y su aplicación, las comunicaciones ligeras no establecen ningún tipo de mecanismo de priorización.

Por su parte, las *comunicaciones pesadas* están diseñadas para que se lleven a cabo en zonas WiFi habilitadas en diferentes puntos de la infraestructura de transporte (estaciones, cocheras, etc.). Este tipo de comunicaciones sí establece un mecanismo de priorización, cuyo cometido es arbitrar las comunicaciones que se realicen dentro del área de cobertura de un mismo punto de acceso, de forma que no haya aplicaciones que monopolicen el ancho de banda, y que se garantice que las comunicaciones que tengan más criticidad se lleven a cabo primero. Sin embargo, a través de las comunicaciones pesadas, no se hace ningún tipo de gestión de las comunicaciones entre las aplicaciones, y por consiguiente no se aplica ningún mecanismo de garantía de la calidad de servicio. Lo único que garantiza es que las comunicaciones se lleven a cabo de acuerdo a un orden de prioridad.

Así, se considera importante resaltar algunas de las características del mecanismo de priorización y gestión de los intercambios de información de este tipo de comunicaciones:

- La priorización se lleva a cabo de manera secuencial. Es decir, primero se sirve la más prioritaria, y cuando termine, la siguiente más prioritaria, y así sucesivamente hasta servir todas las peticiones, y siempre que el vehículo se encuentre dentro del área de cobertura.
- No se hace ningún tipo de gestión de QoS. Es por ello que no está preparado para atender peticiones de forma concurrente, estableciendo una única comunicación activa dentro del área de cobertura de un mismo punto de acceso en cada momento.

Por lo tanto, este enfoque de priorización, en el caso de las comunicaciones pesadas, no atiende a las mismas necesidades que se plantean en el diseño del middleware de este trabajo doctoral. Centrando por consiguiente la comparativa en el modo de conectividad continua planteado a través de las comunicaciones ligeras.

5.3.1 Escenario de prueba

En este caso, el escenario de prueba planteado será común para los tres sistemas evaluados en esta fase de experimentación. Por ello, a la hora de configurar el banco de pruebas, se han de tener en cuenta los puntos en común de las diferentes soluciones para que el escenario sea aplicable en cada una de ellas, y asimismo, los resultados obtenidos sean comparables.

5.3.1.1 Capacidades objeto de la comparativa

A la hora de llevar a cabo esta experimentación, nos centraremos en aquellos aspectos que son comunes entre los sistemas que son objeto de comparativa. La **Tabla 5.3** muestra las capacidades que presentan los tres sistemas involucrados.

SISTEMA	CAPACIDADES
Tesis	<ul style="list-style-type: none"> - Solución a nivel de capa de aplicación - Multienlace - Comunicaciones continuas en movilidad - Monitorización del estado del canal - Cálculo de ancho de banda - Conmutación de enlaces transparente - Selección del mejor enlace para las comunicaciones - Priorización de peticiones de comunicación - Control dinámico de la QoS en base a la disponibilidad de ancho de banda

SISTEMA	CAPACIDADES
Linux	<ul style="list-style-type: none"> - Solución a nivel de red - Multienlace - Comunicaciones continuas en movilidad - Conmutación de enlaces transparente - Cambios de enlace basados en criterios estáticos y sólo por pérdida del enlace activo - Priorización a través de la diferenciación de tráfico - Control estático de la QoS en base al ancho de banda (fijo) establecido para el enlace
EuskoTren	<ul style="list-style-type: none"> - Solución a nivel de capa de aplicación - Dos modalidades de comunicación 1) <i>Comunicaciones ligeras</i> <ul style="list-style-type: none"> - Dos enlaces de telefonía móvil (primario y secundario) - Comunicaciones continuas en movilidad 2) <i>Comunicaciones pesadas</i> <ul style="list-style-type: none"> - Monoenlace - Comunicaciones no continuas (sólo puntos fijos de la infraestructura) - Priorización de peticiones secuencial

Tabla 5.3: Capacidades de los sistemas evaluados en la experimentación comparativa

En lo que a gestión del canal se refiere, si bien la solución de Linux permite una conmutación de enlaces transparente, al igual que nuestro middleware, este sistema no implementa mecanismos de monitorización del canal, de forma que los cambios de enlace a través de este sistema sólo se producen cuando el enlace establecido como el activo pierde la conectividad. En ese momento, el sistema operativo selecciona el siguiente enlace disponible en base a una serie de criterios estáticos. Es decir, tal como se ha indicado en el apartado 2.2.3.2, el sistema operativo realiza una priorización de enlaces de comunicación de forma predefinida (por tipo), por lo que si se desconecta el más prioritario se intentará establecer conexión a través del segundo más prioritario, y así sucesivamente.

Así, ni el sistema Linux ni el sistema de EuskoTren implementan mecanismos que permitan gestionar y monitorizar el estado de múltiples enlaces de red, permitiendo así llevar a cabo una selección dinámica del enlace a través del cual se llevarán a cabo las comunicaciones. Por esa razón, con el propósito de que la experimentación se lleve a cabo estableciendo una serie de condiciones que puedan permitir la comparación de estos sistemas en base a los aspectos que tienen en común, dado que el middleware de comunicaciones que aquí se presenta sí que realiza una monitorización y selección de enlaces dinámica, lo cual supone una ventaja sobre las otras dos soluciones, en este caso la experimentación se llevará a cabo a

través de un solo enlace. Además, se ha optado por desactivar la funcionalidad de gestión del canal (monitorización de los enlaces y cálculo de ancho de banda) del middleware y preestablecer el valor de ancho de banda disponible en cada momento. De este modo, la comparativa resultante de estas pruebas permitirá analizar los resultados generados a través de los diferentes sistemas aplicando exactamente los mismos valores de ancho de banda. Por tanto, para llevar a cabo estos experimentos, el servicio de medición de ancho de banda (SMAB) que implementa el middleware recurrirá a un fichero donde tendrá registrados los valores de ancho de banda correspondientes a cada minuto de prueba.

En lo que a priorización de comunicaciones y control de QoS se refiere, tanto el middleware resultante de esta tesis como el sistema de Linux centran su comportamiento en el ancho de banda ofrecido por el enlace, y el ancho de banda mínimo requerido por las aplicaciones para llevar a cabo esas comunicaciones con garantías de QoS. Sin embargo, aunque el sistema Linux realiza una gestión de QoS en base al ancho de banda establecido para el canal, no desarrolla mecanismos de cálculo de ancho de banda que permitan actualizar de forma dinámica este valor en base a la disponibilidad real. Así, dado que el propósito de este experimento es evaluar el comportamiento de esta técnica de priorización y gestión de QoS en un entorno de movilidad, donde el ancho de banda ofrecido por el enlace va fluctuando a lo largo del recorrido del vehículo, se ha recurrido a la definición de scripts a través de los cuales se permite actualizar este guarismo en base a los valores de ancho de banda definidos en el escenario de pruebas. De esta forma, el sistema se adaptará a las nuevas condiciones actuando sobre las comunicaciones que se encuentren activas.

En cuanto al sistema de EuskoTren, teniendo en cuenta la aplicabilidad y el propósito de los dos tipos de comunicaciones que define este sistema, la experimentación se llevará a cabo a través de las comunicaciones ligeras, ya que las comunicaciones pesadas están diseñadas para el intercambio de información vehículo-tierra en diferido, en zonas de la infraestructura de transporte habilitadas con puntos de acceso WiFi donde el vehículo suele estar estacionado un periodo de tiempo lo suficientemente largo como para poder hacer cargas y descargas de contenidos de información voluminosos. Por tanto, como el escenario que aquí se plantea hace referencia a un entorno de comunicaciones continuas en movilidad, en este caso las pruebas se realizarán a través de las comunicaciones ligeras que son las que ofrecen ubicuidad en las comunicaciones vehículo-tierra, independientemente de la localización del vehículo.

Por consiguiente, estos experimentos se focalizarán en evaluar el comportamiento de estos tres sistemas a la hora de gestionar las comunicaciones vehículo-tierra en base a un mismo escenario de prueba, siendo el objetivo final la validación de la segunda parte de la hipótesis que indica que el middleware de comunicaciones desarrollado *optimiza el uso del ancho de*

banda disponible en la red, aumentando así la tasa de transferencia media de las comunicaciones más prioritarias.

5.3.1.2 Despliegue físico de la prueba

En lo que al despliegue de la prueba se refiere, se mantiene la composición del banco de pruebas que se aplica en la experimentación funcional (ver **Figura 5.11**), donde un ordenador portátil hace las veces del sistema vehicular, y un PC representa al sistema de tierra. Del mismo modo, se mantiene el router inalámbrico que permite establecer conectividad entre ambos sistemas, simulando la conectividad vehículo-tierra. Sin embargo, dado que esta experimentación se basa en el establecimiento de un único enlace para las comunicaciones, en este caso el ordenador portátil que representa el sistema embarcado estará dotado de un solo enlace de red.

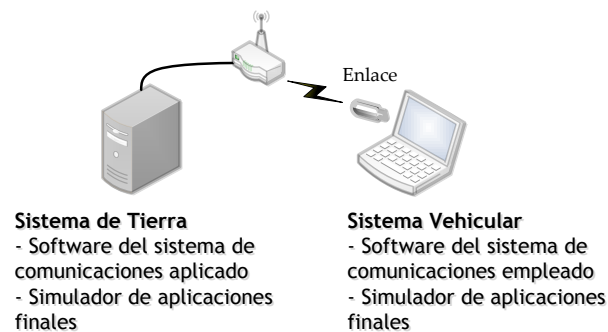


Figura 5.11: Despliegue de las pruebas comparativas

Así, la idea es desplegar cada uno de los sistemas de comunicaciones que formarán parte de la comparativa en este banco de pruebas, y evaluar cómo se comporta cada uno de ellos dentro de un mismo escenario.

5.3.1.3 Configuración de ancho de banda

Tal como se ha hecho en la experimentación funcional, en este caso también se han aplicado los valores de ancho de banda medidos a lo largo la ruta que muestra la **Figura 5.2.**, con la diferencia de que en este caso solamente se hará uso de uno de los enlaces, ya que como se ha dicho anteriormente, los sistemas alternativos que forman parte del experimento no realizan una gestión del canal que permita una selección del enlace más favorable para las comunicaciones en cada momento, tal como hace el middleware.

Por tanto, en este caso el escenario de prueba se ha configurado a partir de los valores de ancho de banda medidos a través del enlace 3G de Movistar. La **Figura 5.12** representa los valores de ancho de banda planificados para el enlace establecido en las pruebas para la comunicación vehículo-tierra a lo largo de los 17 minutos de prueba.

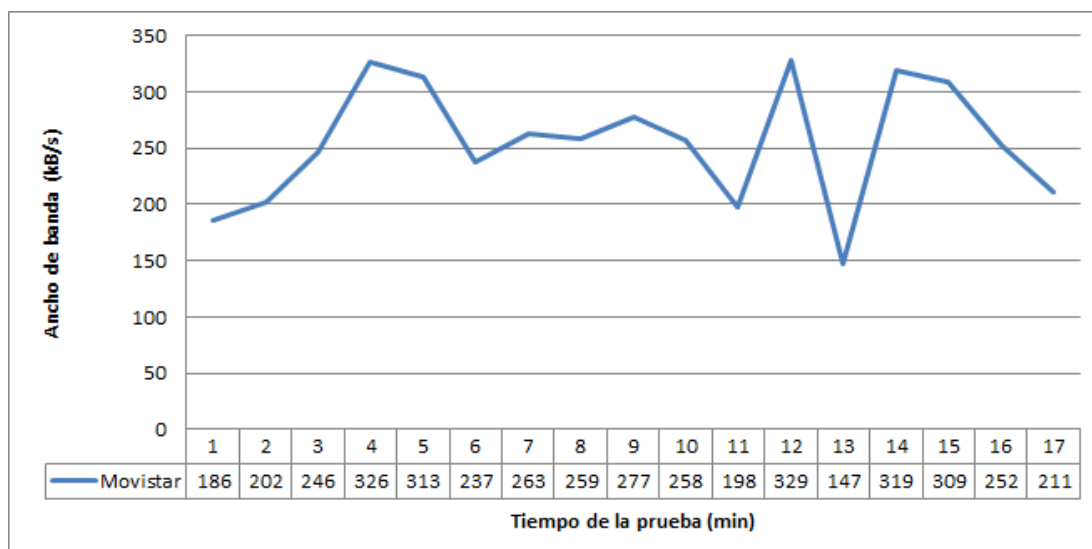


Figura 5.12: Valores de ancho de banda aplicados en la experimentación comparativa

5.3.1.4 Configuración del conjunto de aplicaciones de prueba

El conjunto de aplicaciones y la simulación de tráfico generado por las mismas será en este caso igual que en la experimentación funcional. A continuación se vuelve a incluir la tabla que relaciona los tipos de servicios involucrados en la prueba, sus requisitos de ancho de banda (parámetro de QoS), el nivel de prioridad de la información y la frecuencia de lanzamiento de las peticiones.

	PRIORIDAD	ANCHO DE BANDA MÍNIMO	MINUTO DE LANZAMIENTO
Posicionamiento	Crítica	1 kB/s	Cada 10 segundos durante toda la prueba
CCTV tiempo real	Alta	150 kB/s	Minuto 1
CCTV en diferido	Normal	100 kB/s	Minuto 1
Descarga log aplicaciones	Baja	40 kB/s	Minuto 2

Tabla 5.4: Características de las aplicaciones finales involucradas en la experimentación comparativa

Al igual que en las pruebas anteriores, a través del simulador de aplicaciones se planificarán las peticiones que se generarán a lo largo de las pruebas realizadas a cada sistema objeto de la comparativa, repitiendo el mismo escenario en los tres casos.

5.3.2 Experimento y resultados

A lo largo de este apartado se describirán los resultados de las pruebas con cada uno de los tres sistemas involucrados en esta experimentación. Cabe mencionar, que al igual que en la experimentación funcional, si bien las pruebas se han realizado con cuatro tipos de aplicaciones, en este caso también se obviará el tráfico generado por el servicio de posicionamiento por no ser representativo de cara a los resultados por el valor tan reducido de ancho de banda que consume respecto a los otros tipos de servicios, y su dificultad para percibirlo al representarlo en las gráficas.

5.3.2.1 Prueba del middleware

Comparando el escenario de pruebas de la experimentación funcional (ver apartado 5.2.1) con el escenario que se plantea en este caso, se ve que la diferencia está en que en este caso solamente se habilita un enlace para las comunicaciones, siendo el conjunto de aplicaciones y tráfico generado el mismo. Además, en este caso se ha optado por desactivar la funcionalidad correspondiente a la gestión del canal, de forma que la prueba para los tres sistemas se produzca en las condiciones más equitativas posibles.

A continuación se describen los resultados obtenidos con el middleware propuesto en este trabajo de tesis haciendo uso de un único enlace para las comunicaciones.

5.3.2.1.1 Ancho de banda del enlace activo

La **Figura 5.13** representa el ancho de banda del enlace activo (único en este caso) notificado por el MCE al MCT a lo largo de la prueba.

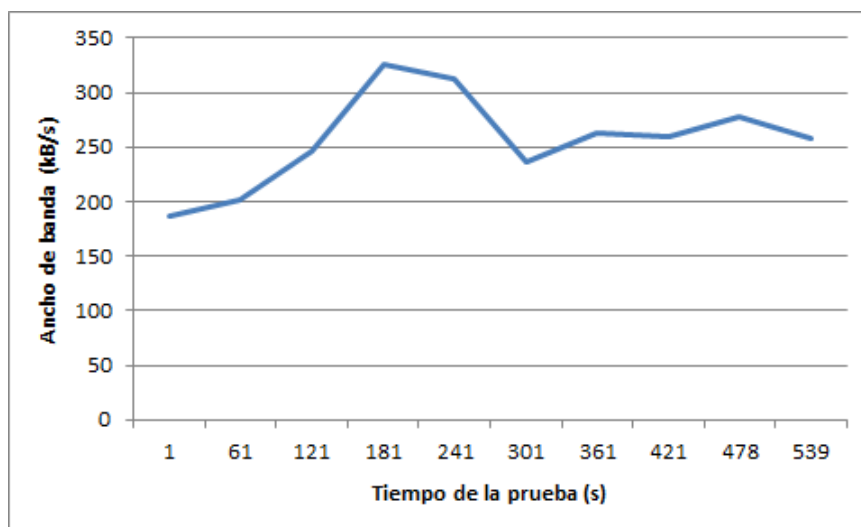


Figura 5.13: Ancho de banda del enlace activo por el middleware a lo largo de la experimentación comparativa

Como se ha indicado anteriormente, la funcionalidad de cálculo de ancho de banda ha sido desactivada a la hora de llevar a cabo esta experimentación, por lo que los valores de ancho de banda que representa el gráfico de la **Figura 5.13** son exactamente los definidos en el escenario de pruebas para los primeros 9 minutos (ver **Figura 5.12**).

5.3.2.1.2 Ancho de banda consumido por las aplicaciones

La **Figura 5.14** representa el ancho de banda consumido por las aplicaciones a lo largo de la prueba, en este caso aplicando un solo enlace. Si analizamos los valores de ancho de banda que conforman el escenario de pruebas, se puede observar que el middleware asigna el 100% del ancho de banda disponible entre las comunicaciones que están transmitiendo en cada momento, por lo que está diseñado para optimizar el uso del ancho de banda disponible en la red.

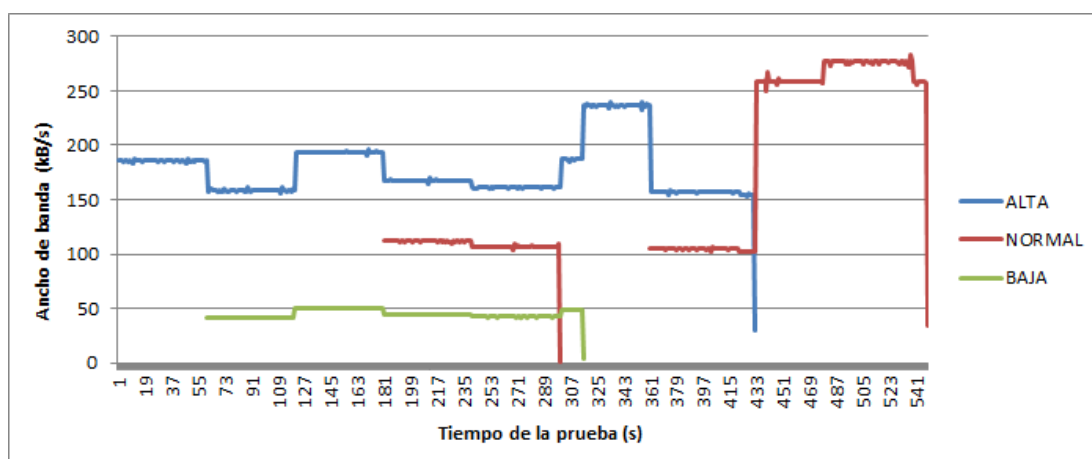


Figura 5.14: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (middleware)

5.3.2.1.1 Gestión de las comunicaciones

La forma en la que se comporta este sistema ha quedado validada y demostrada durante la experimentación anterior. Sin embargo, de cara a compararlo con los otros sistemas que se han seleccionado para llevar a cabo esta nueva experimentación, a continuación se describen diferentes circunstancias que se han dado a lo largo de esta prueba, bajo las condiciones que se han descrito previamente en el apartado 5.3.1.1, y que se consideran reseñables para la comparativa.

La **Figura 5.15** representa la situación que se produce al inicio de la prueba, entre el minuto uno y dos. Al inicio de la prueba, el ancho de banda del enlace se ha limitado a 186 kB/s. Si recordamos la secuencia de comunicaciones planificadas en el banco de pruebas (ver apartado 5.3.1.4), al inicio de la misma se lanzan la comunicación de prioridad alta y normal, mientras que la comunicación de prioridad baja se lanza un minuto más tarde. Sin embargo, prueba la limitación inicial es de 186 kB/s, por lo que como el ancho de banda requerido para

cubrir las necesidades de QoS de la petición alta (150 kB/s) y normal (100 kB/s) es de 250 kB/s, el sistema inicia la prueba priorizando la comunicación alta, y posponiendo la comunicación normal hasta que la disponibilidad de ancho de banda crezca.

En el segundo minuto de prueba, se lanza la comunicación correspondiente a la prioridad baja, que dada la disponibilidad de ancho de banda puede ser atendida, ya que la suma de los requisitos mínimos de la comunicación alta (150 kB/s) y baja (40 kB/s) asciende a 190 kB/s, que es menor que el ancho de banda disponible.

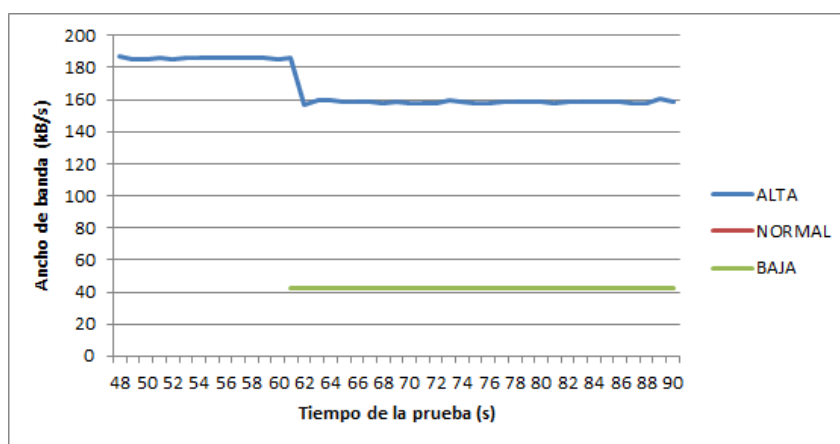


Figura 5.15: Inicio de la comunicación de prioridad baja (middleware)

La situación **Figura 5.16**, representa el comportamiento del sistema cuando se produce la subida de ancho de banda programada en la prueba del minuto tres al cuatro. Así, esa subida de ancho de banda, permite que además de atender la comunicación de prioridad alta y baja, se reanude la comunicación correspondiente a la prioridad normal.

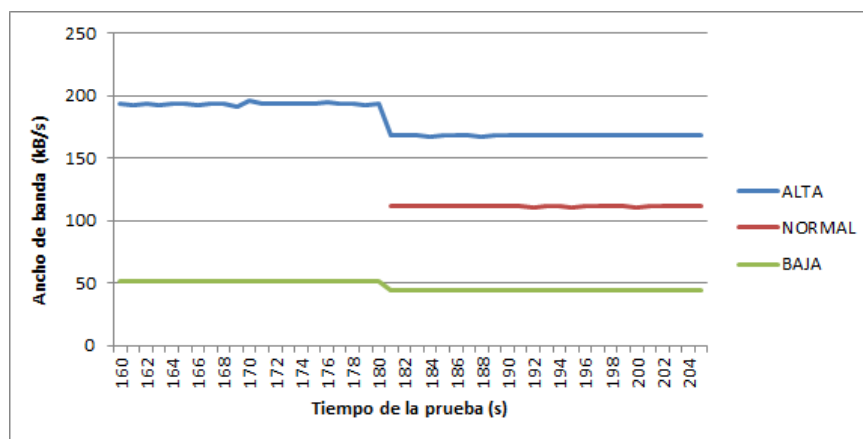


Figura 5.16: Priorización de la comunicación de prioridad normal (middleware)

Siguiendo adelante con la prueba, la **Figura 5.17** muestra la situación que se da entre el minuto cinco y seis de la prueba. En el minuto seis, el ancho de banda coge un valor de 237

kB/s. Esto significa que no hay ancho de banda suficiente para atender las tres peticiones que están en curso con garantías de QoS, por lo que el sistema pausa en este caso el normal, dado que siempre se le da prioridad a la más crítica (la alta en este caso), y la alta (150 kB/s) y la normal (100 kB/s) no pueden atenderse simultáneamente en este caso, dado que la suma de sus requisitos mínimos de ancho de banda exceden al ancho de banda disponible. Por ello, se pausa la petición de prioridad normal, pero la de prioridad baja (40 kB/s) puede seguir transmitiendo, ya que la suma de ancho de banda mínimo requerido por la petición alta y baja es de 190 kB/s, inferior al ancho de banda disponible. Además, en el segundo 316 aproximadamente, se completa la comunicación correspondiente a la petición baja.

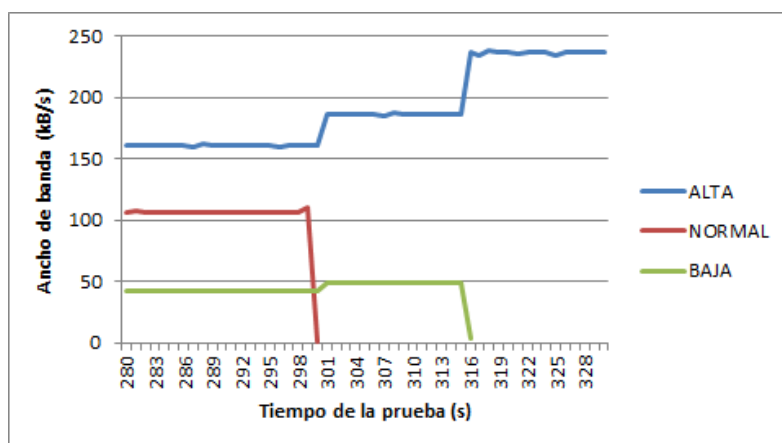


Figura 5.17: Pausa petición de prioridad normal, y comunicación de prioridad baja completada (middleware)

En el minuto siete de la prueba, el ancho de banda sube otra vez, en este caso a 263 kB/s, por lo que, tal como ilustra la **Figura 5.18**, el middleware vuelve a dar paso a la comunicación de prioridad normal.

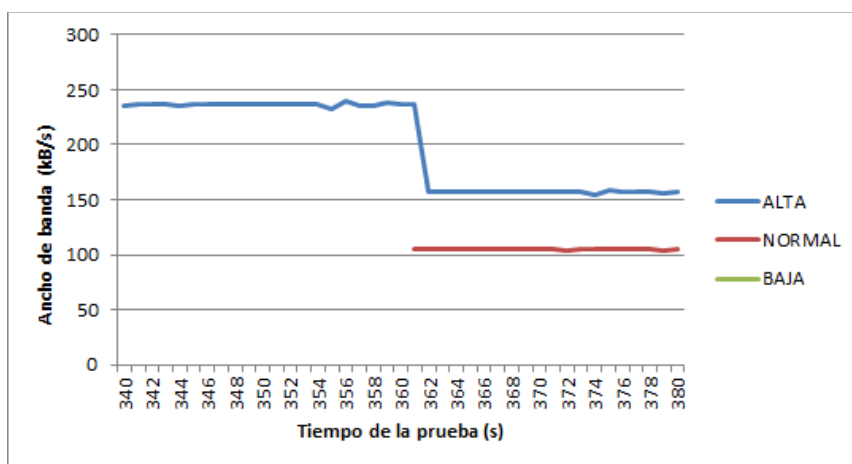


Figura 5.18: Inicio de la comunicación de prioridad normal por subida de ancho de banda (middleware)

Para finalizar, la **Figura 5.19** representa el momento en el que se completa la comunicación de prioridad alta, y cómo el middleware ajusta el ancho de banda asignado a la

comunicación normal en base al ancho de banda disponible, que es de 259 kB/s en el minuto ocho (desde el segundo 420 al 480), de 277 kB/s en el minuto nueve (del segundo 480 al 540), y de 258 kB/s al final de la prueba, donde ya se completa la comunicación de prioridad normal.

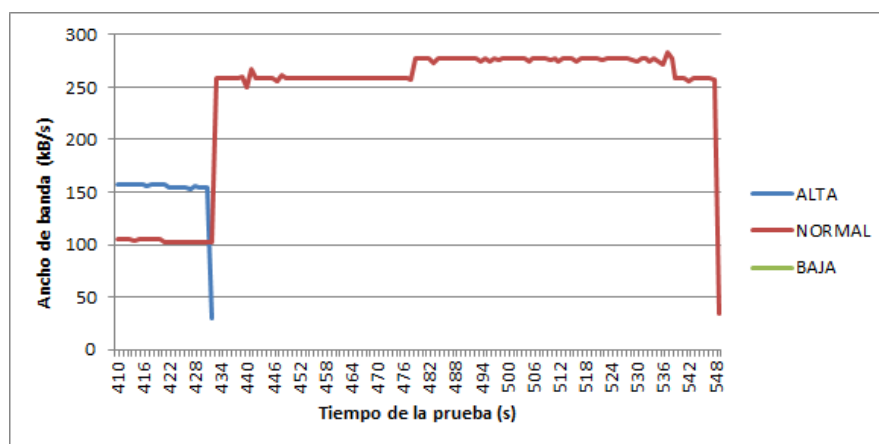


Figura 5.19: Fin de la comunicación alta y ajuste de ancho de banda de la comunicación normal (middleware)

5.3.2.2 Prueba del sistema de priorización de comunicaciones ininterrumpidas multienlace

En este apartado se describen los resultados obtenidos a la hora de llevar a cabo la prueba, en este caso a través del sistema basado en la diferenciación de tráfico para llevar a cabo la priorización y control de QoS de las comunicaciones, descrito en el apartado 2.2.3.2 de la memoria.

El punto comparativo entre este sistema y el middleware planteado en la tesis está en que ambos sistemas realizan una planificación dinámica y ajuste de ancho de banda de acuerdo a los requisitos de calidad de servicio de las aplicaciones.

5.3.2.2.1 Ancho de banda consumido por las aplicaciones

La Figura 5.20 representa el ancho de banda consumido por cada aplicación a lo largo de la prueba. En este gráfico se puede observar que hay momentos en los que el ancho de banda asignado a las comunicaciones es bastante parejo, aun cuando sus necesidades declaradas son muy diferentes, lo que se traduce en que, en este caso, el sistema no garantiza que las comunicaciones se realicen en todo momento respetando los requisitos mínimos de ancho de banda demandados. Este hecho será analizado de forma más detallada en el apartado que viene a continuación.

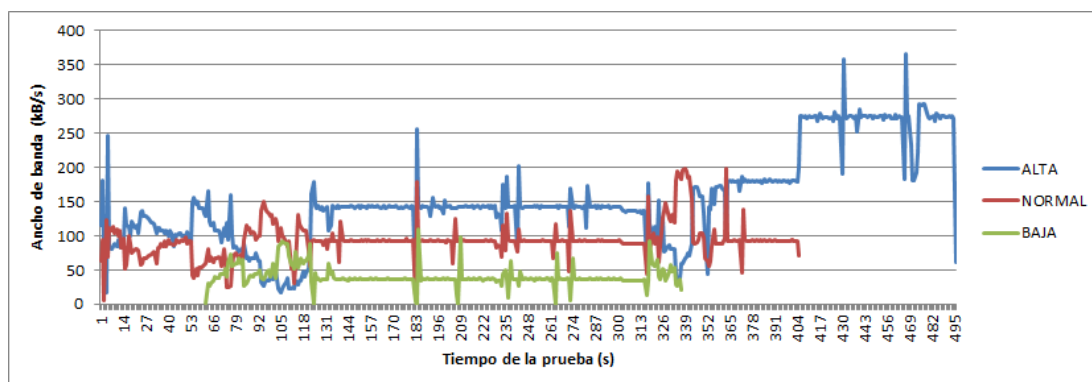


Figura 5.20: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (sistema Linux)

5.3.2.2.2 Gestión de las comunicaciones

La experimentación comienza con el lanzamiento de las comunicaciones de prioridad alta (CCTV en tiempo real) y prioridad normal (CCTV en diferido). Durante el primer minuto de prueba, el enlace de red ofrece un ancho de banda de 186 kB/s (ver **Figura 5.12**), cuando el ancho de banda mínimo requerido por ambas comunicaciones para cubrir sus necesidades de QoS es de 250 kB/s, por lo que el ancho de banda disponible es inferior al ancho de banda demandado por las aplicaciones. Observando cómo se ha comportado el sistema en este caso, se puede ver que la tasa de transferencia de la comunicación de prioridad alta es inferior al necesario para que se respeten sus condiciones de QoS (150 kB/s). En este caso, el sistema tiende a hacer un reparto del ancho de banda equitativo entre las comunicaciones activas, independientemente del nivel de prioridad, sin aplicar ningún tipo de mecanismo de control de admisión, que implicaría el aplazamiento de la comunicación de las comunicaciones menos prioritarias a favor de aquellas que presenten mayor nivel de criticidad.

En el segundo minuto de la prueba (a partir del segundo 60 en la **Figura 5.21**), el ancho de banda configurado para las comunicaciones se establece en 202 kB/s, tal como está definido en el escenario de prueba. Es en ese momento cuando se produce el lanzamiento de la comunicación de prioridad baja (descarga de log de las aplicaciones). Así, el ancho de banda necesario para cubrir los requerimientos de QoS de las tres comunicaciones, es en este caso de 290 kB/s, que sigue siendo superior al ancho de banda disponible, por lo que el sistema sigue sin poder cubrir las necesidades de ancho de banda de todas las comunicaciones activas. Además, si examinamos el gráfico, es notable como la comunicación de prioridad baja está transmitiendo a tasas superiores a sus requerimientos mínimos, mientras que las comunicaciones alta y normal, siendo más prioritarias en principio, no ven satisfechas sus necesidades.

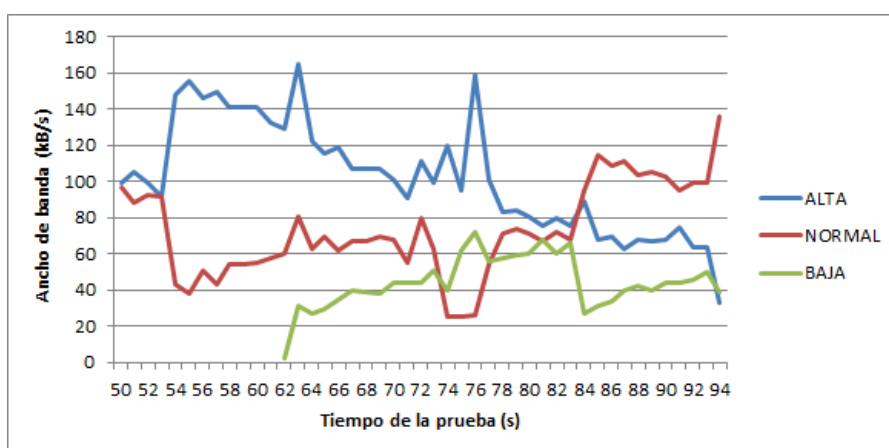


Figura 5.21: Ancho de banda insuficiente para cubrir los requisitos de todas las comunicaciones (sistema Linux)

Si avanzamos en la prueba, en el tercer minuto (segundos 120 a 160), el ancho de banda disponible pasa de ser 202 kB/s a 246 kB/s. Si bien el ancho de banda mínimo requerido por las aplicaciones es superior, observando la **Figura 5.22** se ve que con esta subida de ancho de banda el sistema empieza a ajustar la tasa de transferencia de las mismas de forma más próxima a sus requerimientos mínimos, aunque por debajo de los valores mínimamente requeridos.

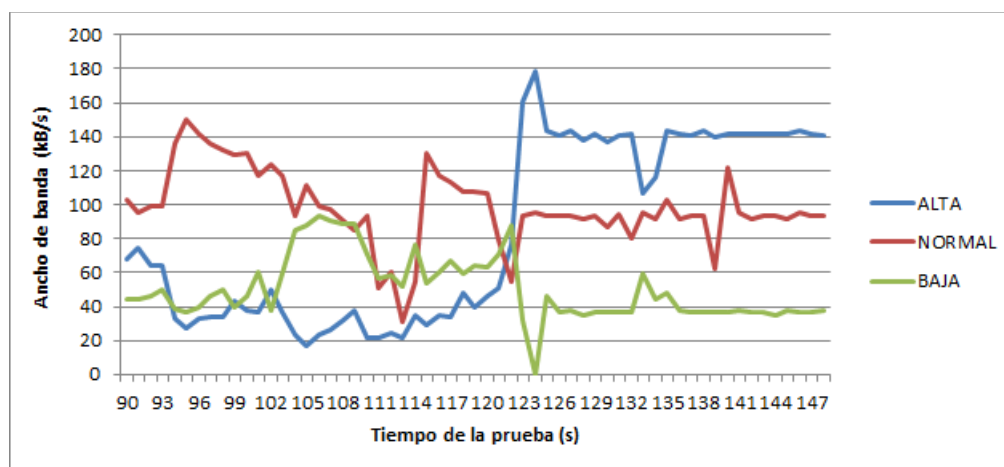


Figura 5.22: Subida de ancho de banda y ajuste de tasas de transferencia (sistema Linux)

La **Figura 5.23** muestra el momento en el que se completa la comunicación de prioridad normal. En ese periodo de tiempo que muestra la gráfica, el ancho de banda disponible es de aproximadamente 260 kB/s. Así, en el momento que se completa esa comunicación, el sistema ajusta el ratio de transferencia de la comunicación de prioridad alta (CCTV en tiempo real), de forma que haga uso de todo el ancho de banda disponible.

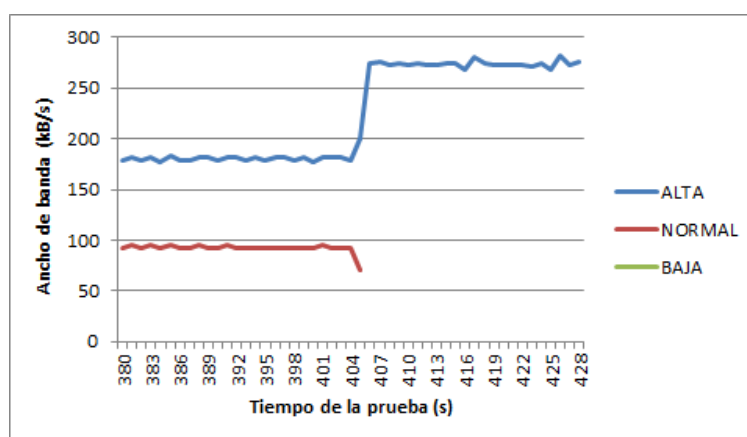


Figura 5.23: Finalización de la comunicación de prioridad normal (sistema Linux)

Por tanto, los resultados indican que en los casos en los que el ancho de banda disponible es suficientemente elevado para dar respuesta a los requisitos de calidad de servicio de las aplicaciones que se están comunicando en un momento dado, la priorización de las comunicaciones se comporta de la manera esperada, otorgando a cada comunicación por lo menos el ancho de banda mínimo requerido, de forma que cuando hay ancho de banda suficiente, el sistema hace una asignación de acuerdo a los niveles de prioridad.

Sin embargo, hay casos en los que la división de ancho de banda no se realiza en proporción a la demanda de las aplicaciones, independientemente de sus requisitos mínimos y su nivel de prioridad. Este hecho se produce cuando el ancho de banda disponible es menor que la suma de ancho de banda mínimo requerido por las comunicaciones que se estén llevando a cabo en un momento dado. En estas circunstancias, el sistema no puede garantizar los requisitos de QoS de todas las comunicaciones, y resuelve la situación ajustando el ratio de transferencia de las comunicaciones de manera más o menos equitativa, independientemente de su nivel de prioridad.

5.3.2.3 Prueba del sistema conectividad de EuskoTren

Tal como se ha indicado anteriormente, el sistema de conectividad de EuskoTren diferencia dos tipos de comunicaciones: las ligeras, que están basadas en conectividad móvil para llevar a cabo transmisiones de volúmenes pequeños de información, y las pesadas, que se habilitan en puntos fijos de la infraestructura donde el vehículo suele estar estacionado el tiempo suficiente para llevar a cabo transmisiones de grandes volúmenes de información que no tienen por qué ser servidas en el mismo momento en el que se generan.

Teniendo en cuenta que la experimentación en este caso hace referencia a un escenario de comunicaciones vehículo-tierra en movilidad, donde es necesario que haya una continuidad en las comunicaciones a medida que el vehículo se vaya reubicando, tal y como se ha

argumentado en el apartado 5.3.1.1, estas pruebas se llevarán a cabo usando la modalidad de comunicaciones ligeras.

Así, en este caso se aplicará la misma secuencia de comunicaciones ejecutada para los otros dos sistemas, con el propósito de comparar el comportamiento de este otro empleando exactamente los mismos parámetros de entrada (condiciones de red y planificación de comunicaciones).

5.3.2.3.1 Ancho de banda consumido por las aplicaciones

La **Figura 5.24** representa la tasa de transferencia percibida por las aplicaciones finales durante esta prueba. Simplemente revisando la gráfica se puede percibir que esta tasa de transferencia es claramente inferior al ancho de banda necesario para cubrir las necesidades de QoS de las mismas.

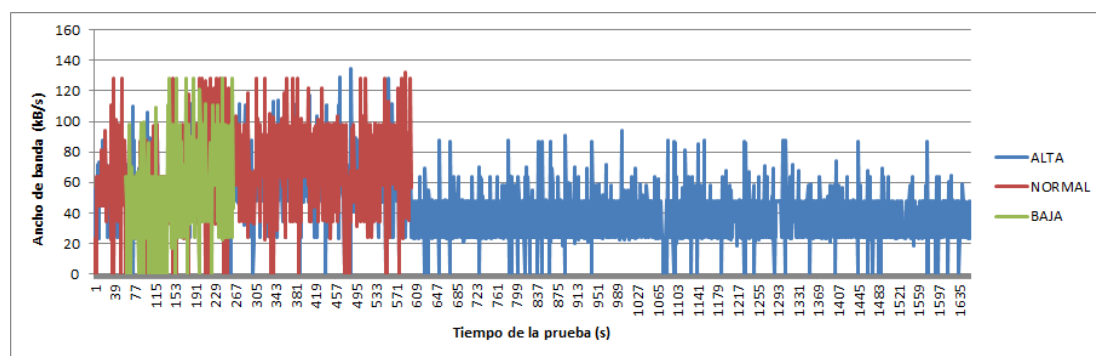


Figura 5.24: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (sistema EuskoTren)

En el siguiente apartado analizaremos la prueba de forma más detallada.

5.3.2.3.1 Gestión de las comunicaciones

La prueba comienza con el lanzamiento de las peticiones de prioridad alta y normal (**Figura 5.25**). Tal como se puede observar, la tasa de transferencia de estas comunicaciones es en este caso inferior a la tasa mínima requerida por las aplicaciones para cubrir sus necesidades de QoS. Además, como el sistema no implementa ningún tipo de mecanismo de priorización a través de la modalidad de comunicaciones ligeras, ambas comunicaciones se llevan a cabo haciendo un uso similar de ancho de banda.

En este punto cabe recalcar que la información transmitida entre las aplicaciones pasa por un sistema intermedio (sistema de comunicaciones de EuskoTren) que basa su funcionamiento en una serie de protocolos que procesan a su vez la información que se transmite, a través de la codificación y decodificación de la información transmitida, con el retardo y sobrecarga que esto supone. Así, este hecho se traduce en que la tasa de transferencia percibida por las

aplicaciones finales es menor que el ancho de banda disponible vehículo-tierra, que es el que realmente consume el sistema para llevar a cabo las comunicaciones.

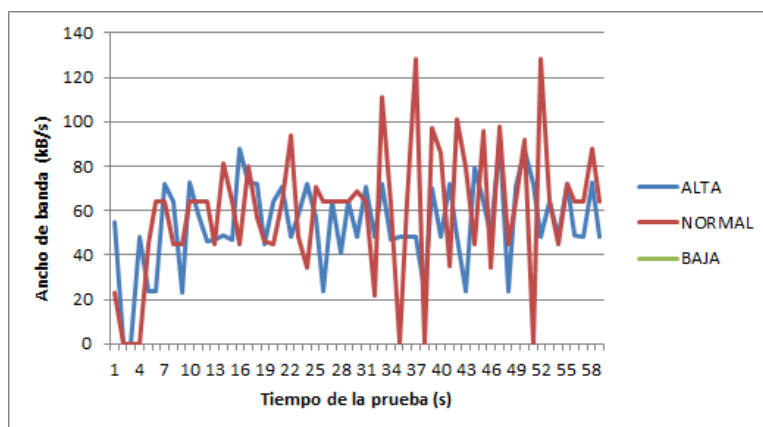


Figura 5.25: Comunicaciones alta y normal activas (sistema EuskoTren)

La **Figura 5.26** ilustra el momento en el que, en el segundo minuto de prueba (segundos 60 a 120), se inicia la transmisión de datos correspondiente a la descarga de log (prioridad baja). Observando los valores de ancho de banda programados en el escenario de prueba correspondientes a este periodo de tiempo (ver **Figura 5.12**), se puede apreciar que a lo largo del primer minuto (hasta el segundo 60 de prueba) el ancho de banda disponible es 186 kB/s, y a lo largo del segundo minuto (hasta el segundo 84 en el caso del gráfico) es 202 kB/s. Sin embargo, la tasa de transferencia media de la petición alta ha sido en el primer minuto de 53 kB/s, y el de la petición normal 58 kB/s. Por tanto, la suma media de ancho de banda consumido por las dos peticiones que han estado activas a lo largo del primer minuto asciende a 111 kB/s, cuando el ancho de banda disponible en el sistema es del 186 kB/s. Esto es debido a la cuestión que se ha mencionado previamente, es decir, a la sobrecarga que produce el protocolo que establece este sistema, que hace que la tasa de transferencia percibida por las aplicaciones sea menor que el ancho de banda que se consume realmente para llevar a cabo estas comunicaciones.

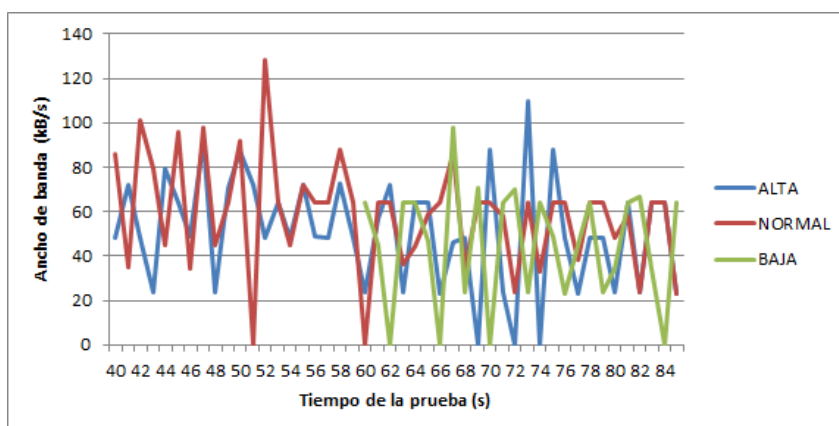


Figura 5.26: Inicio de la transmisión de la comunicación baja (sistema EuskoTren)

En este sentido, analizando lo acontecido a lo largo del segundo minuto de prueba, resulta que habiendo un ancho de banda de 202 kB/s, la tasa de transferencia media de la petición alta en este periodo ha sido de 46 kB/s, la de la normal de 50 kB/s, y la de la baja de 48 kB/s. Por tanto, la suma de las tasas de transferencia media de las tres comunicaciones ha sido en el segundo minuto de 144 kB/s.

Por tanto, este sistema no optimiza el uso del ancho de banda disponible para que las comunicaciones de las aplicaciones se lleven a cabo realizando un aprovechamiento de la capacidad del canal. La **Figura 5.27** muestra el periodo de tiempo de la prueba en el que se están llevando a cabo las tres comunicaciones (las correspondientes a la comunicación alta, normal y baja). En este gráfico, al igual que en los anteriores, se percibe que el ancho de banda consumido por las aplicaciones es considerablemente inferior que el mínimamente requerido para cubrir sus requisitos de QoS.

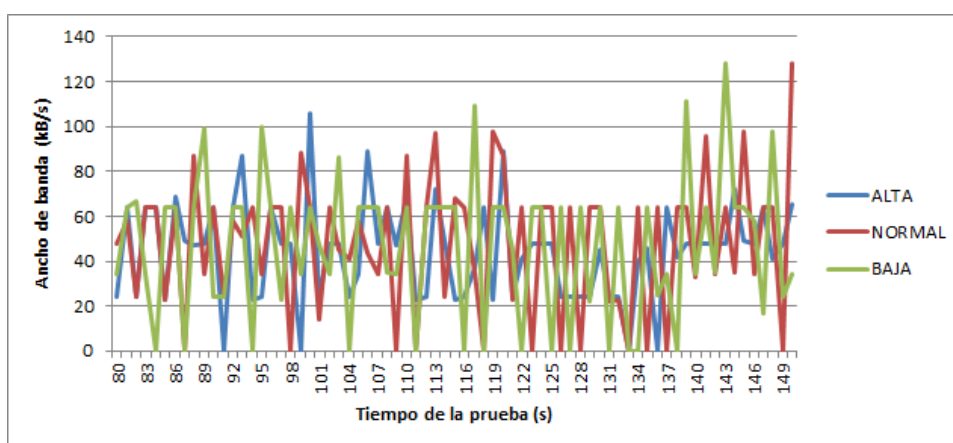


Figura 5.27: Comunicaciones alta, normal y baja activas (sistema EuskoTren)

La **Figura 5.28** muestra el instante en que se completa la comunicación baja. Tal como se puede observar, una vez completada esta comunicación, las comunicaciones alta y normal aumentan su tasa de transferencia.

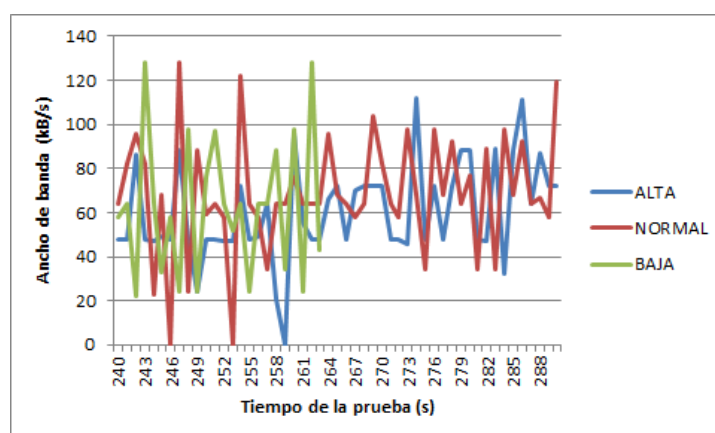


Figura 5.28: Comunicación de prioridad baja completada (sistema EuskoTren)

La **Figura 5.29** por su lado, representa el instante en que se completa la comunicación de prioridad normal.

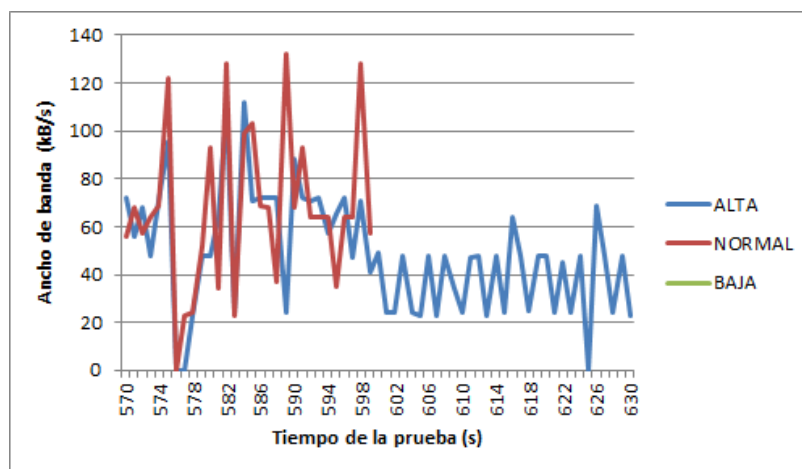


Figura 5.29: Comunicación de prioridad normal completada (sistema EuskoTren)

Así, una vez finalizadas las comunicaciones de prioridad normal y baja, a partir del minuto nueve de prueba, la aplicación de CCTV en tiempo real sigue transmitiendo durante otros diez minutos, tal como representa la **Figura 5.30**. Durante este periodo de tiempo, la aplicación de CCTV en tiempo real ha transmitido a una tasa media de 39 kB/s, un valor bastante inferior a la disponibilidad de ancho de banda durante ese periodo de tiempo.

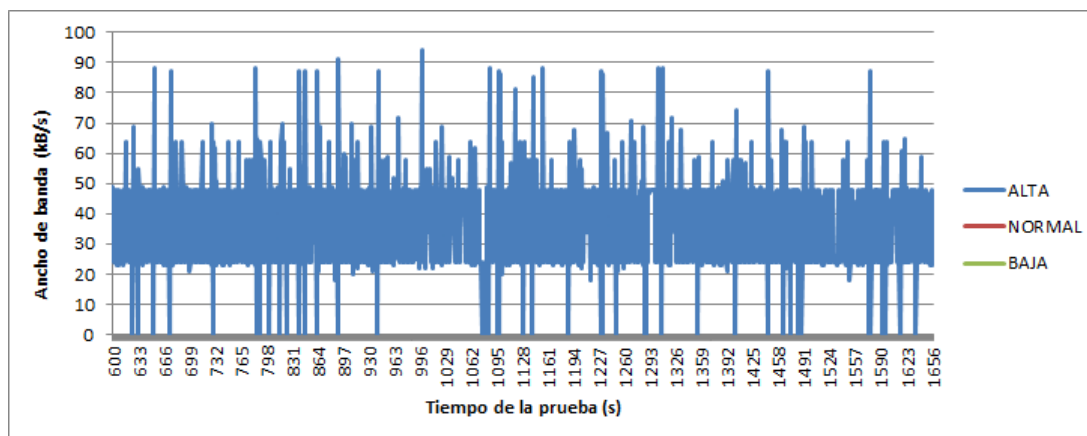


Figura 5.30: Comunicación de prioridad alta activa (sistema EuskoTren)

Por tanto, queda demostrado que las comunicaciones ligeras del proyecto de conectividad de EuskoTren presentan limitaciones a la hora de dar respuesta a un escenario como el que se plantea en este experimento, como consecuencia de la alta sobrecarga producida por el protocolo de comunicaciones y el proceso de codificación y decodificación de la información transmitida. Esto conlleva a que la tasa de transferencia percibida por las aplicaciones finales no se corresponda con el ancho de banda disponible realmente en la red. Asimismo, este

sistema de comunicaciones no contempla ningún tipo de mecanismo de priorización, ni control de QoS.

5.3.3 Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos a través de esta segunda experimentación posibilitan la validación de la última parte de la hipótesis que hace referencia a las bondades del sistema, que son concretamente dos:

- Optimización del uso del ancho de banda disponible.
- Aumento de la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza más prioritaria.

Así, a la hora de evaluar los resultados, se ha realizado un análisis de los mismos desde dos puntos de vista directamente relacionados con esos dos aspectos: (1) la priorización de las comunicaciones y el control de ancho de banda, y (2) el rendimiento del sistema a la hora de dar respuesta a las necesidades de ancho de banda de las aplicaciones, y por consiguiente a su QoS.

5.3.3.1 Priorización de las comunicaciones y control de ancho de banda

Con respecto a los aspectos relacionados con la priorización y el control de la QoS, el proyecto de conectividad de EuskoTren no define ninguna técnica de priorización ni de control de la QoS a la hora de establecer comunicaciones ininterrumpidas vehículo-tierra mientras los trenes están en movimiento (comunicaciones ligeras). Además, si bien las comunicaciones pesadas definidas en dicho proyecto sí realizan una priorización de las peticiones, estas comunicaciones se llevan a cabo en diferido y no se realiza ningún tipo de gestión de la QoS, aplicando una priorización de las comunicaciones secuencial, atendiendo a las peticiones de comunicación de las aplicaciones una a una, de forma que no se pueda establecer más de una comunicación activa en paralelo dentro del área de cobertura de un mismo punto de acceso inalámbrico (WiFi en este caso).

Por tanto, descartando la solución de conectividad de EuskoTren como una alternativa en lo que a capacidades de priorización de las comunicaciones y control de la QoS se refiere, de aquí en adelante se pondrá el foco de atención en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el middleware de comunicaciones que es fruto del trabajo de esta tesis (ver capítulo 4), y la solución centrada en la diferenciación de tráfico y basada en la distribución Linux (ver apartado 5.3.2.2) que se presenta en este caso como alternativa.

Así, comparando la forma en la que ambos sistemas llevan a cabo la priorización y la gestión de la QoS (en base al ancho de banda asignado a las comunicaciones), se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- A la hora de priorizar las comunicaciones, el sistema basado en la distribución Linux no realiza ningún tipo de *control de admisión*. Es decir, si el ancho de banda disponible no cubre las necesidades de todas las comunicaciones que se están llevando a cabo, este sistema sigue manteniendo esas comunicaciones activas, aunque no se garanticen sus necesidades de ancho de banda mínimas, y por consiguiente sus requisitos de QoS. Además, cuando el ancho de banda disponible es inferior al ancho de banda demandado para llevar a cabo las comunicaciones, el sistema basado en la distribución Linux no hace ninguna diferenciación entre las diferentes comunicaciones, haciendo una asignación equitativa de ancho de banda entre ellas.

Por otro lado, el middleware de comunicaciones objeto de esta tesis realiza un control de admisión de forma que si no hay suficiente ancho de banda, sólo se atienden aquellas más prioritarias cuyos requisitos de QoS puedan ser cubiertos. Por tanto, si bien con este sistema se posponen las comunicaciones que no puedan disponer del ancho de banda mínimo requerido, se garantiza que las aplicaciones siempre se comuniquen garantizando su QoS.

- Cuando el ancho de banda disponible es mayor que el ancho de banda demandado para llevar a cabo las comunicaciones, el middleware hace una asignación de tasa de transferencia para cada una de las comunicaciones en proporción al ancho de banda mínimo demandado por las mismas.

En cuanto a la solución basada en la distribución Linux, cuando el ancho de banda disponible es mayor que el ancho de banda mínimamente requerido para garantizar la QoS del conjunto de aplicaciones que se encuentren transmitiendo, este sistema hace una asignación de ancho de banda de acuerdo a los niveles de prioridad de las comunicaciones.

Por consiguiente, se puede concluir diciendo que el middleware generado en este trabajo de tesis doctoral realiza una gestión de ancho de banda permanente, llevando a cabo primero un control continuo de la disponibilidad del ancho de banda que ofrece el enlace de red por el que se están realizando las comunicaciones y llevando a cabo después una asignación de dicho ancho de banda a las diferentes comunicaciones en base a los requisitos de las aplicaciones. Por tanto, este middleware optimiza el uso del ancho de banda, dado que basa su comportamiento en la disponibilidad real de ancho de banda del canal, dirigiendo el uso de ese ancho de banda a aquellas comunicaciones que más criticidad presenten, buscando satisfacer sus necesidades mínimas de ancho de banda en todo momento. Estrategia ésta que

redunda en el aumento de la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza prioritaria, tal como se indica en la hipótesis, y tal y como se demostrará en el siguiente apartado.

5.3.3.1 Rendimiento

Como se ha indicado anteriormente, en este apartado se analizará el rendimiento de los tres sistemas comparados a la hora de dar respuesta a las necesidades de ancho de banda de las aplicaciones. Para ello, se examinarán los resultados de las pruebas realizadas a lo largo de esta experimentación.

La **Tabla 5.5** muestra de forma comparativa algunos de los indicadores obtenidos de los resultados de las pruebas realizadas con cada uno de los tres sistemas. En ella, se indica la duración de la prueba en cada caso (todas ellas se basan en la transmisión del mismo volumen de información), el tiempo transcurrido hasta completarse cada comunicación de diferente prioridad, la tasa media de transmisión correspondiente a cada comunicación, un indicativo sobre si el sistema en cuestión hace una asignación del 100% del ancho de banda disponible para atender las necesidades de comunicación de las aplicaciones finales, así como si el sistema hace un control de la QoS o no.

	MIDDLEWARE	DISTRIBUCIÓN LINUX	EUSKOTREN (LIGERAS)
Duración prueba	9 min 10 s	8 min 15 s	27 min 37 s
Tiempo transcurrido hasta completarse cada petición	ALTA= 7 min 13 s NORMAL= 9 min 10 s BAJA= 4 min 16 s	ALTA= 8 min 15 s NORMAL= 6 min 44 s BAJA= 4 min 35 s	ALTA = 27 min 37 s NORMAL= 9 min 58 s BAJA= 3 min 23 s
Tasa media de transmisión por prioridad	ALTA = 176 kB/s NORMAL= 167 kB/s BAJA= 45 kB/s	ALTA = 152 kB/s NORMAL = 93 kB/s BAJA= 41 kB/s	ALTA = 45 kB/s NORMAL= 63 kB/s BAJA= 56 kB/s
Porcentaje de tiempo de transmisión con garantías de QoS	ALTA = 100% NORMAL= 100% BAJA= 100%	ALTA= 33% NORMAL= 17% BAJA= 26%	ALTA= 0% NORMAL= 0,1% BAJA= 67%
Aprovechamiento del 100% del ancho de banda disponible	Si	Si	No
QoS	Si (control de admisión)	Si, menos cuando el ancho de banda disponible no es suficiente	No

Tabla 5.5: Comparativa de los tres sistemas que han formado parte de la experimentación

Tal como muestran los resultados de la tabla, el sistema basado en Linux ha necesitado menos tiempo para completar la prueba que nuestro middleware. Esto se produce por el hecho de que el middleware implementa un mecanismo de control de admisión, de forma que si no puede atender los requisitos de QoS de una petición ésta se pospone hasta que el sistema determine lo contrario. Por tanto, cuando una comunicación deja de ser prioritaria, este sistema pausa esa comunicación, y la aplaza hasta que vuelva a ser prioritaria, o la disponibilidad de ancho de banda permita que se atienda con garantías de QoS. Son precisamente estas pausas y reanudaciones de comunicaciones las que provocan que el tiempo para completarse la prueba sea superior al resultante de la prueba del sistema Linux, ya que tal como está diseñado el sistema actualmente, cada reanudación implica el reinicio y la retransmisión de datos para la comunicación que haya sido pausada.

En este sentido, si revisamos el tiempo que han necesitado las comunicaciones para completarse a través de cada uno de los sistemas, vemos que si bien la petición baja y la alta han necesitado menos tiempo a través del middleware que a través de los otros dos sistemas para completarse, la petición de prioridad normal ha necesitado más tiempo que a través del sistema Linux. El motivo es precisamente el mismo que se ha comentado, y es que esta comunicación ha sufrido alguna pausa a lo largo de la prueba.

En cuanto a la tasa de transferencia media de las comunicaciones más prioritarias, el middleware desarrollado en esta tesis es el que mejores resultados da, dado que siempre transmite ofreciendo garantías de QoS, en cuanto al ancho de banda, para este tipo de comunicaciones. Así, el ancho de banda medio que se ha obtenido por ejemplo para la comunicación más prioritaria, la alta, en este caso ha sido de 178 kB/s cuando la tasa mínima requerida para esta comunicación es de 150kB/s.

Si bien el sistema Linux ha ofrecido una tasa media que supera al ancho de banda mínimo requerido por las comunicaciones tanto en la prioridad alta como en la baja, a través de este sistema las comunicaciones no siempre se llevan a cabo con garantías de QoS, dado que el sistema siempre sigue transmitiendo, aunque eso suponga que todas las comunicaciones se lleven a cabo sin respetar sus necesidades mínimas de ancho de banda. Además, cuanto más comunicaciones activas haya (en la prueba hay sólo 3), menos capacidad tendrá este sistema para dar respuesta a las necesidades de QoS de las aplicaciones, ya que en las situaciones que no hay suficiente ancho de banda, hace un reparto más o menos equitativo entre todas las comunicaciones, independientemente de su prioridad. Por ejemplo, en el caso de la comunicación más prioritaria (la alta), su tasa de transferencia sólo ha cubierto o superado sus requerimientos mínimos de ancho de banda durante el 33% del tiempo que ha durado su transmisión a lo largo de la prueba.

Por otra parte, en lo que a la modalidad de comunicaciones ligeras de EuskoTren se refiere, este sistema implementa una serie de protocolos de alto nivel que hacen que se produzca

una sobrecarga (generado por el proceso de codificación/decodificación de la información transmitida) a la hora de transmitir los datos intercambiados entre las aplicaciones finales vehículo-tierra. Por ello, la tasa de transferencia percibida por las aplicaciones es muy inferior a lo que realmente consume este sistema para llevar a cabo las comunicaciones, y por tanto éstas necesitan mucho más tiempo para completarse que a través de los otros dos sistemas.

Con respecto al aprovechamiento del ancho de banda disponible en la red, tanto el middleware como el sistema Linux hacen un uso del 100% del valor de ancho de banda para responder a las necesidades de comunicación de las aplicaciones. Pero el middleware además está diseñado para que siempre prevalezcan las comunicaciones de naturaleza más crítica.

Una vez comentados estos resultados, es importante recalcar que si quisiéramos cambiar el comportamiento del sistema de forma que, por ejemplo, no se produzcan pausas en las comunicaciones en caso de que no hubiera suficiente ancho de banda para atenderlas (para aquellas no incluidas entre las más prioritarias y que se puedan atender sin garantías de QoS de acuerdo al ancho de banda disponible), este sistema ofrece flexibilidad para añadir nuevos parámetros que ayuden a mejorar su comportamiento. Con el propósito de demostrar este hecho, se ha realizado una nueva prueba añadiendo un nuevo parámetro al sistema. Se trata de un parámetro que establece si procede que una petición determinada sea atendida en caso de que no haya suficiente ancho de banda para cubrir sus necesidades. Así, cuando una aplicación genera una petición de comunicación, además de indicar el ancho de banda mínimo requerido para esta comunicación para cubrir sus necesidades de QoS, indica si es favorable que la transmisión de datos se lleve a cabo a pesar de que no se haga en base a sus requisitos mínimos, o es preferible pausarlo y posponer la transmisión a un momento en el que sí puedan cubrirse las necesidades de QoS. De esta manera, tras esta modificación, el sistema realiza la priorización de las comunicaciones de la misma manera que en el caso anterior, asignando el ancho de banda mínimo requerido para cada una de estas peticiones prioritarias, y después, en caso de que haya disponibilidad de ancho de banda adicional (y no sea suficiente para atender ninguna otra petición pendiente con garantías de QoS), asigna ese ancho de banda a la petición más prioritaria que no se esté atendiendo, pero que a través de este parámetro tenga determinado que se lleve a cabo la comunicación siempre que sea posible. Por tanto, a través de esta modificación se minimizan las pausas de las comunicaciones.

La **Figura 5.31** muestra el ancho de banda consumido por cada comunicación a lo largo de esta nueva prueba.

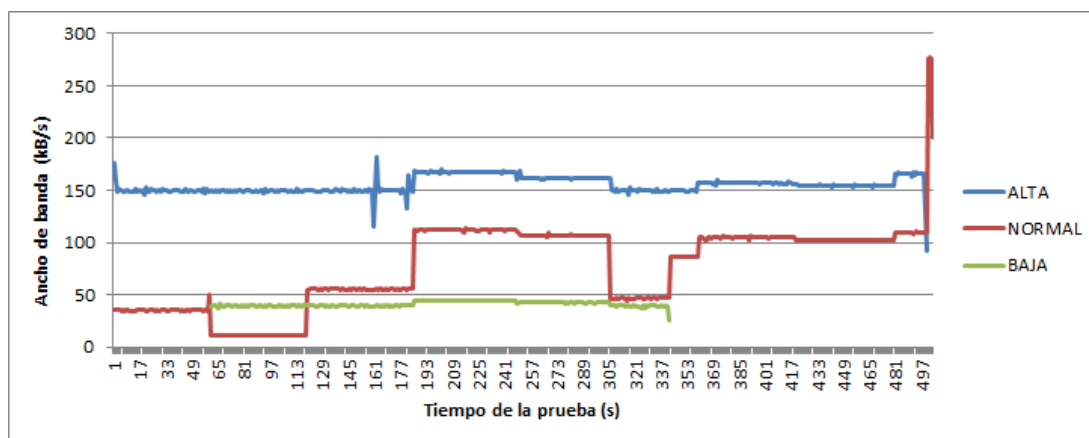


Figura 5.31: Representación del ancho de banda consumido por las aplicaciones (modificación middleware)

Tal como se puede observar, hay momentos a lo largo de la prueba que la comunicación normal se lleva a cabo por debajo de sus requerimientos mínimos (100 kB/s), dado que aunque es la segunda petición más prioritaria, hay momentos en los que no hay suficiente ancho de banda para atender la comunicación alta y normal de forma concurrente con garantías de QoS. Sin embargo, tanto la petición alta como la baja se han llevado a cabo en todo momento cubriendo sus requerimientos mínimos. Por tanto, a través de la incorporación de este nuevo parámetro se ha logrado evitar que la comunicación de prioridad normal sufra pausas. Por lo que queda demostrada la flexibilidad que el sistema aporta para la incorporación de nuevos parámetros que permitan adaptar y mejorar su comportamiento.

A continuación se vuelve a incluir la tabla comparativa de los resultados de las pruebas, esta vez incluyendo la prueba realizada tras la modificación del middleware (middleware' en la (Tabla 5.6). Comparando los resultados obtenidos en esta nueva prueba, tanto con los resultados obtenidos anteriormente con las pruebas del middleware, como con los del sistema Linux, vemos que en este caso se reduce el tiempo que ha necesitado el sistema para atender la comunicación normal, dado que esta vez se ha evitado la pausa. Sin embargo, se ha reducido la tasa media de transferencia de las otras dos comunicaciones (aunque siempre cubriendo sus necesidades de ancho de banda), a favor de otras (la de prioridad normal en este caso) que a pesar de no tener suficiente disponibilidad de ancho de banda para cubrir su QoS no se pausan, gracias a la aplicación de este nuevo parámetro. Por este hecho, la tasa media de la comunicación normal se ha visto reducida considerablemente en este caso, dado que esta comunicación se ha llevado por debajo de su tasa mínima requerida durante el 49% del tiempo de la prueba. Así, aunque las comunicaciones han necesitado algo más de tiempo para llevarse a cabo con el middleware modificado que con el sistema Linux, el middleware responde de forma mucho más favorable a la hora de garantizar los requisitos de QoS en ambos casos.

	MIDDLEWARE	MIDDLEWARE'	DISTRIBUCIÓN LINUX	EUSKOTREN (LIGERAS)
Duración prueba	9 min 10 s	8 min 24 s	8 min 15 s	27 min 37 s
Tiempo transcurrido hasta completarse cada petición	ALTA= 7 min 13 s NORMAL= 9 min 10 s BAJA= 4 min 16 s	ALTA= 8 min 20 s NORMAL= 8 min 24 s BAJA= 4 min 42 s	ALTA = 8 min 15 s NORMAL= 6 min 44 s BAJA= 4 min 35 s	ALTA = 27 min 37 s NORMAL= 9 min 58 s BAJA= 3 min 23 s
Tasa media de transmisión por prioridad	ALTA = 176 kB/s NORMAL= 167 kB/s BAJA= 45 kB/s	ALTA = 152 kB/s NORMAL= 75 kB/s BAJA= 41 kB/s	ALTA = 152 kB/s NORMAL = 93 kB/s BAJA= 41 kB/s	ALTA = 45 kB/s NORMAL= 63 kB/s BAJA= 56 kB/s
Porcentaje de tiempo de transmisión con garantías de QoS	ALTA = 100% NORMAL= 100% BAJA= 100%	ALTA= 100% NORMAL= 51% BAJA= 100%	ALTA= 33 % NORMAL= 17 % BAJA= 26%	ALTA= 0 % NORMAL= 0,1 % BAJA= 67 %
Uso del 100% del ancho de banda disponible	Si	Si	Si	No
QoS	Si (control de admisión)	Si (control de admisión con nuevo parámetro que permite transmitir a menos tasa que en mínimo en las peticiones que se indique que así sea)	Si, menos cuando el ancho de banda disponible no es suficiente	No

Tabla 5.6: Comparativa incluyendo una nueva prueba del middleware con un parámetro adicional

Por tanto, a través del sistema Linux y a través del middleware modificado se obtiene un rendimiento muy parecido, pero el middleware además favorece a las comunicaciones prioritarias, y ofrece mayores garantías de QoS. Además, cabe recordar que a lo largo de esta experimentación se han visto mermadas las capacidades del middleware, ya que se ha deshabilitado el mecanismo de gestión del canal, que monitoriza y selecciona el mejor enlace para las comunicaciones de forma dinámica, habilitando comunicaciones multienlace que favorecen la continuidad de las comunicaciones, y la disponibilidad de un mayor ancho de

banda, ya que el sistema siempre selecciona el enlace más favorable para llevar a cabo las comunicaciones.

En definitiva, los resultados obtenidos de esta experimentación indican que este sistema ofrece un buen rendimiento a la hora de atender las necesidades de comunicación de las aplicaciones, prevaleciendo las comunicaciones prioritarias, haciendo que éstas siempre se lleven a cabo de acuerdo a sus requisitos de QoS, lo que provoca, tal como se indica en la hipótesis, un aumento de la tasa de transferencia media de las comunicaciones más prioritarias.

Capítulo 6

Resultados, Conclusiones y Líneas Futuras de Trabajo

A lo largo de los capítulos precedentes se han ido detallando todos los pasos llevados a cabo durante la realización de esta tesis doctoral. Se comenzó con una descripción de la problemática abordada, indicando los objetivos e hipótesis que han regido este trabajo; el análisis del estado de la técnica y las oportunidades de mejora identificadas; las capacidades y las características principales del middleware de comunicaciones desarrollado para atender las necesidades de comunicación vehículo-tierra; y finalmente los experimentos y pruebas llevadas a cabo con el objeto de validar la hipótesis y a su vez las bondades del sistema planteado.

En este último capítulo se ofrece un resumen de todas las cuestiones que se han ido mencionando a lo largo de la memoria, haciendo hincapié en las contribuciones principales de este trabajo, destacando los resultados de la experimentación que han permitido llevar a cabo la validación de la hipótesis, y las líneas futuras de trabajo, las cuales proponen una serie de mejoras que podrían realizarse en torno a esta tesis. Asimismo, a modo de conclusión final, se indican una serie de consideraciones finales.

6.1 Contribuciones

Las comunicaciones vehiculares presentan una serie de retos relacionados con la disponibilidad e interrupción de la conectividad, cobertura, y limitaciones de ancho de banda. Además, dentro del ámbito del transporte se están desplegando aplicaciones de diferente naturaleza que presentan diferentes necesidades de comunicación. Estas aplicaciones suelen compartir el medio de transmisión, compitiendo por el uso del ancho de

banda. El problema surge cuando el ancho de banda disponible en la red es menor al ancho de banda demandado por estas aplicaciones. En estos casos se producen problemas de cuello de botella, o incluso la monopolización del ancho de banda por parte de ciertas aplicaciones. Además, dependiendo de la funcionalidad o cometido de estas aplicaciones, la transmisión de información de una de ellas puede ser más prioritaria que la de otra dada la criticidad de la información que transmite.

Así, para hacer frente a este tipo de problemática y permitir el diseño de software conectado de forma ubicua en un entorno vehicular como el que se presenta, esta tesis ha abordado el diseño de un sistema intermedio o middleware que permita gestionar este tipo de cuestiones abstrayendo a las aplicaciones finales de los aspectos relacionados con la tecnología de comunicaciones.

6.1.1 Motivaciones y objetivos

Las soluciones telemáticas planteadas en el ámbito del transporte presentan cada vez mayor complejidad, con cada vez mayor número y heterogeneidad de dispositivos. Esta complejidad está motivada por el crecimiento continuo de los sistemas y la especificidad de las arquitecturas. Ante estas circunstancias, se demandan tecnologías que permitan una mayor interoperabilidad entre estas soluciones.

En lo que a conectividad inalámbrica se refiere, los vehículos mantienen conexiones inalámbricas a lo largo de su trayecto, pasando del área de conectividad de una antena a otra, suponiendo una serie de retos en lo que a la continuidad y mantenimiento de la conexión se refiere. Asimismo, las nuevas tecnologías aplicadas en el transporte permiten desplegar nuevos servicios tanto en los centros de “tierra” como en el vehículo. Para ello, es necesario contar con la disponibilidad del enlace de comunicaciones.

Por otro lado, el creciente interés en transmitir por el mismo medio físico tanto datos de control como tráfico multimedia, conlleva importantes implicaciones a la hora de gestionar las comunicaciones. Para ello, es fundamental el control de parámetros de calidad de servicio (QoS). Además, los usuarios, aplicaciones y sistemas finales solicitan servicios de comunicación con garantías de QoS específicas. Simultáneamente, los servicios desplegados en el transporte demandan cada vez más ancho de banda. Así, con el propósito de dar soporte a múltiples tipos de aplicaciones con diferentes requisitos de QoS, las estrategias eficientes de gestión de recursos, reserva de ancho de banda y control de admisión juegan un rol muy importante.

Teniendo en cuenta todas estas cuestiones, se pueden identificar una serie de retos a ser abordados en la gestión de comunicaciones inalámbricas en movilidad:

- *Interrupciones* intermitentes del servicio por falta de cobertura.
- Limitaciones de *ancho de banda*.
- Diferentes *prioridades* y volúmenes de datos generados por diferentes aplicaciones.

En esta línea, a lo largo de este trabajo de investigación se detectaron una serie de capacidades que un sistema de comunicaciones inalámbrico aplicado a este ámbito debiera poseer. Muchas de éstas se corresponden con limitaciones o puntos de mejora de otros trabajos y proyectos previos analizados en el estado de la técnica, que están directamente relacionados con los objetivos generales de la presente tesis, que son:

- Respuesta a las *necesidades de QoS* demandadas por las aplicaciones.
- *Priorización dinámica* de las comunicaciones.
- *Selección transparente del mejor enlace* para las comunicaciones.

También se han tomado como punto de partida algunos trabajos precedentes que han servido como base a la hora de diseñar diferentes funcionalidades o mecanismos incluidos en la arquitectura de comunicaciones que se ha presentado como trabajo doctoral.

Así, se han analizado una serie de enfoques y soluciones que permiten la optimización del uso de redes inalámbricas, tanto desde el punto de vista de gestión de redes y cambios de enlace, como desde el punto de vista de la QoS y priorización de comunicaciones. También se han estudiado algunas arquitecturas inalámbricas existentes, que han servido como referencia para confirmar las tendencias anteriormente citadas. Se trata de soluciones desarrolladas con carácter industrial, realizadas con el propósito de ser desplegadas en la industria del transporte con el fin de responder a necesidades detectadas dentro de las compañías de este ámbito.

Como se ha indicado anteriormente, a través del análisis de estos enfoques y proyectos, se ha podido comprobar que ninguno de ellos propone un sistema que establezca mecanismos de QoS y priorización dinámica, a la vez que una gestión del canal en tiempo real que implique el cálculo de ancho de banda, y una gestión de múltiples enlaces de comunicación que permita seleccionar en cada momento el mejor enlace inalámbrico para las comunicaciones. Son precisamente todas estas cuestiones las que ha cubierto este trabajo de tesis doctoral.

Además, aunque existen numerosos trabajos relacionados con la optimización de las comunicaciones, incluyendo la priorización de tráfico y control de QoS, estos trabajos suelen estar habitualmente centrados en las redes pero no tanto en las aplicaciones o en los servicios que hacen uso de dichas redes. Estos trabajos centrados en el nivel de red, suelen establecer mecanismos que permiten realizar un control de tráfico en base a la priorización de flujos de datos de acuerdo a su origen. En esta tesis se propone un planteamiento más novedoso,

invirtiendo el enfoque clásico, y centrando la solución en servicios de gestión de las comunicaciones que puedan ser proporcionadas a nivel de capa de aplicación.

Por otro lado, muchas de las soluciones de priorización de tráfico existentes están orientadas a redes cableadas, y no se ajustan a los cambios producidos en el estado y conectividad de las redes inalámbricas. En este sentido, en un entorno móvil como el vehicular, surge la necesidad de monitorizar en tiempo real las condiciones de red, permitiendo adaptar la planificación de las comunicaciones de forma dinámica posibilitando, a su vez, un control de QoS adaptativo.

Por tanto, el objetivo fundamental de la tesis es *diseñar un middleware para la planificación y gestión dinámica de comunicaciones en el ámbito vehicular*, basado en la monitorización y gestión del estado de la red, adecuando el tráfico generado en base a la naturaleza y necesidades de las aplicaciones, aplicando un control de QoS, permitiendo así optimizar el uso de las capacidades de red disponibles.

6.1.2 Capacidades del middleware de comunicaciones

El middleware resultado de esta tesis consta de un sistema software desarrollado para habilitar comunicaciones inalámbricas en el ámbito vehicular. Así, este middleware define una serie de protocolos de alto nivel para posibilitar las comunicaciones entre las aplicaciones finales que necesiten establecer comunicaciones vehículo-tierra. De esta manera, se permite que las aplicaciones finales se abstraigan de cualquier problemática relacionada con la gestión de las comunicaciones en entornos de movilidad. En esta línea, este sistema habilita comunicaciones inalámbricas multienlace con los vehículos, seleccionando en cada momento aquél enlace que mejores prestaciones ofrezca. Para ello, el sistema realiza una monitorización continua del estado de los enlaces de red, identificando qué enlaces se encuentran disponibles, y por consiguiente, ofrecen conectividad en cada momento. Además, el middleware desarrolla un servicio adicional que permite realizar mediciones del ancho de banda de estos enlaces. Por tanto, el sistema siempre selecciona como activo para llevar a cabo las comunicaciones aquel enlace que además de ofrecer conectividad, ofrezca mayor disponibilidad de ancho de banda. En este sentido, una de las capacidades principales del sistema desarrollado es que la comunicación de enlaces se hace de forma transparente para las aplicaciones, de manera que dichos cambios de enlace no sean percibidos por las mismas, ya que no provocan interrupciones en las transmisiones de datos.

En lo que a la gestión de las comunicaciones se refiere, esta solución se centra en las necesidades de QoS y prioridad de la información a transmitir de las aplicaciones, posibilitando una planificación adaptativa de las comunicaciones que permite ajustar y gestionarlas dinámicamente en base a los requisitos de ancho de banda de las aplicaciones, el

conocimiento del estado de la red, y los comportamientos previos del sistema. De esta manera, el sistema anticipa en todo momento las comunicaciones más prioritarias que puedan ser atendidas con garantías de QoS. Todo ello sienta las bases para refinar y optimizar la gestión de estas comunicaciones, permitiendo también que una misma aplicación pueda generar tráfico de diferente naturaleza y prioridad. Así, esta solución propone una serie de criterios divididos en dos categorías: estáticos y dinámicos, ofreciendo la posibilidad de introducir nuevos parámetros que doten al sistema de más inteligencia a la hora de gestionar la priorización de las comunicaciones, sobre todo con la aplicación de criterios dinámicos que permiten la retroalimentación del sistema en base a sus comportamientos previos, de forma que sea capaz aprender y de optimizar su comportamiento de acuerdo a esta información. Justamente, este hecho representa una de las principales ventajas abordadas en el diseño de este middleware desarrollado a nivel de capa de aplicación: su flexibilidad para modificar y mejorar su comportamiento.

En resumen, las principales capacidades de este sistema son: (1) la priorización de las comunicaciones y control de QoS, (2) la gestión y monitorización del canal de comunicaciones, que implica la selección del medio físico más adecuado a utilizar en cada momento para llevar a cabo las transmisiones de datos de forma transparente para las aplicaciones finales, y (3) la regulación de la comunicación entre aplicaciones finales.

6.2 Validación de la hipótesis

La hipótesis de partida de esta tesis doctoral, cuya comprobación de su veracidad ha guiado la construcción de un middleware de comunicaciones con las características anteriormente expuestas, así como los experimentos realizados, es la siguiente:

Hipótesis: “Es posible desarrollar un middleware de comunicaciones para entornos vehiculares, que teniendo en consideración criterios de calidad del servicio de las aplicaciones, monitorizando el estado de las redes para la selección del enlace más favorable en cada momento, y realizando una priorización dinámica y adaptativa de las peticiones de comunicación, sea capaz de optimizar el uso del ancho de banda disponible en la red, aumentando la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza más prioritaria”.

Con el fin de validarla, se han llevado a cabo una serie de experimentos en laboratorio. Para ello, se ha dividido la hipótesis en dos partes: su enunciado inicial, que versa en torno a las características del middleware propiamente dicho, y la segunda, al final de la misma, en torno a los resultados o beneficios reportados. De esta manera, la primera parte de la

hipótesis se ha validado llevando a cabo una experimentación funcional del sistema, mientras que la segunda ha sido validada a través de una experimentación comparativa que permite la evaluación de los resultados de uso del middleware de comunicaciones frente a otras soluciones adoptadas en la industria del transporte para la gestión de comunicaciones vehículo-tierra.

En ambos experimentos se ha definido un escenario de prueba (común para todos los sistemas que participan en la experimentación comparativa). El escenario de prueba incluye una serie de aplicaciones finales que generan diferente tipo de tráfico (multimedia, binarios, texto, etc.) que son habituales en los sistemas de transporte, así como condiciones de red predefinidas.

En cuanto a los resultados de las pruebas, una vez completada la *experimentación funcional* se ha podido demostrar que este middleware da paso a las comunicaciones dando garantías de cumplimiento del ancho de banda mínimo requerido por las mismas, garantizando que siempre transmitan respetando sus requisitos mínimos de QoS, posponiendo su ejecución en caso contrario, hasta que dichos requisitos puedan ser cubiertos. Además, se ha demostrado que este middleware está capacitado para funcionar en un entorno multienlace, de forma que a través de la monitorización del estado de conectividad de las diferentes redes de acceso y el cálculo de la disponibilidad de ancho de banda por cada una de ellas, seleccione en cada momento aquél que mejores prestaciones ofrezca. De la misma manera, se ha demostrado que la conmutación de un enlace a otro se realiza de forma transparente para las aplicaciones que se encuentran comunicándose, que no perciben cortes en la comunicación. En cuanto a la priorización de las peticiones de comunicación, se ha podido comprobar que el sistema responde de forma dinámica y adaptativa a los cambios circunstanciales que se dan en el sistema, ya sea por la entrada de nuevas peticiones de comunicación desde las aplicaciones finales, o bien por cambios en el estado de los enlaces de red que influyen en el ancho de banda disponible para llevar a cabo las comunicaciones. Así, a través de estos resultados se han podido dar por validados los requisitos contemplados en la primera parte de la hipótesis.

Por otro lado, con los resultados de las pruebas realizadas en la *experimentación comparativa* se ha validado la segunda parte de la hipótesis, que dice que el middleware es capaz de optimizar el uso del ancho de banda disponible en la red, aumentando la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza más prioritaria. Para ello, por un lado, se ha realizado un análisis del comportamiento de los tres sistemas que han formado parte de esta experimentación en base a aspectos relacionados con la priorización y el control de la QoS. A través de este análisis, se ha podido comprobar que este middleware optimiza el uso del ancho de banda, dado que basa su comportamiento en la disponibilidad real de ancho de banda del canal, dirigiendo el uso de ese ancho de banda a aquellas

comunicaciones que más criticidad presenten, buscando así satisfacer sus necesidades mínimas de ancho de banda en todo momento. Estrategia ésta que redundará en el aumento de la tasa de transferencia media de las comunicaciones de naturaleza prioritaria, tal como se indica en la hipótesis. Después se ha analizado el rendimiento de los tres sistemas comparados a la hora de dar respuesta a las necesidades de ancho de banda de las aplicaciones. En este sentido, los resultados indican que el middleware atiende siempre las peticiones con garantías de QoS, de forma que prevalezcan las peticiones prioritarias, aumentando al mismo tiempo la tasa de transferencia media en la que se llevan a cabo las comunicaciones. Aspectos que los otros dos sistemas evaluados no resuelven de manera favorable.

6.3 Líneas futuras de trabajo

En cuanto a las posibles acciones futuras que permitan mejorar la solución propuesta o bien abrir nuevas líneas de avance en la investigación, se presentarán a continuación las que se considera que son más destacables.

Aun cuando los experimentos que se han realizado han demostrado un más que aceptable comportamiento de nuestra solución de comunicaciones, al menos para las condiciones en las que éstos fueron realizados, algunas mejoras relativas al diseño de este sistema de comunicaciones podrían obtenerse a través de las siguientes acciones:

- **Cambios de enlace más inteligentes**

El mecanismo para la gestión del canal realiza una selección de enlace en base a la monitorización del estado de conectividad de los mismos, y mediciones de ancho de banda que va haciendo el sistema continuamente. Sin embargo, como línea futura de trabajo se propone la optimización de este mecanismo a través de la aplicación de nuevos criterios.

Una posible estrategia es la aplicación de históricos o mapas de ancho de banda para las ubicaciones por las que habitualmente transcurre un vehículo. El conocimiento de valores de ancho de banda previos pueden ayudar al sistema a prever las fluctuaciones de ancho de banda inminentes a lo largo del trayecto realizado por un vehículo, y así llevar a cabo acciones proactivas.

En esta misma línea, otro criterio que pudiera ser tenido en cuenta son las tendencias de conectividad de las diferentes redes de acceso a lo largo de un recorrido determinado. En este sentido, sería interesante la aplicación de históricos en cuanto a secuencias de cambio de enlace se refiere en recorridos conocidos. De esta manera, se puede optimizar el funcionamiento del sistema permitiendo que se anticipe a

situaciones de pérdida de enlace que pueden provocar retardos en las comunicaciones.

Teniendo en cuenta la influencia que tiene en el estado de la conectividad la movilidad del vehículo, el mecanismo de selección de enlace implementado en este caso podría ser refinado teniendo en cuenta aspectos como la latencia de la red, y otra serie de parámetros de conectividad.

Desde el punto de vista de la priorización de las comunicaciones y sus necesidades de QoS, el sistema pudiera añadir nuevos criterios de cambio de enlace que favorezca que el sistema atienda en cada momento el máximo número de peticiones prioritarias posible. En este sentido, en la descripción del sistema se indicaba que éste establece un margen de ancho de banda entre el enlace que se encuentra ya activo y el nuevo enlace, para determinar si la diferencia de ancho de banda entre ambos es suficientemente relevante como para llevar a cabo dicho cambio. Sin embargo, esta forma de proceder puede ser refinada en siguientes versiones, estableciendo, por ejemplo, que a la hora de llevar a cabo el cambio de enlace no solo se valore si la diferencia de ancho de banda ofrecida por el nuevo enlace es suficientemente representativo, sino que ese cambio de enlace implique, por ejemplo, que se puedan atender más peticiones prioritarias de manera simultánea.

Por tanto, este sistema ofrece gran flexibilidad en este sentido, siendo posible ir integrando diferentes factores que permitan refinar u optimizar la forma de proceder del mecanismo de selección del enlace activo.

- **Múltiples enlaces de comunicación simultáneamente**

El sistema desarrollado establece un único enlace en cada momento para llevar a cabo las comunicaciones. Esto es así por el hecho de que su diseño ha sido planteado para buscar una continuidad de las comunicaciones, de forma que la disponibilidad de varios enlaces de comunicaciones en cada momento permita que el sistema pueda conmutar de uno a otro de acuerdo al estado y capacidades de cada uno de ellos. Así, en caso de pérdida del enlace activo, el sistema está preparado para conmutar a otro enlace de forma transparente para las aplicaciones. Sin embargo, si bien añade complejidad al sistema, se puede estudiar el uso de varios enlaces de comunicación de forma simultánea para llevar a cabo las comunicaciones, que permitiría disponer de más ancho de banda. En este caso, también habría que valorar en qué momento llevar a cabo las comunicaciones por varios enlaces (puede aumentar su coste), si sólo llevarlos a cabo si afectan a las comunicaciones más prioritarias, etc.

- **Mecanismos de priorización dinámicos**

El mecanismo de priorización implementado por el middleware de comunicaciones se basa en una serie de criterios divididos en dos categorías: estáticos y dinámicos. Si bien en esta primera aproximación del sistema sólo se ha incluido un criterio dinámico (los reintentos de comunicación), este sistema ofrece flexibilidad para incorporar nuevos criterios que permitan optimizar su comportamiento. Así, en futuras aproximaciones se podrían incluir nuevos criterios dinámicos que posibiliten la retroalimentación del sistema a partir de datos históricos con respecto a comportamientos previos, de manera que el middleware reconfigure la forma de priorizar las comunicaciones de acuerdo a esta información. Se trata por tanto de dotar de cierta inteligencia al sistema, para que “aprendiendo” de las diferentes circunstancias que se den a lo largo del tiempo, busque siempre la mejor configuración posible a la hora de priorizar las comunicaciones.

- **Control de retransmisiones de información**

El middleware implementa un mecanismo de control de admisión, de forma que pausa las comunicaciones que no puedan ser atendidas en un momento dado. Esto provoca, tal como está diseñado actualmente el sistema, que la reanudación de estas comunicaciones implique su reinicio, y por tanto la retransmisión de datos previamente transmitidos. Por ello, se propone como línea futura de trabajo el control de estas retransmisiones, de forma que en caso de que se produzca una pausa de una determinada petición, el sistema conozca el volumen de datos (número de bytes) que haya sido transmitido ya a su destino. De esta manera, a la hora de reanudar una comunicación pausada, el middleware indicaría a la aplicación origen de la comunicación desde qué punto iniciar en cada caso la transmisión de datos. Sin embargo, como esta forma de proceder deja de tener sentido para ciertos tipos de aplicaciones (por ejemplo para la descarga de video en tiempo real) que no requieren la retransmisión de datos, este hecho debería ser también parametrizado en el sistema.

- **Escalabilidad del sistema**

Por último, de cara al trabajo futuro queda pendiente la realización de pruebas de rendimiento del sistema que permitan evaluar su comportamiento dependiendo del número de vehículos que se estén comunicando a través del mismo. Son pruebas que sobre todo afectan a la escalabilidad del sistema desde el punto de vista del centro de control, que es donde se encuentra ubicado el elemento software del middleware, el Máster de Comunicaciones de Tierra (MCT), que toma todas las decisiones relativas a la priorización y gestión de las comunicaciones, y a través del cual se canalizan las comunicaciones vehículo-tierra que se estén llevando a cabo en cada momento.

6.4 Consideraciones finales

Las compañías de transporte vienen realizando fuertes inversiones durante los últimos años en acciones de innovación tecnológica con el propósito de mejorar la calidad de los servicios ofrecidos a sus clientes. Este hecho está permitiendo el establecimiento de comunicaciones inalámbricas entre los vehículos y los centros de gestión de estas compañías, facilitando el desarrollo y despliegue de nuevos sistemas de transporte inteligente (ITS).

Las últimas tendencias en torno a las redes de comunicaciones vaticinan que las futuras redes establecerán un entorno de acceso inalámbrico heterogéneo, que incluirá la coexistencia de múltiples tecnologías de acceso. En este contexto, conviene destacar la aparición, fuerte apoyo institucional e iniciativas de investigación puestas en marcha para el desarrollo de los futuros ITS cooperativos. En este ámbito destacan normativas como ETSI ITS y ISO/CALM, que han logrado definir un conjunto de estándares para las comunicaciones en entornos vehiculares con gran aceptación por parte del sector.

El trabajo de esta tesis ha aportado una solución innovadora en este campo, diseñada a nivel de capa de aplicación, con el objeto de establecer una plataforma para el despliegue de servicios inteligentes basados en comunicaciones vehículo a infraestructura de centro de control, de forma que se habilite un canal a través del cual las compañías de transporte pudieran beneficiarse de servicios de valor añadido que mejoren su labor en el día a día.

El ámbito de investigación abordado en esta tesis tiene aún un largo recorrido, ya que el avance en las telecomunicaciones y su aplicación para el desarrollo de nuevos servicios en el transporte abren un abanico amplio de posibilidades, tanto desde el punto de vista de las redes de comunicaciones, como desde el punto de vista de los sistemas de información que puedan desarrollarse a su alrededor. De aquí en adelante queda, por tanto, un extenso campo abierto a la investigación, que a buen seguro se traducirá en los próximos años en muchos avances al servicio de las personas.

Referencias Bibliográficas

- [Aguado+05] M. Aguado, E. Jacob, P. Saiz, J. Unzilla, M. Higuero and J. Matias, "Railway signaling systems and new trends in wireless data communications", Veh. Tech. Conference, pp. 1333-1336, Sep. 2005
- [Ahmad+08] I. Ahmad and D. Habibi, "A novel mobile WiMAX solution for higher throughput", in 16th IEEE International Conference on Networks, pp. 1-5, 2008
- [Albayrak+08] S. Albayrak, M. Elkotob and A.C. Toker, "Smart Middleware for Mutual Service-Network Awareness in Evolving 3GPP Networks", 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE), pp. 44-50, 2008
- [Aurrecoechea+02] C. Aurrecoechea, A.T. Campbell and Linda Hauw, "A survey of QoS architectures," IEEE Trans Inf Techn Biomed, 2002
- [Baig+04] A. Baig, M. Hassan, and L. Libman, "Prediction-based Recovery from Link Outages in On-Board Mobile Communication Networks", in Proceedings of IEEE Globecom, 2004
- [Beeby07] I. Beeby, "The Future for Terrestrial Wireless Services for the next Five Years: Myths and Realities for WiFi on Trains", Presented at the BWCS Train Communication Systems, 2007
- [Benzi+05] F. Benzi, G. S. Buja, and M. Felser, "Communication architectures for electrical drives," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 1, pp. 47-53, 2005
- [Bishop+03] T. A. Bishop, R. K. Karne, "A Survey of Middleware", Computers and Their Applications, pp. 254-258, 2003
- [Blake+98] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang and W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Services," RFC 2475, 1998.
- [Bondavalli+09] A. Bondavalli, A. Ceccarelli, J. Grpnbaek, D. Iovino, L. Karna, S. Klapka, T.K. Madsen, M. Magyar, I. Majzik and A. Salzo, "Design and Evaluation of a Safe Driver Machine Interface", International

- Journal of Performability Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 153-166, June 2009
- [BOSS12] Boss: On Board Wireless Secured Video Surveillance, <http://celtic-boss.mik.bme.hu/>, Accessed 2012
- [Braden+94] R. Braden, D. Clark, S. Shenker: "Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview," RFC 1633, 1994
- [Brun+06] O. Brun, C. Bockstal, and J. M. Garcia, "A simple formula for end-to-end jitter estimation in packet-switching networks," in Proceedings of the International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, ICN/ICONS/MCL'06, Morne, 2006
- [Brussel10] W. Van Brussel, "Bringing ICT services to trains: technical and economical challenges", 9th Conference on Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE), pp. 1-7, 2010
- [Bychkovsky+06] V. Bychkovsky, B. Hull, A. Miu, H. Balakrishnan, and S. Madden, "A measurement study of vehicular Internet access using in situ WiFi networks", in Proc. ACM MobiCom Conference, 2006
- [C2C12] Car-2-Car Communication Consortium, <http://www.car-2-car.org/>, Accessed 2012
- [Carballedo+10] R. Carballedo, I. Salaberria, A. Perallos, I. Odriozola and U. Gutierrez, "A backup System based on a decentralized positioning system for managing the railway traffic in emergency situations", on International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 285-290, 2010
- [Ceccarelli+08] A. Ceccarelli, I. Majzik, D. Iovino, F. Caneschi, G. Pinter and A. Bondavalli, "A Resilient SIL 2 Driver Machine Interface for Train Control Systems", Third International Conference on Dependability of Computer Systems (DepCoS-RELCOMEX), 2008
- [Chander+11] K. Chander and D. Juneja, "A Novel Approach for Always Best Connected in Future Wireless Networks", Global Journal of Computer Science and Technology, Vol. 11, Issue 15, Version 1.0, 2011
- [Chung+08] T. Chung, F. Yuan, "Extending Always Best Connected Paradigm for Voice Communications in Next Generation Wireless Network", IEEE, 2008

- [CORBA02] Object Management Group. The Common Object Request Broker: Architecture and Specification. OMG Technical Committee Document, 2002
- [CSWL08] California Software Labs, "Extending end-to-end QoS to WiFi based WLAN, CSWL whitepaper", <http://www.cswl.com/whitepapers/qos-wireless-lan.html>, 2008
- [Derksen+06] J. Derksen, R. Jansen, M. Maijala, and E. Westerberg, "HSDPA Performance and Evolution", Ericson Review, no. 03, pp. 117-120, 2006
- [Deshpande+09] P. Deshpande, A. Kashyap, C. Sung and S.R. Das, "Predictive Methods for Improved Vehicular WiFi Access", in Proc. of the 7th international conference on Mobile systems, applications, and services, pp. 263-276, New York, USA, 2009
- [Devaparalli+05] V. Devaparalli, R. Wakikawa, A. Petrescu and P. Thubert, "Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol", RFC3963, Jan. 2005
- [Drarwadkar+01] P. Dharwadkar, H.J. Siegel, E.K.P. Chong, "A Heuristic for Dynamic Bandwidth Allocation with Preemption and Degradation for Prioritized Requests", in Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'01), 2001
- [EC01] European Commission, "White paper: European transport policy for 2010: time to decide", Available: http://www.eurosfaire.prd.fr/7pc/doc/1131022490_livre_blanc_politique_transports_2010.pdf, Sep. 2001
- [Eijk+03] R. Eijk, J. Brok, J. Bommel and B. Busropan, "Access Network Selection in a 4G Environment and the Roles of Terminal and Service Platform", WWRF #10, New York, 2003
- [EMT08] EMT, Empresa Municipal de Transportes de Madrid, "Plan Estratégico Tecnológico 2008-2011", Madrid, 2008
- [Epstein+00] B.M. Epstein, M. Schwartz, "Predictive QoS-Based Admission Control for Multiclass Traffic in Cellular Wireless Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 3, 2000
- [Eriksson+08] J. Eriksson, H. Balakrishnan, and S. Madden, "Cabernet: A WiFi-Based Vehicular Content Delivery Network", in Proc. ACM MobiCom Conference, 2008
- [Ernst+07] R. Ernst, G. Spiegelberg, T. Weber, H. Kopetz, A. Sangiovanni-Vincentelli, and M. Jersak, "Automotive networks: Are new busses and gateways the answer or just another challenge?," in

- CODES+ISSS 2007: International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, Salzburg, pp. 263, 2007
- [ERTMS12] ERTMS – European Rail Traffic Management System, Available: http://ec.europa.eu/transport/rail/interoperability/ertms/ertms_en.htm, Accessed 2012
- [ETSI09] ETSI TR 102 638 V1.1.1. "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definition", 2009
- [ETSI10] ETSI EN 302 665, "Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture", Septiembre 2010
- [Fang+03] X. Fang and D. Ghosal, "Performance modeling and QoS evaluation of telemedicine in GSM/GPRS networks", IEEE International Conference Communications, vol. 1, pp. 271–275, 2003
- [Felser05] M. Felser, "Real-time ethernet - Industry prospective," Proceedings of the IEEE, vol. 93, pp. 1118-1129, 2005
- [Festag+08] A. Festag, et al., "NoW---Network on Wheels: Project Objectives, Technology and Achievements", in Proceedings of the 6th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), pp. 211-216, 2008
- [Fodor+03] G. Fodor, A. Eriksson, et al., "Providing Quality of Service in Always Best Connected Network", IEEE, 2003.
- [Fokum+10] D.T. Fokum and V.S. Frost, "A Survey on Methods for Broadband Internet Access on Trains", Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol. 12, no. 2, pp. 171-185, Second Quarter 2010
- [Fuehrer+07] T. Fuehrer and M. Piastowski, "Method, multimedia device for the transmission and/or reception of multimedia data via a data transmission system, and gateway for connecting a multimedia device to a data transmission system according to the Flexray standard.," Patent Cooperation treaty application, 2007
- [Gac+00] R. Gac et al., "Traffic and trend analysis of Local and Wide Area Networks for a distributed PACS implementation", International Society for Optical Engineering, vol. 3980, pp. 447–57, 2000
- [Gatti02] A. Gatti, "Trains as Mobile devices: the TrainCom Project", Wireless Design Conference, London, 2002
- [Gatti03] A. Gatti, "Trains as mobile devices, the Dynamic Insertion Network Object (DINO) concept, The EU TrainCom project approach", World Congress in Railway Research (WCRR), Edinburgh (Scotland), Oct. 2003

- [Gehlen+06] G. Gehlen, G. Mavromatis, "A Web Service based Middleware for Mobile Vehicular Applications", Vehicular Technology Conference (VTC), pp. 1-5, 2006
- [Ginis+04] R. Ginis and R. Strom, "An Autonomic Messaging Middleware with Stateful Stream Transformation", Proceedings of the International Conference on Automatic Computing, May. 2004
- [GMV08] GMV, 2008, Especificaciones funcionales del equipamiento embarcado de los trenes de la plataforma de comunicaciones embarcada, Oferta técnica
- [Gokhale+04] A. Gokhale, B. Natarajan, D. Schmidt and J. Cross, "Towards Real-Time Fault-Tolerant CORBA Middleware", Cluster Computing, 7(4), pp.331-346, 2004
- [Greenfield98] D.Greenfield, "ATM, the services are real. What about the savings", Data Communications, 27(2):48c-48j, 1998
- [Greve+05] F.D. Greve, et al., "FAMOUS: A Network Architecture for Delivering Multimedia Services to FAsT MOving USers", Wireless Personal Communications Volume 33, Numbers 3-4, pp. 281-304, 2005
- [Gronbaek08] J. Gronbaek, Tatiana K. Madsen, Hans Peter Schwefel, "Safe Wireless Communication Solution for Driver Machine Interface for Train Control Systems," icons, pp.208-213, Third International Conference on Systems (icons 2008), 2008
- [Guo+04] F. Guo, J. Chen, W. Li and T. Cker Chiueh, "Experiences in building a multihoming load balancing system", in Proc. of IEEE Infocom 2004, Hong Kong, China, Mar. 2004
- [Gustafsson+03] E. Gustafsson and A. Jonsson, "Always best connected. Wireless Communications", IEEE [see also IEEE Personal Communications], 10(1):49{55, Feb. 2003
- [Gutierrez+10] U. Gutierrez, I. Salaberria, A. Perallos, R. Carballedo, "Towards a Broadband Communications Manager to regulate train-to-earth communications", 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 1600-1605, 2010
- [Hablinguer04] G. Hablinguer, "Implications of Traffic Characteristics on Quality of Service in Broadband Multi Service Networks", Proceedings of the 30th EUROMICRO Conference, pp. 196-204, Sep. 2004
- [Hancock+04] J. Hancock, S. Draving, and Agilent_Technologies, "Jitter — Understanding it, Measuring It, Eliminating It - Part 2: Jitter Measurements," High Frequency Design, p. 6, -/05/2004 2004

Referencias Bibliográficas

- [Hardy02] W.C. Hardy, "QoS measurement and evaluation of telecommunications Quality of Service", Review R.Chodoreck, IEEE Communications Magazine, 40(2), pp. 30–32, 2002
- [Henderson07] T. Henderson. "End-Host Mobility and Multihoming with the Host Identity Protocol", Internet draft, March 2007
- [Henning+04] M. Henning, "A New Approach to Object-Oriented Middleware", IEEE Internet Computing, 8(1), pp.66-75, 2004
- [Hernández+11] S. Hernández, H. Moner, Gozalvez J., E. Armada, D. de la Fuente, M. Sepulcre. "INTEL VIA: Plataforma Inalámbrica Multi-Tecnología para la Señalización, Seguridad y Gestión de Infraestructuras Viales", en XXI JORNADAS TELECOM I+D, Santander, Septiembre, 2011
- [Huard+96] J. Huard et al., "Meeting QoS guarantees by end-to-end QoS monitoring and adaptation", IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, pp. 348–355, 1996
- [Hubert02] B. Hubert, "Linux Advanced Routing & Traffic Control HOWTO", Available: <http://lartc.org/howto/>, Jul. 2002
- [Hwang+08] I-Shyan Hwang, Bor-Jiunn Hwang, K. Robert Lai, Ling-Feng Ku, Chien-Chieh Hwang: Adaptive QoS-Aware Resource Management in Heterogeneous Wireless Networks. AINA Workshops, pp. 880-885, 2008
- [IAU06] IAU (Institut d'aménagement urbain), "note rapide n°418: sécurité et comportement", Available: http://www.iaurif.org/fileadmin/Etudes/etude_222/nr_418_CDS_dans_les_TC_idf.pdf, October 2006
- [Icomera12] Icomera, <http://icomera.com>, Accessed 2012
- [IEEE_P802.21] IEEE Std P802.21/D05.00, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Independent Handover Services". Technical report, April 2007
- [IETF12] Internet Engineering Task Force (IETF), <http://www.ietf.org/rfc/>, Accessed 2012
- [INTEL VIA12] INTEL VIA, <http://www.intel-via.org>. 2012
- [Janf+09] K. Janf, M. Han, S. Cho, H-K. Ryu, J. Lee, Y. Lee, and S. B. Moon, "3G and 3.5G Wireless Network Performance Measured from Moving Cars and High Speed Trains", in Proc. Of ACM MICNET 2009, Beijing, China, Aug. 2009

- [Jang+09] K. Jang, M. Han, S. Cho, H-K. Ryu, J. Lee, Y. Lee, and S. B. Moon, "3G and 3.5G Wireless Network Performance Measured from Moving Cars and High-speed Trains," in Proc. of MICNET, Beijing, China, 2009
- [Jeney+07] G. Jeney, C. Lamy-Bergot, X. Desurmont, R. Lopez da Silva, R. Álvarez García-Sanchidrián, M. Bonte, M. Berbineau, M. Csapodi, O. Cantineau, N. Malouch, D. Sanz and J.L. Bruyelle, "Communications Challenges in the Celtic-BOSS project", Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking Lecture Notes in Computer Science Volume 4712, pp. 431-442, 2007
- [Jeney+09] G. Jeney, L. Bokor and Z. Mihály, "GPS Aided Predictive Handover Management for Multihomed NEMO Configurations", 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), pp. 69-73, 2009
- [Johnson+04] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko, "Mobility Support in IPv6". RFC 3775 (Proposed Standard), June 2004
- [Jooris+05] B. Jooris et al., "Mobile Communication and Service Continuity in a Train Scenario", Presented at the 12th Symposium on Communications and Vehicular Technology in the BENELUX, 2005
- [Karagiannis+11] G. Karagiannis, et al., "Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions", IEEE Communication Surveys & Tutorials, pp. 584-616, 2011
- [Karlsson+02] M. Karlsson, M. Bergek, M. Agervald and K. Axelsson, "A System for Data Transmission via Several Communication Routes", European Patent EP1175757B1, Jan. 2002
- [Keskin09] U. Keskin, "In-vehicle communication networks: a literature survey", Available: <http://alexandria.tue.nl/repository/books/652514.pdf>, 2009
- [Kita+09] N. Kita, T. Ito, S. Yokoyama, T. Ming-Chien, Y. Sagawa, M. Osagawara, and M. Nakatsugawa, "Experimental study of propagation characteristics for wireless communications in high-speed train cars", in 3rd European Conference on Antennas and Propagation, pp. 897-901, 2009
- [Kleinman10] S. Kleinman, "Control Network Traffic with Iptables", Available: <http://library.linode.com/security/firewalls/iptables>, 2010
- [Koenders+08] E. Koenders, J. Vreeswijk. "Cooperative Infrastructure", Proc. 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Eindhoven, 2008

- [Konstantas+02] D. Konstantas, V. Jones, and R. Herzog, "Mobihealth –innovative 2.5/3g mobile services and applications for healthcare. In Proc. of the 11th IST Mobile and Wireless Communications Summit, Thessaloniki, Greece, June 2002
- [Kurowski+12] S. Kurowski, J. Zibuschka, H. Roßnagel and W. Engelbach, "A Concept for Interoperability of Security Systems in Public Transport", Proceedings of the 9th International ISCRAM Conference, 2012
- [Lai+01] K. Lai and M. Baker, "Nettimer: A Tool for Measuring Bottleneck Link Bandwidth", in Proc. of the USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems, San Francisco, CA, USA, Mar. 2001
- [Lamy-Bergot+09] C. Lamy-Bergot, S. Ambellouis, L. Khoudour, D. Sanz, N. Malouch, A. Hocquard, J-L. Bruyelle, L. Petit, A. Cappa, A. Barro, E. Villalta, G. Jeney and K. Egedy, "Transport system architecture for on board wireless secured A/V surveillance and sensing", 9th Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), pp. 564-568, 2009
- [Lan+07] K. Lan, S. Hanhere, G. Setiwan, S. Iskandar and Z.M. Wu, "Feasibility Study for Using Mobile Gateways in Public Transportation Vehicles for ITS Applications", in V2VCOM 2007, Jun. 2007
- [Lanoo+07] B. Lannoo, J. Van ooteghem, D. Pareit, T. Vam Leeuwen, D. Colle, I. Moerman and P. Demeester, "Business model for broadband internet on the train", The Journal of The Institute of Telecommunications Professionals, 1, pp. 19-27, 2007
- [LARTC12] Linux Advanced Routing & Traffic Control, <http://www.lartc.org>, <http://tcng.sourceforge.net>, Accessed 2012
- [Leen02] G. Leen and D. Hafferman, "Expanding automotive electronic system", In-Vehicle Networks, IEEE, pp. 88-93, 2002
- [Leijonhufvud01] G. Leijonhufvud, "Multi access networks and Always Best Connected, ABC", MMC Workshop, Nov. 2001
- [Leohold04] J. Leohold, "Communication requirements for automotive systems", Keynote presentation, WFCS 2004, 5th IEEE Workshop on Factory Communication Systems, pp. 22-24, 2004
- [Lim+09] W. Lim, D. Kim, Y. Suh and J. Won, "Implementation and performance study of IEEE 802.21 in integrated IEEE 802.11/802.16e networks", Comput. Commun. 32, 1, pp. 134-143, Jan. 2009

- [Marrero+08] D. Marrero, E.M. Macías, and A. Suárez, "An admission control and traffic regulation mechanism for infrastructure WiFi networks", *IAENG International Journal of Computer Science*, Vol. 35, Issue 1, pp. 154-160, ISSN: 1819-656X, 2008
- [Martínez06a] I. Martínez, "Contribuciones a Modelos de Tráfico y Control de QoS en los Nuevos Servicios Sanitarios Basados en Telemedicina", Tesis Doctoral, 2006
- [Martínez06b] A.M. Martínez, "El autobús en red (e-bus)", *Revista ITS, Sistemas Inteligentes de Transporte*, Número 3, pp. 37-40, 2006
- [Martins+08] R. Martins, L. Lopes and F. Silva, "A Peer-to-Peer Middleware Platform for Fault-Tolerant, QoS, Real-Time Computing", *Proceedings of the 2nd workshop on Middleware-Application Interaction (MAI)*, pp. 1-6, 2008
- [Martins12] R. Martins, "On the Integration of Real-Time and Fault-Tolerance in P2P Middleware", PhD in Computer Science, 2012
- [Mendonca+12] M. Mendonca, K. Obraczka and T. Turetti, "The Case for Software-Defined Networking in Heterogeneous Networked Environments", *Proceedings of the 2012 ACM conference on CoNEXT student workshop*, pp. 59-60, 2012
- [Moniak+07] G. Moniak, E. Masson, H. Dumortier, M. Berbineau and A. Rivenq, "Robust and High Data Rate Wireless Link for Security Between a Bus and a Control Centre", *Proc. of IEEE VTC-2007 Fall*, pp. 1426-1430, Sept-Oct. 2007
- [Murray+03] K. Murray, R. Marthur, D. Pesch, "Network access and handover control in heterogeneous wireless networks for smart space environments", *First International Workshop on Management of Ubiquitous Communications and Services (MUCS)*, 2003
- [Natarajan+00] B. Natarajan, A. Gokhale, S. Yajnik and D. Schmidt, "DOORS: Towards High-Performance Fault Tolerant CORBA", in *Proceedings of International Symposium on Distributed Objects and Applications (DOA)*, pp. 39-48, 2000
- [Navet+05] N. Navet, Y. Song, F. Simonot-Lion and C. Wilwert, "Trends in automotive communication systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, No. 6, pp. 1204-1224, 2005
- [Nelson+00] Nelson and Donna C., "Intelligent Transportation Primer, Institute of Transportation Engineers, Washington, D.C. pp. 10-1. ISBN 0-935403-45-0 pp. 1-9, 2000

- [NEMO12] NEMO Working Group, <http://www.ietf.org/html.charters/nemo-charter.html>, Accessed 2012
- [Netfilter12] Netfilter/Iptable Project Homepage, <http://www.netfilter.org/projects/iptables/>, Accessed 2012
- [NetLimiter12] Net Limiter, <http://www.netlimiter.es>, 2012
- [Nicholson+08] A.J. Nicholson and B.D. Noble, "BreadCrumbs: Forecasting Mobile Connectivity", in Proc. of ACM MobiCom 2008, San Francisco, CA, USA, Sep. 2008
- [Nieva+00] T. Nieva, A. Fabri, A. Benammour, "Jini Technology Applied to Railway Systems", Proceedings of the 2nd International Symposium on Distributed Objects and Applications (DOA'00), Antwerp (Belgium), Sept. 2000
- [Nieva+01] T. Nieva, A. Fabri, A. Wegmann, "Remote Monitoring of Railway Equipment Using Internet Technologies", Technical report No. DSC/2001/18, Apr. 2001
- [NLANR/DAST12] NLANR/DAST: Iperf 1.7.0 – The TCP/UDP Bandwidth Measurement Tool, <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>, <http://iperf.sourceforge.net/>, Accessed 2012
- [Okabe+05] T. Okabe, T. Shizuno and T. Kitamura, "Wireless LAN Access Network System for Moving Vehicles", 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp. 211-216, 2005
- [OMG02] Object Management Group, "Fault Tolerant CORBA Specification", OMG Technical Committee Document, 2002
- [OMG05] Object Management Group. Real-time CORBA Specification. OMG Technical Committee Document, 2005
- [Ormont+08] J. Ormont, J. Walker, S. Banerjee, A. Sridharan, M. Seshadri, and S. Machiraju, "A City-Wide Vehicular Infrastructure for Wide-area Wireless Experimentation", in Proc. of WinTech, San Francisco, 2008
- [Ott+05] J. Ott and D. Kutscher, "A disconnection-tolerant transport for drive-thru Internet environments", in Proc. IEEE Infocom Conference, 2005
- [Ott+06] J. Ott and D. Kutscher, "A modular access gateway for managing intermittent connectivity in vehicular communications," European Transactions on Telecommunications, vol. 17, no. 2, pp. 159-174, 2006
- [Pang+09] J. Pang, B. Greenstein, M. Kaminsky, D. McCoy, and S. Seshan, "Wifi-Reports: Improving Wireless Network Selection with

- Collaboration", in Proc. of ACM MobiSys 2009, Krakow, Poland, Jun. 2009
- [Papadimitratos+06a] P. Papadimitratos, V. Gligor, J-P. Hubaux, "Securing Vehicular Communications-Assumptions, Requirements and Principles", Workshop on Embedded Security in Cars (ESCAR), p. 5-14, 2006
- [Papadimitratos+06b] P. Papadimitratos, A. Kung, J-P. Hubaux, and F. Kargl, "Privacy and Identity Management for Vehicular Communication Systems: a Position Paper", Workshop on Standards for Privacy in User-Centric Identity Management, 2006
- [Pareit+07] D. Pareit et al, "QoS-enabled Internet-on-train network architecture: inter-working by MMP-SCTP versus MIP", in 7th International Conference on ITS Telecommunications (ITST'07), Sophia Antipolis, pp. 1-6, 2007
- [Pareit+12] D. Pareit, et al, "A novel network architecture for train-to-wayside communication with Quality of Service over heterogeneous wireless networks", in press for EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012
- [Pavlopoulos+98] S. Pavlopoulos, E. Kyriacou, A. Berler, S. Dembeyiotis, and D. Koutsouris. "A novel emergency telemedicine system based on wireless communication technology-ambulance", in Proc. of Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, 2(4): 261-267, Dec. 1998
- [Perallos+12] A. Perallos, I Salaberria, R. Carballedo, I.J. García, U. Hernández and I. Angulo, "Towards a Safer Railway Traffic Management Methodology based on a Backup Decentralized Wireless Positioning System", Journal of Modern Traffic and Transportation Engineering Research (MTTER), Vol. 1, pp. 1-8, 2012
- [Perera+06] E. Perera, H. Petander and A. Seneviratne, "Bandwidth fuelling for network mobility", in International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, pp. 1-5, 2006
- [Perkins02] C. Perkins, "IP Mobility Support for IPv4". RFC 3344 (Proposed Standard), August 2002. Updated RFC 4721
- [PointShot12] PointShot Wireless, <http://pointshotwireless.com>, Accessed 2012
- [PREDRIVE09] PRE-DRIVE C2X "Deliverable D1.2 Refined Architecture", Febrero 2009
- [Ramesh+10] H.S. Ramesh Babu, Gowrishankar, P.S. Satyanarayana, "An Intelligent Call Admission Control Decision Mechanism for Wireless Networks", Journal of Computing, Volume 3, Issue 4, 2010

- [Rodriguez+04] P. Rodriguez, R. Chakravorty, J. Chesterfield, I. Pratty, and S. Banerjee, "MAR: A Commuter Router Infrastructure for the Mobile Internet", in Proc. of ACM Mobisys, Jun. 2004
- [RootWireless12] Root Wireless, <http://rootwireless.com/>, Accessed 2012
- [Rosenberg+02] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, and E. Schooler. "SIP: Session Initiation Protocol". RFC 3261 (Proposed Standard), June 2002. Updated by RFCs 3265, 3853, 4320, 4916
- [Rosi+08] U.T. Rosi, C.S. Hyder, T. Kim, "A Prioritized Service Protocol for Vehicular Communication", Second International Conference on Future Generation Communication and Networking (FGCN), vol. 1, pp. 337-342, 2008
- [Rovcanin+11] M. Rovcanin, D. Naudts, D. Pareit, E. Van de Velde, J. Bergs, I. Moerman and C. Blondia, "Data traffic differentiation and QoS on the train, in fast parameter varying, heterogeneous wireless networks", 18th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), pp. 1-6, Nov. 2011
- [SAFEDMI07] SAFEDMI, Deliverable D3.1 - Wireless communication architecture and protocols, Preliminary Version, 2007
- [SAFEDMI12] SAFEDMI, Safe Driver Machine Interface (DMI) for ERTMS automatic train control, http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/safedmi_en.htm, Accessed 2012
- [Salaberria+09] I. Salaberria, R. Carballado, U. Gutierrez, A. Perallos, "Wireless Communications Architecture for 'Train-to-Earth' Communication in the Railway Industry", 10th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, pp. 625-633, 2009
- [Salaberria+12a] I. Salaberria, R. Carballado and Asier Perallos, "Towards a Service Based on 'Train-to-Earth' Wireless Communications for Remotely Managing the Configuration of Applications Inside Trains", DCAI, volume 151 of Advances in Soft Computing, pp. 103-111. Springer, 2012
- [Salaberria+12b] I. Salaberria, R. Carballado and Asier Perallos, "Wireless Technologies in the Railway: Train-to-Earth Wireless Communications", ISBNCO: 978-953-51-0189-5, pp. 469-492, 2012
- [Sanmateu+02] A. Sanmateu et al., "Seamless Mobility across IP Networks Using Mobile IP", int'l J. Computers and Telecommunications Networking, vol. 40, pp. 181-190, 2002

- [Sanz+08] D. Sanz, V. Delcourt, O. Gatin, M. Berbineau, S. Ambellouis and L. Khoudour, "BOSS: intelligent embedded video surveillance system with real-time transmission of video to the control centre", 8th World Congress on Railway Research, Seoul, Korea, May. 2008
- [Schmidt+00] D. Schmidt and F. Kuhns. "An Overview of the Real-Time CORBA Specification", IEEE Computer, 33(6), pp. 56-63, 2000
- [Schmidt99] D. Schmidt, "An Architectural Overview of the ACE Framework", USENIX Association newsletter, 24(1), 1999
- [Schweppe+10] H. Schweppe and Y. Roudier, "Security issues in vehicular systems: threats, emerging solutions and standards", 5th Conference on Network Architectures and Information Systems Security, 2010
- [Seitz03] N. Seitz, "ITU-T QoS standards for IP-based networks," IEEE Communications Magazine, 41(6):82-89, 2003
- [Sichitiu+08] M.L. Sichitiu and M. Kihl, "Inter-vehicle communication system: A survey", IEEE Communications Surveys, 10(2), pp. 88-105, 2008
- [Steinberg04] D.H. Steingberg, "Jini: Out of the Bottle and Into the Box", Available: <http://onjava.com/pub/a/onjava/2004/12/29/jini.html>, 2004
- [Steuer+08] F. Steuer, T. Geithner, T. Kashchwig, K. Bür, S. Albayrak, "A Connectivity Management System for Vehicular Telemedicine Applications in Heterogeneous Networks", in Proc. of ACM Tridentcom, Innsbruck, Austria, March 2008
- [StrokeNet07] StrokeNet Project – Networked Intelligence for Holistic Stroke Treatment, <http://strokenet.de> [Online; accessed November 2007]
- [Stübing+10] H. Stübing, et al. "simTD: A Car-to-X System Architecture for Field Operational Tests", IEEE Communications Magazine, vol. 48, Issue 5, pp. 148-154, Mayo 2010
- [Teraoka+07] F. Teraoka, K. Gogo, K. Mitsuya, R. Shibui, and K. Mitani. "Unified l2 abstractions for l3-driven fast handover", Internet draft, February 2007
- [Tolly94] K. Tolly, "Networked multimedia: How much bandwidth is enough?", Data Communications, 23(8):44-51, 1994
- [TrainCom+04] TrainCom, "Integrated Communication System for Intelligent Train Applications", <http://www.traincom.org/>, 2004
- [Tso+09] F.P. Tso, L. Zhang, J. Tengy, W. Jia, D. Xuany, and F. Xhang, "An Empirical Evaluation on the Performance of Mobile HSPA Networks", Technical Report, Dept of CS, City University of Hong Kong, Jul. 2009

- [Tso+10] F. P. Tso, J. Teng, W. Jia, and D. Xuan, "Mobility: a double-edged sword for hspa networks: a large-scale test on hong kong mobile hspa networks," in *MobiHoc 2010*, 2010
- [Umiliacchi+97] P. Umiliacchi and C. Pentimalli, "ROSIN - TR 1045 – Summary of the Specification and Development Work", Available: http://cordis.europa.eu/telematics/tap_transport/library/rosin-d1-3.html, 1997
- [Urquiola+12] G. Urquiola, A. Perallos and R. Carballedo, "Continuous Broadband Communication System Base don Existing Open Source Network Tools for Vehicular Environments", *Intelligent Transportation System Conference*, 2012
- [Vanem+03] E. Vanem, S. Svaet, F. Paint, "Effects of multiple access alternatives in heterogeneous wireless networks", *IEEE Wireless and Networking*, pp. 1696-1700, 2003
- [Velastrin+04] S.A. Velastrin, L. Khoudour, B.P.L. Lo, J. Sun and M.A. Vicencio-Silva, "PRISMATICA: a multi-sensor surveillance system for public transport networks", *Proc. of IEE RTIC 2004*, pp. 19-25, April 2004
- [Verstrepen+10] L. Verstrepen, W. Joseph, E. Tanghe, J. Van Ooteghem, B. Lannoo, M. Pickavet, L. Martens and P. Demeester, "Maiking a well-founded choice of the wireless technology for train-to-wayside data services", *9th Conference on Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE)*, pp. 1-7, 2010
- [Vidales+09] P. Vidales, A. Menecke and M. Solariski, "Metropolitan Public WiFi Access Base don Broadband Sharing", *Mexican International Conference on Computer Science*, pp. 146-151, Sept. 2009
- [Wang+00] W. Wang, KR. Subramanian, L. Zhang and JH. He, "Medical imaging transmission for telemedicine over ATM networks", *Applied Telecommunications Symposium*, pp. 267–72, 2000
- [Wang+04] X.G. Wang, J.E. Mellor and G. Min, "A QoS-based bandwidth management scheme in heterogeneous wireless networks", *International Journal of Simulation Systems, Science and Technology*, ISSN: 1473-8031, 5 (1-2), pp. 9-17, 2004
- [Weimerskirch+06] A.Weimerskirch, C.Paar, M.Wolf: "Secure In-Vehicle Communication", Chapter in *Embedded Security in Cars*, K.Lemke, C.Paar, M.Wolf (Eds.), Springer-Verlag, 2006.
- [Wroclawski99] J. Wroclawski, "The use of RSVP with IETF Integrated Services," *RFC 2210*, 1999.

- [Wu+02] G. Wu et al., "MIRAI Architecture for Heterogeneous Networks", IEEE Comm., vol. 40, no. 2, pp. 126-134, 2002
- [Yao+08] J. Yao, S.S. Kanhere and M. Hassan, "An Empirical Study on Bandwidth Predictability in Mobile Computing", in Proc. of IEEE ACM WinTech 2008, San Francisco, CA, USA, Sept. 2008
- [Yao+09] J. Yao, S.S. Kanhere, and M. Hassan, "Geo-intelligent Traffic Scheduling for Multi-homed On-Board Networks", in Proc. of ACM MobiArch09, Krakow, Poland, Jun. 2009
- [Yao+10] J. Yao, S.S. Kanhere and M. Hassan, "Quality Improvement of Mobile Video Using Geo-intelligent Rate Adaptation", IEEE Wireless Communications and networking Conference (WCNC), pp. 1-6, 2010
- [Yao+11] J. Yao, S.S. Kanhere and M. Hassan, "Mobile Broadband Performance Measured from High-Speed Regional Trains", 74th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2011-Fall), 5-8, San Francisco, USA. Sep 2011
- [Yao+12] J. Yao and M. Hassan, "Improving QoS in High-Speed Mobility Using Bandwidth Maps", in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 11, pp. 603-617, April 2012
- [Yener01] B. Yener, "Smartbox: An add-on solution for guaranteed QoS", USENIX Special Workshop on Intelligence at the Network Edge, pp. 429-434, 2001
- [Yiping+07] C. Yiping and Y. Yuhang, "A New 4G Architecture Providing Multimode Terminals Always Best Connected Services", IEEE Wireless Communications, 2007
- [Yiping+08] Y. Chen, C. Deng, "Access Discovery in Always Best Connected Networks", IEEE, 2008
- [Zhu+09] H. Zhu, R. Lu, X. Shen, and X. Lin, "Security in service-oriented vehicular networks", IEEE Wireless Communication Magazine, 16(4), pp. 16-22, 2009
- [Zitterbart+03] M. Zitterbart et al., "IPonAir – Drahtloses Internet des nächsten Generation", PIK, vol. 26, no. 4, Oct. 2003