

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Interoperabilidad en el futuro ecosistema europeo de ciudades inteligentes

TESIS DOCTORAL

**Víctor Fernández Pallarés**

Dirección:

**Dr. Juan Carlos Guerri Cebollada**

**Dra. Alicia Roca Martínez**

Valencia, España

Abril 2018

# Abstract

Sustainable development of urban areas is a challenge of highest interest at global level. Never before could anyone have thought of the information as an asset of our society. The advent of the new technologies have provided us with a huge amount of unthinkable resources to manage the data generated by the city and make urban areas evolve.

Nowadays a proper management of the city will depend on the continent, the amount and nature of the data and the resources and infrastructures to be taken into account. This is the beginning of what will make the current concept of city change. The new model of the city we will face is due to a higher connectivity and interaction, without human intervention, among all the services that determine an urban centre. This is an approach to what would be the 'intelligent city' or SmartCity. To develop this concept, a feature of paramount importance is the mobility of the elements that form it and make it live, as it is what supports the daily routine in the urban model. A very important element in this context is the electric vehicle (FEV, '*Full Electric Vehicle*'), for all the reasons we see in our work. For a proper launching of the FEV it is necessary to integrate it with the rest of infrastructures that influence the mobility in the city.

Our work has consisted of researching and designing an interoperability solution to manage the use of the FEV in the urban landscape.

The first of our goals in this work is to put the FEV in place into the SmartCity. To achieve it, it is required to study the most relevant parts of a centralised information system in order to manage the vehicle autonomy, the energy demand in the city, the energy availability in each charge station and a user interface to communicate with the system. Moreover, the system will be able to manage, in a proactive way, the needs of the network in order to optimise costs and improve efficiency.

On the other hand, the second of our objectives is to study how the factors involved in the mobility within the SmartCity can ensure that FEV mobility is carried out as planned and, with it, conveniently integrate the FEV in the urban mobility system. In other words, our aim is to integrate the FEV management landscape, studied in the first part, with the other agents of mobility into the SmartCity, thus providing a comprehensive solution to the problem of integration of the FEV in the new European cities ecosystem. This requires optimizing the interaction between the FEV and the meteorological information, traffic and mobility services in the city such as public transport, parking and e-sharing, in addition to a necessary traffic forecasting strategy for the early decision-making.

# Resumen

El desarrollo sostenible de las zonas urbanas es un reto de alto interés a nivel mundial. En los años 70 nadie podía haber pensado en la información como un activo de nuestra sociedad. Hoy en día las nuevas tecnologías ponen a nuestro alcance una ingente cantidad de recursos impensable para manejar todos los datos generados por la ciudad. Una gestión adecuada de la ciudad dependerá del continente, de la cantidad y de la naturaleza de los datos y de los recursos e infraestructuras a tener en cuenta. Esto es el inicio de lo que puede hacer cambiar el concepto actual de ciudad permitiendo una mayor conectividad e interacción autónoma, sin intervención humana, entre todos los servicios que caracterizan un núcleo urbano, aproximándonos de este modo a lo que sería la 'ciudad inteligente' o SmartCity. Para desarrollar este concepto, una característica de gran importancia que debe tenerse en cuenta es la **movilidad** de los elementos que la componen y le dan vida, pues es aquello que permite el día a día en el núcleo urbano. Un elemento muy importante en este contexto es el **vehículo eléctrico** (*FEV*, '*Full Electric Vehicle*'), por todas las razones que vemos en nuestro trabajo. Para una adecuada puesta en marcha del FEV es necesario integrarlo con el resto de infraestructuras que influyen en la movilidad en la ciudad. Esto permitirá hacer realidad ese nuevo modelo urbano inteligente que pretendemos alcanzar y que es nuestro futuro.

Nuestro trabajo ha consistido en investigar y diseñar una solución de interoperabilidad que gestione la utilización del FEV en un entorno urbano, aprovechando las infraestructuras existentes, optimizando los recursos de que disponemos, e integrando las posibilidades de comunicación que las TIC nos ofrecen.

Nos planteamos dos objetivos en nuestro trabajo, el primero de los cuales es integrar y poner en marcha el FEV en la SmartCity. Para ello hemos necesitado estudiar las partes más relevantes de un sistema de información centralizado para controlar la autonomía del FEV en la SmartCity, prever la demanda de energía a la red (es decir, estimar la energía total que tendrá que disponer inicialmente la red para atender la posible demanda de energía), controlar la disponibilidad neta de energía en las estaciones de carga de la red y finalmente diseñar el proceso de gestión activa de la demanda que permita optimizar el consumo energético y los precios.

Por otra parte, el segundo de nuestros objetivos consiste en estudiar cómo los factores que intervienen en la movilidad dentro de la SmartCity pueden garantizar que el desplazamiento del FEV se lleve a cabo según lo planificado y con ello integrar adecuadamente los FEV en el sistema de movilidad urbano. Es decir, se trata de integrar el entorno de gestión del FEV, estudiado en la primera parte, con el entorno externo al FEV en la SmartCity, proporcionando así una solución global al problema de integración del FEV en el nuevo ecosistema de ciudades europeas. Para ello se requiere optimizar la interacción entre el FEV y los servicios de información meteorológica, de tráfico y de movilidad en la ciudad como son el transporte público, el estacionamiento y el alquiler (*e-sharing*), además de una necesaria estrategia de predicción del tráfico para la toma anticipada de decisiones.

# Resum

El desenvolupament sostenible de les zones urbanes és un repte d'alt interès a nivell mundial. Fins els anys 70 ningú podia haver pensat en la informació com un actiu de la nostra societat. Avui en dia les noves tecnologies posen al nostre abast una ingent quantitat de recursos impensable per a gestionar totes les dades generades per la ciutat. Una gestió adequada de la ciutat dependrà del continent, de la quantitat i de la naturalesa de les dades i dels recursos i infraestructures a tenir en compte. Això és l'inici del que pot fer canviar el concepte actual de ciutat permetent una major connectivitat i interacció autònoma, sense intervenció humana, entre tots els serveis que caracteritzen un nucli urbà, aproximant d'aquesta manera el que serà la 'ciutat intel·ligent' o SmartCity. Per desenvolupar aquest concepte, una característica de gran importància que cal tenir en compte és la mobilitat dels elements que la componen i li donen vida, ja que és allò que permet el dia a dia al nucli urbà. Un element molt important en aquest context és el vehicle elèctric (FEV, '*Full Electric Vehicle*'), per totes les raons que veiem al nostre treball. Per a una adequada posada en marxa del FEV cal integrar-lo amb la resta d'infraestructures que influeixen en la mobilitat a la ciutat. Això permetrà fer realitat aquest nou model urbà intel·ligent que pretenem assolir. És sense dubte el nostre futur. El nostre treball ha consistit en investigar i dissenyar una solució d'interoperabilitat que gestione la utilització del FEV en un entorn urbà, aprofitant les infraestructures existents, optimitzant els recursos de què disposem, i integrant les possibilitats de comunicació que les TIC ens ofereixen.

Ens plantegem dos objectius en el nostre treball, el primer dels quals és integrar i posar en marxa el FEV a la SmartCity. Per a això hem necessitat estudiar les parts més rellevants d'un sistema d'informació centralitzat per controlar l'autonomia del FEV a la SmartCity, preveure la demanda d'energia a la xarxa (és a dir, estimar l'energia total que haurà de disposar inicialment la xarxa per atendre la possible demanda d'energia), controlar la disponibilitat neta d'energia a les estacions de càrrega de la xarxa i finalment dissenyar el procés de gestió activa de la demanda que permeti optimitzar el consum energètic i els preus.

D'altra banda, el segon dels nostres objectius consisteix a estudiar com els factors que intervenen en la mobilitat dins de la SmartCity poden garantir que el desplaçament del FEV es dugui a terme segons el planificat i amb això integrar adequadament els FEV en el sistema de mobilitat urbà. És a dir, es tracta d'integrar l'entorn de gestió del FEV, ja estudiat en la primera part, amb l'entorn extern al FEV a la SmartCity, proporcionant així una solució global al problema d'integració del FEV en el nou ecosistema de ciutats europees. Per a això es requereix optimitzar la interacció entre el FEV i els serveis d'informació meteorològica, de trànsit i de mobilitat a la ciutat com són el transport públic, l'estacionament i el lloguer (e-sharing), a més d'una necessària estratègia de predicció del trànsit per a la presa anticipada de decisions.

# Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado estos años durante el desarrollo de esta investigación.

En especial, quiero agradecer profundamente los consejos y la transmisión de su saber hacer a mis directores, el Dr. Juan Carlos Guerri y la Dra. Alicia Roca. Su guía, sus recomendaciones, sus críticas y su apoyo han sido de enorme valor y motivación para llegar al final de la presente tesis.

Nada de esto hubiese sido posible si no hubiera habido personas tan importantes en mi vida que, con su ilusión y afecto por mi -y lo que estaba creciendo dentro de mi-, me han llevado a ello. Me estoy refiriendo a personas que vieron en mi la posibilidad de trabajar aquel que ha sido siempre mi mejor activo, mi capacidad de razonamiento, mi intuición y el aprender a aprender. Estaré eternamente agradecido a estas personas que, tras muchos años de luchar contra un carácter especialmente rudo, el mío, consiguieron poco a poco, tras cada etapa de mi vida, hacerme ver la realidad y llegar al cierre de esta nueva etapa. Me estoy refiriendo, por orden temporal, a:

(i) D. Servando Fernández y Dña. M<sup>a</sup> Pilar Pallarés, mis primeros maestros, además de padres. Ellos, con su enorme comprensividad y su afán de cuidar a su familia, consiguieron transmitirme ese saber ser e imponerme las bases sin las cuales hubiese sido imposible avanzar desde mi etapa en Primaria. A ellos debo bases lógicas de razonamiento, iniciadas con aquellos cuadernos Rubio con que Servando me insistía (y nos peleábamos, discutiendo sobre resolución de problemas analíticos) cada día después del colegio y antes de comer, o las bases de mi capacidad de estudio, a que M<sup>a</sup> Pilar me llevó con nuestros repasos nocturnos, con temas como los que llamábamos “los cinco sentidos o los puntos cardinales” que, si bien quedan para el recuerdo en nuestras mentes, están y estarán presentes todos los días de lo que me quede de vida.

(ii) D. Manuel Marqués, mi maestro de Matemáticas por excelencia, además de profesor y mi preparador de Olimpiadas Matemáticas, con quien gané mis primeros premios a nivel

regional y nacional. Gracias a ti, Manuel, por ese momento en el Instituto en que me enseñaste que las matemáticas no son tan fáciles como yo pensaba, sino más, pero teniendo en cuenta que siempre se pueden complicar para suspender a cualquiera. Gracias a ti, Manuel, por enseñarme que lo importante no es el contenido sino la perseverancia y las ganas de avanzar, que “la única forma de aprender a integrar es integrando” y que “no tengo por qué demostrar ya nada a nadie a partir de este momento”, según tus propias palabras. Gracias a ti, Manuel, por la ilusión, por ese saber hacer que me transmitiste y por toda la base matemática que dejaste tan bien implantada en el fondo de mi ser para siempre y que conservaré mientras tenga uso de razón.

(iii) Dña. Alicia Roca, mi primera profesora al llegar al mundo universitario, compañera de multitud de trabajos empresariales y experiencias en proyectos de Telecomunicación (con quien gané el Premio Nacional al Mejor Proyecto Fin de Carrera, entre otros), además de maestra, amiga y buena consejera desde que inicié mi carrera. A ti, Alicia, debo todo aquello que reforzó las enseñanzas de Manuel (durante mis estudios superiores, en la Universidad). Me gustaría destacar tu saber pensar, tu saber entrever lo que puede llegar a ocurrir y la capacidad de intuición que me transmitiste. Sinceramente creo que todavía no he conseguido alcanzar esa grandísima capacidad tuya de saber intuir el porqué de ciertas cosas. Pero estoy en camino, espero, y fruto de ello es el presente trabajo.

Gracias a Javier Frasset, amigo, alumno y profesor a la vez, compañero de trabajo, aventuras y desventuras, cuyo apoyo y consejo han sido cruciales en nuestras distintas experiencias y proyectos, así como para el desarrollo de la presente tesis. Asimismo gracias también a José Rafael Romero, amigo y excelente profesional, por compartir sus conocimientos en 'Computer Science' y por discutir sus experiencias en desarrollo de sistemas, que sin duda han sido un apoyo fundamental en nuestros trabajos desde la etapa de mi Proyecto Final de Carrera.

Gracias a mi hermana Araceli que ha estado presente durante todo este tiempo brindándome apoyo. Gracias al resto de mi familia, especialmente a mis abuelos Servando y María, y Jacinto y Pilar, que aunque ya no estén con nosotros, mucho les debo por su amor y apoyo incondicional siempre. También gracias a mi hasta ahora novia M<sup>a</sup> José, su apoyo y cariño, aunque también su rebeldía, han sido parte de mi fuerza y motivación de cada día, aunque de vez en cuando también ha supuesto mi pérdida de atención.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a D. Juan Carlos Guerri, tutor, profesor y amigo, y al Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, por permitirme llevar a cabo el presente trabajo y poner a mi disposición todas las facilidades que pude necesitar.

Finalmente también mi agradecimiento a la Comisión Europea de Evaluación de Proyectos del Séptimo Programa Marco (FP7) de I+D+i, en Bruselas, por el apoyo brindado mediante la financiación de todos los proyectos que constituyeron el contexto de trabajo para realizar este trabajo de tesis doctoral.

*«Let the future tell the truth, and evaluate each one according to his work and accomplishments»*

~ Nikola Tesla (1856-1943)

*«El futuro mostrará los resultados y juzgará a cada uno de acuerdo a sus logros»*

A mis padres y abuelos.

# Contenidos

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
1.1 Objetivo A: Integración del FEV en la SmartCity.....	20
1.2 Objetivo B: Sistema de movilidad en la SmartCity .....	22
1.3 Estándares de aplicación y otras consideraciones.....	24
1.4 Resultados obtenidos.....	24
1.5 Entorno de investigación: Séptimo Programa Marco I+D+i Europa.....	26
1.5.1 Organización de los proyectos FP7.....	26
1.5.2 Trabajo de investigación.....	26
<b>CAPÍTULO 2. INTEGRACIÓN DEL FEV EN LA SMARTCITY</b>	<b>29</b>
2.1 Entorno de trabajo.....	30
2.2 Problemas planteados y arquitectura para integrar el FEV en la SmartCity .....	32
2.2.1 Centro de Control (CSCC) .....	33
2.2.2 Interfaz de usuario .....	34
2.3 Solución propuesta .....	36
2.3.1 Estimación de la autonomía de los FEV .....	36
2.3.2 Previsión de la demanda de energía.....	41
2.3.3 Estudio de la disponibilidad neta de energía: servicios G2V y V2G .....	47
2.3.4 Gestión activa de la demanda (DSM) .....	61
2.3.5 Integración del sistema solución.....	65
2.4 Diseño relacional de la interfaz de usuario .....	66
2.4.1 Diseño de la base de datos .....	67
2.4.2 Diseño de procesos .....	69
2.4.3 Acceso y uso.....	73
<b>CAPÍTULO 3. PRUEBAS DEL MODELO DE INTEGRACIÓN DEL FEV EN LA SMARTCITY</b>	<b>77</b>
3.1 Metodología.....	78
3.2 Estimación de la autonomía del FEV desde CSCC.....	80
3.3 Previsión de la demanda de energía en el núcleo urbano .....	92
3.4 Análisis de disponibilidad de energía en las CS .....	96

3.5	Gestión activa de la demanda (DSM) .....	99
3.5.1	Resolución del problema de optimización .....	100
3.5.2	Descripción del entorno de test .....	101
3.5.3	Análisis de los resultados obtenidos .....	105
3.6	Procesos de identificación y acceso web .....	122
3.7	Pruebas integradas: resultados de las pruebas de campo .....	124
3.8	Conclusiones. Impacto en el futuro de Europa y propuesta de mejoras.....	128

---

**CAPÍTULO 4. SISTEMA DE MOVILIDAD EN LA SMARTCITY** **131**

---

4.1	Entorno de trabajo.....	132
4.2	Problemas planteados y arquitectura del sistema de movilidad.....	134
4.3	Solución propuesta: Sistema de interoperabilidad.....	135
4.3.1	Fuentes externas y adaptadores de datos .....	136
4.3.2	Comunicaciones con las fuentes externas y modelo de datos .....	150
4.3.3	Predicción del tráfico .....	167
4.4	Conclusiones. Impacto en el futuro ecosistema europeo de ciudades inteligentes. ....	181

---

**LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN** **183**

---

**REFERENCIAS**

1	Referencias bibliográficas .....	187
2	Referencias web.....	196

## Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados obtenidos .....	25
Tabla 2. Capacidades comerciales batería del FEV.....	39
Tabla 3. Estructura vectorial de datos según el tipo de día. ....	45
Tabla 4. Comprobación de la ubicación de las estaciones de carga .....	83
Tabla 5. Pasos del viaje 1 .....	84
Tabla 6. Pasos del viaje 2.....	87
Tabla 7. Pasos del viaje 3.....	90
Tabla 8. Escenarios del test .....	93
Tabla 9. Datos y parámetros de simulación .....	95
Tabla 10. Parámetros y Datos de simulación (Escenario1). ....	97
Tabla 11. Descripción de datos de entrada.....	101
Tabla 12. Descripción de datos de salida.....	101
Tabla 13. Parámetros técnicos de los FEV.....	103
Tabla 14. Configuración de la simulación.....	104
Tabla 15. Test 6: Batería de datos reales .....	117
Tabla 16. Parámetros FEV.....	125
Tabla 17. Resultados pruebas.....	126
Tabla 18. Atributos de objetos de tráfico .....	143
Tabla 19. Variables de la matriz de rutas .....	145
Tabla 20. Estructura del objeto del adaptador de datos de estacionamiento .....	148
Tabla 21. Estructura de las reservas del adaptador de estacionamiento. ....	148

## Lista de Figuras

Figura 1. Temporalización entorno de investigación.....	27
Figura 2. Arquitectura del Sistema de Interoperabilidad SmartV2G .....	32
Figura 3. Gráficos de referencia de la grid y mapa de CSs.....	35
Figura 4. Diseño equivalente para la simulación del proceso en batería (MathWorks, Inc).....	38
Figura 5. Diagrama en bloques Matlab para la estimación de carga.....	40
Figura 6. Vista de Open Street Map .....	42
Figura 7. Modelado conceptual de una neurona .....	44
Figura 8. Demanda de energía agregada obtenida para un día de la semana en un escenario de carga libre.....	44
Figura 9. Proceso de agrupación realizado para la generación de servicios .....	49
Figura 10. Probabilidad de ocupación en los tres modos de comportamiento diferenciados.....	51
Figura 11. Proceso iterativo de obtención de la matriz $\Phi$ .....	58
Figura 12. Integración del sistema ‘Smart Vehicle to Grid’.....	66
Figura 13. Objetivo de la solución BI.....	67
Figura 14. Diagrama relacional de la base de datos diseñada.....	69
Figura 15. Proceso de búsqueda de estación de carga (CS).....	70
Figura 16. Proceso de reserva y actualización de datos en las CS.....	71
Figura 17. Procedimiento almacenado ‘state-car’ .....	72
Figura 18. Diagrama relacional de la interfaz de usuario .....	73
Figura 19. Interfaz de inicio.....	74
Figura 20. Pantalla carga express.....	75
Figura 21. Velocidad del vehículo para el ciclo de conducción europeo (NEDC). .....	81
Figura 22. Potencia requerida por la batería del FEV.....	82
Figura 23. Estado de carga y corriente de batería.....	82
Figura 24. Test 1: ruta para la validación del algoritmo de autonomía .....	85
Figura 25. Test 1: velocidad del viaje.....	85
Figura 26. Test 1: evolución del SOC.....	86
Figura 27. Test 2: ruta para la validación del algoritmo de autonomía .....	87
Figura 28. Test 2: velocidad estimada del viaje.....	88
Figura 29. Test 2: evolución del SOC.....	88
Figura 30. Test 3: ruta para la validación del algoritmo de autonomía .....	90

Figura 31. Test 3: velocidad de estimación del viaje .....	91
Figura 32. Test 3: evolución del SOC.....	91
Figura 33. Comparación de datos de carga pronosticados y reales Escenario1 (24 horas)....	96
Figura 34. Energía G2V negativa .....	98
Figura 35. Energía V2G positiva .....	99
Figura 36. Tarifa PUN (Italian “Prezzo Unico Nazionale“) correspondiente al día 24/07/2012.....	105
Figura 37. Resultados Test 1 “perfil agregado no controlado” .....	106
Figura 38. Resultados Test 2 “sin restricciones de red”. .....	107
Figura 39. Señal de referencia de potencia de la red.....	109
Figura 40. Resultados Test 3 “incorporación de restricciones de red”.....	110
Figura 41. Perfiles de potencia de carga neta en tres momentos distintos del día.....	111
Figura 42. Evolución del control del FEV no. 2 .....	112
Figura 43. Evolución del estado de carga del FEV no. 2.....	112
Figura 44. Resultados Test 4 “reacción a una señal DSM” .....	113
Figura 45. Variación de los perfiles de potencia de carga neta (en caso de DSM) en distintos momentos del día.....	114
Figura 46. Análisis de sensibilidad con respecto al parámetro $\mu$ .....	115
Figura 47. Test 5: perfiles de potencia de carga neta en el caso de $\mu = 5000$ .....	116
Figura 48. Perfil de carga medido para FEV3.....	118
Figura 49. Test 6: Perfil de carga agregado medido a nivel de área de carga.....	119
Figura 50. Referencia de potencia seleccionada .....	119
Figura 51. Resultados Test 6 “datos reales, sin flexibilidad de tiempo adicional”.....	120
Figura 52. Resultados Test 6 “datos reales, 30 minutos de flexibilidad de tiempo adicional” .....	121
Figura 53. Resultados Test 6 “datos reales, 1 hora de flexibilidad de tiempo adicional” ...	121
Figura 54. Perfil de carga no controlada medido en FEV7.....	122
Figura 55. Perfil controlado en FEV7.....	122
Figura 56. Procedimiento de acceso al sistema V2G. ....	122
Figura 57. Protocolo de acceso seguro via interfaz web.....	123
Figura 58. Test de Validación/Identificación del usuario en la CS. ....	123
Figura 59. Identificación del usuario en movimiento (‘on road’). ....	124
Figura 60. Punto fijo de carga calculado por el algoritmo DSM.....	126
Figura 61. Comparación perfil de carga aplicado vs calculado .....	127
Figura 62. Primer punto fijo de carga calculado (12:15) .....	127
Figura 63. Último punto fijo de carga calculado (13:15) .....	128
Figura 64. Último punto de carga.....	128
Figura 65. Arquitectura del sistema de movilidad.....	134
Figura 66. Diseño plataforma solución: infraestructuras de movilidad y comodalidad .....	137
Figura 67. Diseño del WDA.....	138
Figura 68. Estructura interna del TDA.....	140
Figura 69. Interacción entre el TDA y el STM .....	140
Figura 70. Datos de comportamiento del tráfico para un día (series temporales). ....	144

Figura 71. Representación de datos devueltos por el PTDA.....	146
Figura 72. Estructura PDA .....	147
Figura 73. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.1 .....	151
Figura 74. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.2 .....	152
Figura 75. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.3 .....	154
Figura 76. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.4 .....	155
Figura 77. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.7 .....	156
Figura 78. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.5 .....	157
Figura 79. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.8 .....	158
Figura 80. Estructura de base de datos FEVSE (interfaz AI.5) .....	160
Figura 81. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz I.5 .....	161
Figura 82. Estructura de datos HMI. ....	163
Figura 83. Algoritmo de predicción del tráfico (ATMS).....	174
Figura 84. Ejemplo de series de predicción de tráfico obtenidas.....	175
Figura 85. Función de autocorrelación simple (SAF). ....	175
Figura 86. Función de autocorrelación parcial (PAF). ....	176
Figura 87. Modelo inicial generado, autorregresivo de orden 2.....	177
Figura 88. Series de datos iniciales vs resultantes .....	178
Figura 89. Error de predicción de las series de datos generadas por el modelo autorregresivo de orden 2.....	178
Figura 90. Series de predicción (rojo) vs deterministas (azul) –muestra 27 02:15– .....	179
Figura 91. Series de predicción (rojo) vs deterministas (azul) –muestra 139 11:35–.....	180
Figura 92. Series de predicción (rojo) vs deterministas (azul) –muestra 279 23:15–.....	180

## Acrónimos

ATMS	Advanced Traffic Management System
BI	Business Intelligence
BMS	Battery Management System
CS	Charging Station
CCSC	Charge Station Control Center
CSO	Charging Station Operators
DER	Distributed Energy Resources
DSM	Demand Side Management
DSO	Distribution System Operators
DWH	DataWarehouse
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle
EV	Electric Vehicle
EVIN	EV-Information Network
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
EVSEO	Electric Vehicle Supply Equipment Operators
FC	Fast Charge
FEV	Full Electric Vehicle
FEVSE	Full Electric Vehicle Supply Equipment
FP7	Seventh European Framework Program
GME	Gestore Mercati Energetici
G2V	Grid to Vehicle
HMI	Human Machine Interface
H2020	Horizon 2020
IOS	Information On-board Service
ITS	Intelligent Transport Systems
KPI	Key Performance Indicator
LA	Loading Area
LAC	Loading Area Controller
LS	Least Squares
MCS	Main Control System of the FEV
MIA	Master Interaction Aggregator
MOBINCITY	Smart Mobility in Smart City
MPC	Model Predictive Control

NEDC	New European Driving Cycle
PAF	Partial Autocorrelation Function
PDA	Parking Data Adapter
PEV	Plug-in Electric Vehicle
PIIS	Proactive Intelligent Information Service
SAP	Simple Autocorrelation Function
SC	Slow Charge
SMARTV2G	Smart Vehicle to Grid Interface
SMP	Semi-Markov Process
SOC	State of Charge
STM	Smart Transport Middleware
TIC	Tecnologías de la Información y Comunicación
UML	Unified Modeling Language
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
V2G	Vehicle to Grid
V2I	Vehicle to Infrastructure
VIN	Vehicle Identification Number (Car2Go)
WAC	Web Access Control
WP	Working Package

# Capítulo 1

## Introducción y Objetivos

*«En realidad no me preocupa que quieran robar  
mis ideas, me preocupa que ellos no las tengan»*  
~ Nikola Tesla (1856-1943)

La Unión Europea centra actualmente gran parte de sus actividades de investigación e innovación en el Programa Marco Horizonte 2020\* ([A]) que abarca el período 2014-2020. El programa fomenta tres acciones principales: (i) promover el liderazgo industrial en Europa, (ii) reforzar la excelencia de su base científica, y (iii) abordar los principales retos sociales. Las investigaciones aquí presentadas fueron financiadas por el Séptimo Programa Marco (FP7), programa anterior a H2020, y finalizaron a principios del año 2017.

El desarrollo sostenible de las zonas urbanas es un reto de alto interés a nivel mundial. Debido a ello las ciudades se han convertido en motores cruciales para el desarrollo socio-económico. Europa afronta una oportunidad histórica para reinventar sus entornos urbanos como ecosistemas innovadores que integren soluciones inteligentes en materia de energía, transporte, y Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC).

---

\* <http://www.eshorizonte2020.es/> ; [http://cordis.europa.eu/programme/rcn/664087\\_es.html](http://cordis.europa.eu/programme/rcn/664087_es.html)

Las nuevas tecnologías permiten ofrecer soluciones a los problemas que el día a día va planteando a nuestras ciudades y que van surgiendo conforme van apareciendo nuevas necesidades. Esto requiere del desarrollo de proyectos I+D+i, y es donde se enmarca el presente trabajo. Los elementos que motivan la investigación llevada a cabo podemos resumirlos como sigue.

En los años 70 nadie podía haber pensado en la información como un activo de nuestra sociedad. En aquel momento la información era un activo intangible difícilmente gestionable. Hoy en día las características y las capacidades de almacenamiento y gestión de la información han evolucionado. Debido al avance de las nuevas tecnologías, parte de dicha información podemos considerar que se ha convertido en un activo tangible. Podemos decir que cada vez **la información** es más gestionable y crece su valor como activo principal de todos y cada uno de los agentes de una ciudad.

Igual que todo contenido requiere un **continente**, los datos que nos llevan a la información se encontrarán alojados en un ordenador, al menos en primera instancia. Conforme hemos ido avanzando, es mayor la cantidad de datos que necesitamos almacenar y no es suficiente un simple ordenador. Las nuevas tecnologías han permitido que los datos se almacenen de modo distribuido en varios ordenadores, no necesariamente ubicados en un mismo lugar físico pero sí conectados formando una red. Esta red de ordenadores puede almacenar la información de que hace uso un individuo, un hogar (que evolucionará a hogar inteligente [1],[2],[3]), una comunidad, una compañía o incluso toda una ciudad. Por esta razón se puede llevar a cabo una identificación entre el lugar o lugares físicos en que se encuentra almacenada la información y la entidad (individuo, hogar, comunidad, empresa o ciudad) que representa.

Para hacer uso de los datos almacenados es necesario gestionarlos correcta y eficientemente. Las nuevas tecnologías ponen a nuestro alcance una ingente cantidad de recursos hasta hace poco impensable. Una gestión adecuada dependerá del continente, de la cantidad y de la naturaleza de los datos y de los recursos e infraestructuras a tener en cuenta. Por ejemplo, si tenemos toda la información almacenada en un mismo ordenador, la gestión es sencilla, ya que disponemos de todos los datos sin necesidad de salir al exterior. Cuanto más distribuida se encuentre la información, cuantos más recursos se requieran, más compleja será su gestión. Necesitamos desarrollar, por tanto, un sistema que permita conocer dónde se encuentran los datos que se necesitan en cada momento, cómo manejarlos y a quién proporcionarlos para que la entidad a la que representan (hogar, empresa o la propia ciudad) funcione adecuadamente. Esto es el inicio de lo que puede hacer cambiar el concepto actual de ciudad permitiendo una mayor conectividad e interacción autónoma, sin intervención humana, entre todos los servicios que caracterizan un núcleo urbano, aproximándonos de este modo a lo que sería la 'ciudad inteligente' o SmartCity ([4],[5]).

Para desarrollar el concepto de SmartCity, una característica de gran importancia que debe tenerse en cuenta es la **movilidad** de los elementos que la componen y le dan vida, pues es aquello que permite el día a día en el núcleo urbano. Los proyectos que se plantean sobre la SmartCity dan lugar a soluciones integradas ([6],[7]) que tienden a facilitar la movilidad, la búsqueda de la sostenibilidad y la mejora de la calidad de vida en las ciudades.

Un elemento muy importante en este contexto es el **vehículo eléctrico** (*FEV*, '*Full Electric Vehicle*'), por las razones que siguen:

(1) Posibilita diseñar un nuevo modelo urbano en el que la mayoría de sus servicios se encuentran integrados. La integración del FEV en la ciudad exige un cambio necesario del modelo urbano y, con ello, del ecosistema de ciudades europeas. Este nuevo modelo de ciudad, la SmartCity, es el que posibilita, a su vez, la puesta en marcha de la flota de FEVs. Para ello se necesita en primera instancia interconectar todos los servicios de aprovisionamiento de energía para poder controlar la demanda de carga de los usuarios. El hecho de integrar el FEV en la ciudad plantea necesariamente el problema de optimización del uso de energía. Para conseguir una mayor eficiencia energética se necesitan herramientas y servicios inteligentes que permitan integrar los sistemas urbanos de energía y transporte. Es por ello que nuevos sistemas de información y gestión se van a ir incorporando progresivamente, generando la SmartCity real.

(2) Soluciona en parte el grave problema de contaminación que sufre nuestro planeta hoy en día. Para ello se hace necesario emplear sistemas de movilidad bajos en emisiones de CO<sub>2</sub>, es decir, impulsar el uso de nuevos tipos de energías no convencionales en el transporte, como la electricidad, gas natural comprimido (GNC), gas natural licuado (GNL), combustibles renovables y adaptados. Los FEV representan un potencial innegable para reducir la contaminación. En la Unión Europea se espera para 2020 que exista más de 1 millón de vehículos eléctricos en el mercado. Sin embargo, para el despliegue de este medio se han tenido que afrontar serias desventajas que suponían un obstáculo notable para la penetración generalizada de este tipo de movimiento, como veremos más adelante.

Para una adecuada puesta en marcha del FEV es necesario integrarlo con el resto de infraestructuras que influyen en la movilidad en la ciudad. Esto permitirá hacer realidad ese nuevo modelo urbano inteligente que pretendemos alcanzar y que es nuestro futuro. Y así lo está fomentando Europa desde hace ya bastante años, como hemos comentado.

Nuestro trabajo ha consistido en investigar, diseñar y desarrollar una solución de interoperabilidad que gestione la utilización del FEV en un entorno urbano, aprovechando las infraestructuras existentes, optimizando los recursos de que disponemos, e integrando las posibilidades de comunicación que las TIC nos ofrecen.

Presentamos a continuación los dos campos de trabajo en que hemos dividido nuestra investigación: los hemos denominado objetivo A y objetivo B.

## 1.1 Objetivo A: Integración del FEV en la SmartCity

Uno de nuestros objetivos es integrar y poner en marcha el FEV en la SmartCity y para ello hemos necesitado estudiar dos partes importantes:

1. El estudio y diseño de las partes más relevantes de un sistema de información centralizado, que denominamos **centro de control** (*CSCC*, '*Charge Station Control Center*'). Se trata de un sistema que va a permitir controlar las demandas de energía por parte de los usuarios (cargas de sus FEV) y gestionar las necesidades propias de la red para optimizar costes y mejorar la eficiencia. Además, atendiendo a las ventajas que proporcionan los FEV, éstos podrán devolver energía a la red bajo ciertas condiciones (funcionando en cierto modo como centrales de energía de la misma red [8],[9]), especialmente cuando hayan almacenado más energía de la que hubiesen requerido para su movilidad y cuando la red lo necesite, como veremos a lo largo de nuestro trabajo.

El CSCC resulta fundamental en nuestra arquitectura, constituye el núcleo central de la investigación y desempeña el papel ejecutivo en todo el proceso de gestión de la red. Hemos planteado, resuelto y probado lo que se denomina su capa de lógica de negocio, dejando el desarrollo de la capa de presentación para futuras puestas en marcha reales.

Para alcanzar este objetivo necesitamos analizar los puntos siguientes:

- i. Estudiar la **autonomía del FEV** a integrar en la SmartCity. Se trata de un primer objetivo centrado totalmente en el FEV y dependiente de las características del fabricante. Es muy importante poder estimar desde el CSCC la evolución del estado de carga (SOC, '*State Of Charge*') del FEV para prever posteriormente sus posibles demandas de carga y, por tanto, sus posibles llegadas a uno u otro punto de carga en la ciudad.  
Se ha llevado a cabo diseñando un algoritmo en Matlab que permite obtener la evolución del SOC, en función de las características de la batería, del trayecto y de estándares europeos como puede ser el NEDC ('*New European Driving Cycle*', ciclo de referencia para la homologación de vehículos en Europa), en un núcleo urbano, como vamos a ver a lo largo del trabajo.

- ii. Prever la **demanda de energía a la red** teniendo en cuenta el mapa vial del núcleo urbano y la dimensión de la flota de FEV en la ciudad. Es decir, se trata de estimar la **energía total que tendrá que disponer inicialmente la red** para atender la posible demanda de energía.

Para estimar la demanda de energía a la red es lógico usar los datos de tráfico existentes (datos reales extraídos de los posibles históricos de la ciudad). En caso de no haberlos, que es la situación más probable hoy en día, vamos a obtener unos datos iniciales de tráfico mediante el entrenamiento de redes neuronales.

- iii. Estudiar la **disponibilidad neta de energía en las estaciones de carga** (*CS*, '*Charge Station*') de la red, teniendo en cuenta los dos puntos anteriores, es decir, la autonomía del FEV y la energía total que tiene que disponer la red. Este estudio requiere llevar a cabo un **modelado de la movilidad en la ciudad**, puesto que la circulación de los FEV dependerá de la disponibilidad de energía en las CS. Tengamos en cuenta que al llegar un FEV a una CS no siempre podrá cargarse. Dependerá de si el punto de carga en la CS está en servicio o no, y esto es algo que va a controlarse desde el CSCC, como veremos.

Para proceder con este estudio debemos conocer:

- La energía que deben disponer las CS para atender las demandas de carga de los vehículos (servicio que denominamos G2V, '*grid to vehicle*').
- La energía que los FEV son capaces de devolver a la red (*servicio V2G – 'vehicle to grid'*-) por haber cargado más de la que necesitaban o bien por haberla generado debido a su propio sistema eléctrico. Este servicio V2G va a permitir llevar a cabo una gestión óptima de la demanda de energía con el fin de reducir los costes de cara al usuario y a su vez mejorar la eficiencia de la red. Tengamos en cuenta que este servicio es de gran importancia para que la red pueda superar los momentos de picos de alta demanda de energía por parte de los FEVs.

Para estudiar esta disponibilidad de energía en las CS hemos diseñado un algoritmo basado en procesos *procesos estocásticos y cadenas Markov* ([10],[11]) que nos permite estudiar la evolución de los servicios G2V y V2G.

Para presentar y analizar los resultados, ejecutamos el algoritmo que hemos desarrollado en Matlab y C++. Con él podemos controlar los procesos de carga de los vehículos eléctricos (FEVs) y constituir lo que denominaremos nuestra '*Smart Grid*' ([12],[13]), una red de interconexión entre proveedores, usuarios y elementos intermediarios de gestión para llevar a cabo un uso inteligente de la energía.

- iv. Diseñar el proceso de **gestión activa de la demanda** que permita optimizar el consumo energético y los precios. Se trata de evitar costes excesivos en que pueden incurrir los FEVs y momentos de sobrecarga de la red cuando el coste de energía es menor. Es decir, se trata de hacer intervenir una nueva variable en el diseño global del proceso de integración del FEV en la ciudad: **el coste de la energía**, variable a lo largo del día y evidentemente dependiente del proveedor de energía.

La gestión activa de la demanda consiste, por tanto, en encontrar dinámicamente (a lo largo del día y readaptándose frente a posibles intervenciones de la red o simplemente frente a cambios en los precios de la energía) un equilibrio entre lo que demandan los FEV en cada momento y la disponibilidad de energía en las CS por parte de la red.

Para diseñar una adecuada gestión activa de la demanda formalizamos el problema que presenta utilizando técnicas de programación lineal. Este problema es resuelto numéricamente en distintos escenarios cuya complejidad es creciente en función de las intervenciones que haga la red (DSM, *Demand Side Management*) para controlar la sobrecarga y con ello conseguir una mayor eficiencia y el menor coste de cara a los FEV.

2. El desarrollo de una **interfaz** para permitir al usuario del FEV acceder al sistema de gestión. Esto lo hemos conseguido diseñando una base de datos, su modelo relacional y el repositorio correspondiente, dejando la parte de la capa de presentación (*front-end*) para las implementaciones en las distintas ciudades donde se adopten nuestros resultados.

Queremos resaltar que este apartado no lleva proceso de investigación asociado. Sí, en cambio, incluye la parte de desarrollo. Para llevarlo a cabo hemos utilizado tecnología Javascript, C++, Java, MySQL, Oracle en pruebas finales y diseño UML.

Llevamos a cabo nuestro trabajo de investigación bajo el entorno del proyecto europeo SmartV2G -*Smart Vehicle to Grid*-<sup>†</sup> entre junio de 2011 y febrero de 2015, financiado por la Comisión Europea dentro del Séptimo Programa Marco.

## 1.2 Objetivo B: Sistema de movilidad en la SmartCity

El segundo de nuestros objetivos consiste en estudiar cómo los factores que intervienen en la movilidad dentro de la SmartCity pueden garantizar que el desplazamiento del

---

<sup>†</sup> <http://smartv2g.eu/>      [http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306_en.html)

FEV se lleve a cabo según lo planificado y con ello integrar adecuadamente los FEV en el sistema de movilidad urbano. Es decir, se trata de integrar el entorno de gestión del FEV, ya estudiado en la primera parte, con el entorno externo al FEV en la SmartCity, proporcionando así una solución global al problema de integración del FEV en el nuevo ecosistema de ciudades europeas. Para ello se requiere optimizar la interacción entre el FEV y los servicios de información meteorológica, de tráfico y de movilidad en la ciudad como son el transporte público, el estacionamiento y el alquiler (*e-sharing*). A estos elementos los denominamos fuentes externas de información. Se pretende llevar a cabo una predicción del tráfico para anticipar una posible toma de decisiones.

Para alcanzar este objetivo necesitamos analizar los puntos siguientes:

1. La identificación del origen de los datos, es decir, las distintas **fuentes externas**. La obtención de estos datos tiene que ser compatible con los sistemas de integración del FEV vistos en la primera parte de nuestro trabajo. Los procesos de obtención de estos datos constituyen el middleware que denominamos STM (*'Smart Transportation Middleware'*).
2. La definición de las **comunicaciones** con las interfaces externas identificadas en el punto anterior y el diseño del **modelo de datos** requerido para su implementación. Ello requiere un necesario análisis de casos y el uso de diseños UML (*'Unified Modeling Language'*), definiendo así el modulo de gestión y tratamiento de datos del sistema de movilidad, que denominamos MIA (*'Master Integration Aggregator'*). Este modelado permite integrar las fuentes externas con un servidor central de gestión via WebServices y utilizando formatos JSON/XML. Este servidor central es el responsable de la estrategia de predicción del tráfico y toma anticipada de decisiones que pretendemos en este último punto que vemos a continuación. A este servidor lo denominamos PIIS (*'Proactive Intelligent Information System'*).
3. La **predicción del tráfico**. Para dotar al servidor central de una capacidad de predicción de tráfico que permita al sistema tomar decisiones y gestionar la movilidad en la ciudad, hemos diseñado un algoritmo. Este algoritmo estará basado en el auto-aprendizaje de la propia dinámica urbana y en previsiones de los comportamientos estocásticos de los usuarios en conjunto, como veremos en el presente trabajo. Además, el algoritmo de predicción necesita poder estimar continuamente el error cometido en sus propias predicciones para garantizar una mejora continua del sistema de gestión de movilidad en la ciudad.

Llevamos a cabo nuestro trabajo de investigación bajo el entorno del proyecto europeo Mobincity<sup>‡</sup> -*Smart Mobility in Smart Cities*- entre julio de 2012 y marzo de 2016, financiado por la Comisión Europea dentro del Séptimo Programa Marco.

### 1.3 Estándares de aplicación y otras consideraciones

Los estándares principales que se aplican en nuestro trabajo son

- a) Estándares referentes a la comunicación: estándares ITS-G5 y GeoNetworking, emitidos por el Instituto Europeo de normas de Telecomunicaciones (ETSI) para especificar la comunicación inalámbrica entre los Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS).
- b) Estándares referentes a la transferencia de energía entre vehículos y estaciones de carga:
  - (1) El estándar ISO 15118 de la interfaz de comunicación entre el vehículo y la red entre dicho vehículo y la estación de carga. Este estándar ayuda a proporcionar los nuevos modos/servicios que pueden surgir como consecuencia de las características propias del FEV, como el servicio V2G, como vemos a lo largo de nuestro trabajo
  - (2) La norma ISO 61851, que define la función de seguridad para gestionar la alimentación en el lado de la red para el sistema de carga del FEV. Esta norma estandariza las tomas y modos de carga de los FEV.

Los resultados finales de nuestro trabajo pueden extenderse a áreas esenciales en economía, en la gestión del tráfico, en el control energético, en las comunicaciones de la ciudad y en la propia industria automovilística, como se verá en las conclusiones.

### 1.4 Resultados obtenidos

Presentamos a continuación los resultados obtenidos en nuestro trabajo. En forma esquemática, enumeramos lo que serían las contribuciones de nuestro trabajo:

---

<sup>‡</sup> <http://mobincity.eu/>      [http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177_en.html)

Objetivo	Subobjetivo	Contribución Tesis
A	1. Control, desde el CSCC, de la autonomía del FEV a integrar en la SmartCity	Algoritmo 1: Obtención de la evolución del estado de carga (SOC) de un FEV en un núcleo urbano, según estándar europeo NEDC.
	2. Previsión de energía de la ciudad	Algoritmo 2: Cálculo de la energía que la ciudad debería ofrecer para satisfacer la posible demanda, en función del nº FEVs y del mapa vial urbano.
	3. Evolución y disponibilidad de energía para satisfacer los servicios G2V y V2G	Algoritmo 3: Evolución de (i) la energía que deberían inyectar las CS a los FEV (G2V) en función de la estimación de su ocupación y su SOC; y (ii) la energía que pueden devolver los FEV a la red (V2G), colaborando así en una mayor eficiencia de la red y disminución de costes para los FEV.
	4. Gestión Activa de la Demanda	Algoritmo 4: Diseño y resolución del problema de optimización planteado para controlar la energía disponible en la red y calcular los costes asociados, según tarifa del proveedor de energía. Obtención de la curva de carga dinámica y su readaptación (DSM, ' <i>Demand Side Management</i> ') a exigencias del proveedor de energía y a necesidades de los usuarios.
B	1. Definición de los adaptadores de datos de las fuentes externas.	Estructuras de adaptadores de datos necesarias para integrar las fuentes externas con el entorno de gestión del FEV.
	2. Diseños UML y modelo de datos necesarios para las comunicaciones entre los elementos del sistema de interoperabilidad.	Diseños UML de las comunicaciones con las interfaces externas identificadas y diseño del modelo de datos requerido para su implementación.
	3. Predicción del tráfico, necesaria para la toma anticipada de decisiones.	Algoritmo 5: Predicción del tráfico via estrategias adaptativas usando histórico de datos en tiempo real y previsiones estocásticas.

Tabla 1. Resultados obtenidos

## 1.5 Entorno de investigación: Séptimo Programa Marco I+D+i Europa

Nuestra investigación, durante estos más de seis años de trabajo, se ha llevado a cabo dentro del Séptimo Programa Marco de I+D+i de Europa (FP7<sup>§</sup>), sin cuya financiación no hubiese sido posible la consecución de nuestros resultados. Describimos la organización seguida en estos proyectos de investigación.

### 1.5.1 Organización de los proyectos FP7

Los proyectos FP7 se dividen en equipos de trabajo, llamados ‘working packages’ (WP). En el primero de ellos (WP1) se suele efectuar un análisis de requerimientos, y en el último suelen integrarse las partes desarrolladas, testearlas y proceder a un posible prototipado. El resto de WPs incluyen la investigación, desarrollo e innovación.

Cada proyecto es desarrollado por un consorcio formado por diversas entidades (empresas –PYMEs o gran empresa–, gobiernos, administraciones y universidades, entre otros), llamados ‘partners’. Sólo uno de ellos asume la responsabilidad de coordinador general, entre cuyas obligaciones se encuentra la presentación a la Comisión Europea de los resultados que se van alcanzando semestral o anualmente, la gestión financiera del proyecto y cualquier otra tarea que implique la coordinación del consorcio completo.

Cada partner puede asumir el rol de líder o coordinador de un WP, o simplemente participar como componente del equipo de trabajo de dicho WP, desarrollándose así una arquitectura jerárquica que hace posible la gestión del proyecto. La complejidad de la gestión es proporcional al número de partners de que consta el consorcio. El líder de cada WP es el responsable de la buena marcha del equipo de trabajo, de su coordinación técnica y, por tanto, de que se consiga cada uno de los hitos estipulados previamente en el plan de trabajo.

### 1.5.2 Trabajo de investigación

Empezamos nuestro trabajo analizando cómo los sistemas de interoperabilidad pueden ser útiles para la sociedad en la que vivimos y cómo puede implementarse el concepto de interoperabilidad para cubrir las necesidades de una sociedad europea globalizada. El primer paso fue participar entre noviembre de 2003 y enero de 2006, como colaborador de la Universitat Jaume I de Castellón, en un proyecto de naturaleza teórica: [C] **Interop**<sup>\*\*</sup> (*Interoperability Research for Networked Enterprises*

---

<sup>§</sup> <http://cordis.europa.eu/projects>

<sup>\*\*</sup> [http://cordis.europa.eu/project/rcn/71148\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/71148_en.html)

*Applications and Software*). El objeto de este proyecto consistió en diseñar estándares de interoperabilidad en entidades en general y sus requerimientos, e integrar de modo sostenible los elementos esenciales que permiten la interoperabilidad: la necesaria ontología implicada en el modelado de un proyecto de interoperabilidad y sus diferentes arquitecturas. Mi responsabilidad en este proyecto fue (1) desarrollar la ontología aplicada a las distintas arquitecturas de interoperabilidad; y (2) adaptar la ontología al concepto de empresa virtual [17].

Estos resultados fueron la base de los proyectos que propusimos posteriormente, entre 2010 y 2016, cuatro de los cuales fueron aprobados para su financiación por la Comisión Europea. Podemos dividir estos proyectos en dos grupos, si atendemos a nuestras intenciones en la línea de investigación marcada:

- **Ámbito local.** Los objetivos de estos proyectos fueron las aplicaciones específicas a algunas áreas relevantes de nuestra economía, tales como el área energética y la electromovilidad ([D] **SmartV2G**<sup>††</sup> -*Smart Vehicle to Grid interface*-), las comunicaciones inter-empresariales y su aplicación al área alimentaria ([F] **FiSpace**<sup>‡‡</sup>-*Future Internet & Crop Protection Information Sharing*-), y la investigación en salud (**iCareCoops**<sup>§§</sup> -*Active and Assisted Living*-).
- **Ámbito global.** Inclusión de otros recursos y elementos externos en los proyectos específicos de interoperabilidad anteriores, como el caso de las ‘Smart Cities’: [E] **Mobincity**<sup>\*\*\*</sup> -*Smart Mobility in Smart Cities*-.

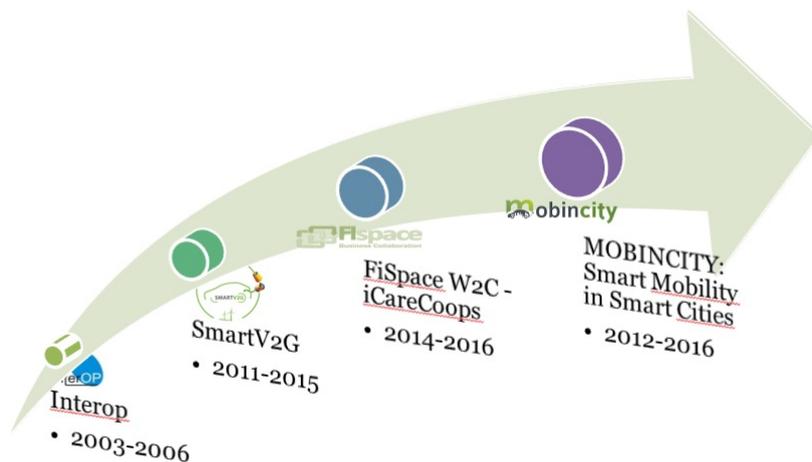


Figura 1. Temporalización entorno de investigación

<sup>††</sup> <http://smartv2g.eu/>      [http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306_en.html)

<sup>‡‡</sup> <http://www.fispace.eu/>      [http://cordis.europa.eu/project/rcn/110987\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/110987_en.html)

<sup>§§</sup> [http://cordis.europa.eu/project/rcn/71148\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/71148_en.html)

<sup>\*\*\*</sup> <http://mobincity.eu/>      [http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177_en.html)

El doctorando<sup>†††</sup>, como director del área I+D+i y socio de CIT Development, S.L.<sup>†††</sup>, ha sido el responsable técnico de la compañía e investigador principal responsable de los WPs coordinados por CIT en estos proyectos financiados por la Comisión Europea.

En este trabajo se presentan parte de nuestros resultados conseguidos en los proyectos SmartV2G ([D]) y Mobincity ([E]), los relacionados con el problema de gestionar un uso masivo de FEVs como medio habitual de transporte.

En los próximos capítulos describimos el trabajo de investigación, las soluciones propuestas, su implementación, las pruebas a que hemos sometido nuestros resultados teóricos, los resultados conseguidos y los posibles futuros proyectos.

---

<sup>†††</sup> <https://es.linkedin.com/in/vfernandezpa>

<sup>†††</sup> <https://www.b2match.eu/ict2015/participants/251>

## Capítulo 2

# Integración del FEV en la SmartCity

*«Si tan sólo conociésemos la magnificencia del 3, 6 y 9, entonces tendríamos una de las claves del universo. La vida es y siempre seguirá siendo una ecuación imposible de ser resuelta, pero tiene ciertos factores que podemos llegar a conocer»*

~ Nikola Tesla (1856-1943)

Para integrar y poner en marcha el FEV en la SmartCity, el principal problema con que nos encontramos es que no existe un sistema adecuado en la ciudad para gestionar el proceso de carga del FEV de modo eficiente tanto para la red como para el usuario. El objetivo del presente capítulo consiste en especificar los algoritmos necesarios para diseñar este sistema de gestión. Las propias características del FEV lo dotan de capacidades para poder diseñar otros servicios de apoyo al simple proceso de carga, posibilitando que no sea siempre la red la que soporte todo este proceso.

Como hemos anunciado en la sección 1.1 necesitamos un centro de control (CSCC) que gestione el proceso de carga del FEV y su comunicación con la red de estaciones de carga (CS). Además, tenemos que tener en cuenta el coste de la energía para que el CSCC tome las medidas adecuadas para optimizar el coste repercutido en el usuario final.

## 2.1 Entorno de trabajo

El trabajo fue llevado a cabo en el marco del proyecto denominado SmartV2G -*Smart Vehicle to Grid*-<sup>§§§</sup>, financiado por la Comisión Europea dentro del Séptimo Programa Marco en el ámbito denominado ‘*Green Vehicles*’, entre junio de 2011 y febrero de 2015.

El proyecto SmartV2G fue coordinado y desarrollado por un consorcio compuesto por siete entidades de cuatro países distintos (España, Eslovenia, Alemania e Italia): *Energy Technology Institute*, *Fraunhofer Institute for Communication Systems*, **CIT Development**, *Elektro Ljubljana Podjete Za Distribucijo Elektricne Energije*, *Technomar*, *Etel Svetovanje in Druge Storitve y Universita Degli Studi Di Roma La Sapienza*.

El proyecto consta de ocho paquetes de trabajo (WPs), de los cuales el cuarto es el que hemos llevado a cabo en su totalidad. Hemos colaborado además en el quinto, sexto y séptimo. Para entender mejor el proyecto consideramos conveniente resumir los objetivos de los ocho paquetes de trabajo:

- El objetivo del primer paquete de trabajo (WP1) consistió en analizar los requerimientos funcionales del sistema.
- En el segundo paquete de trabajo (WP2) se llevaron a cabo el diseño e implementación de los detalles de las estaciones de carga necesarios para proporcionar los servicios exigidos por el proyecto. Para ello se realizaron las siguientes tareas:
  - Diseño y definición de las especificaciones técnicas de la estación de carga para el FEV.
  - Diseño y definición de la arquitectura del sistema de control de la estación de carga.
  - Desarrollo del software para el control de la estación de carga.
- En el tercer paquete de trabajo (WP3) se definieron los requerimientos para efectuar el diseño y desarrollo de las interfaces de comunicación entre los distintos componentes de la Smart Grid, como hemos definido en la sección 1.1. Entre ellos podemos distinguir la selección de los protocolos y arquitecturas de los medios de comunicación adecuados para permitir la interacción entre el FEV, las estaciones de carga y la comunicación entre las distintas estaciones de carga entre sí.
- El cuarto paquete de trabajo (WP4) fue el núcleo central del proyecto. El objetivo de este WP fue investigar las estrategias de gestión activa de la demanda (*DSM*,

---

§§§ <http://smartv2g.eu/>      [http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306_en.html)

'Demand Side Management'), el sistema de control de intervenciones de red y las comunicaciones entre las distintas partes involucradas. Parte de la investigación presentada en este trabajo corresponde a nuestros resultados obtenidos para alcanzar los objetivos del presente WP4 y conseguir la valoración positiva del equipo de evaluadores de la Comisión Europea.

Los resultados de nuestra investigación son los responsables de conseguir la interoperabilidad, como ya hemos explicado en el capítulo 1, permitiendo un control automático de los procesos de carga de los FEV.

- En el quinto paquete de trabajo (WP5) se llevó a cabo el proceso de integración de los componentes desarrollados en los paquetes WP2, WP3 y WP4. Para verificar el buen funcionamiento del sistema se realizaron las pruebas pertinentes en laboratorio, validándose así la interoperabilidad entre los distintos dispositivos, sistemas de control y gestión, y los medios de comunicación desarrollados.
- Probadas las soluciones desarrolladas a nivel de laboratorio, en el sexto paquete de trabajo (WP6) se llevaron a cabo las pruebas de campo. Se realizaron en las ciudades de Valencia en España y Ljubljana en Eslovenia. Las pruebas efectuadas fueron:
  - Prueba de la red de comunicación entre todos los elementos de SmartV2G para validar la interoperabilidad y la integración del sistema en la Smart Grid.
  - Pruebas de los algoritmos diseñados en el WP4 para validar los sistemas SmartV2G responsables de la gestión de la red de estaciones de carga.
  - Pruebas del nivel de seguridad de las comunicaciones entre las distintas partes involucradas, puesto que se opera con una cantidad masiva de datos de usuarios confidenciales.
- El séptimo paquete de trabajo (WP7) se ocupó de conseguir una comunicación, difusión y explotación de los resultados obtenidos en el proyecto y de garantizar que los resultados fueran compatibles con las expectativas del mercado.
- Por último, el octavo paquete de trabajo (WP8), de carácter más horizontal, se encargó de llevar a cabo la gestión necesaria para la adecuada coordinación del plan general del trabajo del proyecto.

Vamos a estudiar a continuación los problemas planteados y la arquitectura propuesta, las soluciones proporcionadas y, en el siguiente capítulo, las pruebas realizadas.

## 2.2 Problemas planteados y arquitectura para integrar el FEV en la SmartCity

Para alcanzar los objetivos presentados en la sección 1.1 del capítulo previo, es decir, estudiar cómo controlar la autonomía del FEV, cómo prever la demanda de energía a la red, cómo estudiar la disponibilidad neta de energía en las estaciones de carga y plantear un nuevo tipo de servicios de soporte V2G, y finalmente cómo diseñar el proceso de gestión activa de la demanda, proponemos la siguiente arquitectura. Consta de los elementos que presentamos en la siguiente figura y que describimos a continuación:

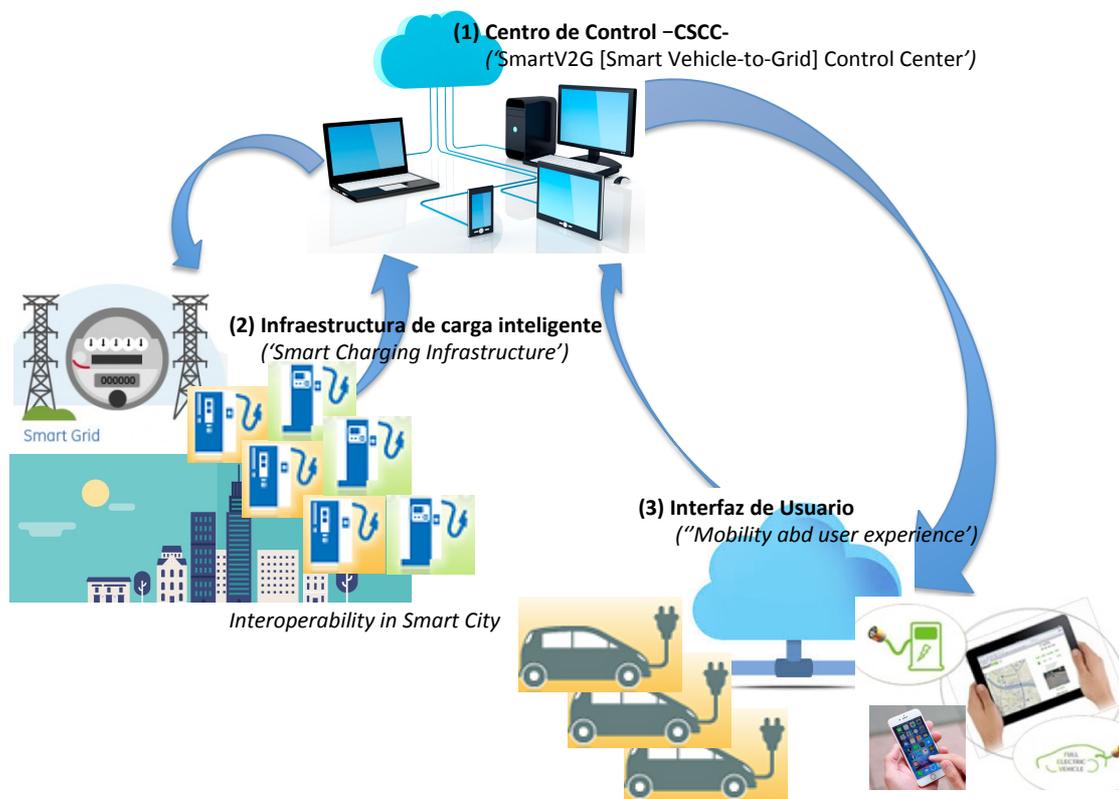


Figura 2. Arquitectura del Sistema de Interoperabilidad SmartV2G

1. **Centro de Control** ('Charge Station Control Center', CSCC).  
El CSCC desempeña el papel ejecutivo en la gestión de la red y de las comunicaciones con los FEV. Se trata de un elemento fundamental en nuestra arquitectura. En la siguiente sección 2.2.1 describimos qué problemas presenta su implementación.
2. **Infraestructura de carga.** Está formada por las estaciones de carga y la red de distribución eléctrica. Las estaciones de carga están conectadas con el CSCC *vía comunicación 4G o Ethernet* y son controladas a distancia *de acuerdo con la norma*

*IEC61851 [18]* desde el CSCC. El problema que aquí se presenta es cómo diseñar los algoritmos de gestión activa de la demanda necesarios para llevar a cabo dicho control desde el CSCC. Este problema queda resuelto en el WP4, y posteriormente probada su solución en el WP6.

Aunque la infraestructura de carga es parte importante de la arquitectura del sistema, fue esencialmente desarrollada por el WP2 y no forma parte de nuestro trabajo. Por tanto no se incluye en este documento.

3. **Interfaz de usuario.** Posibilita a los usuarios comunicar su disposición a participar en los nuevos servicios del sistema de gestión de red, como veremos a lo largo de nuestro trabajo, consultar sus preferencias relacionadas con las sesiones de carga y otra información relacionada con el FEV, como el estado final de carga real / inicial y la capacidad de la batería. El usuario del FEV puede acceder al sistema de gestión vía smartphone y/o simplemente web. El problema que aquí se plantea es el diseño del modelo relacional de su base de datos y el repositorio correspondiente, como describimos en la sección 2.2.2.

A continuación detallamos los problemas presentados por el CSCC y la interfaz de usuario.

### 2.2.1 Centro de Control (CSCC)

El CSCC es el núcleo central de nuestra arquitectura. Hemos desarrollado una solución alojada en la nube que controla la interoperabilidad entre FEV (a través del plug-in correspondiente del vehículo eléctrico *-PEV-*), las estaciones de carga (CS) que conforman la red (*Energy Grid*) y los usuarios (via web o smartphones), de acuerdo a la arquitectura propuesta.

Los problemas que plantea el diseño del CSCC vienen descritos en los siguientes puntos. Su solución cubre los objetivos que hemos presentado en la sección 1.1 del capítulo previo.

1. **Estimar la autonomía** de la flota de FEV. El problema consiste en analizar y obtener a priori la evolución del estado de carga ('State of Charge', SOC) de los FEV para prever las posibles demandas de carga y, por tanto, las posibles llegadas a uno u otro punto de carga en la ciudad.
2. **Prever la demanda de energía** a la red. Es importante conocer a priori qué energía va a requerirse de la red y, por tanto, conocer anticipadamente la energía que la red debería ofrecer a la ciudad para el aprovisionamiento de energía a los

FEV. Esto dependerá del número de CS disponibles, de los FEV de la posible flota y del propio mapa vial.

3. Estudiar qué energía debe ser suministrada a los FEV y qué energía podemos disponer de ellos para optimizar la distribución total de energía disponible.

Uno de los problemas que se plantean es cómo la red pueda superar los momentos de picos de alta demanda de energía por parte de los FEV. Para resolver este problema es importante estudiar la **disponibilidad neta de energía en las estaciones de carga** (CS) considerando ambos servicios, el de suministro, que se conoce como *G2V* (*'grid to vehicle'*), y el que denominamos *V2G* (*'vehicle to grid'*), que permite una recuperación de energía y que posibilitan los FEV. El problema que plantea el diseño del servicio *V2G* es que a priori no se sabe cómo los FEV son capaces de devolver energía a la red por haber cargado más de la que necesitaban o bien por haberla generado debido a su propio sistema eléctrico. Las propias características eléctricas del FEV posibilitan que este servicio pueda implementarse y llevar a cabo una gestión óptima de la demanda de energía con el fin de reducir los costes de cara al usuario y a su vez mejorar la eficiencia de red.

Se trata, por tanto, de encontrar una solución óptima a la satisfacción de las exigencias de los usuarios y las necesidades de la red.

4. Diseñar una **gestión de la demanda** para optimizar el consumo y el coste de la energía. Es decir, el problema radica en que la red pueda intervenir en la mayor o menor disponibilidad de energía en los momentos que se necesita, provocando así que se reduzca o aumente la demanda de energía por parte de los usuarios. Por ejemplo, en los momentos pico de máxima demanda de energía, la red debe poder intervenir controlando la disponibilidad de energía en las CS. A su vez, los FEV deberían colaborar con la red en los momentos de máximo y/o mínimo aprovisionamiento de energía. En adelante a esta gestión la denominamos gestión activa de la demanda (**DSM**, *'Demand Side Management'*)
5. Integrar la solución a todos los problemas previos en el CSCC, permitiendo así la interoperabilidad entre las CS de la red y los FEV.

## 2.2.2 Interfaz de usuario

Se trata de diseñar una base de datos adecuada para visualizar en cada momento la siguiente información:

1. Mapa indicando la localización y la disponibilidad de las diferentes **estaciones de carga** dentro de un área local.

2. Información sobre el estado de carga de los FEV, sus posibles **demandas de energía**, las reservas efectuadas y su predisposición a ofrecer un servicio V2G.
3. Información sobre la **potencia suministrada** por las compañías de energía y el precio de la energía en cént.€/kWh.

Como resultado del tratamiento de estos datos puede detectarse el desbordamiento de energía en el sistema de interoperabilidad local cuando la energía solicitada es mayor que la energía proporcionada por las compañías eléctricas.

A modo de ejemplo, en la siguiente figura mostramos los gráficos obtenidos en nuestra interfaz de usuario. Estos gráficos reflejan datos de localización, demanda de energía y potencia suministrada, respectivamente.

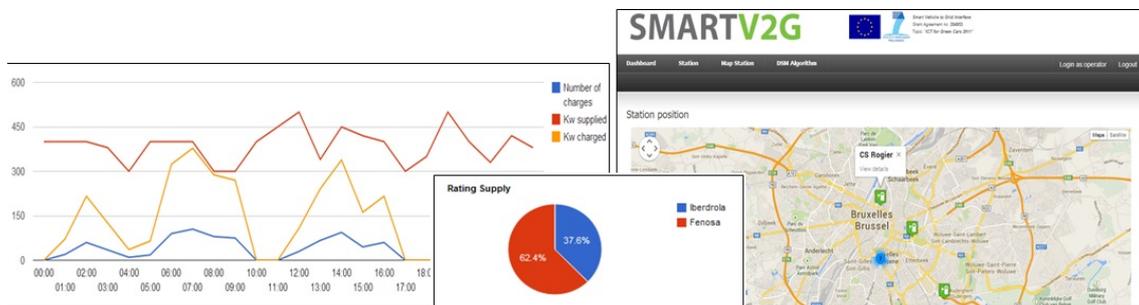


Figura 3. Gráficos de referencia de la grid y mapa de CSs.

Es muy importante que la interfaz de usuario proporcione información sobre las CS, ya que en función de si las CS se encuentran disponibles o no, por ejemplo, un usuario podrá cargar su FEV en un momento u otro. Datos interesantes que necesitaríamos conocer sobre las CS serían:

- Disponibilidad de la estación. Se trata de conocer si la CS funciona correctamente o si por el contrario está fuera de servicio.
- Descripción de las sesiones de carga en ejecución. Es decir, datos sobre la hora de inicio y finalización.
- Gráfico de consumo de energía. Es importante visualizar un gráfico en kWh en una escala de tiempo de horas, días, semanas, meses o años para mostrar el registro histórico y así analizar los hábitos de los usuarios de FEV en relación con la carga de sus vehículos a lo largo del día. Para cada intervalo de tiempo seleccionado el algoritmo debe calcular la suma total de kWh, demandadas y suministradas, para cada CS (*ver código en [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/)*).

## 2.3 Solución propuesta

Vamos a analizar y proponer soluciones a los problemas descritos en la sección anterior, para diseñar el CSCC y la interfaz de usuario.

### 2.3.1 Estimación de la autonomía de los FEV

El análisis del consumo eléctrico y, por tanto, la estimación de la evolución de la autonomía del FEV desde el CSCC se ha llevado a cabo mediante un algoritmo programado en Matlab, y cuyas especificaciones vemos a continuación:

#### 1. Análisis inicial de requerimientos

Para diseñar el algoritmo se especificaron una serie de supuestos esenciales basados en los factores que describimos a continuación:

- A. **Capacidad de la batería.** Debe ser conocida, ya que permite que el algoritmo pueda estimar la velocidad de descarga de la batería del FEV. Esta información se inserta manualmente bien por el usuario o bien cuando se ha dado de alta el FEV en la flota de la ciudad. Los datos que se necesitan son, por tanto, el valor de capacidad directa, en Wh, y el modelo del FEV.
- B. **Estado de carga inicial (SOC)** de la batería. Debe conocerse para calcular la estimación de llegada a la CS necesaria. Este valor se utiliza como dato de entrada en el algoritmo. Se introduce manualmente por el conductor. En escenarios futuros en los que los estándares de interoperabilidad estén más desarrollados, podrían ser comunicados a la aplicación por el propio vehículo.
- C. **Posición actual del FEV y ubicación de la CS seleccionada.** Se supone que son conocidas y se obtienen desde el sistema GPS ofrecido al usuario FEV.
- D. **Ruta a la CS deseada.** Obtenemos esta ruta a partir de la API de Google Maps.

Veamos a continuación en qué ha consistido el proceso llevado a cabo para diseñar el algoritmo de estimación de la evolución de la autonomía de los FEV.

#### 2. Diseño de la solución

Para diseñar el algoritmo que permita al CSCC estimar la autonomía del FEV en cada momento necesitamos seguir el siguiente proceso:

- (i) La primera tarea efectuada fue analizar el **trayecto** a realizar por el FEV y **descomponerlo** en partes de manera que cada una de ellas permita hallar una estimación más aproximada del consumo de energía en cada momento. La API

*Maps Directions*<sup>\*\*\*\*</sup> de Google proporciona información sobre cómo dividir la ruta en estas partes, que denominamos ‘pasos’. Un ‘paso’ es la unidad más elemental de una ruta y solo contiene una instrucción específica como puede ser ‘Gire a la derecha en Leopold II’. El paso también contiene información de distancia y duración relacionadas con la forma en que este paso se relaciona con el paso siguiente. Por ejemplo, un paso denominado "Gire ligeramente a la izquierda en Antwerpse laan" puede contener una duración de 800 m y 45 segundos, lo que indica que el siguiente paso se efectúa tras 800 m y 45 segundos después de este paso. Cada paso contiene los siguientes campos:

- *Instrucciones HTML*: instrucciones presentadas como una cadena de texto html para ser implementada en código.
- *Distancia*: Contiene la distancia recorrida en cada paso. Este campo puede no estar definido si la distancia es desconocida.
- *Duración*: Contiene el tiempo medio estimado requerido para realizar cada paso. Este campo puede no estar definido si la duración es desconocida.
- *Ubicación inicial*: Contiene la ubicación del punto de inicio de cada paso, como un conjunto único de coordenadas: latitud y longitud.
- *End*: Contiene la ubicación del punto final de cada paso, como un solo conjunto de coordenadas de latitud y longitud.

(ii) Una vez analizado el trayecto, necesitamos construir una **matriz de pasos** para implementar en código la ruta del FEV y a partir de ella estimar la necesidad de energía de la batería del FEV.

A partir del concepto de ‘paso’ desarrollamos esta matriz en formato XML. En ella cada componente define un solo ‘paso’ en el enrutamiento. En la siguiente figura mostramos una pequeña muestra del código desarrollado:

```
function calcRoutetime(lat1, long1, lat2, long2) {
  var request = {
    origin: new google.maps.LatLng(lat2,long2),
    destination: new google.maps.LatLng(lat1,long1),
    travelMode: google.maps.TravelMode.DRIVING
  };
  directionsService.route(request, function(result, status) {
    if (status == google.maps.DirectionsStatus.OK) {
      for(var i in result.routes){
        var mylegs=result.routes[i].legs
        for(var j in mylegs) {
```

---

<sup>\*\*\*\*</sup> <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/?hl=es-419>

```

time=mylegs[j].duration.text;
distance = mylegs[j].distance.value;
duration = mylegs[j].duration.value;
}
}
document.getElementById('time').value=time;
}
});
}

```

(iii) La siguiente tarea fue **modelizar** la **descarga de la batería** del FEV.

En nuestro trabajo consideramos FEVs que son susceptibles de ofrecer un servicio V2G, es decir, que pueden colaborar con la red al aprovisionamiento de energía cuando la situación lo requiera, como ya hemos definido en el capítulo anterior. Este servicio V2G es el que caracteriza la red y la gestión de energía en el nuevo modelo urbano.

Dado que existen distintos modelos físicos de baterías recargables para los FEV, tomamos el desarrollado por Hosseini-Badri-Parvania (*'The Plug-in Electric Vehicles for Power System Applications: The Vehicle to Grid (V2G) Concept'*, [19]) específicamente para FEV que son susceptibles de ofrecer un servicio V2G. Para estudiar su proceso de carga/descarga consideramos el modelo Cerero-Camacho, estudiado en [20], por ser el más utilizado. Este modelo permite simular una batería Hosseini sobre un entorno real en el que interaccionan los FEV con el resto de vehículos y con las CS. Este modelo está desarrollado íntegramente en Matlab y destaca por la flexibilidad de su configuración. Entre las ecuaciones allí obtenidas destacamos la que mostramos en la siguiente figura y que utilizamos en nuestro desarrollo Matlab.

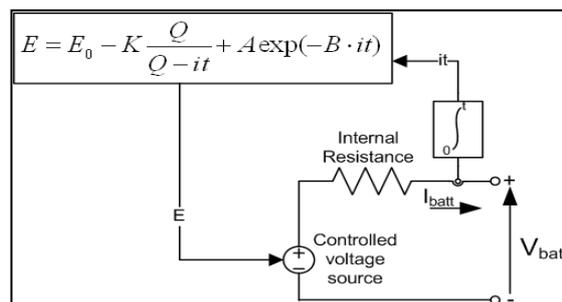


Figura 4. Diseño equivalente para la simulación del proceso en batería (MathWorks, Inc).

En esta figura mostramos el diseño que hemos llevado a cabo para simular el proceso de descarga en batería, donde  $E$  es el nivel de energía estimado,  $E_0$  el nivel de batería inicial,  $t$  el tiempo que lleva en marcha el FEV,  $i$  la intensidad de

corriente,  $Q$  la máxima carga soportada por la batería y  $K, A, B$  constantes características de la batería en cuestión, proporcionadas por Hosseini-Badri-Parvania ([21]).

El proceso requiere, por tanto, introducir la capacidad de la batería, es decir, la máxima energía que puede almacenar la batería, elemento que viene proporcionado por cada uno de los fabricantes. Tomamos este dato de la siguiente tabla que presenta los valores nominales de las capacidades de la batería para algunos modelos de FEV y que utilizamos en las pruebas del proceso programado:

Modelo de vehículo	Capacidad de la batería (kWh)
Renault Fluence Z.E.	22
Renault Zoe Z.E.	22
Nissan Leaf	24
Tesla Roadster	40 – 85
Tesla Model S	53
Mitsubishi i-MiEV	16
Honda Fit FEV	20
Chevrolet Volt/Opel Ampera	16

Tabla 2. Capacidades comerciales batería del FEV.

- (iv) Finalizamos nuestro algoritmo desarrollando en Matlab el **proceso de estimación del estado** de la batería del FEV. Es decir, se trata de estimar la necesidad de energía del FEV en cada momento con el fin de finalizar la ruta codificada en la matriz de pasos.

A partir del consumo, calculado en Wh/km (según [20]), como hemos visto anteriormente), dependiendo de cómo varíe la velocidad al usar el vehículo y la matriz de pasos proporcionada, podemos obtener de forma adaptativa, el alcance ('Scope') o autonomía del FEV en cada momento, como describimos a continuación.

La energía  $W$ , en kWh, que ha consumido el FEV se calcula a partir del consumo  $C$  de la batería, a partir de las variaciones de velocidad a las que sometemos a nuestro FEV a lo largo del trayecto y del tiempo en marcha del mismo, mediante la siguiente fórmula, que obtenemos a partir de las indicaciones de [20] y según las leyes habituales de física básica:

$$W (SOC) = \int_{t=t_0}^{t=t_{actual}} C(Wh/km) \cdot \frac{dv}{dt} \left( \frac{m}{s^2} \right) \cdot 3600^2 \cdot t \cdot dt \left( \frac{s^2}{h^2} \cdot h^2 \right)$$

Con el patrón de datos de velocidad y la estimación del consumo de batería, se obtiene la energía requerida por la batería para llegar a la estación de carga. La energía que queda en la batería del FEV es la que constituye el SOC en cada momento, es decir,

$$SOC = E - W,$$

siendo E la energía estimada inicial de la batería, calculada en el paso anterior (figura 5), y W la energía consumida hasta el momento.

El alcance se obtiene, según indicaciones obtenidas de [20], como:

$$Scope = \frac{\int_{t=t_{actual}}^{t=v/d} C \cdot \frac{dv}{dt} \cdot dt}{E - W},$$

siendo v la velocidad media del FEV y d la distancia que estimamos que queda por recorrer, según el análisis previo del trayecto.

Para implementar las ecuaciones obtenidas hemos desarrollado un diagrama de bloques que presentamos en la siguiente figura.

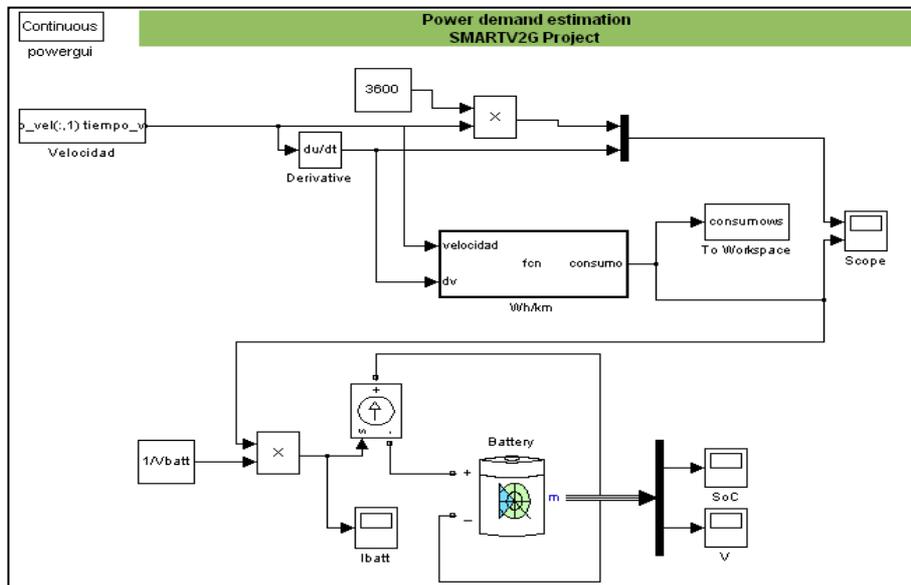


Figura 5. Diagrama en bloques Matlab para la estimación de carga.

Esencialmente se determina el SOC y el consumo eléctrico en función de la matriz de pasos calculada, del proceso de descarga de la batería utilizada (como hemos visto anteriormente), de la velocidad del FEV y de su variación ('derivative', en la figura anterior) a lo largo del trayecto.

La ejecución de este algoritmo, implementado según el diagrama de bloques de la figura 5 en Matlab, permite estimar la evolución del SOC y, por tanto, de la demanda de potencia del FEV.

Una vez implementado el proceso se probó en campo teniendo en cuenta los estándares europeos actuales (ciclo de referencia NEDC -*New European Driving Cycle*- para la homologación de vehículos según la norma Euro6 en Europa y la directiva 98/69/EC, según se presentan en el capítulo siguiente, sección 3.2). Esto es de gran interés porque se pretende conseguir una estandarización de las posibles diferencias regionales de los modelos urbanos que pudiesen surgir. Las pruebas de campo y sus correspondientes validaciones quedan detalladas en el siguiente capítulo.

### 2.3.2 Previsión de la demanda de energía

Para resolver el problema de prever la demanda total de energía, planteada en la sección 2.2.1, hemos diseñado un algoritmo que, teniendo en cuenta el mapa vial de la ciudad donde se desee integrar el FEV (sin considerar las distintas solicitudes de carga de los usuarios) y el tamaño de la flota de FEV en la ciudad, pueda anticipar la energía que la red debería poner a disposición de la ciudad para su aprovisionamiento de energía a los FEV.

Es importante notar que las características del mapa vial de una ciudad condicionan la mayor o menor afluencia de vehículos. Para diseñar el algoritmo que permite prever la demanda de energía necesitamos seguir los siguientes pasos:

1. Obtener los datos iniciales de tráfico de FEVs. Estos datos iniciales pueden ser (i) reales, por disponer ya la ciudad de un histórico de datos, o (ii) simulados en Matlab, en el caso en que la ciudad no pueda facilitarnos tal histórico (*como fue el caso en Ljubljana*) o no existan tales datos reales por no existir flota de FEVs en la ciudad (*como es el caso de Valencia, donde el grado de penetración del FEV es prácticamente nulo*).

El cálculo de los datos iniciales es lo que denominamos ‘*simulación de los escenarios de partida*’ y lo llevamos a cabo mediante el entrenamiento de redes neuronales, en particular de la red neuronal introducida por James A. Momoh y Yanchun Wang en el artículo “*Artificial Neural Network Based Load Forecasting Center for Energy Systems and Control (CESaC)*” ([22]). Esta red neuronal se ejecuta sobre el mapa vial de Ljubljana haciendo uso para ello de las funciones Matlab proporcionadas por Howard Demuth en el capítulo 8 de su libro “*Neural Network Toolbox: For Use with Matlab*” ([23]) y considerando el tamaño de la flota de FEVs.

2. A partir de los datos iniciales de tráfico (reales o estimados) y del tráfico en la siguiente unidad de tiempo, estimar cuál es la función que mejor aproxima estos datos finales a partir de los iniciales. La estimación se efectúa mediante aproximación mínimo-cuadrática en Matlab. Una vez determinada la función que minimice el error cuadrático medio, será utilizada para estimar los datos de tráfico en instantes futuros.

La demanda de energía (sin tener en cuenta en este momento las solicitudes de carga) será, por tanto, proporcional a la estimación del tráfico efectuada.

Veamos cómo hemos llevado a cabo cada una de estas partes de los procesos descritos.

### 1. Simulación de los escenarios de partida (MatSim)

Como ya hemos explicado, en el caso en que no se disponga de datos históricos tenemos que generar unos datos iniciales.

Debido al hecho de que las pruebas en campo (*WP6 del proyecto SmartV2G, [D]*) se iban a desarrollar en Ljubljana (Eslovenia), para el estudio se selecciona este área. El primer paso para crear los datos es crear en MatSim ([J]) la red de carreteras.

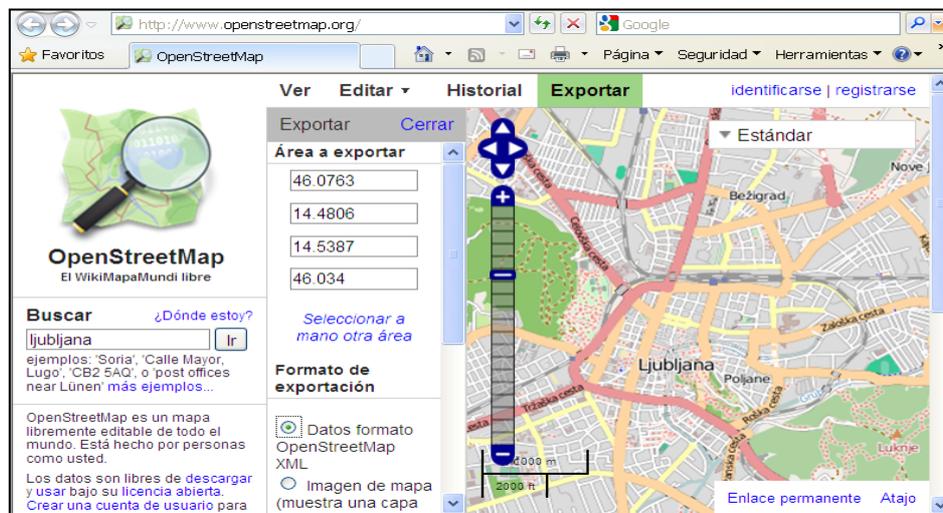


Figura 6. Vista de Open Street Map

El segundo paso es tener en cuenta las condiciones de entorno. Con el fin de reducir el número de casos que pudiésemos encontrar, hemos clasificado los posibles trayectos del FEV en la ciudad dependiendo del día en que sea utilizado. Es decir, el uso del FEV va a ser distinto si es utilizado un día laborable (para trabajar o para ir y volver al hogar) a si se utiliza por ocio o simplemente se usa para llegar a un punto de carga. Estos distintos usos del FEV dan lugar a lo que denominamos modos. Diferenciamos los modos doméstico -'home'-, laboral -'work'- y un tercer modo que denominamos 'other'

distinto a los dos primeros como podría ser el modo de funcionamiento durante un día festivo, como podemos ver en la siguiente muestra de nuestra programación:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<!DOCTYPE plans SYSTEM "http://www.matsim.org/files/dtd/plans_v4.dtd">

<plans>
  <person id="1">
    <plan>
      <act type="home" x="20" y="-5" end_time="06:00:00" />
      <leg mode="car" />
      <act type="work" x="80" y="5" end_time="16:00:00" />
      <leg mode="car" />
      <act type="other" x="20" y="-5" />
    </plan>
  </person>
</plans>
```

Estos modos se caracterizan por un conjunto de parámetros que son: distancias recorridas, velocidades, punto de partida, destino y tiempos de actividad. Estos parámetros son distintos dependiendo del uso que se dé al FEV, es decir, del modo. Por esta razón son de gran importancia para clasificar las pruebas que hagamos posteriormente.

El tercer paso consiste en usar la ANN (*Artificial Neural Network*) considerada, es decir, la red neuronal introducida por James A. Momoh y Yanchun Wang en el artículo “*Artificial Neural Network Based Load Forecasting Center for Energy Systems and Control (CESaC)*” ([22]). Ejecutamos recurrentemente esta ANN sobre el mapa vial de Ljubljana hasta que se observa una estabilización de los resultados obtenidos. Los resultados que consideremos estabilizados al ejecutar la ANN constituirán los datos iniciales que perseguimos.

Para efectuar las sucesivas ejecuciones de la red neuronal utilizamos las funciones Matlab proporcionadas por Howard Demuth en el capítulo 8 de su libro “*Neural Network Toolbox: For Use with Matlab*” ([23]).

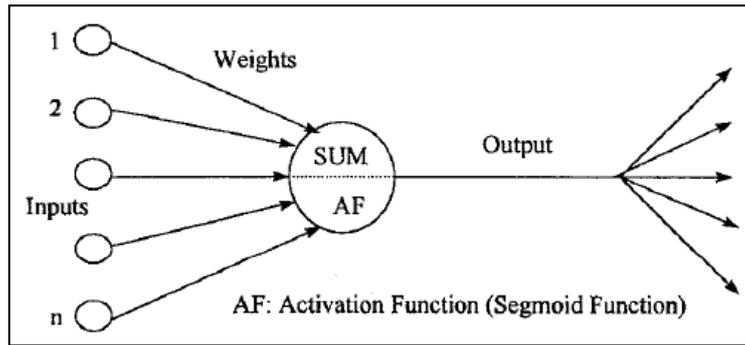


Figura 7. Modelado conceptual de una neurona

Matlab graba cada resultado en un fichero XML que vuelve a ser procesado. Denominamos ‘evento’ a cada uno de los resultados obtenidos, ya que cada uno de ellos desencadena una ejecución de la red neuronal, dando lugar a un nuevo evento.

De forma iterativa nos aproximamos a lo que queremos calcular, es decir, unos datos iniciales de tráfico en la ciudad.

El cuarto paso consiste en agregar los resultados conseguidos (distancias recorridas, tiempos de actividad, energía consumida y, por tanto, demanda de energía prevista) de todos los FEV que hemos introducido como parámetros iniciales según los distintos momentos del día en que se toman las mediciones. En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de la agregación de los resultados conseguidos en un escenario correspondiente a un día laborable en el cual se ha cargado cada FEV cuando su batería se ha descargado.

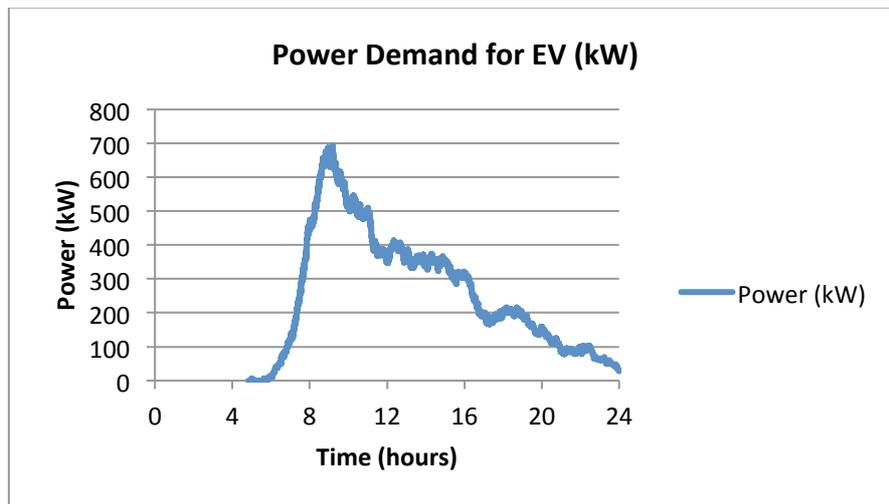


Figura 8. Demanda de energía agregada obtenida para un día de la semana en un escenario de carga libre.

## 2. Modelización de la demanda de energía real

Con los datos iniciales (reales o estimados) construimos una matriz formada por los vectores de datos iniciales (matriz cuya *dimensión* = *número\_vectores* \* *dimensión\_datos\_entrada*) y una matriz de salida, formada por el conjunto de vectores de datos resultado de la carga diaria estimada (matriz de *dimensión* = *número\_vectores* \* *dimensión\_datos\_salida*).

Los **vectores de entrada** corresponden a la carga diaria de los FEV correspondiente a días anteriores. Se eligió sólo dos tipos de días, días laborables y días de fin de semana. Para los días laborables, los vectores de entrada corresponden al día pasado (ayer) y el mismo día en las últimas 3 semanas. En los días de fin de semana los vectores de datos iniciales corresponden al mismo día en las últimas 4 semanas.

El **vector de salida** se obtiene mediante la ejecución recurrente de la red neuronal Momoh-Wang ([22]) y proporciona la estimación correspondiente de energía.

La siguiente tabla describe los vectores de entrada para cada tipo de día, denotando por ‘*d*’ al día actual en que se realiza la predicción.

DAY TYPE	INPUT VECTORS	OUTPUT VECTORS
Workday	24-hours charging load of d-1, d-7, d-14, d-21	24-hours charging load of d
Weekend day	24-hours charging load of d-7, d-14, d-21, d-28	

Tabla 3. Estructura vectorial de datos según el tipo de día.

Los datos iniciales deben estar normalizados para ser utilizados como entrada de la ANN. Si denotamos como  $P_k$  la energía disponible en las CS que estamos considerando en una hora  $k$ , el vector de carga para ese día será  $\vec{P} = \{P_k\}_{k=1}^{24}$ , donde cada una de sus componentes será la carga en cada una de las horas del día. Normalizando dicho vector, tendremos:

$$P_{k,norm} = \frac{P_k - P_{min}}{P_{max} - P_{min}}$$

siendo  $P_{min} = \min\{P_k / 1 \leq k \leq 24\}$ ,  $P_{max} = \max\{P_k / 1 \leq k \leq 24\}$ .

Hemos de efectuar a continuación una aproximación ortogonal mínimo-cuadrática sobre los datos iniciales creados, normalizados y organizados vectorialmente como acabamos de ver.

El problema que se nos plantea en este momento consiste en intentar obtener una función o procedimiento que nos permita estimar los datos de salida en función de los de entrada para poder estimar la salida en futuras acciones.

Para ello, sean  $\{x_k\}_{k=1}^n$  los datos de entrada normalizados (*input vectors*, comentados anteriormente) e  $\{y_k\}_{k=1}^n$  los datos de salida (*output vectors*, comentados anteriormente en la tabla 3). Nuestro objetivo es obtener la función que mejor se aproxime a los datos  $(x_i, y_i)$  que se utilizan como datos de partida.

La representación gráfica de los datos nos permite inducir el tipo de función  $f$  que mejor puede ajustarse a los mismos. Tomando intervalos suficientemente pequeños, como puede ser un día en nuestro caso, podemos observar que la representación gráfica de los datos se asemeja, con cierto error, a una recta en cada intervalo de veinticuatro horas. Este es el motivo por el cual elegimos una función  $f$  lineal para aproximar nuestros datos en intervalos que no superen las veinticuatro horas, para minimizar los errores de aproximación.

Veamos, por tanto, cómo determinar los valores más adecuados de los parámetros  $\{c_0, c_1\}$  que definen la función lineal  $f(x) = c_1x + c_0$  que mejor aproxima el cumplimiento de las condiciones estipuladas, es decir, las predicciones de carga las 24 horas del día  $\{y_k\}_{k=1}^n$  a partir de las cargas medidas días anteriores  $\{x_k\}_{k=1}^n$ :

$$\{y_k\}_{k=1}^n = \{f(x_k, c_1, c_0)\}_{k=1}^n = \begin{Bmatrix} c_1x_1 + c_0 \\ \vdots \\ c_1x_n + c_0 \end{Bmatrix}.$$

Estas condiciones representan un sistema algebraico de ecuaciones lineales que en principio habría que resolver para determinar los parámetros  $\{c_0, c_1\}$ . Sin embargo el sistema suele tener mayor número de ecuaciones que de incógnitas. Por tanto, en general, no existe solución. Esto nos lleva a optimizar el problema intentando encontrar la función lineal  $f$  que mejor se ajuste a los datos. Para ello utilizamos el concepto de error cuadrático medio que definimos a continuación.

Si  $N$  es el número de datos iniciales  $(x_k, y_k)$  de los que partimos, se define el error cuadrático medio cometido como

$$E_2(f) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f(x_k) - y_k)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N ((c_1x_k + c_0) - y_k)^2}.$$

La función mejor aproximación por mínimos cuadrados (LS) es aquella que minimiza este error cuadrático medio y se denomina aproximación mínimo-cuadrática. En este caso, por ser lineal, constituye la denominada recta de regresión.

Para minimizar el error cuadrático medio, derivamos su expresión respecto a cada uno de los coeficientes de la recta de regresión  $\{c_0, c_1\}$  e igualamos a cero. Es sencillo comprobar que tras los cálculos correspondientes obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \sum_{k=1}^N x_k^2 \right) c_1 + \left( \sum_{k=1}^N x_k \right) c_0 = \sum_{k=1}^N y_k x_k \\ \left( \sum_{k=1}^N x_k \right) c_1 + N c_0 = \sum_{k=1}^N y_k \end{array} \right\}.$$

Resolviendo este sistema obtenemos los coeficientes  $\{c_1, c_0\}$  de la recta de regresión. Esta recta permite estimar los datos de salida a partir de los datos de entrada, pudiendo llevar a cabo nuestros pronósticos de estimación de demanda de energía por parte de los FEV en los días siguientes a la carga demandada en un día en cuestión.

Tras esto se llevan a cabo sucesivas ejecuciones del algoritmo hasta que el error cuadrático medio cae por debajo de un umbral que quedará fijado por la ciudad.

Resumiendo, frente a la posible falta de escenarios reales en los que pudiésemos poner en marcha el modelo de aproximación mínimo cuadrática, se obtiene un escenario de partida en un entorno simulado en Matlab. Con los datos simulados calculamos las rectas de regresión en cada uno de los intervalos que hemos distinguido (por horas). El conjunto de los gráficos obtenidos dan una aproximación de la energía que la ciudad debe ofrecer para satisfacer la posible demanda. Este proceso se ha implementado utilizando lenguaje C# (ver [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/) para las especificaciones técnicas del desarrollo).

En el capítulo 3 presentamos los resultados de las pruebas realizadas.

### 2.3.3 Estudio de la disponibilidad neta de energía: servicios G2V y V2G

Una vez estudiada la necesidad de carga de un FEV y analizada la posible demanda de energía en el entorno urbano donde vamos a implantar la electromovilidad, se hace necesario estudiar la disponibilidad neta de energía en cada una de las CS. Se trata del servicio G2V, que permitirá a la red abastecer la demanda de energía del FEV. Al mismo tiempo es muy importante considerar el servicio V2G, mediante el cual los FEV colaboran con la infraestructura de red pudiendo devolver parte de la energía no consumida y así mejorar la eficiencia de la red en momentos críticos.

El análisis de la disponibilidad neta de energía en las CS implica modelizar el **comportamiento de la red**. Para ello tenemos que modelizar la movilidad en el núcleo urbano correspondiente.

Nuestro objetivo es, por tanto, estudiar la evolución de (i) la energía (G2V) que debe inyectar la infraestructura de carga a los FEV en función de la estimación de su ocupación y su SOC; y (ii) la energía que los FEV son capaces de devolver a la red (V2G) por haber cargado más de la que necesitaban o bien por haberla generado debido a su propio sistema eléctrico.

### **1. Análisis inicial**

Veamos cómo calcular los algoritmos que permiten obtener el total de energía G2V y V2G a priori desde el CSCC, teniendo en cuenta que estos cálculos dependen de la modelización de la movilidad en la ciudad.

En primer lugar clasificamos nuestros usuarios FEV<sup>†††</sup> en tres grupos:

- A. Aquellos que no requieren una carga y que no se prevé que la requieran. Estos FEV presentarán un SOC > 99%, lo que implica que en principio tienen carga suficiente (aproximadamente la máxima, o “lleno”, como suele decirse en lenguaje de automoción) como para moverse libremente por el núcleo urbano.
- B. Aquellos que no requieren una carga inmediata pero que se prevé que puedan necesitarla. Es decir, que su SOC sea superior al mínimo –o ‘reserva’, como se diría en lenguaje de automoción-). Este tipo de usuario puede encontrarse en proceso de carga (reposo) o bien en proceso de movimiento y, por tanto, de descarga.
- C. Aquellos que requieren una carga inmediata (SOC < mín), los cuales siempre tendrán prioridad en el sistema.
- D. Usuarios no conectados a la red, los cuales pueden presentar un SOC cualquiera, de modo que cuando se conecten pasan a ser del tipo A, B o C.

Esto da lugar a los grupos A, B, C, D para los cuales la prioridad es creciente de C a A. En la siguiente figura presentamos gráficamente su interrelación:

---

<sup>†††</sup> PHEV, en lenguaje utilizado según el clustering que propone [34]

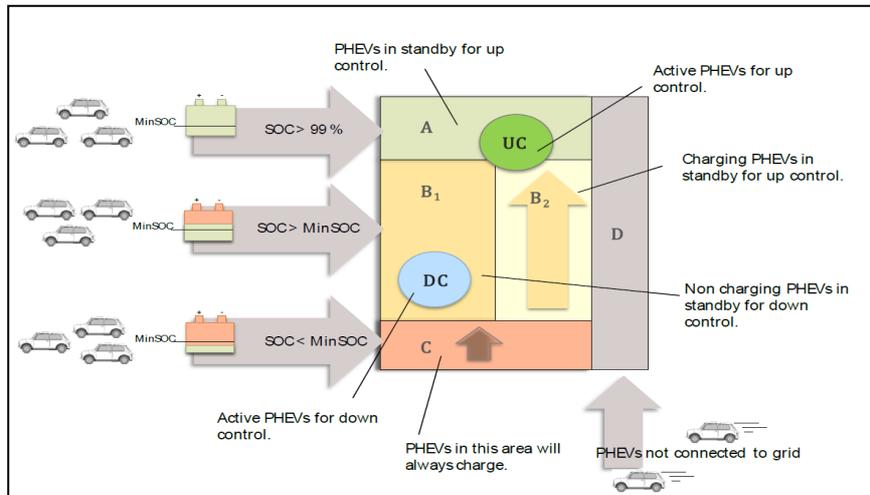


Figura 9. Proceso de agrupación realizado para la generación de servicios

Para estudiar el servicio V2G es importante relacionar la necesidad de energía de los FEV con la previsión de demanda de energía. Para ello tenemos en cuenta tres factores independientes que limitan la potencia de V2G, según [24]:

- 1) La capacidad de transporte de corriente de los cables y otros circuitos que conectan el vehículo a través de la red.
- 2) La energía almacenada en el vehículo, para ver cuál es su posible necesidad de energía y en cuánto tiempo podría consumirla.
- 3) La potencia nominal máxima de la electrónica de potencia del vehículo. Esta potencia viene dada por la siguiente fórmula, según [24], y es de gran importancia para poder calcular la disponibilidad de energía para satisfacer los servicios V2G y G2V, como vemos más adelante.

$$P_{vehicle} = \frac{\left(E_s - \frac{d_d + d_{rb}}{\eta_{veh}}\right) \eta_{inv}}{t_{dist}}$$

donde  $P_{vehicle}$  es la potencia máxima V2G en kW,  
 $E_s$  es la energía almacenada disponible como DC kWh al inversor,  
 $d_d$  es la distancia recorrida en km desde que la batería está llena,  
 $d_{rb}$  es la distancia de autonomía restante en km marcada por el controlador,  
 $\eta_{veh}$  es la eficiencia de conducción del vehículo en km/kWh,  
 $\eta_{inv}$  es la eficiencia de conversión eléctrica del inversor DC a AC (sin dimensiones),  
 $t_{dist}$  es el tiempo de carga de la batería.

La primera conclusión a la que llegamos es que la necesidad de energía del vehículo eléctrico ( $P_{vehicle}$ ) es inversamente proporcional al tiempo de movimiento del mismo y a

la distancia recorrida desde la carga, como era de esperar. Es importante destacar estas consideraciones porque las utilizaremos en el modelado de la movilidad en nuestra ciudad objeto y, por tanto, en el comportamiento de red.

Las CS no pueden estar indefinidamente disponibles para cualquier usuario que las requiera sin previo aviso, pues ello llevaría a un uso ineficiente del servicio G2V ya que no se tendrían en cuenta prioridades o cualquier otro tipo de condicionante en la red o en los FEV. He ahí nuestro propósito en este punto: optimizar esa disponibilidad de carga de las CS para cada uno de los usuarios que las requiera o para predecir que las pueda llegar a requerir.

Ahora bien, como se deduce de lo explicado, sólo podemos contar con información probabilística para anticipar la demanda de energía a las CS. Utilizamos teoría de procesos estocásticos (en particular cadenas Markov -[10], [11]-) para diseñar nuestro modelo. El modelo debe ser capaz de estimar las necesidades de energía de una flota de FEVs en un intervalo de tiempo concreto según los datos probabilísticos de entrada. Describimos a continuación, mediante un análisis probabilístico, cómo estimar los momentos en que los FEVs van a necesitar acudir a una CS, es decir, los intervalos de tiempo desde que los FEV abandonan una CS y vuelven a otra porque han consumido toda o parte de su energía y necesitan una carga. Si denominamos ‘estado’ al hecho de que un FEV se encuentre en una CS, a partir de los ‘**cambios de estado**’ de los FEV vamos a ver cómo el CSCC puede llegar a predecir un futuro cambio de estado, es decir, cuando el FEV necesitará una nueva carga de energía. Y a su vez, en caso de que aún disponga de energía, si en ese estado, si en la CS en la que se encuentre, se necesita que devuelva parte de ella.

Veamos el planteamiento formal del problema, cómo hemos aplicado la teoría probabilística asociada y cuál es el diseño final de nuestro modelo de movilidad de los vehículos eléctricos en un núcleo urbano debido a las necesidades de carga. Esto requiere diseñar un modelo de comportamiento de la red, como ya hemos indicado.

## **2. Definición de los elementos del modelo de movilidad: estados, transiciones y probabilidades**

Para formalizar el problema planteado necesitamos identificar la noción de ‘estado’, como acabamos de hacer. Un **cambio de estado** significa que el vehículo eléctrico ha cambiado de encontrarse en una CS a encontrarse en otra. Por tanto todo cambio de estado tiene un estado inicial y otro final. En caso de que el FEV no proceda de ninguna CS se le atribuye un estado inicial genérico para así incluir todos los FEV de los que no conozcamos su estado inicial.

Veamos cómo el uso de procesos estocásticos permite describir las transiciones entre estos ‘estados’ sin considerar la dependencia del tiempo, sólo su secuencia.

Cuando se considera la dependencia del tiempo en las transiciones entre estados, a tales procesos de cambios de estado se denominan procesos de Markov. Denominamos **tiempos de permanencia** en cada estado a los *tiempos de carga o de permanencia en la CS*. Estadísticamente se comprueba que estos tiempos se distribuyen exponencialmente ([25]). Sin embargo, el modelado de la movilidad de FEV no sigue una distribución exponencial, por lo que una solución es utilizar un proceso semiMarkov ([10],[11]), donde los tiempos de estancia distribuidos de forma no exponencial pueden ser modelados de otro modo, como vemos a continuación. Además, para diseñar nuestro modelo debemos tener en cuenta la dependencia del tiempo para hallar las **probabilidades de transición** y la distribución de los tiempos de estancia.

Para construir nuestro modelo hemos de hallar las probabilidades de que cada uno de los FEV se encuentre en una CS cargando en reposo o bien se encuentre en movimiento. Esta colección de probabilidades permiten modelar el volumen de FEV teniendo en cuenta las transiciones entre estados. Por tanto, las probabilidades más importantes a tener en cuenta en el presente estudio son:

- La **‘probabilidad de ocupación o permanencia’** en una CS. Se trata de la probabilidad de que un vehículo eléctrico llegue a un estado determinado (estación o punto de carga) y lo ocupe para proceder a su carga.

Estas probabilidades dependen del núcleo urbano, de la disposición de las CS y de cuál sea el motivo de la ocupación de la CS. La probabilidad de ocupación de una CS ubicada en un parque empresarial es muy distinta si se considera un día laborable o si se considera un día festivo. Esto da lugar a lo que denominamos ‘modos de comportamiento’ de los usuarios, que hemos distinguido entre doméstico (‘home’), laboral (‘work’) y cualquier otro (‘other’) distinto a estos dos como puede ser un festivo.

A modo de ejemplo, se muestra en el siguiente gráfico la probabilidad de ocupación en los tres modos de comportamiento (hogar, trabajo y otros) que hemos diferenciado para cada usuario. Veremos su obtención en el capítulo de pruebas, tras haber diseñado el modelo.

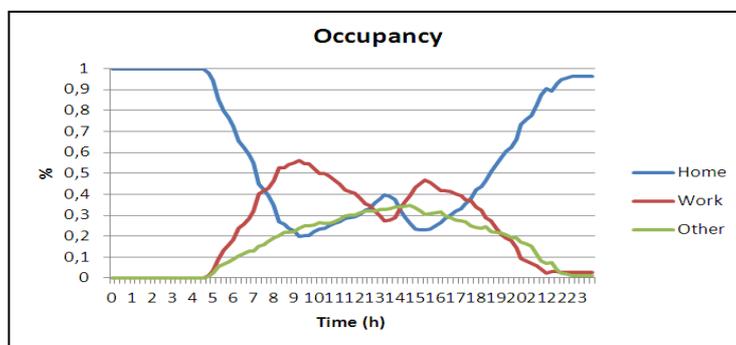


Figura 10. Probabilidad de ocupación en los tres modos de comportamiento diferenciados.

- La **probabilidad de transición** entre estados. Depende de la autonomía del FEV en cada momento, de la distribución de las CS y la de distancia media recorrida en cada intervalo de tiempo.

Describimos a continuación el modelo conseguido.

### **3. Formalización del problema y diseño del modelo de movilidad**

Como hemos explicado, denominamos ‘estado’ al hecho de que un vehículo eléctrico se encuentre en una CS determinada. Podemos suponer sin pérdida de generalidad que hay un número finito de estados (en nuestro caso, puntos de carga, es decir, CS) dado por la secuencia  $\mathbf{I}=\{1,2,\dots,m\}$ .

#### a. Definición de las cadenas de Markov necesarias para el modelo

Sea  $\mathbf{J}_n$  la variable aleatoria que representa el estado del sistema tras la transición  $n$ -ésima. Tenemos, por tanto, una sucesión de variables aleatorias discretas  $\{J_n, n \geq 0\}$ . Esta sucesión de variables aleatorias forman lo que denominamos una cadena de Markov si y sólo si se verifica que la probabilidad de encontrarse en un estado ‘j’ tras la transición  $n$ -ésima sólo depende del estado inmediatamente anterior, no de todos los anteriores. Formalmente, sea  $p_{ij}$  la probabilidad de que nos encontremos en un estado  $j$  tras haber estado en un estado  $i$  en el instante inmediatamente anterior. Es decir:

$$P(J_n = j | J_{n-1} = i, \dots, J_1, J_0) = P(J_n = j | J_{n-1} = i) = p_{ij}. \quad (1)$$

Por tanto nuestra sucesión de variables aleatorias es una cadena de Markov y la probabilidad de transición de un estado  $i$  a otro estado  $j$  depende solo del estado inicial  $i$ . De este modo, la distribución futura de estados depende solo de los estados actuales y no de cómo se ha llegado a ellos.

Por el Teorema de la Probabilidad Total, tenemos que, para cada estado, la probabilidad de ocupación es:

$$P(J_n = j) = \sum_{k=1}^m P(J_n = j | J_{n-1} = k) P(J_{n-1} = k) = \sum_{k=1}^m p_{kj} P(J_{n-1} = k),$$

siendo  $p_{kk}$  la probabilidad de reposo en el estado (o punto de carga)  $k$ -ésimo.

$$\text{Si } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & \dots & p_{m1} \\ p_{12} & p_{22} & \dots & p_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{1m} & p_{2m} & \dots & p_{mm} \end{bmatrix} = [p_{ij}], \text{ tenemos } \begin{pmatrix} P(J_n = 1) \\ \dots \\ P(J_n = m) \end{pmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{pmatrix} P(J_{n-1} = 1) \\ \dots \\ P(J_{n-1} = m) \end{pmatrix}.$$

La matriz  $\mathbf{P}$  (de orden  $m \times m$ ) se denomina **matriz de transiciones** entre estados. Sus entradas son probabilidades, por tanto verifican las condiciones de Kolmogorov. Es decir:

1.  $p_{ij} \geq 0, \forall i, j \in I$
2.  $\sum_{i \in I} p_{ij} = 1, \forall i \in I$

Una cadena de Markov se denomina homogénea si y solo si los valores de  $p_{ij}$  no dependen de  $n$ .

Hasta el momento no hemos considerado la dependencia de las variables aleatorias con respecto al tiempo. Veamos cómo tenerla en cuenta y cómo ello nos lleva a la definición de los procesos estocásticos que forman el modelo:

b. Definición de los procesos estocásticos del modelo. Probabilidades de permanencia y transición

Definida la cadena  $\{J_n, n \geq 0\}$  junto con sus probabilidades de transición, definamos las siguientes variables aleatorias:

Sea  $X_n$  el tiempo de permanencia en el estado  $J_{n-1}$ . Se trata de una variable aleatoria continua, pues depende del tiempo.

Tenemos así una sucesión  $\{X_n, n \geq 0\}$  de variables aleatorias continuas. Estas variables aleatorias dependientes del tiempo forman lo que se denomina un proceso estocástico.

Cada una de las variables del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad, que calculamos a continuación, y pueden o no estar correlacionadas entre ellas.

Para estudiar la colección de variables aleatorias definidas, vamos a calcular su función de distribución condicional. La función de distribución condicional representa la probabilidad de que un usuario que vaya a pasar a un estado 'j', se encuentre al menos durante un tiempo  $x$  en el estado 'i' antes de pasar al siguiente, 'j'. Es decir, la función de distribución condicional entre un estado inicial  $i$  y un estado  $j$  en un tiempo  $x$  es:

$$F_{ij}(n, x) = P(X_n \leq x | J_n = j, J_{n-1} = i). \quad (2)$$

Se define así la matriz  $F = (F_{ij})$  cuyas entradas son las funciones de distribución calculadas. Por el Teorema de Probabilidad Total podemos calcular la función de distribución de  $X_n$  sólo condicionada al estado  $i$ , es decir, la probabilidad de que un usuario se encuentre al menos durante un tiempo  $x$  en un estado antes de pasar al siguiente:

$$H_i(n, x) = P(X_n \leq x | J_{n-1} = i) = \sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot F_{ij}(n, x). \quad (3)$$

Se trataría de calcular la probabilidad de permanencia en un estado  $i$  durante al menos un tiempo  $x$  antes de pasar al siguiente.

Aplicando el teorema de probabilidad condicionada, la probabilidad de transición a un estado  $j$  durante un tiempo  $x$ , teniendo en cuenta que el estado inicial es  $i$ , es:

$$Q_{ij}(n, x) = P\left(\frac{J_n = j, X_n \leq x}{J_{n-1} = i}\right) = P\left(\frac{J_n = j}{J_{n-1} = i}\right) \cdot P\left(\frac{X_n \leq x}{J_n = j, J_{n-1} = i}\right) = p_{ij} \cdot F_{ij}(n, x). \quad (4)$$

Como toda función de distribución verifica que su limite en el infinito es la unidad, podemos concluir que

$$p_{ij} = \lim_{x \rightarrow \infty} Q_{ij}(x).$$

Queda así definida la matriz de transición del proceso  $\mathbf{Q}=(Q_{ij})$ .

### c. Modelo probabilístico de movilidad entre estados

Definimos a continuación unas nuevas variables aleatorias  $T_n$  que sólo tienen en cuenta el tiempo en el que se efectúa la transición a un estado  $J_n$ , sin tener en cuenta su procedencia ni los estados por los que se haya pasado. Es decir, teniendo en cuenta las anteriores variables aleatorias  $X_n$ , las nuevas variables quedarían definidas como sigue:

$$X_n = T_n - T_{n-1}. \quad (5)$$

Por tanto,  $T_n = \sum_{r=1}^n X_r$ , y esta sucesión de variables aleatorias define un proceso bidimensional  $(J, T) = (J_n, T_n), n > 0$ , que denominaremos **proceso de renovación**.

Sea  $N_j(t)$  la variable aleatoria que representa el número de transiciones al estado  $j$  en el intervalo de tiempo  $(0, t)$ . Para poderla utilizar, necesitamos estudiar su función de probabilidad:

Consideremos que partimos de un estado inicial  $J_0=i$ . Para llegar al estado  $j$  en el intervalo de tiempo  $(0, t)$ , podemos permanecer en el estado inicial  $i$  durante un tiempo  $\tau$ , tras el cual pasar al estado  $j$  final en como mucho un tiempo  $t - \tau$ . Además  $\tau$  es una variable continua que puede tomar cualquier valor entre 0 y  $t$ , ya que se trata de una variable temporal. Si queremos contemplar todos los casos, aplicando el teorema de la probabilidad total, tenemos que sumarlos de forma condicionada. En este caso como  $\tau$

es una variable continua, utilizaremos integrales definidas en vez de sumas, como vemos a continuación.

Para calcular la probabilidad de que un vehículo eléctrico llegue al estado ‘j’ n veces habiendo partido del estado “i”, es decir,  $P\left(\frac{N_j(t)=n}{J_0=i}\right)$ , tengamos en cuenta que el estado final j puede ser  $J_1, J_2, \dots, J_m$ , es decir cualquiera de los estados intermedios entre  $J_1$  y  $J_m$ . Formalizando esto tenemos:

$$\begin{aligned} P\left(\frac{N_j(t)=n}{J_0=i}\right) &= \sum_{k=1}^n \int_0^t P(\text{permanencia estado } i) \cdot P(\text{llegue a } j)(\text{en al menos tiempo } t) \\ &= \sum_{k=1}^n \int_0^t P\left(\frac{X_k \leq \tau}{J_0=i}\right) \cdot P\left(\frac{J_k=j, X_k \leq t-\tau}{J_0=i}\right) d\tau = \\ &= \sum_{k=1}^n \int_0^t H_i(k, \tau) \cdot Q_{ij}(k, t-\tau) d\tau = \sum_{k=1}^n H_i * Q_{ij}(k, t). \end{aligned}$$

Podemos calcular, por tanto, el número medio de transiciones desde el estado i aplicando el operador estadístico esperanza:

$$\begin{aligned} R_{ij} &= E[N_j(t)|J_0=i] = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P\left(\frac{N_j(t)=n}{J_0=i}\right) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \sum_{k=1}^n \int_0^t H_i(k, \tau) \cdot Q_{ij}(k, t-\tau) d\tau = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} Q_{ij}^n(t) = \delta_{ij} \cdot U_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} Q_{ij}^n(t), \end{aligned} \tag{6}$$

donde  $Q_{ij}^n(t)$  es el producto convolucional de  $H_i$  y  $Q_{ij}$ , y define la probabilidad de que la n-ésima transición al estado j en un tiempo t haya empezado desde el estado i.

La matriz  $R = (R_{ij})$  definida da lugar, por tanto, a un nuevo proceso estocástico.

Denominamos **función de ocupación (o permanencia) del proceso**, y la denotaremos como  $\phi_{ij}$ , a la probabilidad de estar en un estado j en el momento t, sabiendo que procedemos del estado i. Se calcula esta probabilidad como sigue

$$\begin{aligned} \phi_{ij} &= P\left(\frac{\text{estar en } j \text{ en } t}{\text{procedente de } i}\right) = \delta_{ij}(1 - H_i(n, t)) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} P(i \rightarrow k) \cdot P\left(\frac{\text{estar en } j \text{ en } t}{\text{procede de } k}\right) (\text{en al menos tiempo } t). \end{aligned} \tag{7}$$

A partir de la matriz de transición  $Q$  del proceso, la expresión de la función de ocupación (o permanencia) queda del siguiente modo:

$$\phi_{ij}(n, t) = P\left(\frac{\text{estar en } j \text{ en } t}{\text{procedente de } i}\right) = \delta_{ij}(1 - H_i(n, t)) + \sum_{k=1}^m \int_0^t \dot{Q}_{ik}(n, \tau) \phi_{kj}(n, t - \tau) d\tau.$$

Análogamente definimos la **función de transición del proceso** como la función de probabilidad de abandonar el estado  $j$  en el intervalo  $[t, t+x]$  habiendo partido del estado  $i$ , como:

$$\begin{aligned} \psi_{ij}(n, x) &= \\ &= \int_0^x P(\text{no permenezca en } j \text{ durante } x - \tau \text{ a partir de } t), \text{ procedente de } i \\ &\quad \cdot N^{\circ} \text{Medio (transiciones de } i \rightarrow j \text{ en } \tau) d\tau = \\ &= \int_0^x \left(1 - H_j(n, x + (t - \tau))\right) \dot{R}_{ij}(n, \tau) d\tau. \end{aligned} \tag{8}$$

Estas funciones de ocupación  $\phi_{ij}$  y transición  $\psi_{ij}$  definen tantas familias de ecuaciones como número de FEV tengamos en la flota para el núcleo urbano objeto de nuestro estudio. Este sistema de funciones modeliza la movilidad de la flota de FEV, lo cual nos permite estimar de qué energía necesita disponer cada CS (cada uno de los  $m$  estados tenidos en cuenta en el modelo) en cada momento, y dependiendo de si se prevé que el FEV vaya a llegar a un punto de carga o no. Se trata, por tanto, de la modelización del comportamiento de la red. Para resolver estas ecuaciones, (7) y (8), necesitamos discretizar el tiempo, convirtiendo nuestras variables aleatoria continuas en discretas. Esto lo conseguiremos definiendo lo que se denominan ‘slots’ temporales o bandas temporales en las que mediremos cada una de las magnitudes. Veámoslo.

#### d. Discretización del modelo para su resolución numérica

Utilizamos la fórmula de discretización, dada en [26], para obtener una solución numérica de las ecuaciones (7) y (8). En primer lugar obtenemos las **ecuaciones de evolución** en tiempo discretizado  $k$ , es decir, respecto a la ocupación de un estado  $j$  en el slot temporal  $k$ , sabiendo que procedemos del estado  $i$ , para la variable aleatoria  $n$ -ésima tenemos

$$\phi_{ij}(n, k) = \delta_{ij}(1 - H_i(n, k)) + \sum_{l=1}^m \sum_{\tau=1}^k \phi_{lj}(n, k - \tau) b_{li}(n, \tau), \tag{9}$$

donde, con el fin de simplificar la notación,  $b_{il}(n, k)$  es

$$b_{ij}(n, k) = \begin{cases} Q_{ij}(n, n) = 0 & \text{si } k = n, \\ Q_{ij}(n, k) - Q_{ij}(n, k - 1) = 0 & \text{si } k > n. \end{cases}$$

La probabilidad de **transición** en un momento k para la variable aleatoria n-ésima puede expresarse, por tanto, como

$$\psi_{ij}(n, k) = \sum_{\tau=n}^k (1 - H_j(n, k + t - \tau)) (R_{ik}(n, \tau) - R_{ik}(n, \tau - 1)). \quad (10)$$

e. Diseño del algoritmo de resolución numérica

Para resolver las ecuaciones (9) y (10) en tiempo discreto hemos utilizado métodos numéricos recursivos que utilizan las fórmulas de discretización dadas en [26], donde la resolución se realiza para un horizonte finito de 24 horas (caso transitorio) con un intervalo de tiempo de quince minutos, lo cual define un número de 96 intervalos de tiempo.

Las ecuaciones (9) pueden ser escritas en forma matricial como sigue,

$$\Phi(u, k) = \mathbf{D}(u, k) + \sum_{\tau=1}^k \Phi(\tau, k) \cdot \mathbf{B}(u, \tau). \quad (11)$$

O de modo más compacto como

$$\mathbf{U} \cdot \Phi = \mathbf{D}, \quad (12)$$

siendo la matriz  $\Phi$  la que tiene por entrada (i,j) la probabilidad de encontrarse en un estado j en el instante t, suponiendo que partimos del estado i.

Las matrices U, D son:

$$U = \begin{bmatrix} I & -\mathbf{B}(0, T) & -\mathbf{B}(0, 2T) & -\mathbf{B}(0, 3T) & \dots \\ \mathbf{0} & I & -\mathbf{B}(k, 2T) & -\mathbf{B}(k, 3T) & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I & -\mathbf{B}(2k, 3T) & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & I & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} I & \mathbf{D}(0, T) & \mathbf{D}(0, 2T) & \mathbf{D}(0, 3T) & \dots \\ \mathbf{0} & I & \mathbf{D}(T, 2T) & \mathbf{D}(T, 3T) & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I & \mathbf{D}(2T, 3T) & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & I & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

Resumiendo, partimos de las probabilidades de transición de un estado a otro (matriz  $\mathbf{P}$ ) y de los tiempos de permanencia en los estados extraídos del análisis estadístico de

los datos de comportamiento de movilidad. Además, es necesario conocer la distancia media de todos los viajes entre estados.

Para las matrices  $P$ ,  $F$  y para distancias medias entre estados, la solución de los sistemas lineales  $\Phi$ , ecuaciones (9), y  $\psi$ , ecuaciones (10), proporciona la información de disponibilidad del FEV (*es decir, cuándo podemos utilizar el vehículo eléctrico debido a que ya se encuentra cargado*) que buscábamos.

La solución de los sistemas lineales (9),(10),(11) para las matrices  $\Phi$  y  $\psi$  se obtiene mediante dos procesos iterativos que no requieren inversión matricial ([10]). El proceso iterativo de resolución el sistema (12) para conseguir  $\Phi$  es el dado en la siguiente figura, que ejecutamos en Matlab, dado el alto orden de las matrices implicadas en los sistemas:

```

SMT1 Reads the inputs:  $m, T, {}^T P, {}^T F$ 
SMT2 Constructs  ${}^T Q, {}^T U, {}^T D, {}^T S$ 
for  $s = 0$  to  $T$ 
     $U_{(s,s)} = 1$ 
     $Q_{(s,s)} = 0$ 
     $D_{(s,s)} = 1$ 
     $S_{(s,s)} = 0$ 
endfor
for  $t = 1$  to  $T$ 
    for  $s = t - 1$  downto  $0$ 
         $Q_{(s,t)} = P(s) * F_{(s,t)}$ 
        for  $i = 1$  to  $m$ 
             $S_{ij}(s, t) = Q_{is}(s, t) \cdot \mathbf{1}$ 
        endfor
         $U_{(s,t)} = Q_{(s,t)} - Q_{(s,t-1)}$ 
         $D_{(s,t)} = 1 - S_{(s,t)}$ 
    endfor
endfor
SMT3 Solves the system:
for  $s = 0$  to  $T$ 
     $\Phi_{(s,s)} = 1$ 
endfor
for  $t = 1$  to  $T$ 
    for  $s = t - 1$  downto  $0$ 
         $\Phi_{(s,t)} = D_{(s,t)}$ 
        for  $k = s + 1$  to  $t$ 
             $\Phi_{(s,t)} = \Phi_{(s,t)} + U_{(s,k)} \cdot \Phi_{(k,t)}$ 
        endfor
    endfor
endfor
SMT4 Prints the results:
 ${}^T Q, {}^T \Phi$ 

```

Figura 11. Proceso iterativo de obtención de la matriz  $\Phi$

#### 4. Análisis de disponibilidad de energía G2V y V2G

Procedemos al análisis de disponibilidad de energía en las estaciones de carga (CS) de la red. Como hemos anunciado, vamos a tener en cuenta una de las propiedades que tiene el FEV y que supone una ventaja frente a los vehículos no eléctricos: se trata de su capacidad de generación y/o devolución de energía. Es decir, un FEV, debido a su propio sistema eléctrico, puede almacenar más energía de la que necesita para desplazarse. Además posee una capacidad de generar energía como vehículo eléctrico que es. Esto vamos a tenerlo muy en cuenta a la hora de modelizar y optimizar la gestión activa de la demanda de energía en la ciudad.

Destacamos, por tanto, el servicio de reserva de potencia que denominamos G2V, correspondiente a la carga en sí del FEV, y el servicio de recuperación de energía que denominamos V2G, basado en su capacidad de generación y/o devolución de energía.

i. El servicio que hemos denominado G2V se identifica con la oferta de reserva de potencia al sistema. Es decir, se trata del servicio mediante el cual el FEV reserva en una CS un tiempo determinado para cargar su batería. Esta reserva dependerá del tipo de batería (y/o del vehículo) y de lo que desee el usuario del vehículo. Con ello, la red puede estimar la energía que necesita el FEV cuando hace la reserva y así estar preparada para proporcionar la carga. Además, en función del histórico de cada FEV, almacenado por el centro de control (CSCC), la red puede estimar:

- el tiempo de descarga del FEV tras salir del CS, y
- cuándo volverá de nuevo a reservar en una CS.

Para realizar esta estimación necesitamos el modelo probabilístico.

ii. El servicio V2G hace referencia a que el vehículo haya generado o haya almacenado en su batería más energía de la que requiere en su movilidad y que posteriormente pueda devolverla a la red, sustituyendo a una central de mayor coste, por ejemplo, en los períodos de pico. Su funcionamiento es análogo a lo que ya realizan las centrales hidráulicas de bombeo ([8],[9]).

Veamos cómo las ecuaciones obtenidas anteriormente (9-12) se utilizan como base para calcular la disponibilidad de energía para satisfacer estos servicios en cada intervalo de tiempo.

i. Estimación de lo que denominamos energía disponible ‘**negativa**’. Definimos ‘energía negativa’ como la asociada al primer servicio (G2V), es decir, la energía que tiene que estar disponible en las CS para ser inyectada en los FEV. Su estimación requiere el conocimiento de la llegada de los vehículos eléctricos a las CS y su permanencia. De hecho, una CS tiene que poder proveer a un vehículo de energía sólo cuando éste llegue al punto de carga y lo necesite, no en caso contrario: esto es lo que nos plantea la necesidad de optimizar el proceso.

La ‘energía negativa’ es proporcional a la probabilidad de estar en un estado  $j$  en un momento determinado, independientemente de su procedencia, y a la capacidad de la batería del vehículo eléctrico en dicho momento. Es decir, la energía negativa es proporcional a las probabilidades de ocupación, y al estado de carga de la batería (SOC), como lo hemos calculado con el algoritmo de estimación de carga inicial.

$$E_{G2V_j}(x) = \text{Prob}(\text{permanencia en } j \text{ al menos durante tiempo} = x) \cdot (1 - \%_{\text{SOC}}) \cdot P_{\text{vehicle}} =$$

$$= \sum_{r=1}^m \phi_{rj}(x) \cdot (1 - \%SOC_{(alg1)}(x)) \cdot \frac{\left(E_s - \frac{d_d + d_{rb}}{\eta_{veh}}\right) \eta_{inv}}{t_{dist}} .$$

En definitiva, esta energía negativa es proporcional a la matriz  $\phi$  y al porcentaje de batería utilizada del vehículo eléctrico:

$$E_{G2V} \propto \phi \cdot (1 - \%SOC_{(alg1)}) .$$

- ii. Estimación de la energía disponible ‘**positiva**’. De modo análogo al caso anterior, la ‘energía positiva’ es la asociada al servicio V2G, es decir, la energía que puede devolver el FEV a la red por haberla generado o bien por tener almacenada más energía de lo que necesitaba. Esta energía es inversamente proporcional, por tanto, a la energía que va consumiendo el vehículo eléctrico mientras no se encuentra en una CS y por tanto directamente proporcional a la probabilidad de que llegue al siguiente estado en el menor tiempo posible. El hecho de que un vehículo eléctrico consume su carga implica que se encuentra en transición entre una CS y otro punto de carga al que acudirá cuando considere que el porcentaje de carga que le queda se encuentra por debajo de unos mínimos establecidos por el fabricante, es decir, cuando el usuario FEV pasa de ser de tipo A o B a ser de tipo C, como hemos visto en el primer punto de la sección 2.3.3.

Además, la red recupera parte de la energía que previamente se ha inyectado a los FEV debido a la ya comentada capacidad de generación y devolución de energía de los FEV. Esto es especialmente importante en los períodos de pico cuando la red recibe una alta demanda, quizá superior a la que puede responder. De ahí que podemos definir esta energía positiva como “la energía transferida del FEV a la red” (V2G, [9]).

La ‘energía positiva’ es, por tanto, proporcional a la probabilidad de llegar a un estado  $j$  determinado en menos de un tiempo  $x$ , independientemente de su procedencia, es decir, depende de las probabilidades de transición y de la demanda de energía en el núcleo urbano objeto de estudio, como se ha calculado con el algoritmo de demanda de energía del punto anterior.

$$E_{V2G_j}(x) = \text{Prob}(\text{llegada a } j \text{ en menos de tiempo } = x) \cdot W_{\text{demandada (alg2)}} \cdot P_{\text{vehicle}} =$$

$$= \sum_{r=1}^m \psi_{rj}(x) \cdot W_{\text{demandada (alg2)}}(x) \cdot \frac{\left(E_s - \frac{d_d + d_{rb}}{\eta_{veh}}\right) \eta_{inv}}{t_{dist}} .$$

En definitiva, podemos decir que la energía positiva es dependiente del posible ‘tráfico’ estimado y con ello de la demanda de energía para garantizar la movilidad en la ciudad.

$$E_{V2G} \propto \psi \cdot W_{\text{demandada (alg2)}} \cdot$$

Ambas energías, la positiva y la negativa, dependen, además de las probabilidades de permanencia y transición respectivamente, de la distancia media recorrida, de las probabilidades de reposo, del consumo medio y de la capacidad de las baterías utilizadas en la flota FEV.

En el próximo capítulo presentamos los resultados de estimación del flujo de energía positiva y negativa dentro de la ciudad. Los resultados proporcionan información al CSCC sobre la estimación de flujo de energía V2G/G2V durante cada jornada. Las conclusiones de los resultados obtenidos suponen además un primer paso en la integración de este tipo de servicios en el mercado energético.

Veamos a continuación cómo usar el modelado del comportamiento de la red para controlar de modo inteligente las demandas de energía recibidas de las diferentes estaciones de carga durante el día en función de la red, el coste asociado (según el proveedor de energía) y las reservas realizadas por el usuario FEV.

### 2.3.4 Gestión activa de la demanda (DSM)

En esta sección vamos a resolver el problema de la gestión activa de la demanda para optimizar el uso de energía neta suministrada por la red y reducir los costes tanto para el usuario como para la propia red. Se trata de diseñar un proceso para que desde el CSCC se pueda controlar la demanda de energía y tomar las acciones necesarias para satisfacer las necesidades del usuario y de la red. Es lo que denominamos 'gestión activa de la demanda' (DSM, '*Demand Side Management*'). Para ello es necesario incluir una nueva variable: el coste de la energía, variable a lo largo del día y evidentemente dependiente del proveedor.

La gestión activa de la demanda consiste en adaptar en cada momento la demanda de energía a las posibilidades de la red, y evitar costes excesivos en los que pueden incurrir los FEVs y los momentos de sobrecarga de la red en los momentos en que el coste de energía es menor.

Los elementos que necesitamos conocer para alcanzar nuestro objetivo son:

1. Referentes al FEV:
  - a. Capacidad de la batería eléctrica.
  - b. Coeficientes de rendimiento de la batería de entrada / salida.
  - c. Nivel de carga máximo y mínimo permitido.
  - d. Tasas de carga / descarga.
2. Referentes a los puntos de carga:
  - a. Modo de carga lenta (potencia máxima alrededor de 3,3 kW).

- b. Modo de carga rápida (potencia máxima alrededor de 60-150 kW).
- 3. Modelado del comportamiento de red y de la movilidad del núcleo urbano.

### **i. Análisis inicial y planteamiento del método de solución del problema**

Para diseñar nuestra solución exigimos que las sesiones de carga sean controladas según un sistema que se encarga de actualizarlas en tiempo real cada vez que se produzca un evento de los siguientes tipos, como estudiamos en nuestra publicación [27].

- **Solicitud de carga:** El usuario FEV realiza una solicitud de carga cuando llega a una CS y se conecta a una toma de corriente previamente identificada, especificando las preferencias del usuario (nivel de carga deseado, hora inicial de carga, hora final de carga, toma elegida disponible). Esto permite proporcionar al usuario el coste de carga óptimo (“evento CR”).
- **Reserva:** Desde la interfaz de usuario se realiza una solicitud de carga especificando el tiempo de llegada previsto a la CS, además de sus preferencias, al igual que el caso anterior (“evento RV”). El sistema controlará la carga óptima y notificará el coste relacionado con la carga al conductor.
- **Gestión de la demanda:** En este caso, el actor involucrado es el proveedor de energía, que provoca en el CSCC un evento notificando un cambio intra-día en la tarifa de energía o en la potencia disponible de referencia para una toma temporal especificada (“evento DSM”).
- **Advertencia:** Se trata de una intervención de la propia red para recortar o incluso suspender el servicio de carga por alguna motivo justificado (“evento W”). Esta acción podría depender del fallo de algunas líneas o subestaciones, o de la inesperada caída de potencia desde la red de distribución. En este caso, el sistema debe reaccionar inmediatamente a la petición.

Vamos a plantear un problema de optimización de una función objetivo sujeta a ciertas restricciones expresadas en términos de desigualdades por el método simplex. En definitiva, se trata de buscar el máximo de dicha función objetivo sobre un conjunto de variables que son las que determinan el problema y satisfacen una serie de condiciones o restricciones (impuestas por los puntos de carga, los FEV y la propia red). Estas condiciones se traducen matemáticamente en forma de desigualdades, como vemos a continuación.

### **ii. Diseño de la función objetivo**

La función objetivo se define como los costes acumulados de la carga  $J_{cost}$  en una CS a la que se añade una cantidad de regularización. Sea  $J_{reg}$  la diferencia existente entre el nivel de carga total del FEV y el perfil de carga demandado por el FEV, según [28],

$$J = J_{\text{cost}} + \mu J_{\text{reg}}. \quad (13)$$

Los costes acumulados de carga vienen dados por

$$J_{\text{cost}} = \sum_{m \in M} \sum_{k=I}^{E_m-1} \Delta P_m \text{TC}[k] U_m[k], \quad (14)$$

siendo:

- $k$  el índice (representativo de cada unidad de tiempo, análogamente a como lo hemos utilizado con los SMP en diseño del modelo de movilidad de la sección 2.3.3),
- $M$  el conjunto de sesiones de carga controlada,
- $I$  el momento en que se activa el CSCC para el cálculo de los perfiles de carga,
- $E_m$  la hora de salida  $m$ -ésima del FEV,
- $\Delta P_m$  la potencia máxima permitida por la CS en concreto para la sesión de carga  $m$ -ésima,
- $T$  el tiempo de discretización,
- $C[k]$  la tarifa y
- $U_m[k]$  la señal de control a ser aplicada por la red. De conformidad con la norma IEC61851,  $U_m[k]$  es una variable semicontinua ( $U_m[k] \in \{0\} \cup [\alpha_m, 1]$ , con  $0 < \alpha_m < 1$ ).

Para modelizar  $J_{\text{reg}}$ , utilizamos conceptos de topología matemática. Como estamos trabajando con valores reales de carga, tenemos en cuenta topologías en  $\mathbb{R}^n$ , siendo  $n$  el conjunto de valores que tomamos en cada momento.

Podemos definir diversas normas en  $\mathbb{R}^n$ , entre las cuales tomamos  $\|\cdot\|_{\infty}$  como la  $l_{\infty}$ -norma definida en el espacio  $\mathbb{R}^n$ . Elegimos esta norma por comodidad y por adecuarse a lo que exige nuestro problema, como podemos ver. Es importante proceder a la definición estricta del concepto de norma y con ello el concepto de distancia. Esta norma queda definida como sigue:

$$\|v\|_{\infty} = \text{máx} \{|v_i| : v = (v_i)_{i=1}^n\}$$

La distancia o diferencia entre dos puntos  $v, w$  del espacio es:

$$d(v, w) = \|v - w\|_{\infty} = \text{máx} \{|v_i - w_i| : v = (v_i)_{i=1}^n, w = (w_i)_{i=1}^n\}.$$

El término que mide la distancia entre el nivel de carga del FEV y la referencia dada (y por tanto, que nos permite el seguimiento) es:

$$J_{reg} = \|\Lambda(P - P_{ref})\|_{\infty}, \quad (15)$$

donde  $\Lambda$  es una matriz diagonal de pesos,  $P$  es el vector de carga agregada (cuando el  $k$ -ésimo componente es la carga controlada en tiempo  $k$ ,  $P[k] = \sum_{m \in M_k} \Delta P_m U_m[k]$ ) y  $P_{ref}$  un vector cuyo  $k$ -ésimo componente es la referencia de carga definida por la red en la unidad de tiempo  $k$ .

### iii. Obtención de las condiciones/restricciones del problema de optimización

Analicemos las restricciones que presenta el problema. Para el desarrollo detallado de todas ellas, ver los anexos en la url [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/).

- Restricción para evitar que la carga acumulada no exceda el umbral  $P^*$  establecido por la red. Siendo  $E = \max\{E_m: m \in M\}$  tenemos:

$$\sum_{m \in M_k} \Delta P_m U_m[k] \leq P^*[k] \quad \forall k \in [1, E - 1]. \quad (16)$$

- Restricciones procedentes de la limitación de SOC dada por la capacidad de la batería. Sea la variable  $X_m[k]$  nivel de carga de la batería en el instante  $k$ . Tenemos:

$$X_m^{\min} \leq x_m[k] \leq X_m^{\max} \quad \forall m \in M \quad \forall k \in [1, E]. \quad (17)$$

- Restricciones procedentes de las preferencias del usuario. El estado final de la carga debe ser igual o mayor que el requerido por el usuario FEV.

$$X_m^{\text{ref}} \leq x_m[E_m] \leq X_m^{\max} \quad \forall m \in M. \quad (18)$$

- Modelización de pérdidas  $\xi_m$  necesarias para poder predecir de forma más realista el estado final de la cara (SOC) de los FEV controlados:

$$\begin{cases} x_m[k + 1] = x_m[k] + \Delta P_m T(1 - \xi_m)U_m[k]. \\ x_m[1] = X_m^0. \end{cases} \quad (19)$$

Se trata de la eficiencia de la batería del vehículo eléctrico. Este parámetro, proporcionado por el fabricante de la batería y medido en %, caracteriza el rendimiento de la batería, es decir, la energía que realmente aprovecha.

- Restricciones procedentes de los costes asociados a las sesiones de tarificación únicas:

$$c_m[I] + \sum_{k=I}^{E_m-1} \Delta P_m TC[k] U_m[k] \leq (1 + \varepsilon) c_m^* \quad \forall m \in M. \quad (20)$$

En el capítulo siguiente se presentan los detalles del software utilizado para resolver el problema de programación lineal planteado, la descripción técnica de los datos de entrada exigidos y los datos de salida obtenidos tras las pruebas realizadas, así como su análisis final.

### 2.3.5 Integración del sistema solución

La solución a los problemas planteados se integran en el CSCC, permitiendo al FEV y a la red disfrutar de los siguientes servicios:

Perspectiva del usuario FEV:

- El CSCC proporciona a cada CS un perfil de potencia de carga que intentará satisfacer las preferencias del FEV en la carga.
- El CSCC proporciona los costes en respuesta a una solicitud de carga.
- El CSCC garantiza un tiempo de espera al conductor en tiempo casi real.
- El CSCC garantiza que el coste real evaluado al final de la sesión de carga no difiera significativamente del presupuestado.

Perspectiva de la red:

- El CSCC supervisa y gestiona el estado actual de la CS que permite el uso de las siguientes órdenes:
  - (i) poner en funcionamiento cualquier estación de carga,
  - (ii) detener el funcionamiento de cualquier estación de carga por mantenimiento,
  - (iii) establecer el perfil de carga en la CS (salida DSM) para una nueva solicitud de sesión de carga,
  - (iv) detener a la fuerza cualquier sesión de carga si se detecta algún pico de energía,
  - (v) autenticar a un usuario para iniciar una sesión de carga.
- El CSCC estima diariamente los flujos de movilidad y la disponibilidad del servicio V2G.
- El CSCC proporciona una curva de carga que se ajusta a la obtenida por la red.
- El CSCC puede intervenir frente a variaciones notificadas de precio/volumen.
- El CSCC estima la demanda de energía en las diferentes estaciones de carga. Con ello proporciona información para la provisión de energía, la asignación de esta

energía a las CS, y la supervisión de la demanda de energía para evitar la sobrecarga y para asegurar que se satisfaga la previsión de demanda de energía en el núcleo urbano.

- El CSCC gestiona intervenciones de mantenimiento en las CSs. Cada tarea planificada se describe con datos como:
  - (i) inserción de nuevas tareas: planificadas (manuales o automáticas para mantenimiento periódico) o no planificadas (manuales),
  - (ii) resumen de todas las tareas con propiedades de calendario y búsqueda,
  - (iii) visión general detallada de la tarea requerida,
  - (iv) informes sobre cada tarea e informes estadísticos, e
  - (v) informes sobre inserciones de datos (quién, cuándo, qué).

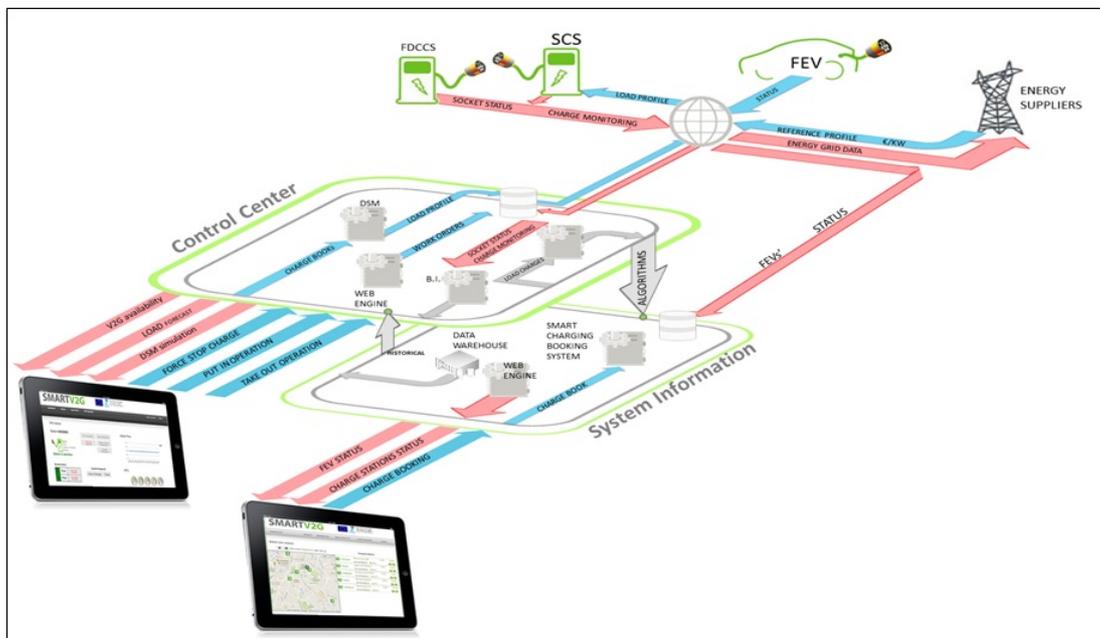


Figura 12. Integración del sistema 'Smart Vehicle to Grid'

Una vez que la gestión de la demanda de energía del FEV se encuentra incluida en el modelo, se puede analizar el impacto de la integración de los algoritmos desarrollados en nuestro trabajo en la operación del sistema. Resulta interesante estudiar cómo el sistema se ve afectado por diferentes escenarios (atención a la demanda de energía sin restricciones de red, bajo un control de la red, con intervenciones más o menos severas, entre las más importantes), como se verá en el capítulo de pruebas.

## 2.4 Diseño relacional de la interfaz de usuario

Presentamos a continuación la resolución del problema planteado por el diseño de la interfaz de usuario y cómo hemos estructurado su modelo relacional.

Como hemos mencionado en el Capítulo 1, este punto de nuestro trabajo no lleva proceso de investigación asociado. Sí, en cambio, incluye la parte de desarrollo.

Nuestro diseño es una solución *'Business Intelligence'* (BI) que permite:

- Gestionar cantidades ingentes de datos. Se necesita un análisis de datos previo al diseño relacional del repositorio de información necesario.
- Diseñar procesos que mantienen organizados todos nuestros datos.



Figura 13. Objetivo de la solución BI

Describimos a continuación las partes de los que se compone nuestro diseño:

1. El diseño de la base de datos.
2. El diseño de los procesos a implementar para mantener los datos actualizados.

Dejamos el diseño de la capa de presentación (*'front-end'*) para cada una de las implementaciones reales a las que se proceda como resultado de la aplicación de nuestros resultados.

### 2.4.1 Diseño de la base de datos

Como hemos indicado, se requieren herramientas *BI* para tener acceso a datos procedentes de varias fuentes de una manera unificada y estandarizada. Para lograrlo fue necesario analizar los distintos formatos de datos utilizados en las distintas empresas eléctricas existentes así como los sistemas de geolocalización de Internet, con el fin de crear una estructura de datos estandarizada.

El primer paso consistió en identificar qué datos se necesita almacenar y con ello definir las estructuras de datos que necesitamos:

- Definición de los datos de la **estación de carga**. Proviene de los estudios realizados en el WP2 del proyecto SmartV2G.

- Definición de los datos de **proveedores de energía**. Proviene del análisis de quién y cómo se envía información a los usuarios y a la red eléctrica.
- Definición de los datos de **usuario** (FEV). Proviene de cada FEV en sí (dependiente del modo en que cada usuario haya configurado su vehículo) y de la flota de FEV.
- Definición de los datos procedentes de Internet, en particular, los datos de la **posición** GPS que envía el FEV necesarios para visualizarlo en un mapa.
- Definición de los datos para conocer las **reservas** realizadas en cada estación de carga.

Las ventajas principales de almacenar estos datos son:

- Toda la información está en un solo lugar.
- Los datos se cargan automáticamente y se actualizan periódicamente.
- El almacén de datos está optimizado para la recuperación rápida de la información.
- La base de datos contiene información no sólo actual sino también histórica que permite realizar cualquier análisis de tendencias o comparación a lo largo del tiempo.
- El almacén de datos está modelado con definiciones claras y uniformes.

La siguiente figura ofrece una visión global del diagrama relacional diseñado. Podemos observar cuáles han sido las tablas diseñadas y cómo se han estructurado. Por ejemplo, es importante ver la estructura de la tabla de usuario (que hemos denominado '*dim\_user*') que contiene todos los datos relativos a la identificación del usuario como son su nombre, dirección, el password cifrado y el propio usuario de acceso (login) al sistema. Debido a la correspondencia entre usuario y FEV, la tabla de usuario tiene que estar conectada con la tabla que contiene los datos del FEV que utiliza (tabla '*dim\_fev*'). Esta tabla contiene campos tan importantes para nuestra gestión como el campo '*manufacturer\_id*' que caracteriza al fabricante del FEV y por tanto los principales valores de los parámetros que determinan el funcionamiento de elementos como la batería.

Un usuario podría utilizar o disponer de muchos FEV, por lo que la relación entre ambas tablas es 1:N. Para poder conocer las características de los FEV, la tabla que los identifica tiene que estar relacionada con otras tablas que identifican con mayor detalle al fabricante y el modelo de la batería utilizada, como son las tablas '*dim\_man*', '*dim\_chprt*' y '*fct\_charge*'. A su vez, para registrar las reservas de carga por parte del usuario y tener en cuenta cuál es el nivel de carga en todo momento, necesitamos registrar estos datos en una tabla que hemos denominado '*dim\_reserves*', como puede verse en la figura.

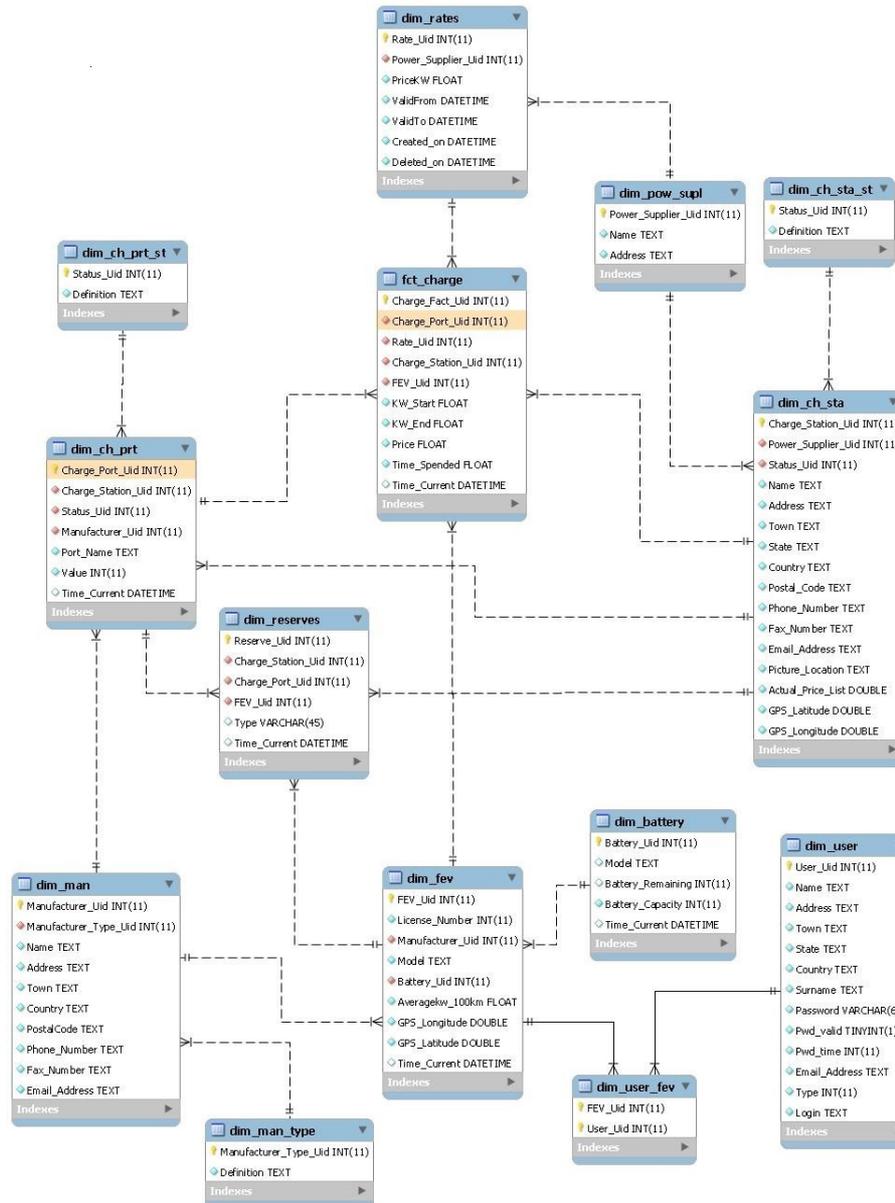


Figura 14. Diagrama relacional de la base de datos diseñada

## 2.4.2 Diseño de procesos

La interfaz de usuario también requiere procesos que permitan intercambiar la información necesaria entre el usuario FEV y el CSCC, así como permitir al usuario la búsqueda de las CS más cercanas.

Para conseguir estas funciones, el FEV se conecta a la Smart Grid (vía 4G, Wifi, entre otras posibilidades) para enviar su posición al centro de control, el cual se conecta al sistema externo de localización GPS para obtener la distancia en km a cada estación de carga. Esto lo hace utilizando el sistema GPS integrado en el FEV.

Así se pueden consultar las CS existentes en la base de datos, devolviendo al usuario las CS más cercanas como resultado de la petición. Como vemos en la figura, utilizamos los datos almacenados en la tabla ‘dim\_fev’, explicada anteriormente, para identificar el FEV desde el que se inicia el proceso. Cuando el CSCC recibe la petición del FEV, consulta las tablas ‘dim\_ch\_sta’ que caracterizan las CS y devuelve al usuario los resultados de la búsqueda junto con el estado (campo ‘status’ y ‘power\_supplier’ de la tabla ‘dim\_ch\_sta’). A continuación presentamos el esquema del diseño del proceso necesario para la búsqueda de carga.

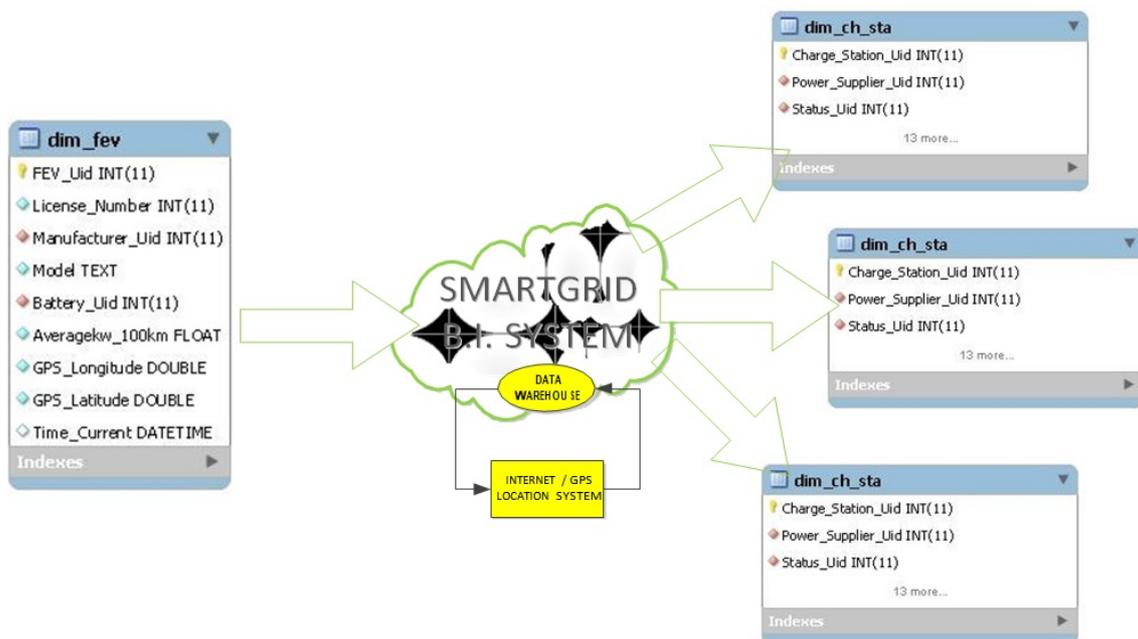


Figura 15. Proceso de búsqueda de estación de carga (CS)

Una vez seleccionada la CS, el usuario puede programar una carga en dicha CS. Para ello el usuario FEV envía al centro de control la información sobre el FEV y el usuario correspondiente (extraídos de la tabla ‘dim\_fev’), así como la fecha y hora deseada para efectuar la carga a través de alguno de los medios de comunicación inalámbrica existente. El centro de control procesa la petición conectándose a la CS para programar la carga y devolver al usuario FEV la confirmación (campos ‘charge\_station\_id’ y ‘power\_supplier\_id’ de la tabla ‘dim\_ch\_sta’).

En la siguiente figura mostramos los pasos seguidos por el proceso de reserva: una vez localizada la CS, el CSCC consulta si está disponible para la fecha y hora determinada por el FEV en su petición de reserva. Si no está disponible se acude a la siguiente CS localizada. En caso de que la CS estuviese disponible, se actualizan los datos en la tabla ‘dim\_reserves’ (conectada con ‘dim\_ch\_sta’) y se confirma la reserva enviando un email al usuario con dicha confirmación.

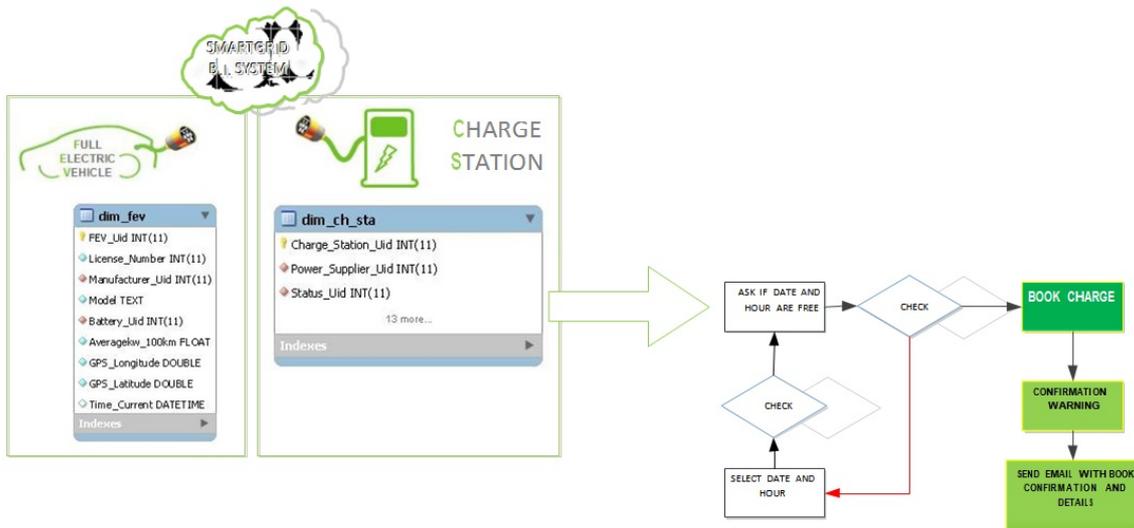


Figura 16. Proceso de reserva y actualización de datos en las CS.

Cada vez que se produzca un cambio en el sistema, para mostrar en tiempo real el último estado de la smart grid en el panel de control, es necesario actualizar la información en la base de datos. Para ello hemos creado dos procedimientos (que hemos denominado *state\_station*, *state\_car*) que actualizan los datos de las tablas pertenecientes a la interfaz de usuario con los datos relevantes de las estaciones de carga y FEV, respectivamente. Debido a su importancia en la implementación de la interfaz, destacamos los detalles de estos dos procesos:

- ‘**state\_station**’: tiene como finalidad actualizar en la base de datos el estado actual de cada CS cada vez que hay un cambio en dicha estación. Los parámetros necesarios para la entrada de datos en el procedimiento son:
  - (i) identificador de la estación,
  - (ii) identificador del punto de carga en la CS (si dispusiera de distintos puntos de carga),
  - (iii) hora local actual, y
  - (iv) estado actual del punto de carga.
  
- ‘**state\_car**’: tiene como finalidad actualizar en la base de datos la información del FEV cada vez que se realice una petición de carga. Los parámetros necesarios son:
  - (i) identificador del FEV,
  - (ii) consumo medio de los últimos 100 km,
  - (iii) latitud actual del FEV (GPS),
  - (iv) longitud actual del FEV (GPS),
  - (v) capacidad de la batería del FEV,
  - (vi) batería restante del FEV obtenido directamente del FEV o utilizando el algoritmo de estimación de la autonomía del FEV, y
  - (vii) hora local actual.

A continuación presentamos una parte del código que desarrollamos. Puede consultarse el resto de código en los anexos correspondientes, en la url [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/).

```

CREATE DEFINER='root'@'localhost' PROCEDURE `state_car` (
  IN License_Car varchar(50),
  IN avg_last double,
  IN latitude double,
  IN longitude double,
  IN timestamp INT,
  IN capacity INT,
  IN battery INT)
BEGIN
  DECLARE exists_car INT DEFAULT 0;
  DECLARE current_timer varchar(30);

  SELECT count(*) INTO exists_car from dim_fev
  where License_Number = License_Car;
  SELECT from_unixtime(timestamp) INTO current_timer;

  IF (exists_car > 0) THEN
    UPDATE dim_fev SET
      Averagekw_100km=avg_last,
      GPS_Longitude=longitude,
      GPS_Latitude=Latitude,
      Time_Current=current_timer
    WHERE License_Number=License_Car;
    UPDATE dim_battery B, dim_fev F SET
      B.Battery_Remaining=battery,
      B.Battery_Capacity=capacity,
      B.Time_Current=current_timer
    WHERE F.License_Number= License_car AND F.Battery_Uid=B.Battery_U
  END IF;
END

```

Figura 17. Procedimiento almacenado 'state-car'

Resumiendo presentamos el diseño relacional global del sistema, destacando cómo las tablas que forman el repositorio que podemos denominar del FEV y las tablas que forman el repositorio de red alimentan la base de datos central que sigue el diseño mostrado en la figura 19 anterior.

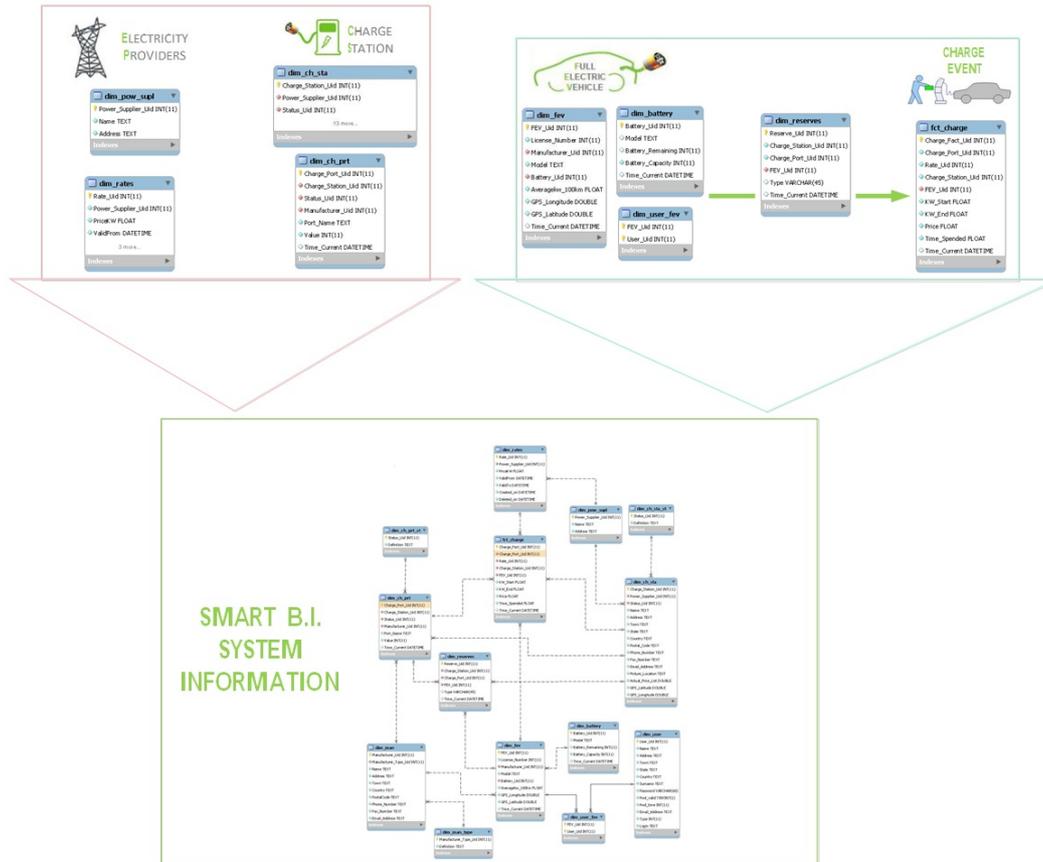


Figura 18. Diagrama relacional de la interfaz de usuario

### 2.4.3 Acceso y uso

Para acceder al sistema de información a través de la interfaz web se lleva a cabo un sistema de autenticación OTP (*One Time Password*) que ofrece una capa adicional de seguridad a nivel de usuario. Por esta razón el sistema, por cada acceso de usuario, genera una contraseña válida de un solo uso, que expira en 5 minutos después de su generación y es enviada por correo electrónico vía SMTP tras verificar que el usuario existe en la base de datos.

Una vez dentro del sistema de gestión, el usuario puede acceder a la información perteneciente a los FEV que estén vinculados al perfil. Principalmente, el sistema ofrece la posibilidad de mostrar la ubicación del FEV, función útil para los usuarios que tengan una flota de FEVs y deseen controlar la posición de los mismos. Además, el sistema ofrece datos relevantes sobre los FEV obtenidos del repositorio, destacando el nivel de la batería, autonomía, modelo, número de licencia.



Figura 19. Interfaz de inicio

Para realizar una reserva de carga del vehículo, la interfaz web permite al usuario realizar búsquedas de las estaciones de carga más cercanas dentro del alcance de la autonomía actual del FEV. Para ello hemos incluido en el diseño información que permite ayudar al usuario a elegir una estación de carga. Entre la información accesible, cabe destacar: (i) distancia en km entre el vehículo y la estación de carga, (ii) estado de la estación de carga (abierta, reparada o cerrada), (iii) precio estimado de la carga según el tiempo solicitado y la compañía eléctrica que alimenta a la CS, (iv) nivel estimado de carga de la batería con la previsión de llegada a la CS y (v) nombre de la estación.

Desde el punto de vista funcional, cuando un usuario selecciona una estación de carga para programar una reserva, el sistema ofrece al usuario la posibilidad de realizar la programación según tres tipos:

- La programación ‘express’ tiene como objetivo principal mostrar la fecha y hora libre más próxima. Por ello, en primer lugar, se calcula el tiempo necesario para llegar a la CS, y, basándose en la hora estimada como resultado del cálculo previo, el sistema comprueba si existe una toma libre para la CS seleccionada.

Como ejemplo de la interfaz implementada, presentamos la figura adjunta 25 donde puede observarse parte del detalle.

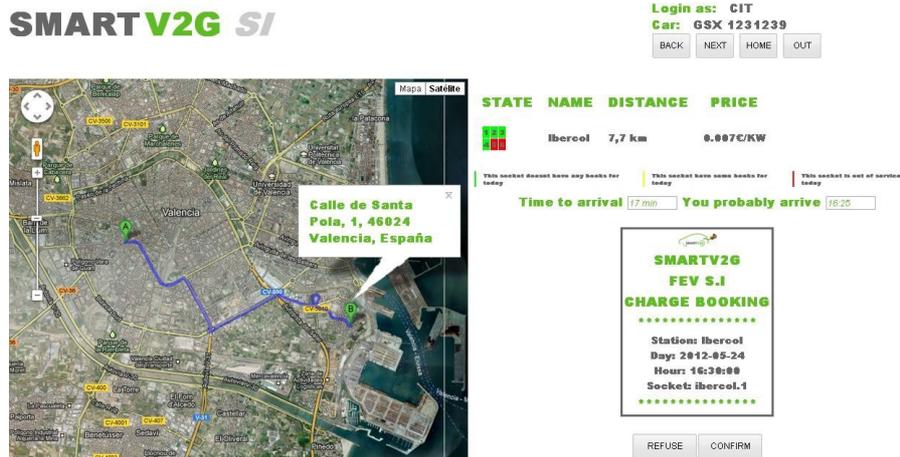


Figura 20. Pantalla carga express

- La programación 'normal' permite al usuario seleccionar el día y periodo en que se quiere realizar la carga. El sistema le mostrará gráficamente la disponibilidad de cada toma, desglosada en slots de 15 minutos.
- La programación 'completa' aporta como valor añadido la posibilidad de calcular el tiempo necesario para realizar una carga completa del FEV desde una hora inicial seleccionada.

Como paso final en la reserva, el usuario tiene la posibilidad de confirmar la carga, por lo que se envía la información al centro de control, el cual se encarga de actualizar la información en la base de datos. Con ello el usuario tiene en tiempo real el estado de la CS.

Efectuada la reserva, al usuario se le envía la confirmación por correo electrónico con un documento adjunto del resumen de la reserva y pago de la transacción. Dicha información es almacenada en la base de datos para disponer de un histórico de cargos que permite a las compañías eléctricas generar listados para la emisión de facturas en el caso que los usuarios tengan contratos establecidos en dichas compañías.

De este modo, y como conclusión, podemos decir que esta base de datos junto con el diseño de los procesos correspondientes permite mantener un histórico de datos a partir del cual poder calcular los distintos indicadores (*Key Performance Indicator, KPI*) que necesite cada implementación real en sí, dependiente de la ciudad donde estemos implantando el sistema y por tanto la interfaz de usuario.

Tesis Doctoral:

Interoperabilidad en el futuro ecosistema europeo de ciudades inteligentes

---

## Capítulo 3

# Pruebas del modelo de integración del FEV en la SmartCity

*“Existen dos tipos de verdades: Las verdades de la razón y las verdades de hecho”*  
~ Gottfried Leibnitz (1646-1716)

En este capítulo presentamos las distintas pruebas efectuadas para evaluar las soluciones propuestas en el capítulo previo.

Con el fin de testear nuestros resultados hemos diseñado una metodología, que presentamos a continuación, para llevar a cabo las distintas comprobaciones y pruebas en campo.

Empezamos llevando a cabo las pruebas en Valencia (España). Pero debido a que la penetración del FEV es muy baja o casi nula en esta ciudad, decidimos probar las soluciones diseñadas en Ljubljana (Slovenia). Aunque el organismo público de control de tráfico no pudo (por legislación vigente) facilitarnos un histórico de datos reales en el núcleo urbano, esta ciudad nos ofrece toda una flota de FEV y una red de estaciones

de carga (CS) a nuestra disposición, hecho que nos permite llevar a cabo todo nuestro plan de pruebas, como vemos a continuación.

### 3.1 Metodología

La metodología desarrollada para testear los resultados obtenidos en el capítulo anterior se compone de las siguientes fases:

- (1) En primer lugar probamos el algoritmo desarrollado para **estimar la autonomía del vehículo eléctrico** (teniendo en cuenta los estándares europeos) y obtener la evolución de su estado de carga. Para ello, hemos diseñado tres casos de prueba con diferentes rutas, dando lugar a tres escenarios reales distintos.
- (2) Para validar el algoritmo de **demanda de energía** según la dimensión de la flota de FEV, las necesidades y el mapa vial del **núcleo urbano**, se plantea diseñar dos experimentos:
  - i. En el primero, se desarrolla un conjunto de pruebas iniciales en un entorno emulado en MatSim (descrito en el capítulo anterior) con el fin de obtener unos datos iniciales de demanda de energía de la cantidad total de FEV en el núcleo urbano.
  - ii. El segundo experimento de nuestro plan de pruebas consiste en ejecutar el proceso diseñado para obtener la demanda de energía en la ciudad a partir de los datos iniciales obtenidos.  
Así, repitiendo recurrentemente el proceso obtenemos una situación que es la que consideramos como modelo final de la previsión de la demanda de energía en el núcleo urbano.
- (3) Teniendo en cuenta las pruebas anteriores, se analiza el proceso de disponibilidad neta de energía en las estaciones de carga. Esto nos permite llevar a cabo un modelado de la movilidad en la ciudad, ya que los vehículos eléctricos se mueven o no dependiendo de la disponibilidad de energía en los puntos de carga funcionales.

Se diseñan así distintos escenarios para ejecutar el algoritmo obtenido y estudiar:

- i. La energía que debe inyectar la infraestructura de carga a los FEV (*servicio G2V –‘grid to vehicle’-*) en función de las reservas previamente hechas por los FEV, la estimación de sus momentos de llegada a los puntos de carga, el estado de carga de su batería (SOC), el tiempo de carga estimado, la energía demandada y el número de vehículos de la flota existente.
- ii. La energía que los FEV son capaces de devolver a la red (*servicio V2G –‘vehicle to grid’-*) por haber cargado más de la que necesitaban o bien por haberla

generado debido a su propio sistema eléctrico. Una contribución muy importante de nuestro trabajo es este servicio V2G, pues caracteriza nuestro sistema y es el que va a permitir, como es nuestra pretensión, la adecuada gestión activa de la demanda de energía con el fin de **incrementar la eficiencia** de la red y consecuentemente **reducir los costes** de cara al usuario. Tengamos en cuenta que este servicio es de gran importancia para que la red pueda superar los momentos de alta demanda de energía por parte de los FEVs.

- (4) En cuarto lugar, se diseñan varios escenarios para analizar nuestra solución de **gestión activa de la demanda**. Es decir, para comprobar cómo la resolución del problema de optimización planteado mediante técnicas de programación lineal permite encontrar un equilibrio entre las necesidades del usuario del vehículo eléctrico (teniendo en cuenta las pruebas de autonomía), los requerimientos del proveedor de energía y los requisitos de optimización de energía en el núcleo urbano (teniendo en cuenta la previsión de demanda de energía). Las situaciones (entornos de test) en que efectuamos nuestras pruebas son:
- i. Situación de carga no controlada. Es decir, un primer escenarios en el cual la carga comienza tan pronto como los vehículos eléctricos se conectan en las CS.
  - ii. Situación de control de carga sin restricciones de red, sólo teniendo en cuenta las preferencias de los usuarios.
  - iii. Simulación del funcionamiento ‘normal’. Es decir, se trata de un entorno de test en el cual incorporamos restricciones de red.
  - iv. Reacción a eventos DSM (*Demand Side Management*). El objetivo de este escenario es mostrar cómo el control es capaz de reaccionar eficazmente a las señales de gestión activa de demanda, es decir, cómo llegar al equilibrio entre usuario y red cuando por alguna razón la red tiene que reaccionar aumentando o disminuyendo la potencia proporcionada.
  - v. Análisis de sensibilidad. El objetivo de este test es evaluar experimentalmente cómo dos indicadores de objetivos opuestos, el coste total y el error de seguimiento promedio, varían con el parámetro responsable del control.
  - vi. Pruebas y verificación adicionales utilizando datos reales. Se trata de un escenario de prueba utilizando datos reales, proporcionados por el principal proveedor italiano en este caso, especialmente con respecto al número de vehículos eléctricos, los tiempos de llegada a las estaciones de carga y la energía demandada.

Se diseñan tres simulaciones para evaluar el rendimiento del algoritmo en función de la flexibilidad permitida establecida por las preferencias del usuario. Estas simulaciones son las siguientes:

- Una primera simulación donde no se incluyen restricciones de red.
- Dos simulaciones donde se le da flexibilidad de tiempo adicional (treinta minutos y una hora respectivamente) a cada punto de carga para que pueda reaccionar frente a posibles controles de la red.

(5) Finalmente se presentan los resultados de la implantación en Ljubljana (Slovenia). Se diseñan las siguientes pruebas en uno de los puntos de carga pública instalados y operativos en la ciudad de Ljubljana:

- i. Aplicación de puntos de ajuste de carga estática. El objetivo de esta prueba es demostrar en campo el correcto funcionamiento de todo el sistema de control de carga del FEV en la red. Estas pruebas se realizan con un solo FEV y dejando que el control calcule el perfil de carga sólo al comienzo de la sesión de carga, sin actualizarlo periódicamente.
- ii. Puntos de ajuste de carga periódicamente actualizados. En esta segunda prueba, el sistema de control actualiza cada cinco minutos los puntos de ajuste de la carga, ejecutando recurrentemente el algoritmo de control de carga del FEV descrito en el capítulo anterior.

A continuación presentamos el diseño de los distintos experimentos de nuestro plan de pruebas, en qué han consistido, cómo se han llevado a cabo, cuáles han sido sus resultados y cuál ha sido la validación final con las pruebas integradas.

## 3.2 Estimación de la autonomía del FEV desde CSCC

Empezaremos por testear el algoritmo de estimación de la autonomía del vehículo eléctrico haciendo uso de los estándares europeos actuales. El objetivo de esta simulación es obtener el estado final de carga de la batería del vehículo eléctrico y así analizar el consumo de los vehículos eléctricos en la ciudad. Con esto habremos probado su autonomía y la posible viabilidad de implantación de la electromovilidad.

El algoritmo fue probado y simulado con Matlab<sup>###</sup>, teniendo en cuenta los estándares relacionados con los ciclos de conducción.

---

<sup>###</sup> <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

Un ciclo de conducción es un conjunto de puntos asociados a la velocidad del vehículo en función del tiempo. Se utiliza para evaluar el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes de un vehículo de manera normalizada, de modo que los diferentes vehículos pueden ser comparados. El modelo conocido como NEDC (*New European Driving Cycle*) se utiliza como ciclo de referencia para la homologación de vehículos según la norma Euro6 en Europa. Se compone, según la directiva 98/69/EC, de una parte urbana llamada ECE (0-780 s) y de una extra-urbana denominada EUDC (*Extra-Urban Driving Cycle, 780-1180 s*), teniendo en cuenta todos los ajustes indicados en la directiva 70/220/EC. En ambas partes el FEV, tras haber estado toda la noche en reposo, se reinicia por la mañana y se hace funcionar en hora punta con múltiples paradas, repitiéndose así cuatro veces el proceso.

Las principales características del ciclo utilizadas para la simulación son: 11023 m de distancia, 1180 s de duración y velocidad media de 33.6 km/h, dato que se obtiene evidentemente de los dos anteriores. El algoritmo fue validado haciendo uso de un Renault Fluence Z.E., de capacidad 22 kWh y una prueba de ciclo de conducción.

En primer lugar presentamos en la siguiente figura la variación de la velocidad a la que sometimos al FEV en función del tiempo de marcha del vehículo en carretera durante un NEDC.

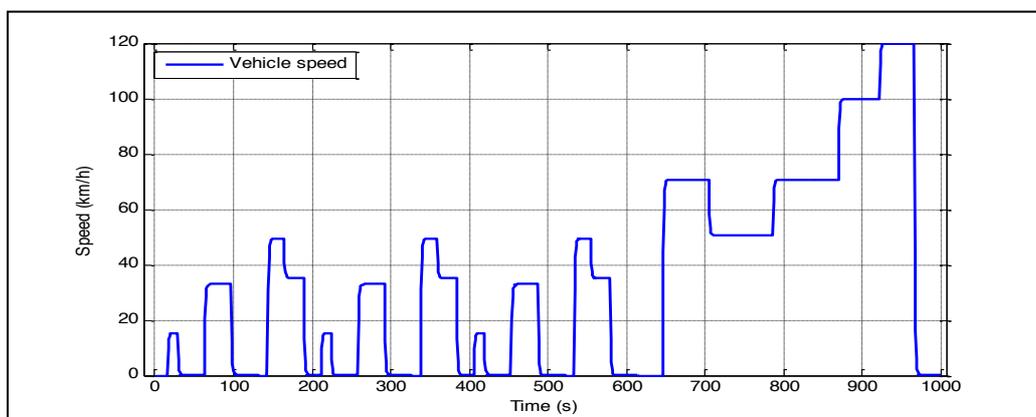


Figura 21. Velocidad del vehículo para el ciclo de conducción europeo (NEDC).

Ejecutando el proceso Matlab cuyo diagrama de bloques se presentó en el capítulo previo (*figura 5*), obtenemos la siguiente demanda de potencia del FEV en función del tiempo transcurrido mientras el vehículo está sometido al ciclo de conducción NEDC.

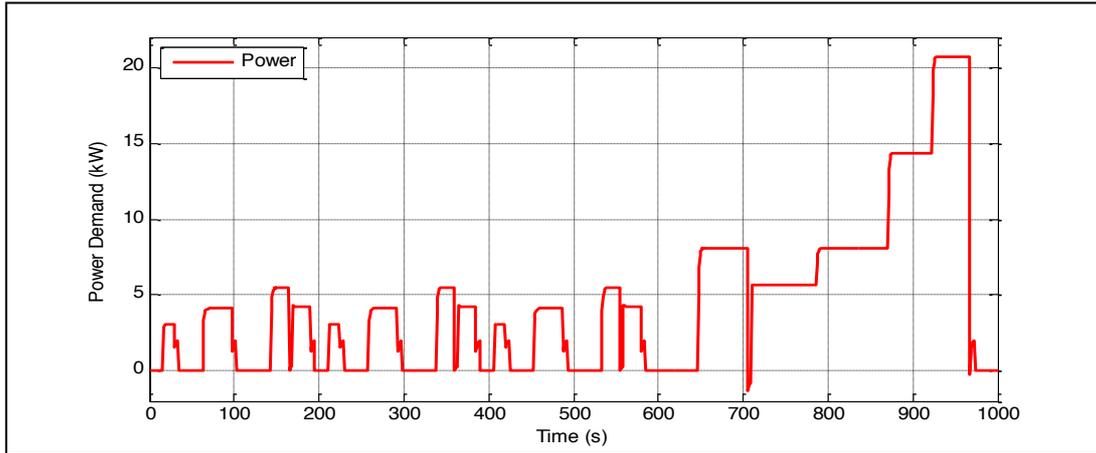


Figura 22. Potencia requerida por la batería del FEV.

A partir de esta estimación de potencia requerida por la batería del FEV y teniendo en cuenta la capacidad de la batería (modelizada según vimos en el capítulo previo) y la utilización de accesorios en el vehículo, calculamos la evolución del estado de carga de la batería (SOC). La figura presentada a continuación muestra la corriente y la evolución del estado de carga de la batería. Los parámetros utilizados para estas simulaciones son:

- SOC inicial = 80%
- Capacidad de la batería = 22 kWh
- Tipo de ruta y velocidades = Nuevo ciclo de conducción europeo (NEDC)
- Utilización de accesorios = 2 kWh (Aire acondicionado + equipo de audio).

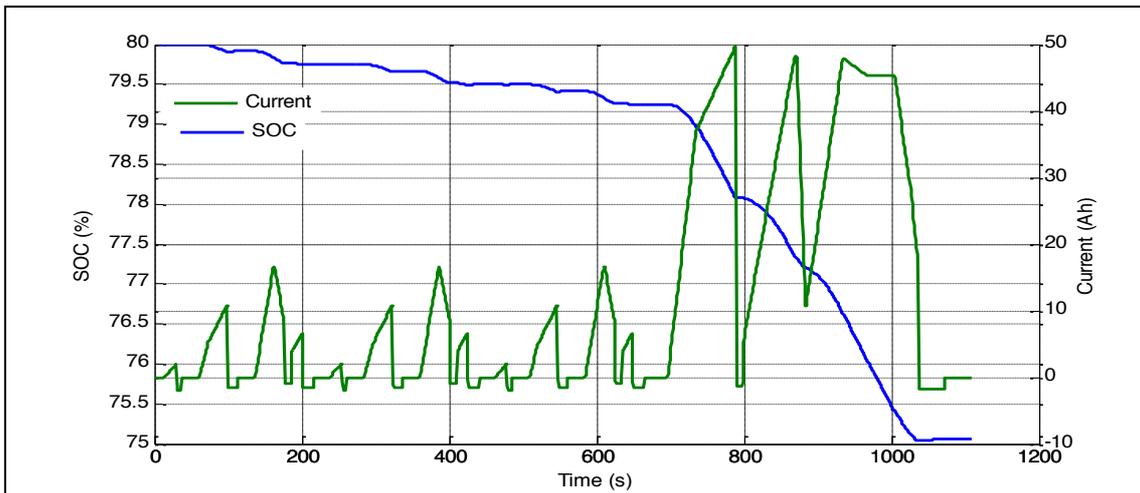


Figura 23. Estado de carga y corriente de batería.

Una vez ejecutado en Matlab el algoritmo de estimación de la autonomía de FEVs, el siguiente paso fue compilarlo en una biblioteca Java para su integración como funcionalidad en el panel de control del CSCC.

Para verificar su correcta implementación diseñamos tres escenarios correspondientes a distintas rutas. Cada escenario se testeó con un vehículo Renault Fluence Z.E tras haber cargado completamente la batería, y como punto de origen los laboratorios ITE (Instituto de Tecnología Eléctrica) ubicados en Paterna (España). Los dos primeros escenarios fueron cortos para corroborar un punto de partida correcto para este bloque de pruebas y así proceder con un tercer test más complejo por incluir un trayecto más largo que unía dos ciudades (no sólo intraurbano) y sometido a unas condiciones más severas. A continuación describimos los tres tests más representativos de nuestras pruebas, que nos permiten comprobar el control de la autonomía del FEV desde el CSCC.

La siguiente tabla define cada ubicación:

#	Lugar	Dirección	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
1	Instituto Tecnológico de la Energía (ITE)	Av/ Juan de la cierva,24, Paterna, Valencia, Spain	39.5463	-0.4540
2	CIT	C/ E.P. Sector Gremis A, nº1, Valencia, Spain	39.4614	-0.4140
3	Playa de la Malvarrosa	C/Isabel de Villena, 2, Valencia, Spain	39.4753	-0.3257
4	Puerto de Sagunto	Av/de la hispanidad, 2, Puerto de Sagunto, Valencia, Spain	39.6650	-0.2287

Tabla 4. Comprobación de la ubicación de las estaciones de carga

### ***Test #1: Desplazamiento entre ITE y CIT***

Para realizar esta prueba, cada paso de viaje se obtuvo mediante Google Maps especificando origen y destino. Tras la solicitud a Google Maps, obtenemos un archivo xml con la siguiente información resumida sobre los pasos de viaje:

Paso	Duración (s)	Distancia (m)	Descripción del paso (instrucciones)
#1	132	1429	Head to the southeast to Av. Juan de la Cierva
#2	52	269	At the roundabout, take the first exit Ctra. Cruz de Gracia
#3	46	357	At the roundabout, take the fourth exit towards CV-35 Valencia
#4	82	2214	Merge onto CV-35
#5	106	2425	Take exit 5 to merge onto CV-31 towards CV-

			365/Paterna/Aeroport/Burjassot (center) / V-30/Port
#6	47	1001	Keep right at the fork, follow signs for A-7/E-15/Circumval·lació/N-335/València (Sud) and CV-30 passes
#7	171	4141	Keep left at the fork, follow signs for N-335/Torrent/Valencia (South) / Port / Alacant / City of Arts and Sciences and goes to V-30
#8	16	249	Take exit 8 towards CV-36, heading Torrent / Picanya / Paiporta / Vara de Quart
#9	13	238	Merge onto CV-30
#10	12	282	Slight left to stay on CV-30
#11	17	224	Take the ramp Quart Beach
#12	17	286	Merge onto CV-36
#13	22	279	Take the exit toward V-30/A-3/Madrid
#14	38	808	Keep left at the fork and go to CV-30
#15	12	233	Take exit 6A toward Three Forques Av / Av. del Cid
#16	21	230	Keep right at the fork and follow signs for Avenida Tres Forques
#17	47	158	Slight right onto Gremis EP Sector B
#18	17	61	Gremis Sector B EP continues clockwise until Gremis EP Sector A
<b>Total</b>	<b>868</b>	<b>14884</b>	

Tabla 5. Pasos del viaje 1

Estos pasos corresponden a la ruta entre las oficinas centrales de ITE en el Parque Tecnológico de Paterna (Valencia) y nuestras oficinas (CIT) en Ciudad Empresarial Ros Casares en Quart de Poblet (Valencia), mostrada en la siguiente figura:

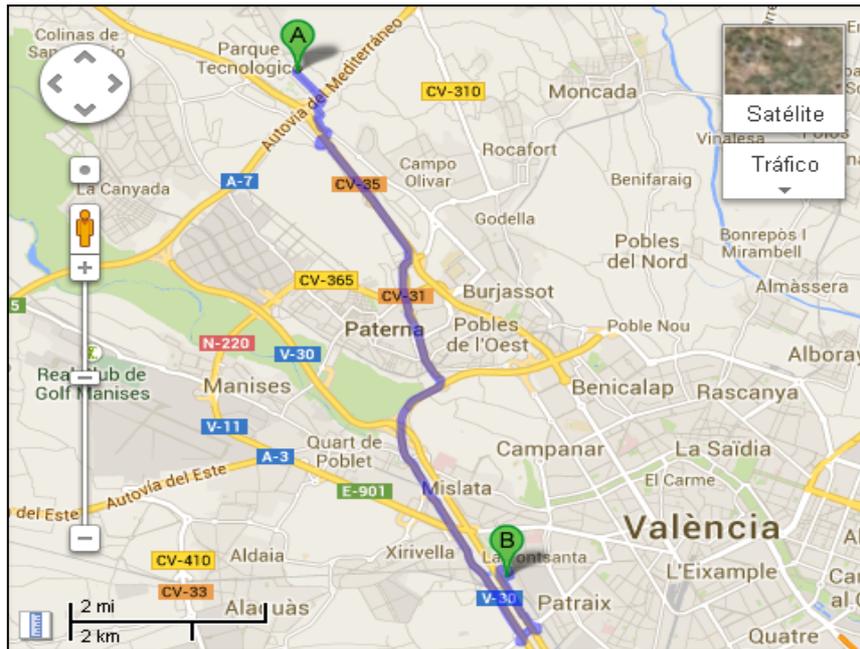


Figura 24. Test 1: ruta para la validación del algoritmo de autonomía

En la siguiente figura vemos los resultados:

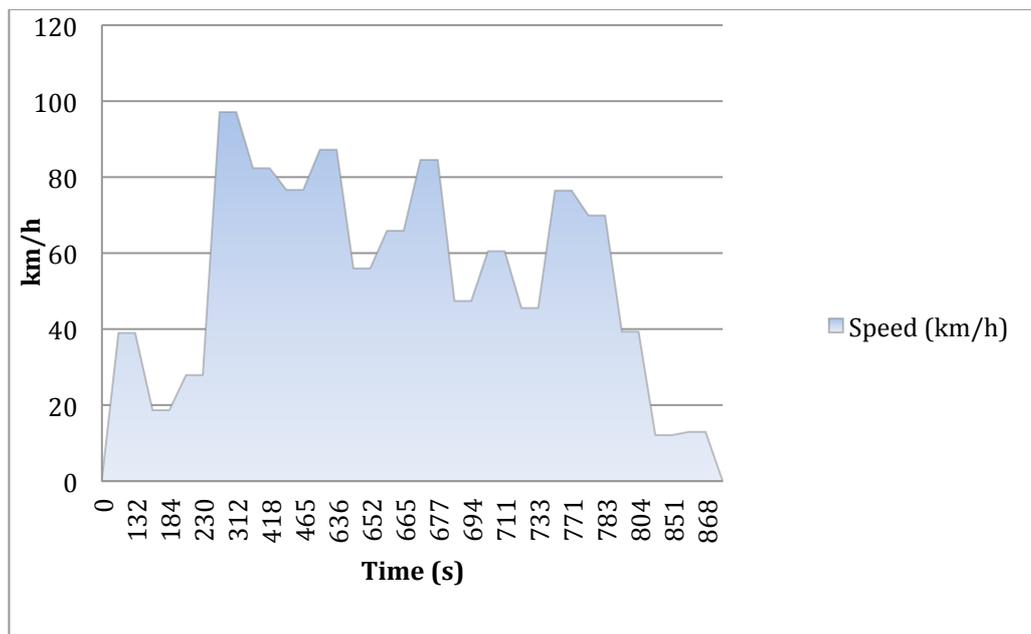


Figura 25. Test 1: velocidad del viaje.

Mediante las simulaciones es posible ver la evolución del SOC en todo el recorrido, como presentamos en la siguiente figura:

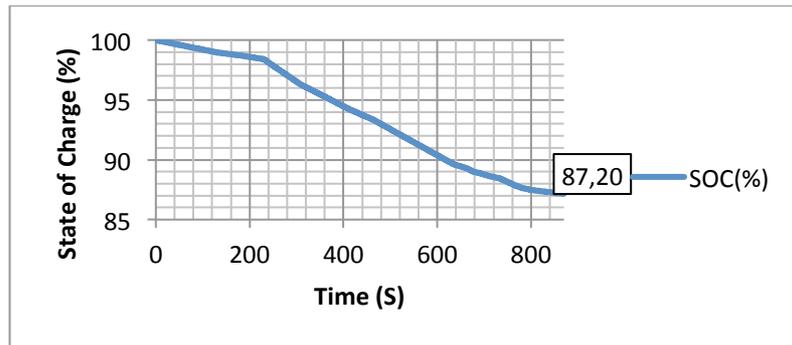


Figura 26. Test 1: evolución del SOC.

De la gráfica obtenida tenemos que el valor final del SOC es del 87,20%. Esto significa que a lo largo de la ruta diseñada, que tiene una longitud de 14,8 km y una duración estimada de 15 minutos, el estado de carga de la batería FEV cae en un 12,8%. Tras haber ejecutado el recorrido con nuestro vehículo de prueba, comprobamos que la variación entre el SOC real y el SOC estimado es de aproximadamente 0,02%. Inicialmente se pensó que este error era tan reducido debido al trayecto corto y a las excelentes condiciones del tráfico el día de la prueba. Esta situación casi ideal nos va a servir como punto de partida para los siguientes tests, que modelizan otras condiciones de recorrido y así garantizar la validez del algoritmo desarrollado.

### ***Test #2: Desplazamiento entre ITE y la playa de la Malvarrosa (Valencia)***

La segunda prueba consistió en una ruta urbana desde los laboratorios de ITE hasta la playa de la Malvarrosa, en Valencia. Al igual que en la primera prueba, cada paso de viaje se ha obtenido mediante Google Maps, especificando origen y destino. GoogleMaps devuelve un archivo xml con la siguiente información resumida sobre los pasos de viaje:

Paso	Duración (s)	Distancia (m)	Descripción del paso (instrucciones)
#1	132	1429	Head southeast on Av Juan de la Cierva
#2	52	269	At roundabout, take the first exit onto Ctra de Gracia Cruz
#3	46	357	At roundabout, take the fourth exit towards CV-35 Valencia
#4	191	4975	Merge onto CV-35
#5	19	336	Take the exit toward Ronda Nord / Av. John XXIII / Round Sud / Av. Mestre Rodrigo / Burjassot
#6	117	2307	Keep left at the fork, follow signs Nord and passes CV-30/Ronda CV-30

#7	30	174	At roundabout, take the second exit
#8	75	928	At roundabout, take the second exit onto Av Hermanos Machado
#9	47	816	Slight left onto Av Hermanos Machado
#10	41	708	Continue straight onto Av Hermanos Machado
#11	145	1595	At roundabout, take the third exit. Spend a roundabout
#12	148	1787	At roundabout, take the second exit onto Av Tarongers
#13	92	1098	At roundabout, take the third exit onto Calle Ingeniero Fausto Elio
#14	112	531	At roundabout, take the first exit onto Camino VeraPasa a roundabout
#15	105	992	Turn right onto Calle Isabel de Villena Spend a roundabout Destination will be on the left.
<b>Total</b>	<b>1352</b>	<b>18302</b>	

Tabla 6. Pasos del viaje 2

Estos pasos corresponden a la ruta entre las oficinas centrales de ITE en el Parque Tecnológico de Paterna (Valencia) y la playa de la Malvarrosa, en Valencia, mostrada en la siguiente figura:

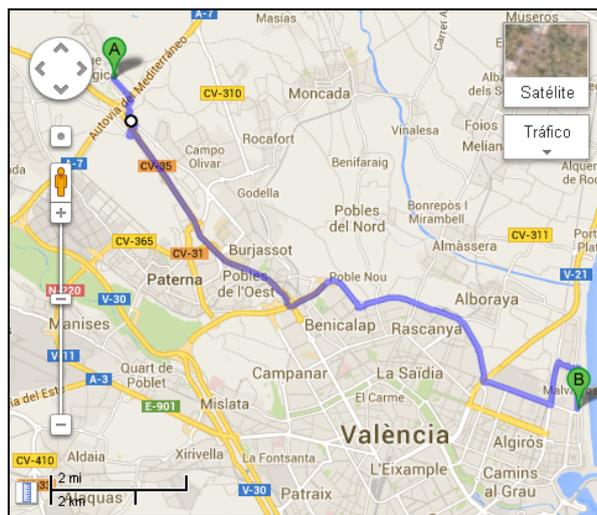


Figura 27. Test 2: ruta para la validación del algoritmo de autonomía

Con la duración y la distancia estimadas de la etapa, se obtiene la velocidad FEV estimada:

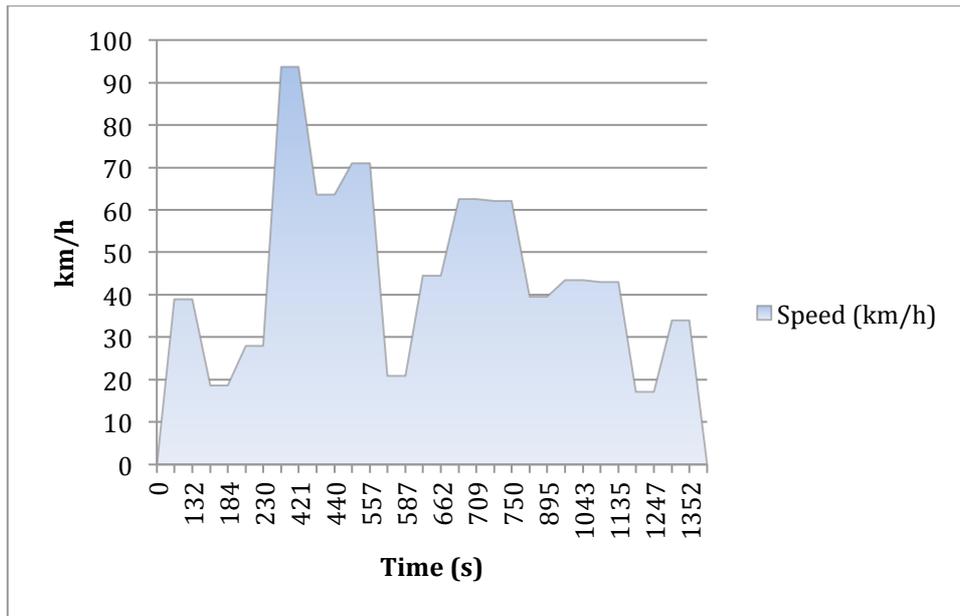


Figura 28. Test 2: velocidad estimada del viaje.

Durante la simulación, la llamada al algoritmo hace posible obtener el SOC final y la evolución del estado de carga durante toda la prueba:

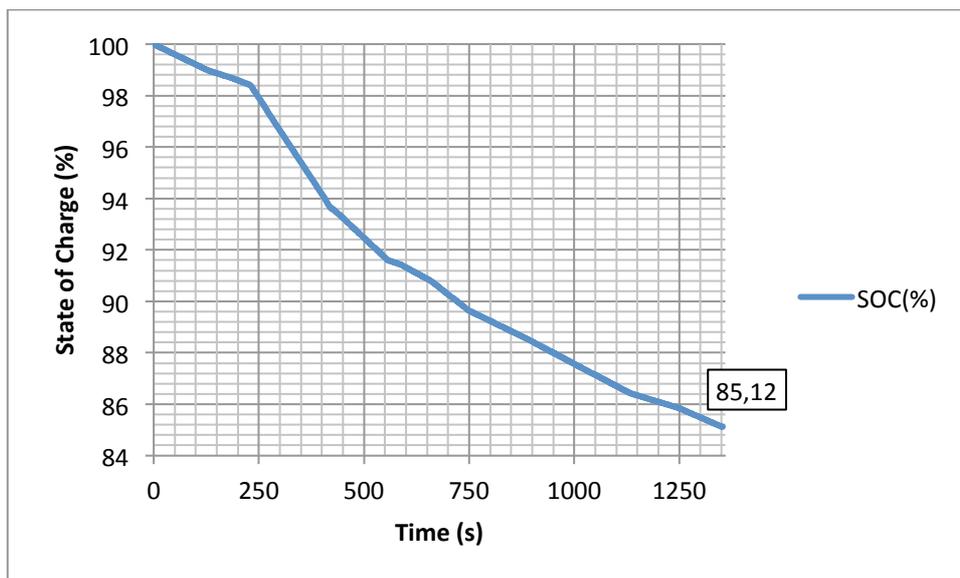


Figura 29. Test 2: evolución del SOC

El valor final del SOC es del 85,12%. Esto significa que tras la conducción a lo largo de la ruta diseñada, de aproximadamente 18,3 kilómetros y una duración estimada de 23 minutos, el estado de carga de la batería FEV cae en 14,88%. Tras haber ejecutado el recorrido con nuestro vehículo de prueba, comprobamos que la variación entre el valor real y el valor estimado del SOC es de aproximadamente 0,03%, muy similar al caso

anterior. Estas dos primeras pruebas permiten comprobar la validez del algoritmo desarrollado en los casos de desplazamiento en núcleo urbano.

Ahora bien, debido a que, aunque las condiciones del tráfico ya eran distintas, la distancia recorrida no es mucho mayor ya que el contexto de estas pruebas era el núcleo intraurbano, que es donde se validó el algoritmo en estos momentos. Lo único que nos quedaría validar es el caso en que el desplazamiento es interurbano, imponiendo así unas condiciones más severas a nuestras pruebas.

***Test #3: Desplazamiento entre ITE y el puerto de Sagunto***

La tercera prueba se desarrolló a lo largo de una ruta interurbana entre los laboratorios de ITE y el puerto de Sagunto (Valencia). Para realizar esta tercera prueba, al igual que en las anteriores, cada paso de viaje se ha obtenido a través de GoogleMaps, especificando origen y destino. El archivo xml que obtenemos como respuesta de GoogleMaps contiene la siguiente información:

Paso	Duración (s)	Distancia (m)	Descripción del paso (instrucciones)
#1	52	404	Head northwest on Avenida Juan de la Cierva to Avenida Juan de la Cierva. Spend a roundabout
#2	46	352	At roundabout, take the first exit Urb Mas Camarena
#3	177	2286	Continue straight onto the rush Urb
#4	9	11	Turn right onto CV-310
#5	54	367	At roundabout, take the second exit onto CV-310
#6	62	683	At roundabout, take the second exit E-15/A-7 Castellón / Barcelona
#7	435	13518	Merge onto E-15/A-7
#8	186	5009	Take exit 307 to merge onto A-23/V-23 towards P. of Sagunto/A-23/Teruel/Zaragoza
#9	162	3912	Take exit 0 to merge onto V-23 towards Puerto de Sagunto
#10	14	224	Take exit 8 towards CV-309, heading to Port of Sagunt/Puçol/V-21/València
#11	69	652	At roundabout, take the fourth exit onto Ctra Plant/CV-309 IV access. Continue to follow CV-309
#12	109	700	At roundabout, take the second exit

			onto Av Juan de Austria
#13	102	582	At roundabout, take the first exit onto Av Hispanidad/N-237. Continue to follow Av Hispanic. Spend a roundabout. Destination will be on the left.
Total	1477	28700	

Tabla 7. Pasos del viaje 3

Estos pasos corresponden a la ruta entre las oficinas centrales de ITE en el Parque Tecnológico de Paterna (Valencia) y el puerto de Sagunto, mostrada en la siguiente figura:

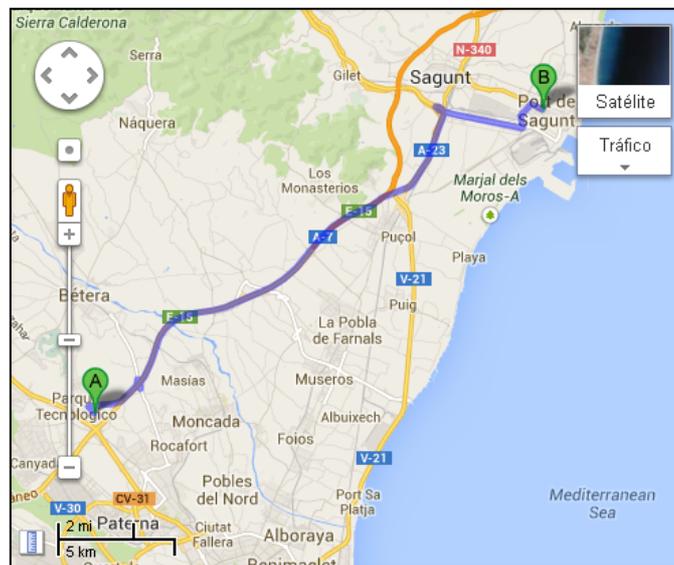


Figura 30. Test 3: ruta para la validación del algoritmo de autonomía

La velocidad del vehículo eléctrico a lo largo del trayecto puede ser calculada a partir de los datos anteriores y teniendo en cuenta el ciclo de conducción. La siguiente figura muestra la evolución estimada de la velocidad a la que irá el vehículo eléctrico:

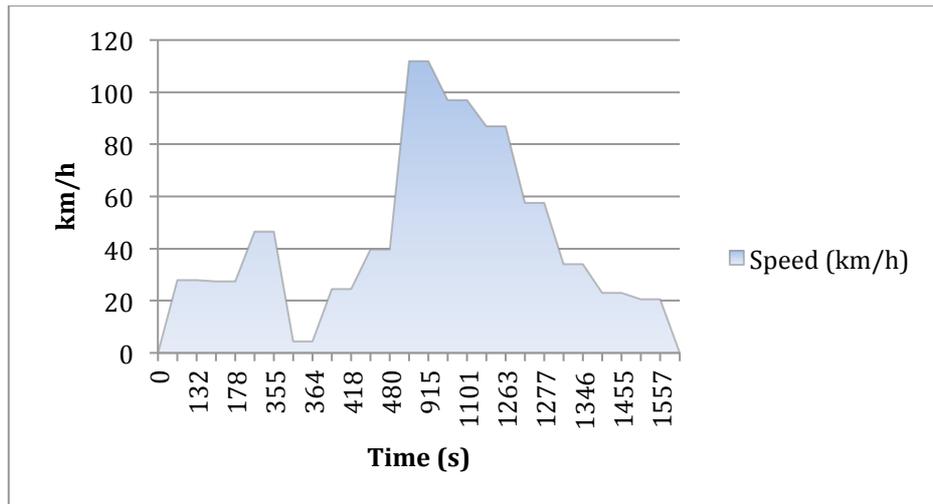


Figura 31. Test 3: velocidad de estimación del viaje

Durante la simulación, la llamada al algoritmo permite seguir la evolución del estado de carga durante toda la prueba y finalmente medir el SOC final, como vemos en la siguiente figura:

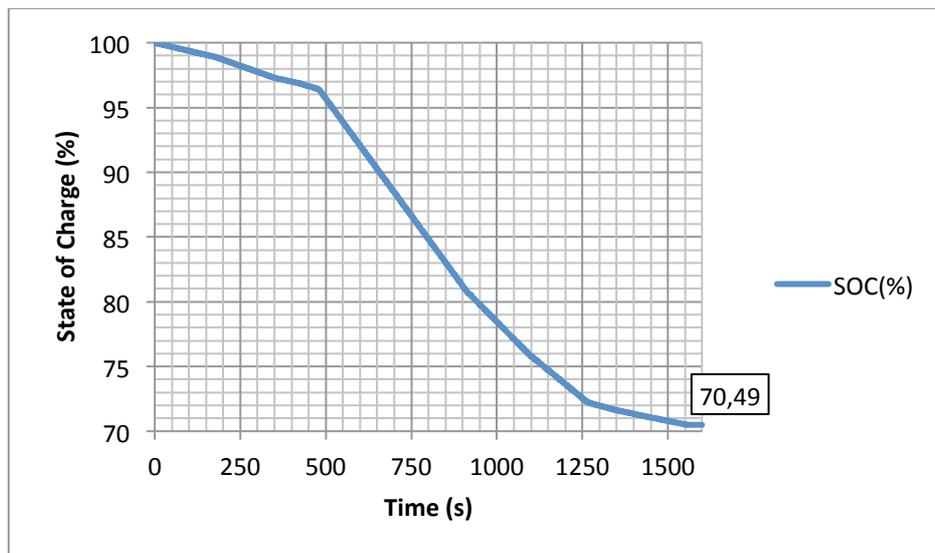


Figura 32. Test 3: evolución del SOC

El valor SOC final es del 70,49%, lo que significa que para la conducción a lo largo de la ruta diseñada, compuesta por 28,7 kilómetros y una duración estimada de 26 minutos, el estado de carga de la batería FEV cae en 29,51%, valor que difiere tan sólo en un 0,04% del valor real obtenido tras haber ejecutado el recorrido con nuestro vehículo de prueba. El error de cálculo entre el valor que hemos obtenido y el valor real del SOC al final del trayecto, en este tercer caso, es mayor que en el caso urbano, pero evidentemente tenemos que tener en cuenta que este error también queda influenciado

por las peores condiciones de tráfico, y más hacia el puerto de Sagunto, que recibe una mayor afluencia de vehículos, especialmente destinados al transporte de mercancías.

Estas tres pruebas permiten modelizar las tres situaciones que queríamos comprobar, cada una efectuada en un contexto y bajo unas condiciones. En cualquier caso, los resultados difieren en menos de un 0,05% de los valores reales, dato muy significativo para la tolerancia que podemos permitir en nuestro control desde el CSCC. Con estos resultados sería más que suficiente para concluir que queda validado el algoritmo desarrollado para controlar la evolución del estado de carga de la batería. Esto es especialmente útil cuando posteriormente queramos controlar el estado de carga desde el CSCC para estimar las necesidades de cada FEV en cada momento. Esta estimación de las necesidades de la flota de FEVs será imprescindible para estimar la llegada de FEVs a los puntos de carga y así poder calcular la posible energía de que disponer en las estaciones de carga de la ciudad. Esto lo vemos a continuación en los siguientes puntos de nuestro trabajo.

### 3.3 Previsión de la demanda de energía en el núcleo urbano

Anticipándonos a la falta de escenarios reales en los que se pudiese probar el algoritmo de previsión, se desarrolló un conjunto de pruebas simuladas (descrito en el capítulo anterior) en un entorno MatSim. El alcance de estos escenarios, como ya anticipamos en el capítulo previo, es la previsión de la demanda de energía de la cantidad total de FEV en la ciudad de Ljubljana.

Elegimos Ljubljana como contexto de nuestras pruebas, como ya hemos explicado anteriormente, ya que nos ofrece una flota real de FEV y una red extendida en marcha de estaciones de carga. A partir de los resultados obtenidos podemos extrapolar nuestras conclusiones a otras ciudades como Valencia, pudiendo llegarse a definir un modelo para la puesta en marcha del ecosistema necesario para la integración del FEV.

Los escenarios diseñados dependen directamente de los siguientes parámetros:

- Número de FEVs en la red de tráfico.
- Tipo de día.
- Tipo de carga. El tipo de carga puede ser rápida -alrededor de 60-150 kW- o lenta -potencia máxima alrededor de 3,3kW-. El número representado en porcentaje en la tabla adjunta indica la cantidad de cargas rápidas del total de cargas diarias.

Los siguientes escenarios han sido los que se han probado en el entorno MatSim:

	Nº FEV	Tipo de día	% Cargas rápidas
Escenario 1	1.000	Workday	0.25
Escenario 2	1.000	Workday	0.50
Escenario 3	1.000	Workday	0.75
Escenario 4	1.000	Holiday	0.25
Escenario 5	1.000	Holiday	0.50
Escenario 6	1.000	Holiday	0.75
Escenario 7	10.000	Workday	0.25
Escenario 8	10.000	Workday	0.50
Escenario 9	10.000	Workday	0.75
Escenario 10	10.000	Holiday	0.25
Escenario 11	10.000	Holiday	0.50
Escenario 12	10.000	Holiday	0.75
Escenario 13	50.000	Workday	0.25
Escenario 14	50.000	Workday	0.50
Escenario 15	50.000	Workday	0.75
Escenario 16	50.000	Holiday	0.25
Escenario 17	50.000	Holiday	0.50
Escenario 18	50.000	Holiday	0.75

Tabla 8. Escenarios del test

El tipo de día se define por el comportamiento de conducción diario agregado de la flota de vehículos eléctricos de acuerdo con los siguientes planes de viaje:

**Tipo de día: Día laborable (lunes-viernes)**

Rutas:

- Inicio> Trabajo> Inicio
- Inicio> Ocio> Hogar
- Inicio> Ocio> Trabajo> Hogar
- Inicio> Trabajo> Ocio> Hogar
- Inicio> Trabajo> Trabajo> Inicio
- Inicio> Trabajo> Inicio> Trabajo> Hogar
- Inicio> Trabajo> Inicio> Trabajo> Ocio> Hogar ,

donde los horarios de salida y llegada serán variables dentro de un rango predefinido:

- Viaje por la mañana "casa" -> 5:00 a 9:30
- Viaje por la mañana "trabajo" -> 8:30 a 14:30
- Viaje por la mañana "ocio" -> 8:30 a 14:30
- Viaje de noche "a casa" -> de 14:00 a 16:00

- Viaje de noche "trabajo" -> 14:00 a 22:00
- Viaje de noche "ocio" -> 14:00 a 22:00

### **Tipo de día: Festivo (sábado - domingo, festivos locales y nacionales)**

Rutas:

- Inicio> Trabajo> Inicio
- Inicio> Ocio> Hogar
- Inicio> Trabajo> Ocio> Hogar
- Inicio> Ocio> Hogar> Ocio> Hogar ,

donde los horarios de salida y llegada serán variables dentro de un rango predefinido:

- Viaje por la mañana "casa" -> 8:00 a 12:00
- Viaje por la mañana "trabajo" -> 8:30 a 14:30
- Viaje por la mañana "ocio" -> 8:30 a 14:30
- Viaje de noche "casa" -> de 14:00 a 22:00
- Viaje de noche "trabajo" -> de 16:00 a 22:00
- Viaje de noche "ocio" -> de 14:00 a 22:00

Los modos de carga del FEV diferenciados son los siguientes:

- Carga gratuita: puede cargarse el FEV cuando se llega a destino.
- Carga de precios controlados: el FEV realiza la carga nocturna en horas de pico.
- Carga mixta: el FEV realiza la carga tan pronto como llegue a su destino o puede esperar hasta la próxima hora.

Para la prueba, una vez seleccionada la ciudad de Ljubljana, se crea en MatSim<sup>§§§§</sup> [J], como vimos en el capítulo anterior, la red de carreteras y de estaciones de carga que pone a nuestra disposición la ciudad.

Para la generación de los datos iniciales se toma la red neuronal introducida en el capítulo 2 y se ejecuta sobre el mapa vial de Ljubljana, haciendo uso para ello de las funciones Matlab proporcionadas por Howard Demuth en el capítulo 8 de su libro “*Neural Network Toolbox: For Use with Matlab*” ([23]). Con esto tendríamos un ejemplo de carga inicial que, aunque se trate de una predicción, la trataremos como dato de partida, como puede verse en la figura 10 del capítulo anterior.

Utilizamos los parámetros mostrados en la siguiente tabla para la simulación MatSim. Como ejemplo presentamos los parámetros establecidos para el primero de los

---

§§§§ <http://www.matsim.org/>

escenarios (Tabla 10) sobre los cuales ejecutamos nuestras pruebas. No presentamos el resto por ser similares y por no extendernos demasiado en nuestra redacción.

Inputs	Descripción	Valor
Ts	Time interval	15 [min]
Scenario	Impact scenario selected	scenario 1
Cap	Average battery capacity (kWh) of FEV fleet	20 [kWh]
P_char	Nominal charging/discharging power	3.7 [kW]

Tabla 9. Datos y parámetros de simulación

Sobre los datos de partida volvemos a ejecutar la red neuronal, obteniendo así unos datos de salida que disponemos en forma de vector. Estos datos son los que nos proporcionan la estimación de energía demandada por la ciudad.

Utilizando aproximación ortogonal mínimo-cuadrática (visto en el capítulo previo) obtenemos una relación entre los datos de salida y los de entrada. De este modo conseguimos diversas rectas que en cada intervalo de tiempo permiten estimar los datos de salida en función de los de entrada. Los coeficientes de estas rectas (que son los que las caracterizan) son los que calculamos en el capítulo anterior a partir de los datos de salida y los de entrada.

Tras ejecutar en MatSim el diseño llevado a cabo, obtenemos la solución al problema planteado: ésta es una función que nos permite estimar los datos de salida en función de los de entrada para así poder estimar la demanda en futuras acciones.

En la siguiente figura mostramos cuáles han sido las rectas que nos permiten estimar la energía demandada por la ciudad en un intervalo de tiempo a partir del anterior (*forecast data*). A su vez, representamos en rojo cuáles son los valores reales de energía demandados por la ciudad.

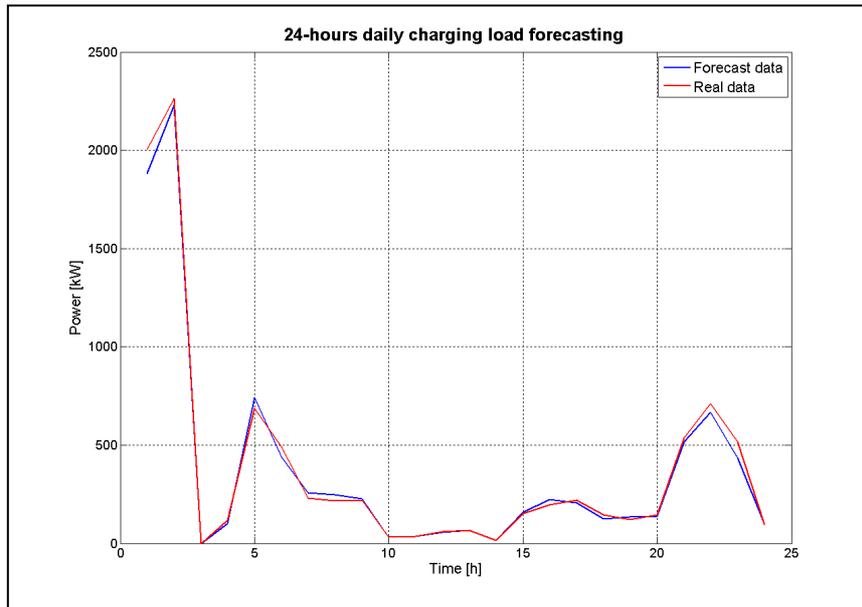


Figura 33. Comparación de datos de carga pronosticados y reales Escenario1 (24 horas)

Los resultados mostrados en la figura corresponden al escenario 1. En el resto de escenarios se obtienen resultados similares que no incluimos por no extendernos tanto en la redacción. Ahora bien, es importante medir el error cuadrático medio ( $MSE$ ) obtenido en la aproximación. Haciendo uso de datos normalizados correspondientes a un año, como explicamos en el capítulo anterior, se obtiene un  $MSE$  de  $5,8252 \cdot 10^{-4}$ , valor suficientemente pequeño como para poder concluir que la predicción de demanda de energía en el núcleo urbano es suficientemente buena como para poder usarla en los siguientes puntos del trabajo.

### 3.4 Análisis de disponibilidad de energía en las CS

De modo análogo a los puntos anteriores, se tradujo el proceso diseñado a código C#, compactado en librerías que permiten su integración en el CSCC.

Teniendo en cuenta los distintos casos validamos el algoritmo diseñado para su resolución numérica. De este modo resolvemos computacionalmente (*en Matlab, dado el alto orden de las matrices implicadas en los sistemas*) las matrices de probabilidad de permanencia  $\Phi$  y de transición  $\psi$  de un punto de carga a otro para cada FEV. De este modo, de acuerdo a las expresiones obtenidas en el capítulo anterior (punto 2.3.3.4), somos capaces de estimar (i) la energía de que debe disponer la red para responder satisfactoriamente a la demanda de carga de los FEV (servicio G2V), teniendo en cuenta al mismo tiempo las necesidades y la eficiencia de la red; y (ii) la energía que los FEV son capaces de transferir a la red (servicio V2G, como así lo denominamos en el capítulo previo) principalmente por motivo de haber acumulado más energía de la que necesitaban para su trayecto y con el fin de colaborar con la red en momentos de mayor demanda, siempre en caso de que esto sea posible, por supuesto.

El escenario final utilizado es el mismo que se ha usado para probar el algoritmo de previsión de demanda de energía. Los datos de la simulación, pertenecientes al escenario 1 de la tabla 10 son:

Inputs	Descripción	Valor
Ts	Time interval	15 [min]
FEV_number	Size of the FEV fleet	1000 [FEVs]
Cap	Average battery capacity (kWh) of FEV fleet	20 [kWh]
P_char	Nominal charging/discharging power	3.7 [kW]
Cpkm	Average power consumption (kWh/km) of FEV fleet	0.2 [kWh/km]

Tabla 10. Parámetros y Datos de simulación (Escenario1).

A continuación presentamos los resultados de estimación de la transferencia de los dos tipos de energía que hemos definido dentro de la ciudad:

- (1) la que tiene que estar disponible en las estaciones de carga (CS) para ser inyectada en los FEV, es decir, la energía disponible para ser transferida de la red a los FEV en su proceso de carga (G2V), que denominamos ‘energía negativa’. Ésta es proporcional a las probabilidades de ocupación o permanencia ( $\phi_{ij}$ ), y al SOC, tal y como lo hemos obtenido en el capítulo previo, es decir:

$$E_{G2V_j}(x) = \sum_{r=1}^m \phi_{rj}(x) \cdot (1 - \%SOC(\text{alg1})(x)) \cdot \frac{\left(E_s - \frac{d_d + d_{rb}}{\eta_{veh}}\right) \eta_{inv}}{t_{dist}},$$

donde  $\phi_{ij}$  es probabilidad de estar en un estado o punto de carga  $j$  en el momento  $x$ , sabiendo que procedemos del estado  $i$ .

- (2) la energía asociada al servicio V2G, la que hemos denominado ‘energía positiva’, es decir, la energía que puede devolver el FEV a la red por haberla generado o bien por tener almacenada más energía de lo que necesitaba, como ya hemos visto. Esta es proporcional a la probabilidad de llegar a un punto de carga  $j$  determinado en el momento  $t$ , independientemente de su procedencia, es decir, depende de las probabilidades de transición ( $\psi_{rj}$ ) y de la demanda de energía (ó previsión de carga) en el núcleo urbano, es decir:

$$E_{V2G_j}(x) = \sum_{r=1}^m \psi_{rj}(x) \cdot W_{demandada}(\text{alg2})(x) \cdot \frac{\left(E_s - \frac{d_d + d_{rb}}{\eta_{veh}}\right) \eta_{inv}}{t_{dist}},$$

donde  $\psi_{rj}$  es la función de probabilidad de abandonar el estado o punto de carga  $j$  en el momento  $x$  habiendo partido del estado  $r$ .

Esto proporciona información al centro de control (CSCC) sobre la estimación del intercambio de energía V2G/G2V durante cada jornada. Esta información supone además un primer paso en la integración de este tipo de servicios en el mercado energético.

La energía disponible negativa (G2V) y positiva (V2G) para los resultados de la simulación de nuestro caso se representa en las siguiente figura.

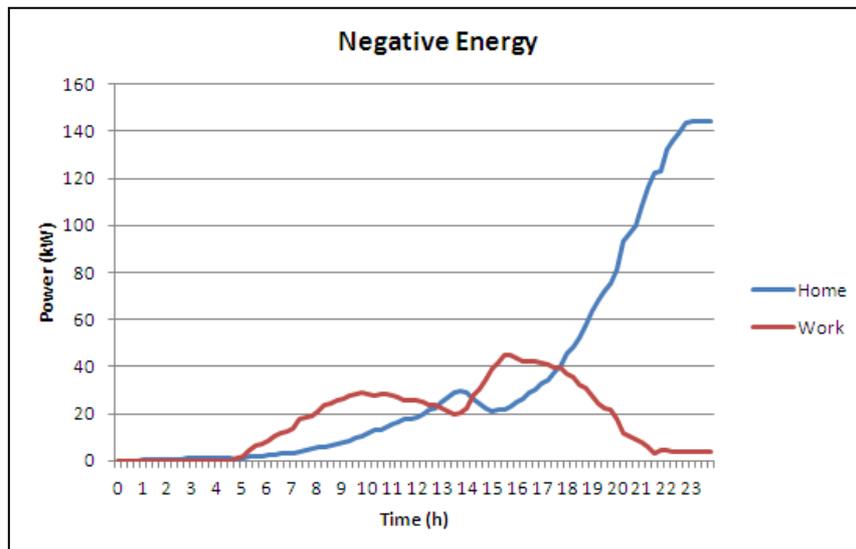


Figura 34. Energía G2V negativa

Se observa que, al principio de la gráfica, la energía negativa es aproximadamente cero. Este comportamiento es debido a que los FEVs están completamente cargados antes del primer viaje alrededor de las 5:00 am. Por tanto es consistente con el comportamiento real.

También se observa que la energía negativa en el hogar aumenta rápidamente a partir de las 18 p.m. aproximadamente. Esto es debido al escenario programado en MATSim, sin control por parte del proveedor de energía, donde los vehículos que llegan a casa desde el trabajo se conectan de inmediato a la carga.

En cuanto a la energía positiva, los perfiles de disponibilidad muestran un patrón similar con respecto a las probabilidades de transición y llegada al hogar y los estados de trabajo, como presentamos en la siguiente figura. Es decir, es durante las horas de trabajo (8:00-12:00 y 15:00-18:00) los días laborales y durante la noche y por la mañana los días festivos antes de empezar a salir a disfrutar del día, cuando los FEV pueden colaborar más con la red, transfiriendo la energía (servicio V2G) que no necesitan y permitiendo así que sea la red quien controle la mayor o menor necesidad de carga. Así

la red se autocontrolaría y aumentaría su eficiencia, permitiendo satisfacer las necesidades de la flota de FEV previamente a su arranque.

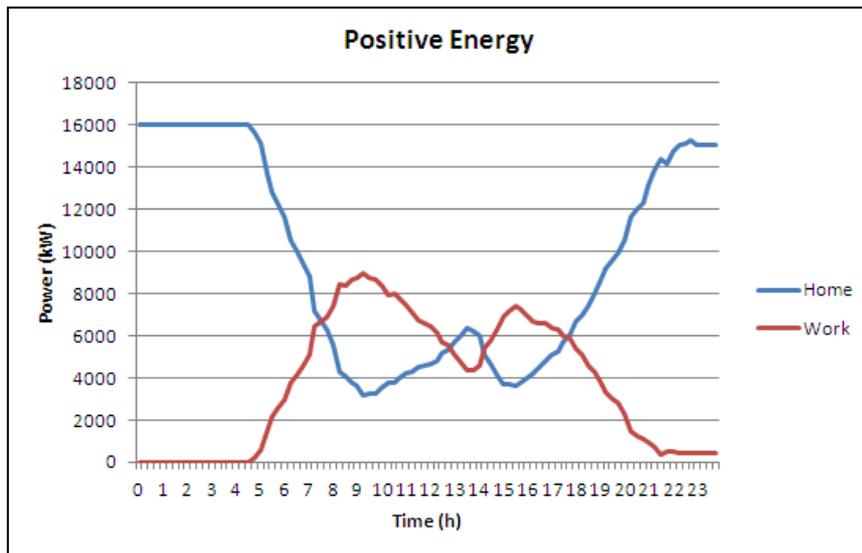


Figura 35. Energía V2G positiva

Como resultado de este método y de su correcta integración en el CSCC, el sistema proporciona información al CSCC sobre la estimación de la transferencia de energía V2G durante el día, información que puede dar lugar a la integración de este tipo de servicios en el mercado energético. Además, esta información se combina con las otras fuentes de datos disponibles para planificar las señales de posible intervención del proveedor de energía (*DSM, Demand Side Management*) que se utilizan para producir las diferentes acciones de control a todas las CS para la regularización de la carga, como se describe en el modelo de control predictivo DSM.

### 3.5 Gestión activa de la demanda (DSM)

El presente punto presenta la ejecución y soluciones obtenidas del problema de programación lineal planteado para encontrar un equilibrio sostenible entre las necesidades del usuario del vehículo eléctrico, los requerimientos del proveedor de energía y los requisitos de optimización de energía en el núcleo urbano.

Recordemos que el objetivo es dotar al centro de control (CSCC) de un sistema de funcionamiento basado en un modelo de control predictivo (MPC), orientado a gestionar de modo inteligente las demandas de energía recibidas.

Debido a la enorme cantidad de ecuaciones y variables presentes en el problema, como se ha explicado en el capítulo previo, hemos procedido a su programación matemática. Veamos el método de resolución del problema de optimización planteado y las distintas pruebas de nuestra implementación.

La conclusión final que obtenemos es, como veremos, que en el CSCC se pueden establecer dinámicamente perfiles de carga para los FEV conectados a un conjunto de CSs pertenecientes a la misma área local permitiendo el control de la demanda de energía de modo dinámico.

### 3.5.1 Resolución del problema de optimización

En este punto vamos a validar los resultados obtenidos al resolver la formulación matemática desarrollada en el capítulo anterior, correspondiente al problema de optimización. Para ello elegimos IBM ILOG CPLEX<sup>\*\*\*\*</sup> (*versión 12.4*), pues, por nuestra experiencia, es de una gran fiabilidad y eficiencia en la resolución de problemas de programación matemática a gran escala.

Mostramos en la siguiente tabla los datos de entrada que requerirá nuestra implementación, acompañada del tipo de dato y la tabla que se almacenará en el modelo relacional que describimos en el capítulo anterior:

	<b>Name</b>	<b>Description</b>	<b>Type</b>	<b>Source</b>
<b>Battery</b>	$X_0$	Initial level of charge	double	Battery table
	$X_{min}$	Minimum level of charge (battery-specific)	double	Battery table
	$X_{max}$	Maximum level of charge (battery-specific)	double	Battery table
	$\xi$	Battery performances coefficient	double	Battery table
<b>FEV model</b>	$\Delta P^{FEV}_{max}$	Maximum charging/discharging power allowed by FEV	double	FEV Models table
	$\Delta P^{FEV}_{min}$	Minimum charging/discharging power allowed by FEV	double	FEV Models table
<b>ChargingStation</b>	$\Delta P^{CS}_{max}$	Maximum charging/discharging power allowed by the CS	double	Charging Station table
	$\Delta P^{CS}_{min}$	Minimum charging/discharging power allowed by the CS	double	Charging Station table
<b>PowerInfo</b>	$P^{ref}$	Desired mean power	double	PowerInfo table
	$P^*$	Maximum power available for	double	PowerInfo

\*\*\*\* <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>

		FEV fleet		table
<b>EnergyInfo</b>	$C$	Electricity tariff	double	EnergyInfo table
<b>ChargingRequest</b>	$X^{ref}$	Desired level of charge	double	Charging Request table
	$E$	Departure time slot (chosen by the driver)	integer	Charging Request table
	$S$	Arrival time slot	integer	Charging Request table
	$\varepsilon$	Tolerance factor for estimated cost	double	Charging Request table
	$f$	Flexibility	boolean	Charging Request table
<b>CSCCPlanner</b>	$I$	Time slot of the last optimization	integer	CSCC Planner table
	$\mu$	Trade-off parameter	double	CSCC Planner table
	$\Lambda$	Diagonal matrix	double	CSCC Planner table
	$T$	Sampling time	double	CSCC Planner table
	$M$	IDs of connected FEV	integer	(calculated at runtime)
	$M_k$	IDs of connected FEV at $k$ -th time slot	integer	(calculated at runtime)

Tabla 11. Descripción de datos de entrada.

Tras las sucesivas recurrencias y ejecuciones, los datos de salida son:

<b>Optimization Result</b>	$U$	Control variable related to the charging operations on the FEV associated to the request	double	(calculated at runtime)
	$c^*$	Estimated cost associated to the request	double	(calculated at runtime)

Tabla 12. Descripción de datos de salida.

Estos datos se almacenan en la base de datos para una posible futura optimización.

### 3.5.2 Descripción del entorno de test

Para llegar a la solución que nos permite gestionar las demandas de energía recibidas de modo eficiente tanto para el usuario como para el proveedor de energía, es necesario distinguir tres escenarios. Estos tres escenarios dan lugar a las distintas situaciones

(entornos de test) en que solucionamos el problema de optimización que hemos diseñado en el capítulo previo:

1. **Simulación del funcionamiento normal:** se muestra cómo se gestiona de forma óptima las operaciones de carga de tal manera que se satisfacen las preferencias del usuario y las restricciones técnicas tanto de la red como de los FEVs.

La resolución del problema de optimización diseñado en este escenario presenta cómo el control se actualiza dinámicamente para adaptarse a la llegada dinámica de nuevas solicitudes de carga.

2. **Reacción a una señal DSM:** se muestra cómo puede gestionarse la flexibilidad de los FEVs para responder a señales DSM (por ejemplo, señales de precio y señales de incremento/decremento de potencia) procedentes de actores de nivel superior (proveedores de energía -DSO-, minoristas, sistemas comunitarios de gestión energética, etc.).

La reacción adecuada a las señales de DSM se logra actualizando las señales de control calculadas. Puede ser el caso que para responder con éxito a la señal DSM sea necesario relajar algunas de las preferencias del usuario o algunas de las restricciones (en particular, las restricciones sobre costes de operación). En ese caso, nuestro procedimiento programado es capaz de calcular el descuento mínimo que el actor de nivel superior debe proporcionar para la aceptación del servicio DSM.

3. **Análisis de sensibilidad:** Mediante un simple análisis de sensibilidad mostramos cómo se consigue el equilibrio entre dos necesidades que a menudo son opuestas: lograr una economía óptima para el usuario y, al mismo tiempo, garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de la red. Comenzaremos investigando experimentalmente la sensibilidad con respecto al parámetro  $\mu$  definido como vimos en el capítulo previo:

$$J = J_{\text{cost}} + \mu J_{\text{reg}} = \sum_{m \in M} \sum_{k=1}^{E_m-1} \Delta P_m \text{TC}[k] U_m[k] + \mu \| \Lambda(P - P_{\text{ref}}) \|_{\infty},$$

siendo  $J_{\text{cost}}$  los costes acumulados de la carga en una CS a la que se añade una cantidad de regularización  $J_{\text{reg}}$ .

Esta cantidad de regularización es la diferencia existente entre el nivel de carga total del FEV y el perfil de carga de referencia (ó demandado por el usuario) definido por DSO.

En la siguiente tabla mostramos los parámetros técnicos de los FEV utilizados. Estos parámetros son los que hemos tenido en cuenta en las ecuaciones (19) del capítulo

anterior (punto 2.3.4.3) correspondientes a las condiciones o restricciones del problema de programación lineal.

$X_m^{max} [kWh]$	$X_m^{min} [kWh]$	$\Delta P [kW]$	$\alpha$ (Valor mínimo del factor de control $U_m$ )	$\xi_m$ (Eficiencia de la batería)
12.8	3.2	3.3	0.1875	2%

Tabla 13. Parámetros técnicos de los FEV

Para la simulación se configura la llegada secuencial de 63 FEV de 06:00 am a 23:00 pm. Los primeros cuatro FEVs se incluyen para simular la presencia de FEVs que han alcanzado el estado deseado de carga o todavía tienen tiempo para realizar cargas por disponer de reserva. Estos primeros FEV dan lugar a situaciones que denominamos "estacionamientos".

Los FEVs restantes están destinados a simular la llegada secuencial a las estaciones de carga de los clientes que exigen cargar sus FEVs sin previa reserva. Como mostramos en la siguiente tabla, los FEVs tienen diferentes estados iniciales de carga (*Tabla 16, tercera columna  $X^0 [kWh]$* ) y los clientes expresan diferentes preferencias de usuario, en términos de tiempo de permanencia en las estaciones de carga (*Tabla 16, segunda columna*) y el estado final de carga deseado (*cuarta columna  $X^{ref} [kWh]$* ).

Los horarios de llegada de FEVs se eligen de forma determinista, es decir, quedan fijados cada 15 minutos de 08:00 am a 12:00 am, cada 30 minutos de 12:00 am a 16:00 am, cada 10 minutos de 16:00 am a 20:00 am y cada 15 minutos a partir de las 20:00 horas. Los tiempos de salida y el estado final de carga deseado se eligen para ser iguales a un valor medio dado, teniendo en cuenta una tolerancia uniformemente distribuida. Teniendo en cuenta nuestras observaciones de la carga de vehículos eléctricos en Ljubljana, la selección de las variables se plantea con el fin de simular un patrón realista de llegada a los puntos de carga.

EV ID	Time interval	$X^0[kWh]$	$X^{ref}[kWh]$	$c_m^*$ [€]	$c_m$ [€]	$c_m^{DSM}$ [€]	Minimum rebate [€]
1	06:00-17:00	10.00	10.00	0.12	-0.06	-0.07	-0.01
2	06:00-17:00	10.00	10.00	0.09	-0.08	-0.08	0
3	06:00-17:00	10.00	10.00	0.02	-0.07	-0.07	0
4	06:00-17:00	10.00	10.00	0.02	-0.08	-0.08	0
5	06:15-09:35	6.41	12.13	0.44	0.44	NA	NA
6	06:30-09:55	6.13	12.10	0.48	0.48	NA	NA
7	06:45-09:30	6.05	12.50	0.53	0.53	NA	NA
8	07:00-10:30	5.66	12.50	0.58	0.58	NA	NA
9	07:15-10:40	5.99	12.50	0.56	0.56	NA	NA
10	07:30-10:10	5.92	12.50	0.57	0.57	NA	NA
11	07:45-11:05	6.46	12.50	0.53	0.53	NA	NA
12	08:00-10:30	6.35	12.50	0.55	0.55	NA	NA
13	08:15-10:55	7.52	10.49	0.27	0.27	NA	NA
14	08:30-10:55	7.31	9.34	0.18	0.18	NA	NA
15	08:45-11:25	6.06	9.55	0.31	0.31	NA	NA
16	09:00-11:05	6.19	10.65	0.40	0.40	NA	NA
17	09:15-11:55	6.63	10.90	0.38	0.38	NA	NA
18	09:30-11:30	6.88	9.76	0.26	0.25	NA	NA
19	09:45-12:30	7.59	9.37	0.13	0.13	0.15	0.02
20	10:00-12:30	6.89	10.29	0.28	0.28	0.29	0.01
21	10:15-11:50	7.51	8.55	0.09	0.09	0.09	0
22	10:30-12:05	7.31	8.33	0.08	0.08	0.09	0.01
23	10:45-12:05	7.00	9.92	0.25	0.25	0.24	0.01
24	11:00-12:25	7.17	8.45	0.10	0.10	0.11	0.01
25	11:15-12:55	6.51	9.01	0.19	0.18	0.19	0.01
26	11:30-13:05	7.78	9.92	0.16	0.16	0.16	0
27	11:45-13:15	6.28	8.30	0.14	0.14	0.15	0.01
28	12:00-13:25	7.68	8.51	0.06	0.06	0.06	0
29	12:30-14:50	6.49	9.36	0.20	0.20	0.20	0
30	13:00-14:50	6.39	8.00	0.11	0.11	0.11	0
31	13:30-15:35	6.95	8.20	0.09	0.09	0.09	0
32	14:00-16:20	7.17	8.60	0.11	0.11	0.11	0
33	14:30-16:25	6.57	10.01	0.26	0.26	0.26	0
34	15:00-16:45	6.76	9.64	0.22	0.22	0.22	0
35	15:30-16:35	6.11	9.56	0.26	0.26	0.26	0
36	16:00-17:45	7.87	8.76	0.07	0.07	0.08	0.01
37	16:10-18:45	6.94	9.02	0.16	0.16	0.19	0.03
38	16:20-18:40	6.32	10.59	0.36	0.36	0.38	0.02
39	16:30-18:50	7.06	9.33	0.19	0.19	0.21	0.02
40	16:40-19:15	6.53	10.31	0.34	0.34	0.34	0
41	16:50-19:30	7.50	9.90	0.22	0.22	0.22	0
42	17:00-19:05	6.46	10.83	0.40	0.40	0.40	0
43	17:10-19:20	7.65	10.08	0.22	0.22	0.22	0
44	17:20-20:20	6.16	9.89	0.34	0.34	0.34	0
45	17:30-19:35	7.92	9.01	0.10	0.10	0.10	0
46	17:40-20:25	7.63	10.74	0.28	0.29	0.29	0
47	17:50-19:55	6.80	9.52	0.25	0.25	0.25	0
48	18:00-20:50	6.86	10.82	0.37	0.37	0.37	0
49	18:10-20:20	6.53	9.29	0.26	0.26	0.26	0
50	18:20-20:30	7.74	10.16	0.23	0.23	0.23	0
51	18:30-21:05	6.29	10.71	0.41	0.41	0.41	0
52	18:40-21:15	6.70	10.03	0.31	0.31	0.31	0
53	18:50-21:15	6.15	9.48	0.31	0.31	0.32	0.01
54	19:00-21:05	6.37	9.48	0.29	0.29	0.29	0
55	19:10-21:35	6.10	10.81	0.45	0.45	0.45	0
56	19:20-22:15	6.98	9.98	0.28	0.28	0.28	0
57	19:30-21:50	7.80	9.74	0.19	0.19	0.18	-0.01
58	19:40-21:45	7.56	9.78	0.21	0.21	0.21	0
59	19:50-22:05	6.81	9.19	0.23	0.23	0.23	0
60	20:00-22:10	7.88	10.91	0.28	0.28	0.28	0
61	20:15-22:50	6.12	9.47	0.30	0.30	0.30	0
62	20:30-22:55	7.64	9.03	0.12	0.12	0.12	0
63	20:45-22:55	6.34	10.30	0.37	0.37	0.35	-0.02

Tabla 14. Configuración de la simulación

### 3.5.3 Análisis de los resultados obtenidos

Para llevar a cabo las distintas pruebas necesitamos tomar un valor de referencia para el coste de la energía eléctrica en un momento dado. Debido a nuestra estancia en Italia y Eslovenia durante las pruebas, hemos utilizado como como tarifa eléctrica el PUN italiano ("*Prezzo Unico Nazionale*"), tomada del '*Gestore Mercati Energetici*' (GME, referencia web [L]) del día 24/07/2012, como muestra la siguiente gráfica:

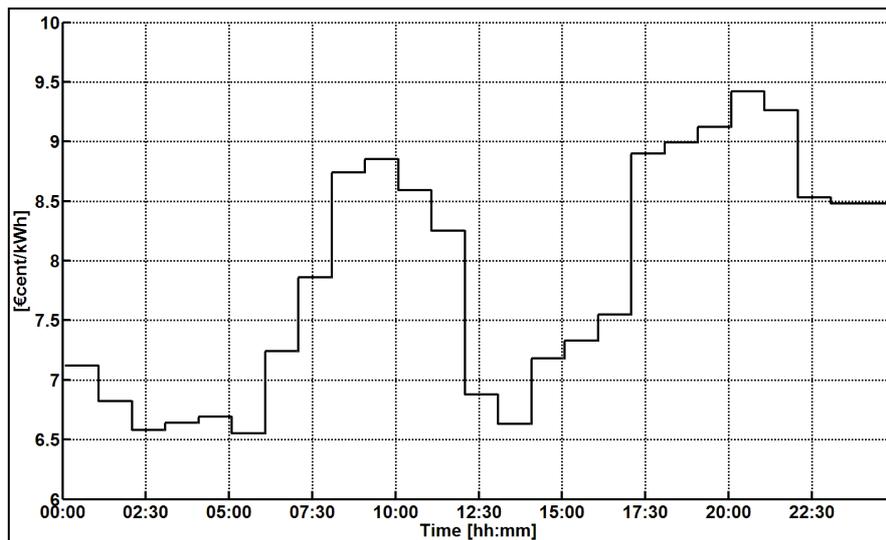


Figura 36. Tarifa PUN (Italian "*Prezzo Unico Nazionale*") correspondiente al día 24/07/2012

Es importante ver cómo varía la tarifa tomada como referencia a lo largo del día, pues en función de su evolución, vemos cómo controlar las cargas. Esto es lo que nos lleva al control dinámico que se pretende.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los distintos tests llevados cabo.

#### Test 1: Carga no controlada

En el primer test de la simulación se obtiene el perfil de potencia de carga no controlada como se describe en la siguiente figura. Como carga 'no controlada' entendemos que la carga comienza tan pronto como se conectan los FEV. En tal escenario el usuario elige un perfil de carga determinado (demanda de energía) y el tiempo de llegada.

En la siguiente figura presentamos los resultados obtenidos al resolver el problema de programación lineal planteado bajo las condiciones de este primer test.

Mientras que el número de vehículos eléctricos es un dato determinista que puede ser conocido, los instantes en que se carga un vehículo dan lugar a las distintas variables aleatorias que consideramos en el modelo. Podemos ver que el perfil de potencia de

carga agregada no controlada presenta picos (como podemos ver entre las 8:00 y las 9:00 o a las 17:50 o a las 20:00 aproximadamente) que pueden perjudicar el funcionamiento de la red, provocando desequilibrios, sobrecargas, caídas de tensión, etc.

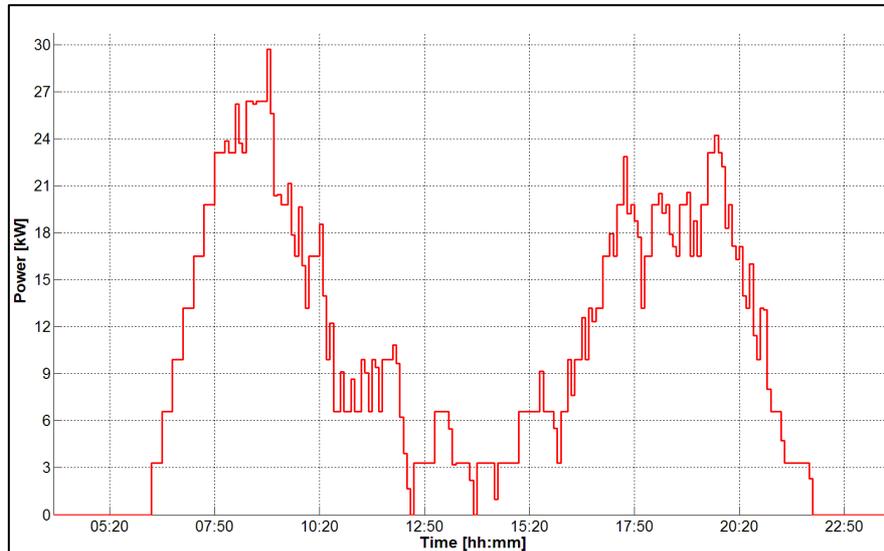


Figura 37. Resultados Test 1 “perfil agregado no controlado”

El coste total de las operaciones de carga, en este caso, es de 16,39 cént.€/kWh. Este depende del número de vehículos eléctricos en la flota y de los distintos momentos de cada una de las cargas. Es necesario, por tanto, controlar adecuadamente las operaciones de carga con el fin de conseguir una eficiencia económica, preservando al mismo tiempo las condiciones de la red.

### Test 2: Control de carga sin restricciones de red, sólo teniendo en cuenta las preferencias de los usuarios.

Para minimizar el coste del consumo de energía se introduce un control de las operaciones de carga (parámetro  $\mu$ ), como se describe en el capítulo anterior. En primer lugar veamos cuál ha sido nuestro resultado sólo teniendo en cuenta las preferencias de los usuarios, es decir,  $\mu = 0$ .

A continuación presentamos los resultados conseguidos en los siguientes gráficos obtenidos. En ellos vamos a distinguir:

- La **potencia de carga** agregada (figura a), correspondiente al proceso de carga del FEV y asociado con el servicio **G2V**.
- La **potencia de descarga** agregada (figura b), asociada a la capacidad de generación y/o devolución de energía del FEV a la red, que hemos denominado servicio **V2G**. Es decir, se trata de la potencia que puede devolver el FEV a la red por haberla generado o bien por tener almacenada más energía de lo que necesitaba. Este servicio V2G es el que caracteriza nuestro diseño y puede darse gracias a la

integración del FEV en la ciudad y a su control por parte de la arquitectura que planteamos en nuestro trabajo. El beneficio que aporta este servicio es doble: minimiza los costes de energía para los usuarios e incrementa la eficiencia de la red proveedora de energía.

- La **potencia neta** agregada resultante (figura c) en toda la simulación.

Los resultados mostrados se refieren a la ejecución de la prueba planteada después del último evento simulado (la última llegada de FEVs a las 20:45, como indica la línea vertical en las subfiguras - el "tiempo actual" al que se refiere la prueba). La capacidad del algoritmo para adaptarse dinámicamente a nuevos eventos se describe en los siguientes tests.

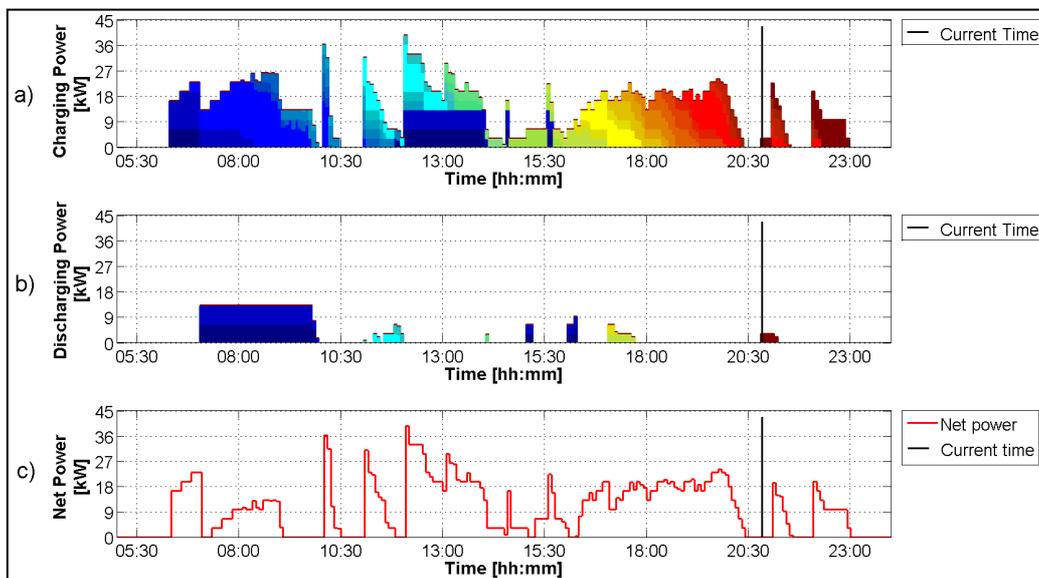


Figura 38. Resultados Test 2 “sin restricciones de red”.

En la figura ‘a’ y figura ‘b’ se asocia un color distinto a la potencia de carga (G2V) de cada FEV y a la potencia que hemos llamado de descarga de cada FEV, es decir, la transferida del FEV a la red, asociada al servicio V2G. Los colores distintos corresponden a cada uno de los FEV conectados a la red. En la gráfica se muestran las potencias medidas en los momentos anteriores al instante en que se hace la medida y las estimaciones de potencias en los momentos posteriores al instante actual (*‘Current time’*).

Ya sabemos, de lo expuesto en el capítulo anterior, que el servicio V2G (correspondiente a los procesos que hemos denominado de descarga en este punto) permite dotar a la red de energía que puede que necesite en períodos de pico. Podemos observar en este caso, que el período del día en el cual se da un mayor proceso de descarga o de transmisión de potencia V2G es durante la mañana, mientras que durante los períodos de pico (aproximadamente a las 10:30 o alrededor de las 13:00, por

ejemplo) los FEV no ayudan a la red con su capacidad de generación o devolución de energía.

A partir de la gráfica de la potencia neta agregada, podemos concluir que, para una mayor efectividad de la red y poder evitar picos, debemos distribuir mejor las operaciones de carga (compatibles con las preferencias del usuario) y el control de potencia adecuado (se puede ver que el estacionamiento de los FEVs – correspondientes al *color azul más oscuro y al negro*- descarga durante períodos caros, según la figura 36 Tarifa PUN, (alrededor de las 10:00) y recarga durante los períodos más baratos del día, es decir, alrededor de las 13:00).

En la figura podemos observar las consecuencias de sólo haber tenido en cuenta las preferencias de los usuarios: los picos aparecen en el perfil agregado de potencia neta en correspondencia con intervalos de tiempo caracterizados por bajos precios de la electricidad (véase figura 36).

Calculando el coste final obtenemos un valor de 15,44 cént.€/kWh. Si sólo tenemos en cuenta las preferencias del usuario este valor sería el mínimo que podría alcanzarse al considerar cualquier restricción de la red.

En principio las restricciones de red perjudicarían al usuario pero aportarían un incremento en la eficiencia de la red proveedora de energía. Estas mejoras en el funcionamiento de la red se traducirán en descuentos para el usuario, como vemos a continuación.

Es conveniente señalar que la misma consideración se aplica también a la carga "manual" (*carga no automatizada*), ya que los usuarios de FEV son más propensos a conectar sus FEVs durante los períodos de tarifas bajas del día (o de la noche). Una vez más, este hecho confirma la fuerte necesidad de desarrollar estrategias que soporten tanto las necesidades económicas de los usuarios de FEV como las limitaciones técnicas de la red.

### **Test 3: Simulación del funcionamiento ‘normal’: Incorporación de restricciones de red.**

En este test y el siguiente se presentan los resultados de las simulaciones en que hemos incluido restricciones de red en el control, no sólo las preferencias del usuario.

Se elige una señal de referencia típica en la que haya variaciones de potencia que se asemejen a la realidad. La referencia de potencia elegida para estas simulaciones se muestra en la siguiente figura.

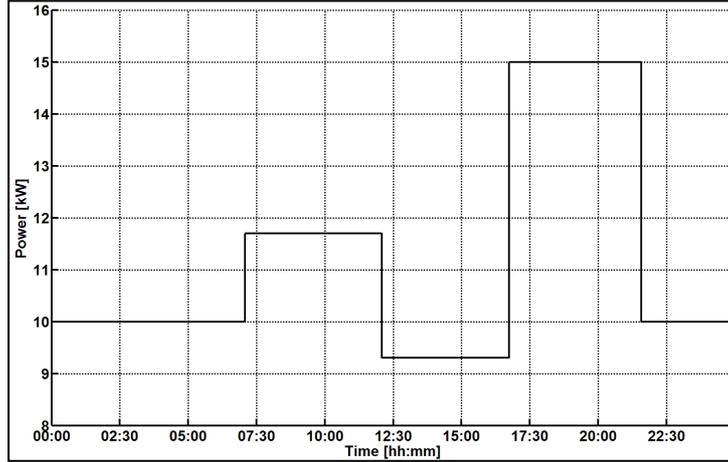


Figura 39. Señal de referencia de potencia de la red

Considerando como umbral de potencia  $P^*[k] = 1.2 \cdot P_{ref}[k]$  y tomando la misma configuración del escenario de prueba que en los tests anteriores, el parámetro  $\mu$  de regularización y la matriz  $\Lambda$  de control (restricción de la red) se establecieron empíricamente con el fin de regularizar los costes de cargas y descargas. El objetivo esperado es evitar los picos anteriores y períodos masivos de cargas ó descargas en diferentes períodos del día en función de los costes. De acuerdo con lo visto en el capítulo previo,

$$J = J_{agregada\ en\ CS} + \mu \|\Lambda(P_{controlada} - P_{ref,DSO})\|_{\infty},$$

- para el coeficiente de regularización de la carga agregada, tomamos el valor  $\mu = 70$ ,
- elegimos una función estrictamente decreciente en función del momento del día, para controlar la diferencia entre el coste de potencia de referencia definida por la red y la potencia controlada suministrada en la CS:  $\Lambda[k, k] = \frac{1}{1+k^2}$ .

En la siguiente figura mostramos los perfiles de carga (G2V) y descarga (V2G) controlados en toda la simulación (después de la última solicitud de carga a las 20:45). En la figura (a) observamos cómo los FEV se cargan a lo largo del día en función de sus necesidades y de las restricciones de red, mientras que en la figura (b) observamos cómo los FEV contribuyen a “alimentar” la red (devolver energía a la red, servicio V2G, como vimos en el capítulo previo durante el desarrollo) en ciertos momentos del día en los cuales hay una mayor demanda de carga como, por ejemplo, en el período entre las 8:00 y las 9:00, momento del día en el cual la red necesita más disposición de potencia.

Si tenemos en cuenta la referencia de potencia de la red elegida para las simulaciones, podemos ver en la *gráfica (c) de la siguiente figura* cómo el control consigue seguir la referencia de potencia de la red (en verde, curva ‘Power reference’) siempre respetando

las preferencias del usuario y las restricciones técnicas de la red. El coste total, en este caso, es de 16,00 cént.€/kWh, mientras que el error medio respecto del valor de referencia de potencia es del 2,2% (el error máximo llega a ser del 16,76% de la referencia). El coste no está lejos del límite teórico alcanzado en el test 2 (15,44 €/kWh), pero inferior al caso incontrolado del test 1 (16,39 €/kWh). Por lo tanto, gracias al desplazamiento de carga adecuado (es decir, a haber conseguido que los FEVs no carguen todos a la vez durante los períodos de menor coste) y al servicio V2G (es decir, a haber conseguido que los FEV que puedan devolver energía a la red lo hagan durante los períodos de mayor demanda), el control consigue optimizar los costes a la vez que proporciona una buena capacidad de carga.

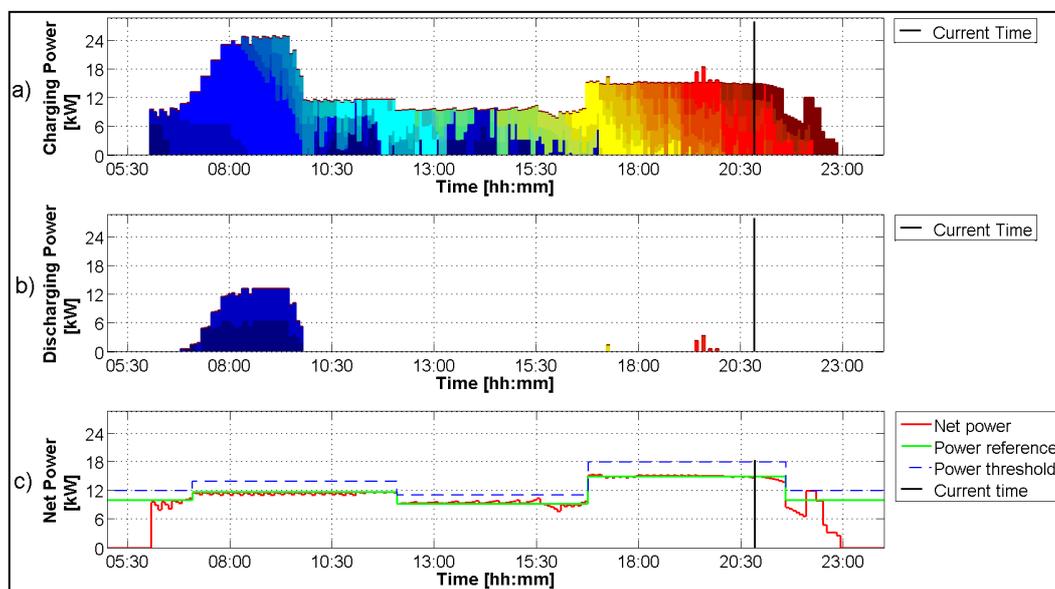


Figura 40. Resultados Test 3 “incorporación de restricciones de red”.

Veamos qué ocurre si variamos los perfiles de carga neta en la CS en distintos momentos del día.

Es interesante observar que desde un principio no se conoce a priori la potencia que necesitaremos a lo largo de la jornada para que el control vaya regularizando la potencia suministrada. A lo largo de la jornada, la estimación de potencia necesaria va cambiando en función del histórico que se va generando y que tenemos en cuenta para las siguientes estimaciones.

Esto permite o no nuevas cargas en una ventana temporal que abarca el antes (potencia netas medidas) y el después (potencias netas estimadas tras el histórico medido) del momento en que se mide el perfil de potencia de carga neta de la CS, como se muestra en la siguiente figura. La gráfica (a) de la siguiente figura nos muestra la potencia neta suministrada por la red hasta las 9:45, momento en que se toma la

medida. En esta gráfica observamos que la potencia suministrada intenta adaptarse a la potencia de referencia pero que su estimación en momentos posteriores se va a alejar de los valores deseados. Sin embargo, conforme avanza la jornada, si nos fijamos en las medidas tomadas a las 20:45 (gráfica c), podemos observar cómo el control ha conseguido regularizar y adaptar la potencia suministrada (en rojo) con la potencia de referencia (en verde).

Se puede ver cómo el seguimiento es preciso antes de la línea que nos indica el momento actual en que nos encontramos (*'Current time'*), mientras que se aleja del perfil de referencia después de ese momento debido a los siguientes hechos:

1) Todavía no hay suficiente demanda de energía después de ese momento de tiempo para realizar un seguimiento de la referencia, puesto que la llegada de FEVs es secuencial.

2) La energía se distribuye dependiendo de la tarifa eléctrica y, sobre todo, dependiendo de la elección de  $\Lambda$  tras el momento de medida *'current time'*. Por este motivo tomamos  $\Lambda[k, k] = \frac{1}{1+k^2}$ , una función estrictamente decreciente en función del momento del día, para controlar la longitud de la ventana en movimiento por delante de la línea *'current time'* en la que el requisito de seguimiento de referencia es estricto.

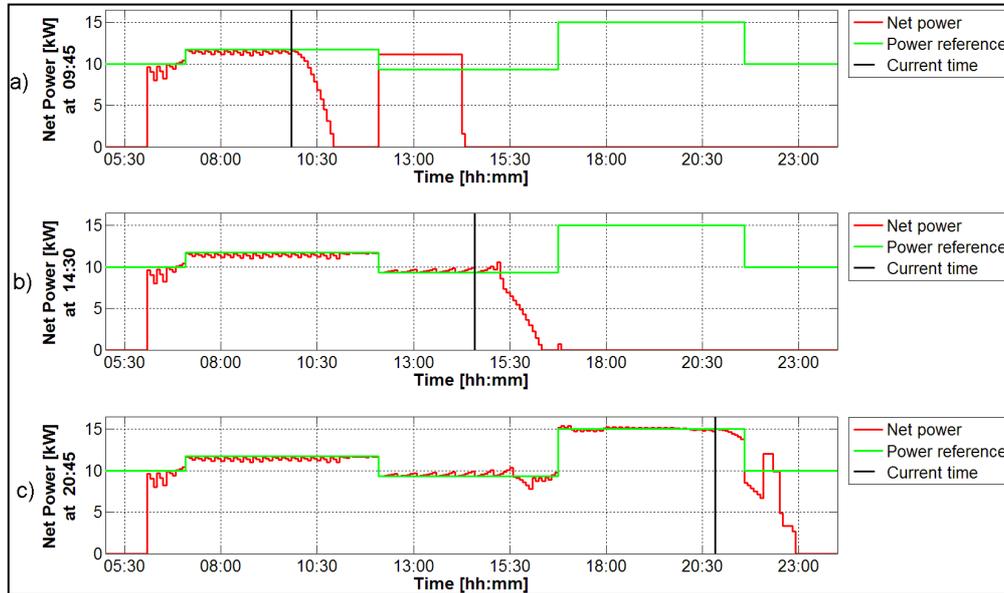


Figura 41. Perfiles de potencia de carga neta en tres momentos distintos del día

Para ajustar dinámicamente el control, evento tras evento, se analizan las secuencias de control y las secuencias de estado de los FEV individualmente. Como ejemplo, en las dos figuras siguientes mostramos la evolución del control y la evolución de los estados del FEV número 2 en tres puntos de tiempo distintos.

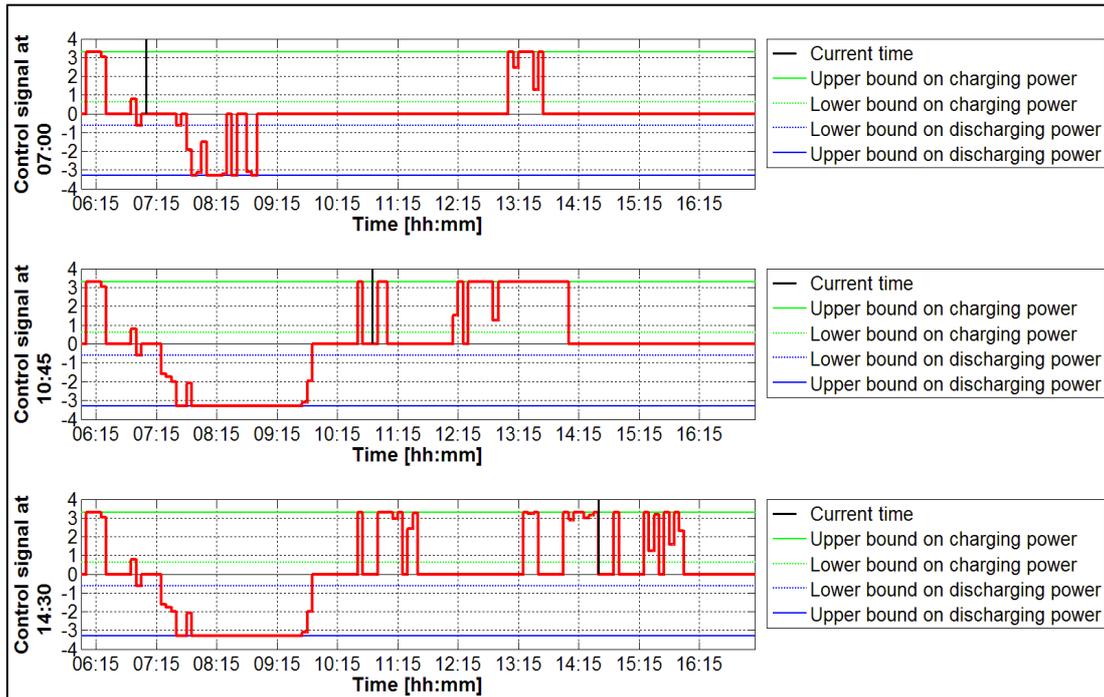


Figura 42. Evolución del control del FEV no. 2

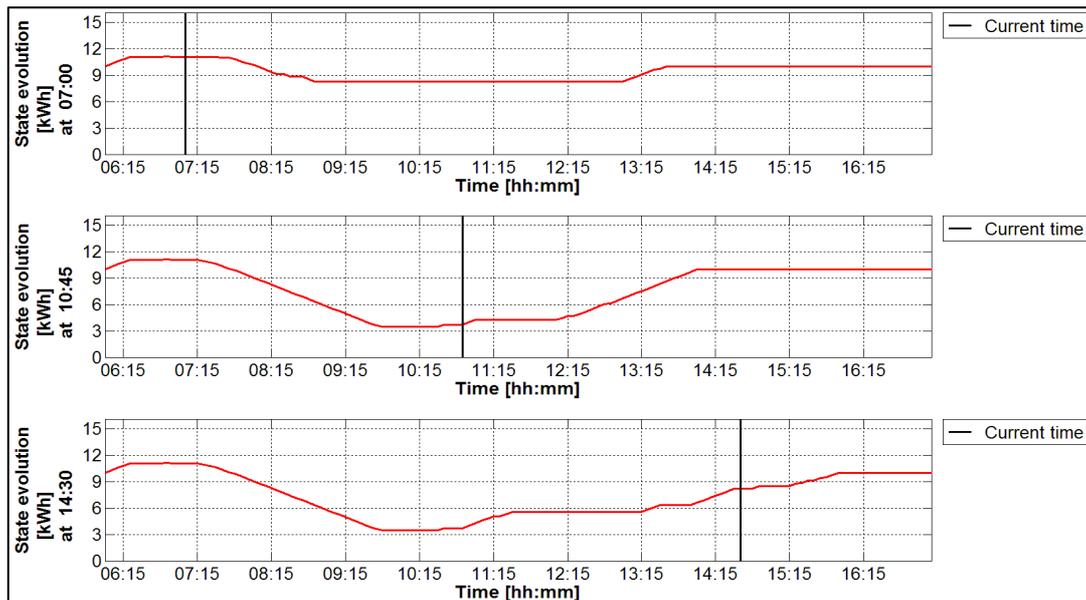


Figura 43. Evolución del estado de carga del FEV no. 2

Cada vez que el control desencadena un evento, se calcula una nueva señal de control teniendo en cuenta las anteriores. Por lo tanto, la señal de control final es dada por la concatenación de todas las señales de control que se encuentran entre los tiempos de activación consecutivos (los que realmente se activan).

Los costes presupuestados ( $c_m^*$ ) y los costes finales ( $c_m[\text{€/kWh}]$ ) asociados a los vehículos eléctricos se muestran, respectivamente, en la columna quinta y sexta de la tabla 14 anterior. En el test actual el control logró satisfacer las solicitudes de los usuarios a un coste siempre igual al presupuestado. Sin embargo, el estado de carga calculado aquí se basó en el modelo de batería, un modelo lineal simple. Por lo tanto, es razonable esperar algunas diferencias entre los dos costes en el caso real.

**Test 4: Reacción a eventos DSM (Demand Side Management)**

En esta simulación se muestra cómo el control es capaz de reaccionar eficazmente a las señales DSM. Bajo las mismas condiciones anteriores lo que vamos a hacer en el presente test es simular una señal de potencia que se notifica a las 11:30 y demanda una reducción de potencia entre las 12:00 y las 13:00. En ese intervalo de tiempo el umbral de potencia se mueve de 11,16 kW a 4 kW.

Las gráficas de la siguiente figura muestran cómo el control reacciona efectivamente a la señal DSM, siendo el error de seguimiento medio de 1,94% respecto a la referencia de potencia. Más aún, es estas figuras podemos observar cómo la potencia de carga (G2V) se distribuye de modo más plano y, frente a picos de demanda como el que ocurre hacia las 12:00 aprox. (como se ve en la gráfica (a) de la figura), los FEVs en azul oscuro (que son los que ofrecen a la red un servicio V2G) devuelven energía a la red para así conseguir responder a tal pico, como podemos observar en la gráfica (b) de la figura. Esto permite conseguir un seguimiento de la referencia de potencia, como podemos observar en la gráfica (c).

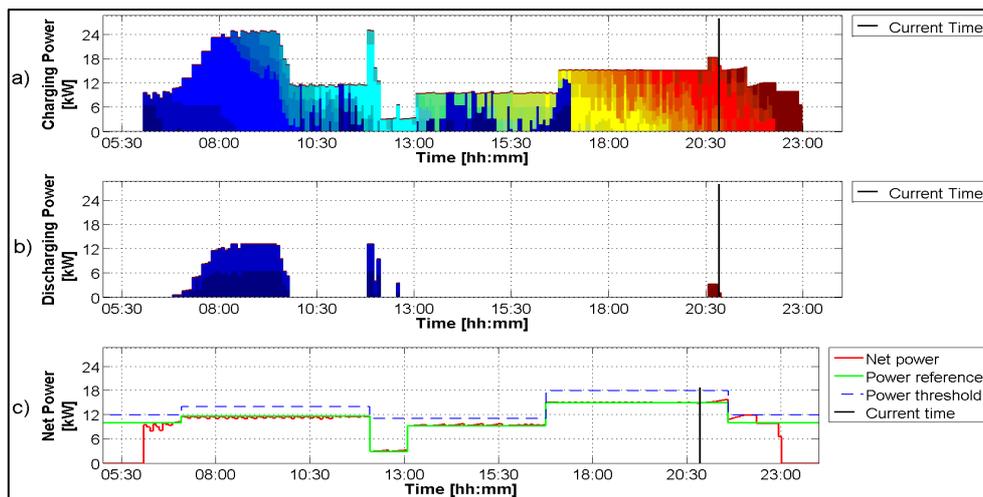


Figura 44. Resultados Test 4 “reacción a una señal DSM”

En la gráfica (a) de la siguiente figura se muestra el perfil de carga neta justo antes de la notificación de la señal de control de demanda DSM. Comparándolo con las gráficas

(b) y (c), correspondientes a momentos posteriores (13:00 y 20:15 respectivamente), se observa que la red reacciona adecuadamente a la señal de control de demanda variando el perfil de carga neta proporcionado.

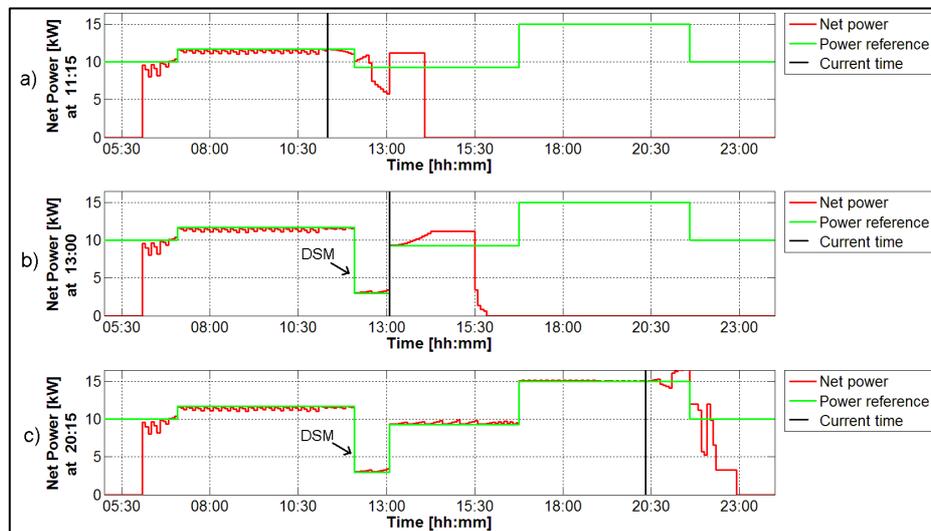


Figura 45. Variación de los perfiles de potencia de carga neta (en caso de DSM) en distintos momentos del día

Puesto que uno de los objetivos del control es lograr el equilibrio entre usuario y red, es razonable esperar que esta reestructuración de la carga forzada por el DSM tenga un coste. De hecho, el coste global sube de 16,00 cént.€/kWh (funcionamiento normal) a 16,13 cént.€/kWh. La séptima columna de la tabla 14 indica, por cada vehículo eléctrico, el coste de las operaciones de carga en caso de evento DSM ( $c_m^{DSM}$  [€/kWh]).

Ya hemos comentado que incluir restricciones de red incrementaría el coste de carga para el usuario. Está claro que la inclusión de restricciones de red es muy beneficioso para la eficiencia de la red, por lo cual para permitir estas restricciones de red deberían planificarse la inclusión de descuentos para los usuarios, es decir, reducción del coste de la energía dependiendo de si el usuario está cargando en un momento no coincidente con sus preferencias. La diferencia entre el coste total en el caso de operaciones normales y el coste total en el caso de DSM representa información valiosa para calcular un posible descuento (*Minimum rebate* [€/kWh]) que un agente de mercado podría proporcionar a la red para una reacción positiva a la solicitud de DSM. Este descuento es importante para conseguir que los usuarios vayan modificando progresivamente sus preferencias para la carga y sus reservas G2V (que también tiene en cuenta la red), y a su vez que colaboren con la misma pudiendo devolver esa energía no utilizada (servicio V2G). De este modo podemos conseguir que la eficiencia de la red sea progresivamente mayor, pudiendo reducir los costes impuestos a los FEVs.

**Test 5: Análisis de sensibilidad (variación del parámetro de control y reacción DSM)**

El control de demanda permite equilibrar dos objetivos distintos: 1) minimizar los costes y; 2) ajustar la potencia real a un perfil de potencia de carga de referencia. El parámetro principal que gobierna el equilibrio entre los dos objetivos es  $\mu$ . En las secciones anteriores  $\mu$  se ha elegido con el objetivo de garantizar un buen seguimiento de la referencia de potencia. El objetivo de este quinto test es evaluar experimentalmente cómo dos indicadores de objetivos opuestos, el coste total y el error de seguimiento promedio, varían con  $\mu$ .

Para ver cómo va variando la relación entre el coste y el error de seguimiento promedio hemos ido variando  $\mu$  de 0 a 20000 y midiendo los resultados. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura, donde representamos la evolución del error medio cometido en el seguimiento de la referencia de potencia respecto al coste en cént.€/kWh. Por comodidad en la gráfica sólo hemos indicado la moneda en que se ha medido el coste, no sus unidades de medida.

Esta gráfica recapitula parte de los resultados obtenidos en los tests anteriores como podemos observar, destacando un coste de 15,44 cént.€/kWh y un error excesivo de seguimiento, mayor al 70%, cuando  $\mu = 0$  (muy significativo de que no hay ningún tipo de restricción por parte de la red) o un coste de 16,00 cént.€/kWh cuando  $\mu = 70$  y un error de seguimiento referencial muchísimo mejor del 2,2% (tests anteriores).

Así pues podemos observar que cuanto mayor es el valor del parámetro de control  $\mu$ , un menor error de seguimiento de la potencia de referencia se traduce en un incremento del coste.

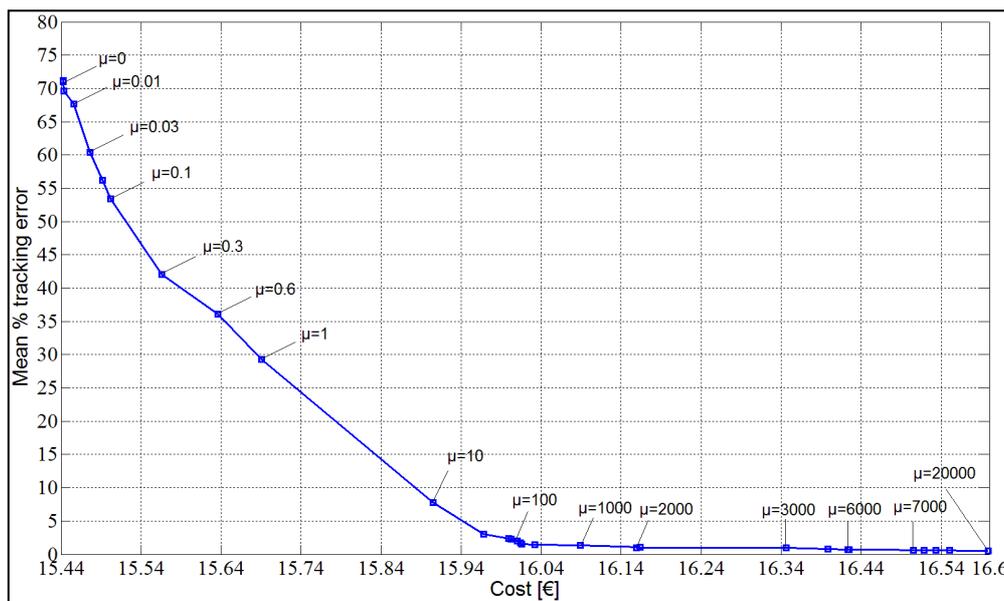


Figura 46. Análisis de sensibilidad con respecto al parámetro  $\mu$

Resulta interesante analizar el caso en que el parámetro  $\mu$  de control toma valores altos. Como ejemplo tomemos  $\mu = 5000$ , en cuyo caso se consigue un seguimiento de referencia casi perfecto, como vemos a continuación.

En la siguiente figura presentamos los resultados obtenidos. En la gráfica (c) de la figura puede observarse cómo el perfil de carga neta al final de la jornada (medida tomada a las 20:00) se adapta casi perfectamente al perfil de potencia de referencia de la red. Más aún, podemos concluir de las otras dos gráficas (a) y (b) cómo el perfil de carga ha ido siguiendo de forma muy precisa la potencia referencial de la red a lo largo de todos los momentos del día. En particular, las gráficas (a) y (b) muestran las medidas tomadas a las 9:00 y 13:00 respectivamente.

En este caso el error medio se sitúa en el 0,74% respecto a la referencia de potencia, repercutiendo ello en un coste de 16,42 cént.€/kWh, comparable al obtenido en el caso no controlado (16,39 cént.€/kWh), correspondiente al test1.

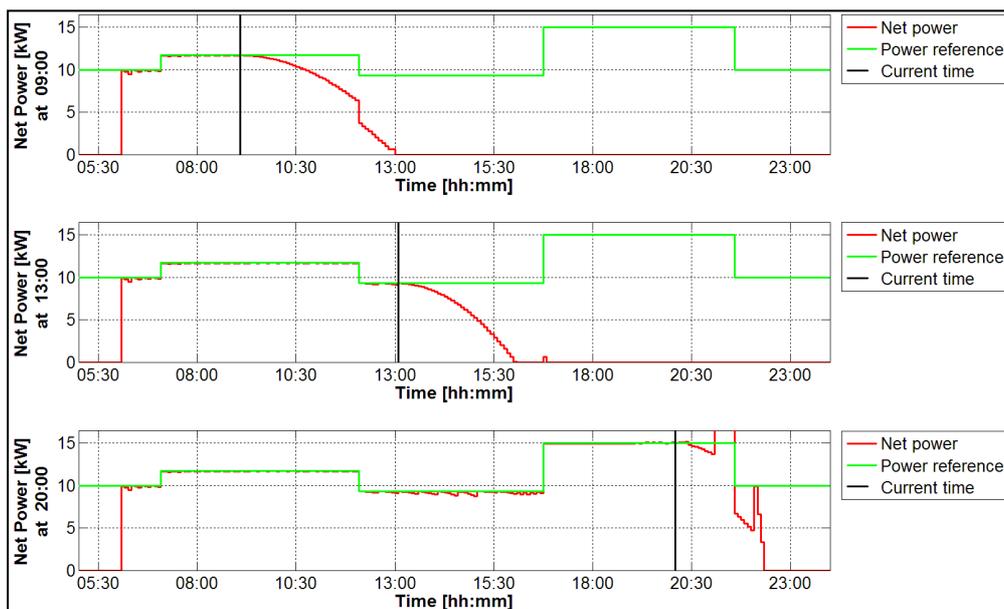


Figura 47. Test 5: perfiles de potencia de carga neta en el caso de  $\mu = 5000$

### Test 6: Pruebas adicionales utilizando datos reales

Los datos de partida de los tests anteriores (número de vehículos eléctricos, tiempos de llegada, energía demandada y flexibilidad de tiempo de los controladores) se eligieron para probar nuestra solución en el caso peor y considerando la baja penetración actual de los vehículos eléctricos. La elección fue fundamental para evaluar los resultados del marco de control propuesto en escenarios futuros caracterizados por una alta penetración de los vehículos eléctricos. Los ensayos han demostrado cumplir todos los

requisitos planteados y dar muy buenos resultados en comparación con el caso no controlado y con los controles que buscan únicamente minimizar los costes.

Hemos dado un paso más en la validación de nuestra solución: probarla contra datos reales (proporcionados por el principal proveedor de energía italiano), especialmente con respecto al número de vehículos eléctricos (FEVs), los tiempos de llegada en las estaciones de carga y la energía demandada. El conjunto de datos de que partimos, es el que se muestra en la siguiente figura.

FEV Number	Arrival Time [hh:mm:ss]	Duration of the Charging Session [hh:mm:ss]	Recharged Energy [kWh]
1	05:13:22	03:43:46	0,798
2	05:18:35	03:36:39	0,637
3	06:39:43	02:36:24	7,043
4	07:34:03	01:30:44	4,496
5	07:46:11	03:16:49	9,906
6	07:51:15	22:29:09	0,668
7	08:01:37	02:22:48	7,514
8	08:03:23	02:24:38	6,722
9	08:15:37	00:43:37	2,297
10	09:08:17	01:26:33	0,302
11	09:20:11	01:44:24	3,832
12	09:25:32	02:07:07	0,284
13	09:27:09	03:53:59	0,364
14	10:27:12	02:06:08	0,346
15	10:27:18	05:05:19	14,608
16	10:53:03	04:33:09	13,433
17	11:37:16	00:58:42	0,062
18	12:12:25	03:48:33	1,56
19	12:14:20	01:23:22	3,561
20	12:15:07	18:07:06	2,025
21	12:25:44	19:43:35	2,8
22	13:01:04	17:39:50	1,559
23	13:29:47	19:07:30	1,124
24	13:36:13	01:52:36	5,402
25	13:46:21	00:41:01	2,109
26	14:52:47	04:24:24	12,92
27	15:16:23	04:18:30	13,643
28	15:20:53	02:14:46	6,396
29	16:00:50	17:39:43	2,127
30	16:14:06	02:04:22	5,671
31	16:14:13	04:02:28	12,34
32	19:27:20	02:24:18	6,442
33	20:09:42	03:50:37	10,665

Tabla 15. Test 6: Batería de datos reales

Los datos de esta tabla hacen referencia a procesos de carga no controlados, en el sentido de que la duración de cada sesión de carga (mostrada en la tercera columna) y la cantidad de la energía recargada (última columna de la tabla) no son especificadas por el usuario. En otras palabras, la carga se inicia en cuanto el FEV se conecta, sin existir una reserva previa, y se desconecta cuando considera. Conocer el momento de llegada y cuánto se desea cargar el FEV es lo que definiría las preferencias del usuario.

El formato de datos es totalmente compatible con el formato de las solicitudes de carga tomadas como entrada por nuestra solución de gestión de demanda (DSM). Las solicitudes de carga se pueden simular fácilmente del siguiente modo:

- Para cada sesión de carga, la hora de inicio deseada de la carga se toma igual a la hora de llegada registrada (segunda columna).
- La hora de salida especificada por el usuario puede derivarse de la información sobre la hora de llegada y la duración del proceso de carga no controlada (tercera columna). Una opción es dejar que el tiempo de salida especificado para la solicitud del usuario sea igual a la hora de llegada más la duración del proceso de carga no controlada. También podríamos haber simulado diferentes tiempos de salida, con el fin de explorar la flexibilidad del sistema de control.
- La energía deseada especificada por la solicitud de carga se toma igual a la energía recargada durante el proceso de carga no controlada (última columna).

Para cada sesión de carga se proporcionó el perfil de carga específico. Por simplificar, a modo de ejemplo se muestra el perfil de carga medido asociado al FEV número 3, mostrado en la siguiente figura.

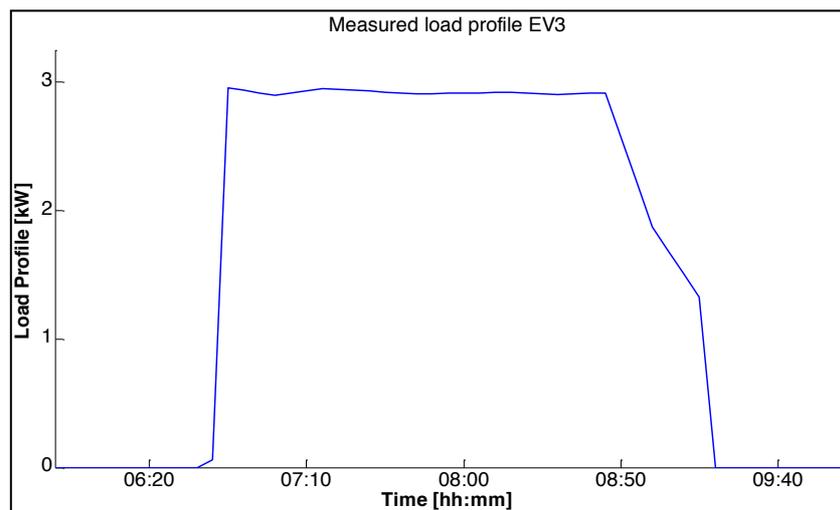


Figura 48. Perfil de carga medido para FEV3

En la siguiente figura mostramos el perfil de carga agregada asociado a todos los FEV considerados, según la tabla anterior. En esta figura, de modo análogo al caso anterior, representamos el perfil de carga de cada FEV con un color distinto, es decir, cada color se refiere a una sesión de carga específica, correspondiente a un FEV de los considerados.

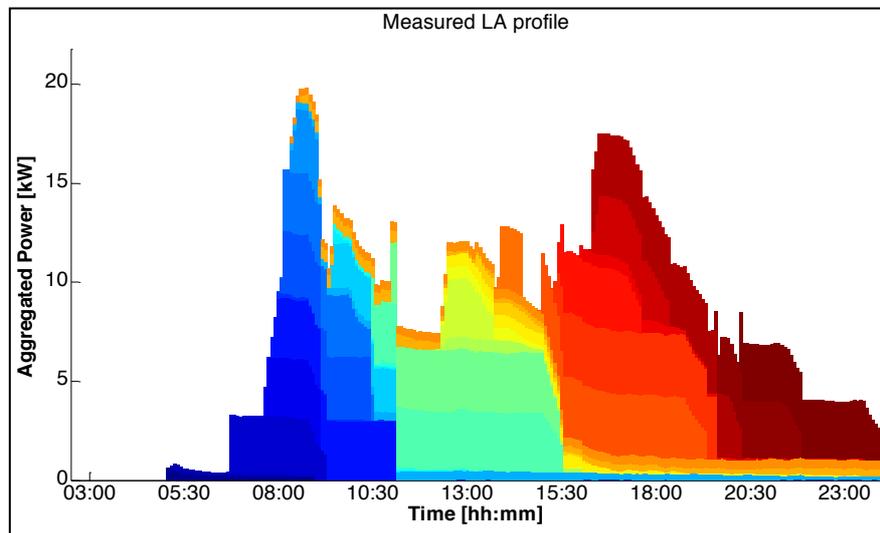


Figura 49. Test 6: Perfil de carga agregado medido a nivel de área de carga

Se puede observar que la figura es de alguna manera similar a la figura del perfil de potencia de carga agregado correspondiente al test1, que muestra el perfil de carga agregado no controlado derivado de los datos elegidos para los tests anteriores. Ambas curvas presentan dos picos principales: el primero alrededor de las 08:00 y las 09:00 y el segundo alrededor de las 17:00 y las 18:00.

La señal  $P_{ref}$  elegida para las simulaciones siguientes se representa en el siguiente gráfico:

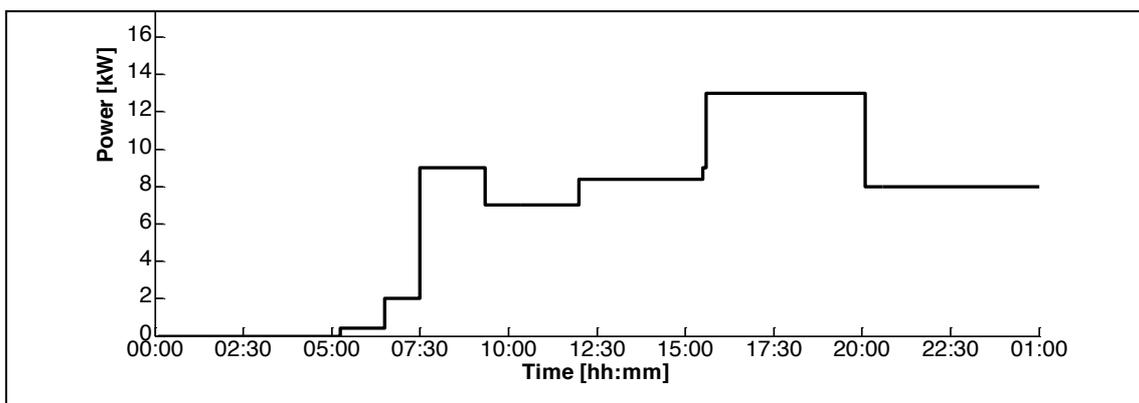


Figura 50. Referencia de potencia seleccionada

A continuación se muestran tres simulaciones para evaluar el rendimiento del algoritmo en función de la flexibilidad permitida establecida por las preferencias del usuario:

- La primera simulación que se presenta se obtiene eligiendo los tiempos de salida como los tiempos de llegada registrados más la duración del proceso de carga no controlada (según ya hemos comentado, a partir de los datos de la tabla 15). Como se esperaba la figura siguiente muestra que el seguimiento no siempre es bueno en el caso que se proporcione a la red una escasa flexibilidad en cuanto al tiempo permitido para la reacción. En otras palabras, es similar al hecho de que se le impida al centro de control controlar la disponibilidad de carga en cada CS, o sea, que no incluya restricciones a la red.

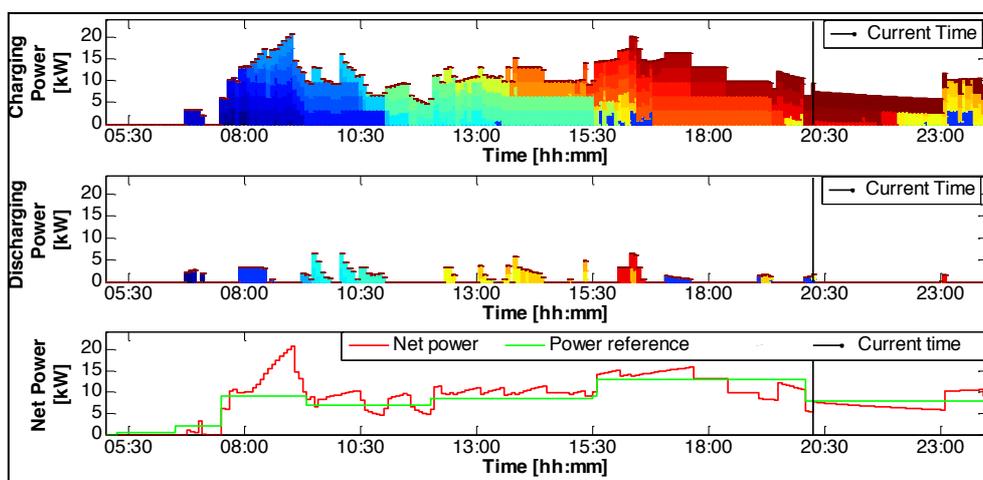


Figura 51. Resultados Test 6 “datos reales, sin flexibilidad de tiempo adicional”

- El rendimiento de seguimiento mejora si se aumentan los tiempos de salida. Las dos figuras siguientes muestran los resultados obtenidos en caso de que todos los tiempos de salida se incrementen 30 minutos y 1 hora, respectivamente.

En estos casos, no sólo se consiguen eliminar los picos en la potencia neta suministrada sino que cuanto mayor sea la flexibilidad que se le aporta a la red para su reacción DSM, mejor es la adaptación de la curva de potencia neta a la potencia de referencia.

Esto implica que el coste será menor y la eficiencia mayor, en cuanto que todas las peticiones de carga serán atendidas y la red incurrirá en una cantidad menor de coste. Esto parece lógico puesto que la red no tendrá que incrementar las infraestructuras para atender esos picos que hemos conseguido eliminar en el suministro de energía.

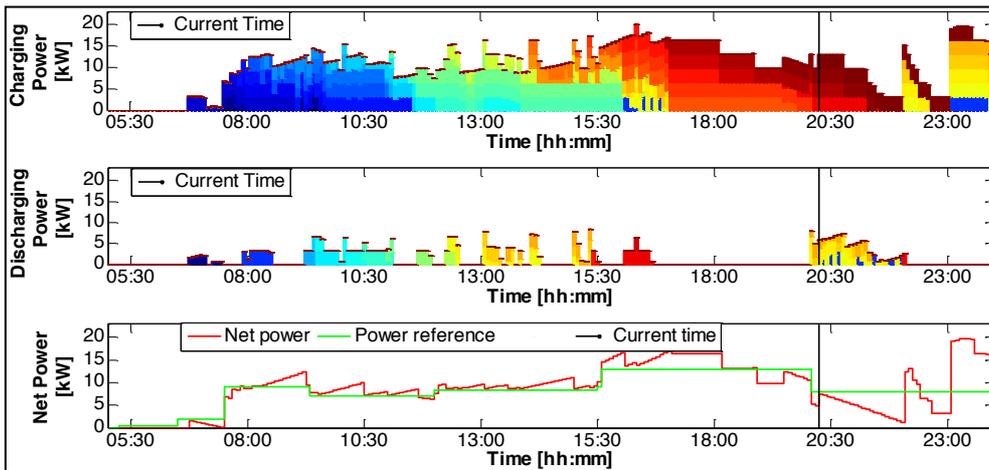


Figura 52. Resultados Test 6 “datos reales, 30 minutos de flexibilidad de tiempo adicional”

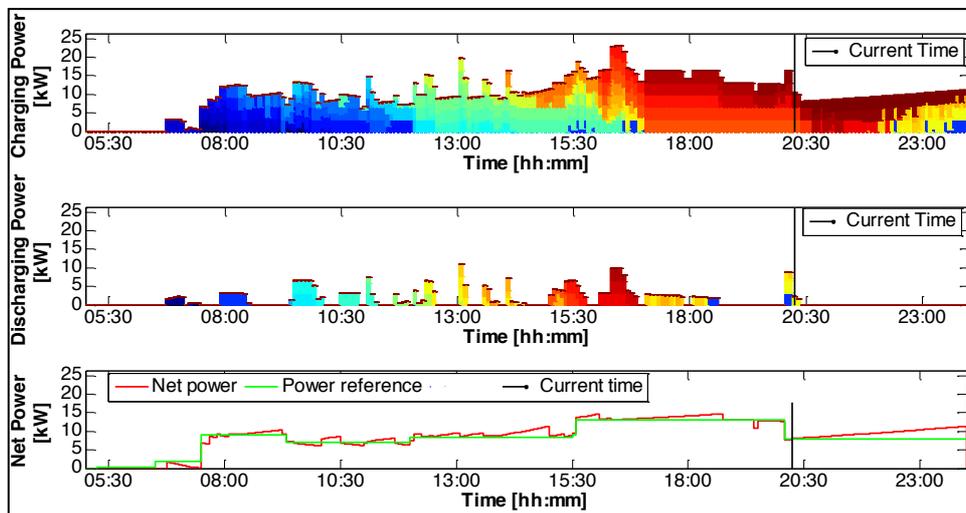


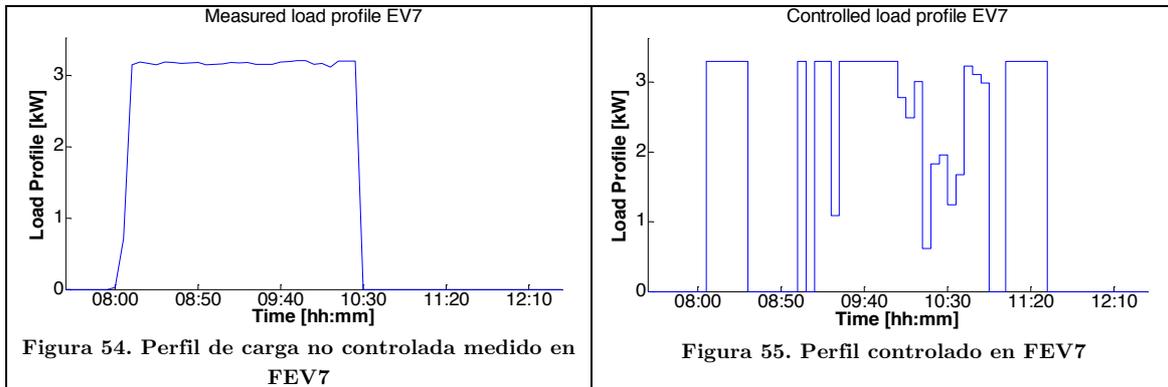
Figura 53. Resultados Test 6 “datos reales, 1 hora de flexibilidad de tiempo adicional”

Como ya hemos explicado en los tests anteriores, la mejora del rendimiento de seguimiento se debe a la intervención de control por parte de la red, una acción que aumenta a medida que aumenta la flexibilidad de tiempo proporcionada por el usuario.

A modo de curiosidad y con el fin de completar nuestro estudio, se muestra una comparación entre uno de los perfiles de carga no controlados y el correspondiente perfil de carga controlado extraído de la última simulación. Tomamos para ello el FEV número 7 de nuestra tabla de datos reales sobre la que estamos trabajando.

De esta comparativa queda claro que, al controlar el proceso de carga, los perfiles de carga de cada FEV varían permitiendo que la red pueda controlar los período de carga (G2V) y descarga (V2G), pudiendo desplazar la carga en caso de momentos de pico.

Esto da lugar a un aumento claro de la eficiencia de la red, que tiene su repercusión inmediata en un decremento de los costes.



### 3.6 Procesos de identificación y acceso web

Para las pruebas integradas de todo nuestro sistema, necesitamos un sistema de acceso web. Este es implementado para realizar las pruebas en laboratorio.

A continuación presentamos nuestros diseños UML para cada uno de los procedimientos creados dentro del sistema de acceso web, cuyo detalle técnico se puede ver en [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/). Estos escenarios han sido ejecutados y validados para realizar cualquier ajuste antes de las pruebas de campo (que veremos en el siguiente punto) para la integración del sistema de interoperabilidad final. Los diseños UML de los procesos de identificación y acceso web son los siguientes:

- Procedimiento de acceso al sistema:

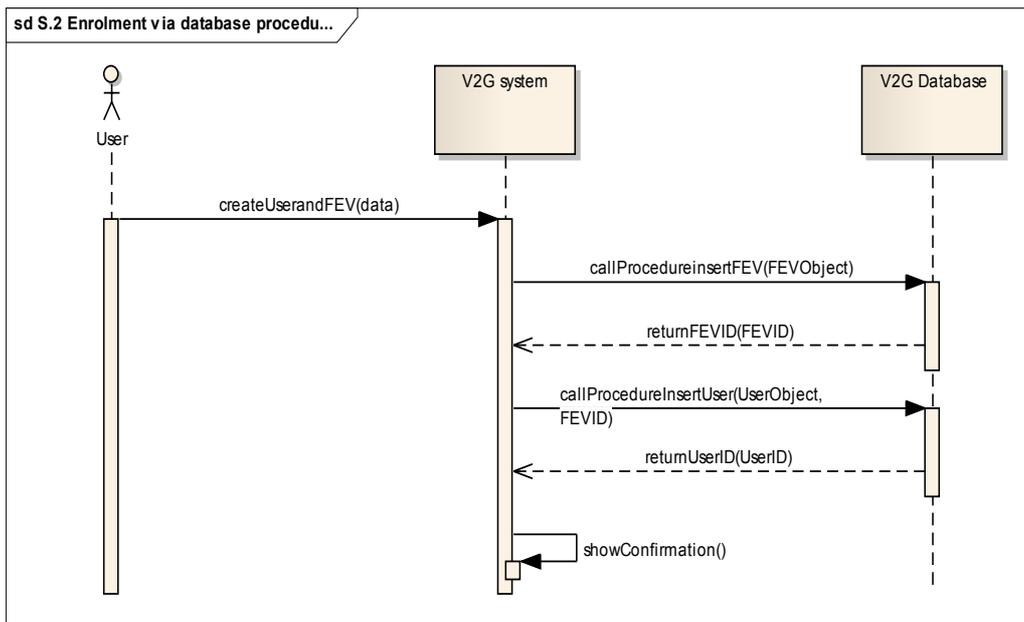


Figura 56. Procedimiento de acceso al sistema V2G.

- Identificación del usuario via interfaz web:

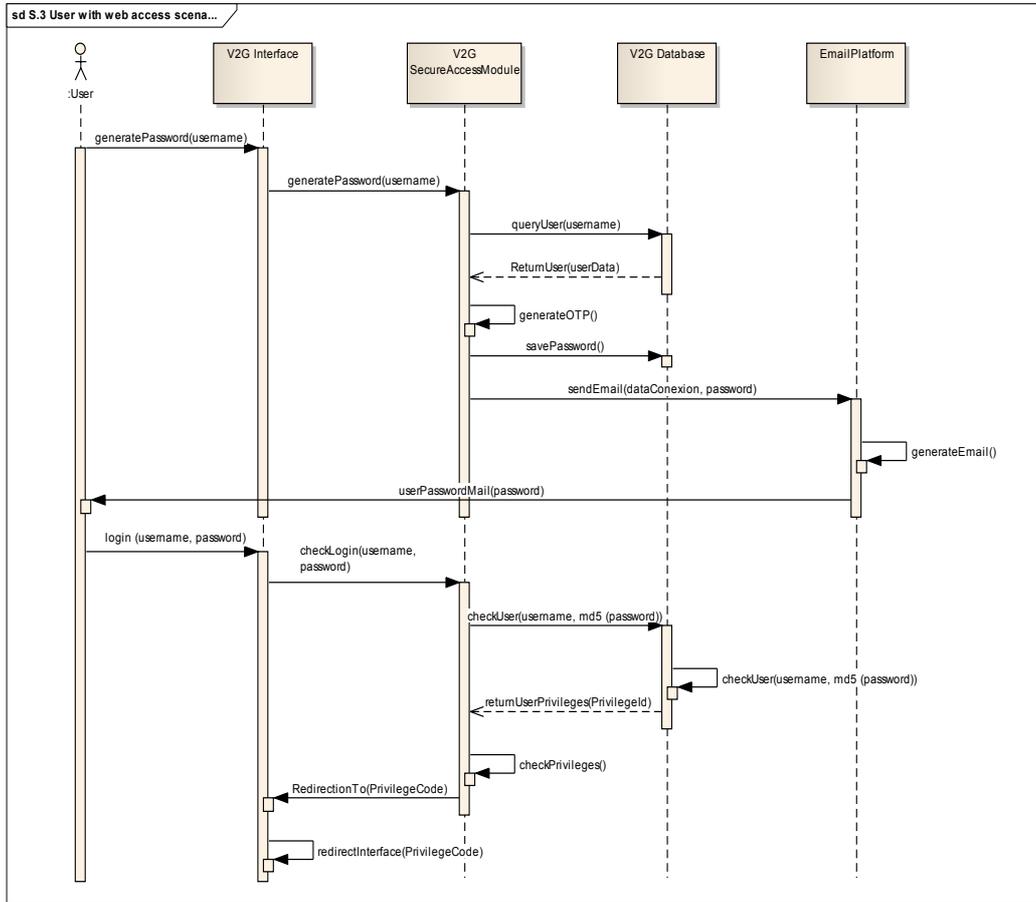


Figura 57. Protocolo de acceso seguro via interfaz web

- Identificación del usuario FEV frente a la estación de carga:

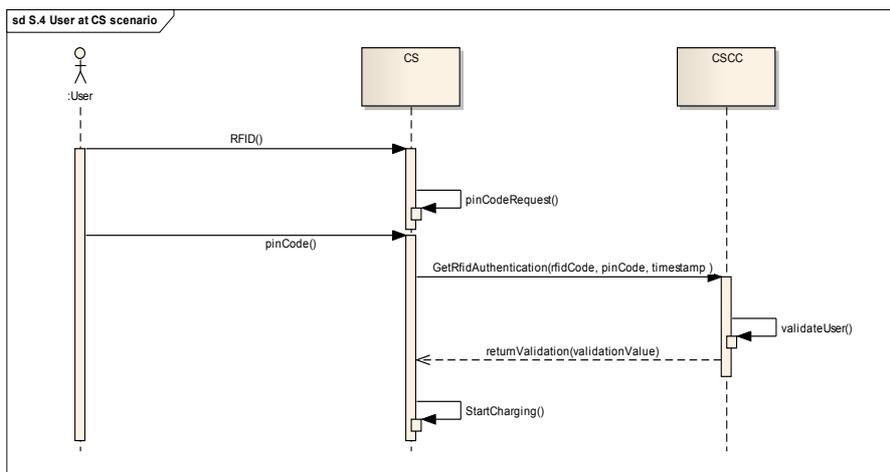


Figura 58. Test de Validación/Identificación del usuario en la CS.

- Identificación del usuario FEV en movimiento frente al CSCC (via app, por tanto):

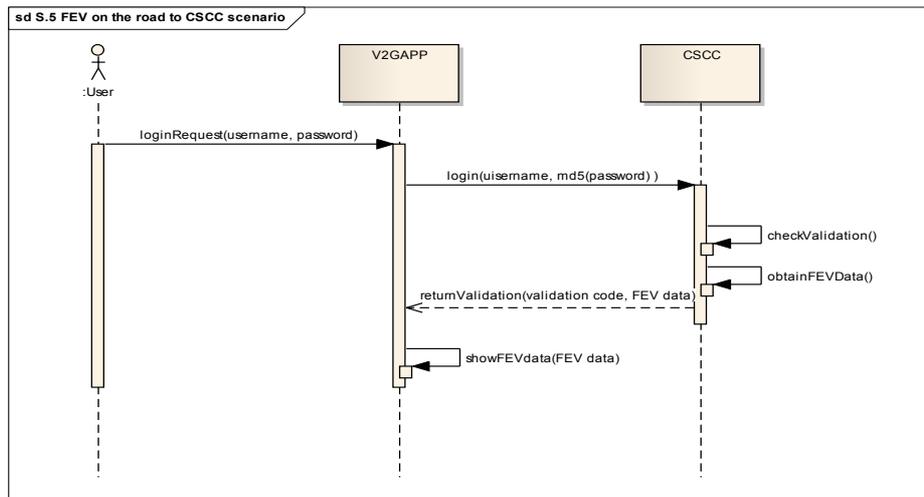


Figura 59. Identificación del usuario en movimiento ('on road').

### 3.7 Pruebas integradas: resultados de las pruebas de campo

En las pruebas en campo y puesta en marcha del sistema integrado de gestión activa de la demanda (DSM) se analizaron los aspectos más importantes del sistema:

- Pruebas de comunicación entre todos los subsistemas 'Smart Vehicle to Grid' que permiten validar la interoperabilidad y la integración del sistema en la red.
- Pruebas de la previsión de carga de los vehículos eléctricos, la estimación de la disponibilidad de energía en la red, gestión de la demanda y el control de la autonomía de los vehículos eléctricos. Estas pruebas son importantes para validar el funcionamiento conjunto (integrado) de los algoritmos desarrollados.

A continuación mostramos las pruebas llevadas a cabo para finalizar nuestro estudio. Pero antes es importante conocer cuáles han sido las características de estas dos pruebas y su contextualización:

- Una primera prueba, en la que calculamos el perfil de potencia de carga únicamente al inicio de la sesión, sin permitir control alguno por parte de la red. Se trata de lo que denominamos 'aplicación de un punto de ajuste de carga estática'. Este punto de ajuste estático es el perfil de potencia de carga que presenta el FEV inmediatamente después de su solicitud de carga.
- Una segunda prueba en la que hacemos intervenir una gestión activa de la demanda, tal y como hemos descrito en los tests previos. Es decir, se trata de la aplicación de ajustes periódicamente actualizados.

El punto de ajuste de la carga se calcula primero después de la solicitud de carga y luego se actualiza periódicamente hasta el final de la sesión de carga. Esto se hace para comprobar que con ello conseguimos un mejor seguimiento en la referencia de potencia, poder reaccionar adecuadamente a las señales procedentes de la red y poder solicitar una modificación del perfil de carga máxima permitida.

Entrando en la contextualización de las pruebas, utilizamos un FEV modelo Nissan Leaf para cuya recarga se cuenta con los siguientes parámetros:

Nominal Battery Capacity [kWh]	22
Maximum charging power [kW]	$1 * 16 \text{ A} * 0.23 \text{ kV} = 3.68 \text{ kW}$
Type of charging (single phase or three phase)	Single phase

Tabla 16. Parámetros FEV

Estas pruebas se llevaron a cabo en uno de los puntos de carga pública instalados y operativos en la ciudad de Ljubljana. Esta estación de carga considerada (CS) se suministra con una conexión trifásica de 3 x 63A (alimentación principal), una tensión de 230/240V, potencia nominal de 43,65kW, un factor de potencia de 1,00, un número de polos de 3P+N y una puesta a tierra de TN-S. La corriente principal se divide en el FEVSE ('Full *Electric Vehicle Supply Equipment*') para dos tomas de modo que dentro de la CS las dos tomas están protegidas por 3x34A. El consumo de esta CS se mide con los medidores instalados en cada toma por separado con el fin de recopilar los datos para el proveedor de energía y el operador de la CS.

### Prueba (i): Aplicación de puntos de ajuste de carga estática

El objetivo de esta prueba es demostrar en campo el correcto funcionamiento de todo el sistema de control de carga del vehículo eléctrico en la red, desde el manejo correcto de las solicitudes de carga de los usuarios hasta el cálculo del perfil de carga, la correcta aplicación del perfil por la CS y finalmente la correcta terminación de la sesión de tarificación. Estas pruebas se han realizado con un solo FEV y dejando que el control calcule el perfil de carga sólo al comienzo de la sesión de carga, es decir, sin actualizarlo periódicamente.

Esta prueba ha puesto de relieve, en primer lugar, que el conocimiento de las buenas estimaciones del factor de eficiencia  $\xi_m$ , y en particular de la capacidad real de la batería del FEV son fundamentales para satisfacer la exigencia de las preferencias de los usuarios (en particular, la energía a recargar). Esto se debe a que el algoritmo de gestión activa de la demanda expresa los valores del estado de carga (SOC) en kWh, mientras que las preferencias del usuario se expresan el valor SOC en %, por lo que se necesita una conversión que a su vez requiere el conocimiento del SOC real.

La siguiente tabla presenta dos pruebas, donde se considera el valor nominal de la capacidad de la batería (*primera columna*) y cómo la degradación de la misma reduce progresivamente su capacidad real.

También se puede observar que los resultados mejoran cuando se considera un valor de 19 kWh para la capacidad real de la batería (*obsérvese que se puede calcular una buena estimación de la capacidad real de la batería simplemente comparando los datos de medición CS y las lecturas SOC del FEV*).

Session ID	Initial SOC→Desired final SOC [%]	Measured final SOC [%]	Energy measured at CS [kWh]
180 (Load profile computed considering for the battery capacity the nominal value of 22 kWh)	10→30	38	5.54
182 (Load profile computed considering for the battery capacity the nominal value of 19 kWh)	38→48	49	2.60

Tabla 17. Resultados pruebas

En cuanto al requisito de seguimiento del perfil de referencia de potencia de carga, en la siguiente figura observamos las señales de potencia obtenidas. A la vista de los resultados mostrados en la figura, concluimos que el seguimiento de la referencia de potencia de carga es preciso sólo cerca del tiempo inicial. Esta conclusión era predecible, puesto que en este tipo de pruebas el perfil de carga nunca se actualiza después de calcularse al principio de la prueba.

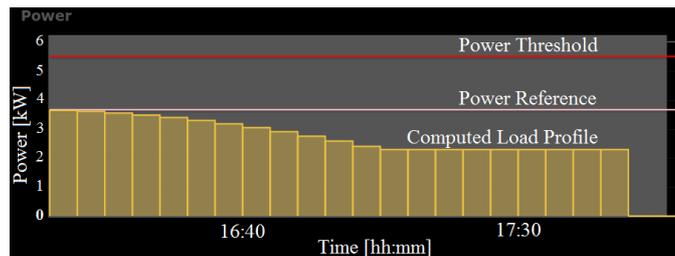


Figura 60. Punto fijo de carga calculado por el algoritmo DSM

En la figura siguiente se compara el punto fijo de carga del FEV (‘computed profile’) con la potencia real aplicada por la estación de carga, en gris (‘applied profile’), que es el que realmente aplica el FEV. Cada muestra (es decir, los puntos blancos en la figura) del perfil aplicado representa la potencia real medida por la CS y enviada al CSCC cada cinco minutos.

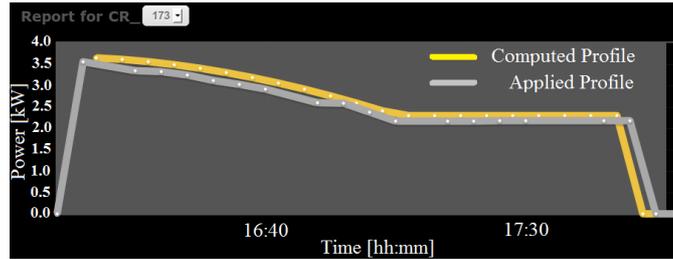


Figura 61. Comparación perfil de carga aplicado vs calculado

De la figura se puede observar que la potencia aplicada sigue la calculada con buena precisión. En particular, la distancia media entre el punto de ajuste del perfil de carga estático y el accionado es de 0,114 kW, el error cuadrático medio es de  $3,72 \cdot 10^{-3}$  y la distancia máxima entre el punto de ajuste del perfil de carga y el accionado es de 0,212 kW. El desajuste entre los dos perfiles depende de:

- No linealidades que caracterizan la batería y el cargador.
- Ruido, como el que influye en el nivel de voltaje, que se supone constante por el algoritmo DSM.
- Redondeo del valor del punto de ajuste de potencia a valores de corriente de fase entera.

### Prueba (ii): Puntos de ajuste de carga periódicamente actualizados

En esta segunda prueba, el sistema de control actualiza periódicamente, en concreto cada 5 minutos, los puntos de ajuste de la carga, iterando el algoritmo de gestión activa de la demanda descrito anteriormente. Esta prueba permite alcanzar un seguimiento de referencia preciso y reaccionar a eventos como una nueva carga, nuevas peticiones y/o variaciones del perfil de referencia establecido por el proveedor de energía, es decir, señales DSM.

En las figuras siguientes se muestran el primer y el último punto fijo de carga calculado por el sistema de control a las 12:15 y 13:15 respectivamente. Se puede observar que el punto de ajuste de carga cambia para adaptarse mejor a la referencia de carga (curvas en gris sobre las figuras). Esta señal de referencia también puede variar durante la ejecución del ensayo para simular una señal DSM de reducción de potencia por parte del proveedor de energía, como vemos a continuación.

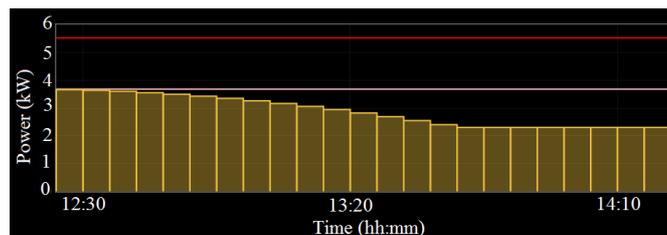


Figura 62. Primer punto fijo de carga calculado (12:15)

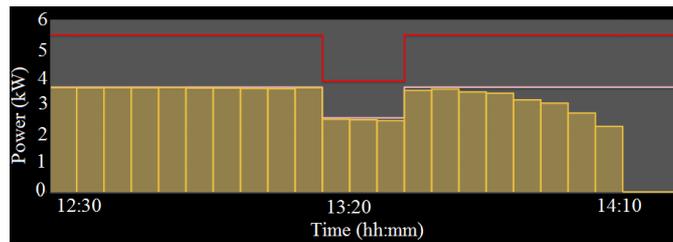


Figura 63. Último punto fijo de carga calculado (13:15)

Es importante observar cómo el punto de ajuste de carga ha ido reajustándose llegando a ser muy aproximado al perfil de referencia variante a que hemos sometido el sistema.

En la figura siguiente se muestra la evolución final del punto de ajuste de carga a la CS (en amarillo) y la potencia de carga realmente aplicada (en gris), medidos desde la CS. Creemos importante destacar que algunos informes para la CS se pierden debido a problemas de conectividad GSM, de ahí el ajuste no perfecto de la potencia de carga a la referencia.

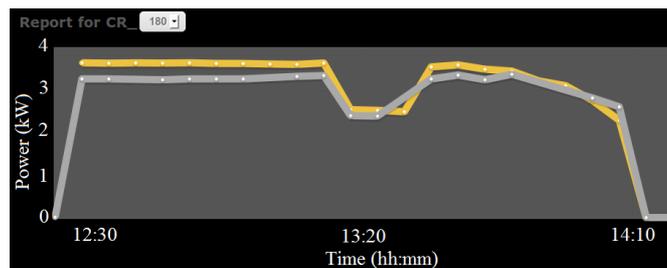


Figura 64. Último punto de carga

Todas las funciones desarrolladas en el sistema superan con éxito las pruebas de campo, como hemos mostrado, la mayoría con excelentes resultados, y sólo en muy pocos casos (y justificados por imprevistos del entorno de pruebas) los resultados no fueron aceptables. Esto nos permitió llegar a ideas muy relevantes para futuras mejoras, como vemos en el siguiente punto.

### 3.8 Conclusiones. Impacto en el futuro de Europa y propuesta de mejoras.

La Comisión Europea trabaja en la definición de normas y reglamentos, puesto que se conoce la importancia de desarrollar tecnologías compatibles para alcanzar una gran penetración en el mercado y garantizar la libre circulación de FEV en el futuro de Europa. Es por esto que Europa fomenta investigaciones sobre la interoperabilidad y el rendimiento de los cargadores de FEV para estimular el desarrollo y el despliegue de este potencial sistema de transporte.

En nuestro caso algunos de estos aspectos se abordaron a través del desarrollo del sistema de comunicación y control del sistema integrado en la red de estaciones de carga. Esto permite un intercambio eficiente y necesario de electricidad y datos entre FEV y red en diferentes escenarios urbanos, como estacionamientos residenciales individuales, áreas de estacionamiento residencial colectivo o áreas de estacionamiento público.

El **principal impacto** esperado como resultado de la implementación del sistema de interoperabilidad es tanto en las perspectivas industriales como en las sociales, destacando:

- Mejora de la eficiencia energética, como resultado de la puesta en marcha del servicio V2G que posibilita la integración del FEV en ciudad.
- Ampliación del alcance del FEV.
- Reducción del coste de mantenimiento del FEV.
- Limitaciones atenuadas para el usuario del vehículo FEV frente al motor de combustión interna
- Mejora significativa de la seguridad, comodidad y nuevos servicios de información para los usuarios de FEV.
- Fortalecimiento de la competitividad global de los sectores europeos del automóvil, las TIC y la batería. Penetración en el mercado de los componentes clave de los FEV.

Aunque hoy en día se están llevando a cabo muchas investigaciones en busca de una mejora de eficiencia y reducción de costes de FEV para asegurar la aceptación pública, todavía existen muchas barreras que impiden la implementación de la electromovilidad. Entre ellas cabe destacar los **costes excesivos**, la falta de infraestructuras y los problemas que implican una **conexión a gran escala a la red**. Los resultados de nuestro trabajo contribuyen a integrar el FEV y proporcionan las herramientas adecuadas para extender el uso del FEV en Europa.

Gracias a la estandarización del sistema V2G diseñado y la implementación del sistema es posible viajar a través de Europa con la capacidad de colaborar con la red inteligente, permitiendo una reducción del coste de la energía y un incremento de eficiencia de la red, como hemos visto a lo largo de las pruebas.

Respecto a los usuarios, el servicio V2G y, con él, la gestión activa de la demanda, permite encontrar las estaciones de carga más adecuadas en cada situación, obteniendo como resultado la flexibilidad suficiente como para elegir dentro de un período de tiempo específico cuándo y dónde cargar la batería a lo largo de una ruta determinada. De este modo, resuelve en gran medida las diferencias entre los vehículos de motor a combustión interna y los FEV desde la perspectiva de los usuarios.

Además de los beneficios para los FEVs, el canal de información bidireccional también proporciona información a la red que contribuye a una **gestión de energía inteligente**. La alineación del proceso de tarificación con el mercado dinámico de la energía, con precios cada vez más susceptibles de variación, también es una contribución en el sistema. La red inteligente puede utilizar la información de *precios para controlar el calendario de carga y el consumo de energía* de los FEV. Teniendo en cuenta estos aspectos, la implementación del sistema tiene beneficios potenciales para una **gestión energética más inteligente** y una mayor fiabilidad de la red.

Por otro lado, también se espera un impacto social directo en las políticas de movilidad, seguridad y sostenibilidad (medio ambiente).

Por último, entre los principales aspectos transversales de la implementación real del sistema, cabe destacar los aspectos de confort y seguridad de los sistemas y los aspectos específicos de accesibilidad de dichos sistemas e infraestructuras de carga de energía amigables para el usuario.

Todas estas cuestiones requieren una normalización en muchos aspectos: protocolos de comunicación, perfiles de carga, sistemas de seguridad, etc. Es por esto que lo conseguido con nuestro trabajo pretende ser una referencia en el proceso de estandarización de la infraestructura de carga del FEV, del cual todavía queda mucho por hacer.

## Capítulo 4

# Sistema de movilidad en la SmartCity

*“Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo”*  
~ Arquímedes de Siracusa (287a.C.–212a.C.)

Una vez ubicado el FEV en la ciudad, es importante estudiar cómo integrarlo con el resto de infraestructuras que influyen en la movilidad en la ciudad. Por ello el objetivo del presente capítulo es integrar el FEV con el entorno externo al FEV en la SmartCity y estudiar cómo los factores que intervienen en la movilidad, junto con el FEV, pueden garantizar que la planificación de los desplazamientos en la ciudad no se vea afectada por causas ajenas a ella. Entre los factores de que dependen los desplazamientos en la ciudad destacamos los servicios de información meteorológica, de tráfico y de movilidad en la ciudad como son el transporte público, el estacionamiento y el alquiler (e-sharing). A estos elementos los denominamos fuentes externas de información, como ya habíamos anticipado en el primer capítulo.

Puede que el FEV no siempre sea eficiente como medio de movilidad en la ciudad debido a su no disponibilidad (por estar descargado), a las distintas condiciones meteorológicas, de tráfico o a su inadecuación al trayecto que quiere recorrerse. Por este motivo es necesario la combinación del uso del FEV con otros medios de movilidad. Es lo que denominamos comodalidad y que necesitamos estudiar como servicio de transporte de la ciudad. Según [35] y [36], la comodalidad se define como “*el*

*uso de un modo o combinación intermodal para un viaje o grupo de viajes, de personas o mercancías, que maximiza la eficiencia del trayecto*". El desarrollo de la comodalidad busca en definitiva la forma óptima de utilizar los distintos modos de transporte para que el trayecto resulte eficiente y sostenible. Esto es importante para alcanzar nuestro objetivo en esta última parte del trabajo, puesto que para evitar que no se vea afectada nuestra planificación al movernos por la ciudad es necesario contar con otros medios de transporte que no sólo el FEV.

Además de analizar, por tanto, la comodalidad y el resto de factores que influyen en la movilidad, para garantizar que la planificación de los desplazamientos no se vea afectada por causas como el tráfico, resulta de gran importancia tomar decisiones de forma anticipada. Para ello necesitamos analizar cómo diseñar un algoritmo de predicción del tráfico. Este problema planteaba un reto innovador a toda la sociedad europea. De ahí que nuestros resultados entrasen a formar parte de los resultados finales de Mobincity, como ya hemos explicado en capítulos anteriores.

## 4.1 Entorno de trabajo

El trabajo fue llevado a cabo en el marco del proyecto denominado Mobincity -*Smart Mobility in Smart Cities*<sup>††††</sup> ([E]), financiado por la Comisión Europea dentro del Séptimo Programa Marco, entre julio de 2012 y marzo de 2016, como ya habíamos comentado.

El proyecto Mobincity fue coordinado y desarrollado por un consorcio compuesto por trece entidades de cinco países distintos (España, Alemania, Eslovenia, Italia y Croacia): *Energy Technology Institute, Fraunhofer Institute for Communication Systems, Electronic Trafic, Energy Institute Hrvoje Požar, Enel Distribuzione, CIT Development, Elektro Ljubljana Podjete Za Distribucijo Elektricne Energije, Hrvastki Telekom, Technomar, Oprema Ravne, Etrek Svetovanje in Druge Storitve, Consortium for Research in Automation & Telecommunication y Zabala Innovation Consulting.*

El proyecto consta de nueve paquetes de trabajo (WPs), de los cuales el segundo es el que hemos llevado a cabo en su totalidad, colaborando y obteniendo los resultados correspondientes en el quinto, sexto, séptimo y octavo. Consideramos necesario resumir a continuación los objetivos de los nueve paquetes de trabajo.

- El WP1 es el punto de partida de todo el proyecto donde los partners definimos y analizamos los requerimientos del sistema general. En él se precisaron las entradas y salidas, y se distribuyó el plan de trabajo entre el resto de WPs.

---

<sup>††††</sup> <http://mobincity.eu/>      [http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177_en.html)

- El objetivo del segundo paquete de trabajo (WP2) consistió en definir la interacción del FEV con las fuentes externas de información. Esta parte permite la integración del FEV con el entorno externo a las infraestructuras de gestión del FEV.  
Una parte de nuestra investigación corresponde a los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos del presente WP2 y conseguir la valoración positiva del equipo de evaluadores de la Comisión Europea
- En el WP3 se analizaron los datos de red eléctrica, tarifas de energía, curva de demanda y disponibilidad de las estaciones de carga requeridas para el desarrollo del sistema integrado que permita la interacción con el entorno externo en la SmartCity.
- Además se necesitan sistemas de comunicación seguros para la interacción eficaz entre la infraestructura de transporte y energética, que fueron desarrolladas paralelamente en el WP4.
- El WP5 consistió en diseñar estrategias adaptativas y algoritmos que definen la planificación de rutas basadas en la información recibida de los WP anteriores. Incluye la definición de modos de conducción energéticamente eficientes, de manera autónoma o semiautónoma, con el objetivo de reducir el consumo de energía.  
Nuestra colaboración en este paquete de trabajo fue esencial para dotar de un valor añadido a nuestros trabajos en el WP2.
- El objetivo del WP6 fue integrar los diversos subsistemas desarrollados obteniendo como resultado el sistema final de interoperabilidad Mobincity, dispuesto a ser instalado en un vehículo eléctrico. El sistema es validado a escala de laboratorio durante este WP por medio de simulaciones. Ello sirvió para realizar un ajuste fino del sistema y de los parámetros.
- Finalmente, dentro del WP7 se realizaron las pruebas de campo a escala real con el objetivo de validar el funcionamiento de sistema Mobincity.
- El WP8 consistió en promover la difusión de los resultados obtenidos dentro del proyecto y el desarrollo de metodologías de evaluación respecto al impacto con el fin de identificar la aceptación por parte del usuario final.
- Por último, el WP9 es un paquete de trabajo transversal en el cual se llevó a cabo la coordinación global del proyecto.

Vamos a estudiar a continuación los problemas planteados, la arquitectura propuesta y las soluciones proporcionadas.

## 4.2 Problemas planteados y arquitectura del sistema de movilidad

Para conseguir una solución de interoperabilidad entre el FEV y el resto de infraestructuras relacionadas con la movilidad en la ciudad necesitamos, en primer lugar, suministrar al FEV datos de fuentes externas. Para ello se requiere estudiar cómo integrar los datos obtenidos de las distintas fuentes que necesitamos identificar y cómo implementar las comunicaciones entre los FEV y estas fuentes externas identificadas. Además, vamos a necesitar un servidor central que gestione esta interoperabilidad y a su vez que nos permita predecir el tráfico para anticiparnos a posibles problemas.

La arquitectura que proponemos consta de los elementos que citamos a continuación. Cada uno de estos elementos plantea distintos problemas que tienen que resolverse para cubrir los objetivos marcados.

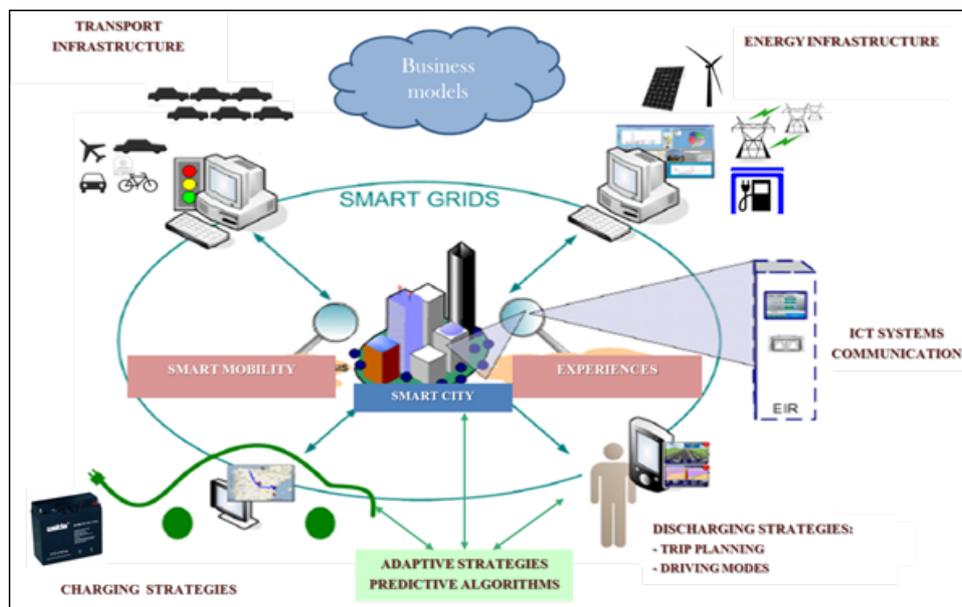


Figura 65. Arquitectura del sistema de movilidad

- (1) Los adaptadores de datos de las fuentes externas identificadas, es decir, los servicios de información meteorológica, de tráfico y de movilidad en la ciudad como son el transporte público, el estacionamiento y el alquiler (e-sharing). Además es importante tener en cuenta los distintos aspectos relacionados con la red eléctrica, las restricciones de transmisión y distribución (tarifas, períodos punta y fuera de temporada, disponibilidad, fuentes de energía), centros de control y las CS, como hemos visto en los primeros capítulos.

El problema que aquí se plantea es la heterogeneidad de los datos procedentes de estas fuentes externas de información. Los procesos de obtención y adecuación de

estos datos constituyen el middleware que denominamos STM (*'Smart Transportation Middleware'*).

- (2) Las comunicaciones entre los adaptadores de datos de las fuentes externas y el necesario servidor central, que vemos a continuación. El problema que plantea el diseño de las comunicaciones es, por un lado, la necesidad de un análisis de casos, y, por otro lado, el diseño del modelo de datos imprescindible para poderlas implementar.

Este análisis de casos, el uso de diseños UML y la definición del modelo de datos a utilizar en las comunicaciones definirán el módulo de gestión y tratamiento de datos del sistema de movilidad, que denominamos MIA (*'Master Integration Agregator'*).

- (3) El servidor central de la arquitectura, que ya hemos anticipado que denominamos PIIS (*'Proactive Intelligent Information System'*). La lógica de negocio del PIIS constituye un aspecto clave de todas las interacciones involucradas dentro del sistema de interoperabilidad.

El problema que presenta el diseño de la lógica del servidor es la necesidad de obtener una estrategia de predicción del tráfico para tomar decisiones de forma anticipada. Pretendemos poder decidir sobre cómo movernos eficientemente en la ciudad para poder llegar a nuestros destinos independientemente de los factores externos.

Para resolver el problema planteado hemos dotado al PIIS de un algoritmo predictivo, basados en estrategias adaptativas capaces de utilizar la información externa en tiempo real.

### 4.3 Solución propuesta: Sistema de interoperabilidad

Presentamos en este punto la solución a los problemas planteados por la arquitectura del sistema de movilidad propuesta:

La solución a los problemas planteados en la sección anterior viene dada por:

- La identificación de las **fuentes externas** de datos y la definición de los **adaptadores de datos** necesarios para integrarlos con el entorno de gestión del FEV. Para ello necesitamos ver cuál es la estructura de cada uno de los adaptadores de datos que formarán el STM para obtener y tratar los datos recogidos.

Se ha llevado a cabo diseñando distintas APIs (*'Application Programming Interface'*) de código abierto que recopilan los datos necesarios, así como los distintos módulos funcionales en Java, para integrar las fuentes externas con el

servidor central via WebServices y utilizando *formatos JSON/XML*. A este servidor central lo denominamos PIIS, como ya hemos comentado.

- La definición de las **comunicaciones** con los adaptadores de datos definidos en el punto anterior. Esto lo haremos mediante un análisis de casos y usando diseños **UML**.

Estas comunicaciones requieren de determinados **modelos de datos** para su implementación. Vamos a definir estos modelos de datos mediante las estructuras y los tipos de datos necesarios para los adaptadores con las interfaces externas de nuestro entorno FEV.

- Definición y diseño del módulo de predicción de tráfico que formará parte del PIIS. Para conseguir este objetivo necesitamos:
  - i. Un modelado del entorno de movilidad.
  - ii. El algoritmo central del sistema que denominamos ATMS (*Adaptative Traffic Management System*) para predecir y anticipar las congestiones de tráfico antes de que ocurran, utilizando los datos históricos de la información de tráfico que se han ido recopilando. Además, este algoritmo puede calcular una estimación del error cometido en sus propias predicciones para mejorar nuestro sistema de forma continua.

Las TIC identificadas para desarrollar las interfaces de comunicación y el modelo de datos requerido son:

- ✓ Tecnologías de comunicación física: 4G, UMTS, LTE (access network).
- ✓ Protocolo de aplicación: Http con RESTful web API.
- ✓ Payload data format: JSON.

Veamos a continuación el detalle de cada una de las soluciones propuestas.

### 4.3.1 Fuentes externas y adaptadores de datos

Debido a la heterogeneidad de los datos, procedentes de las distintas fuentes externas, se necesitan diseñar distintos **módulos de adaptadores de datos**. Éstos constituyen nuestro STM y tienen que interactuar con la capa de infraestructura de transporte para recopilar información relevante de las distintas fuentes.

Se ha llevado a cabo diseñando distintos módulos en Java para integrar las fuentes de datos con el PIIS via servicios web. Durante la investigación se han diseñado e implementado cinco adaptadores de datos, que enumeramos a continuación.

- i. Adaptador de datos meteorológicos (WDA, '*Weather Data Adapter*'),
- ii. Adaptador de datos de tráfico (TDA, '*Traffic Data Adapter*'),

- iii. Adaptador de datos de transporte público (PTDA, 'Public Transport Data Adapter'),
- iv. Adaptador de datos de estacionamiento (PDA, 'Parking Data Adapter'), y
- v. Adaptador de datos de alquileres y compartición de vehículos (eSDA, 'e-Sharing Data Adapter').

En este punto presentamos la estructura de estos módulos del STM. En la siguiente figura observamos que estos cinco adaptadores interactúan con los algoritmos de predicción de tráfico, enrutamiento y toma de decisiones del PIIS. Además se ha diseñado un back-end (operador FEVSE en la figura), un módulo de gestión y tratamiento de datos del sistema de movilidad, el que denominamos MIA (*Master Integration Aggregator*), y un front-end que permita al usuario interactuar con el sistema via dispositivo móvil (*Smartphone App*) o via web (sistemas de reserva).

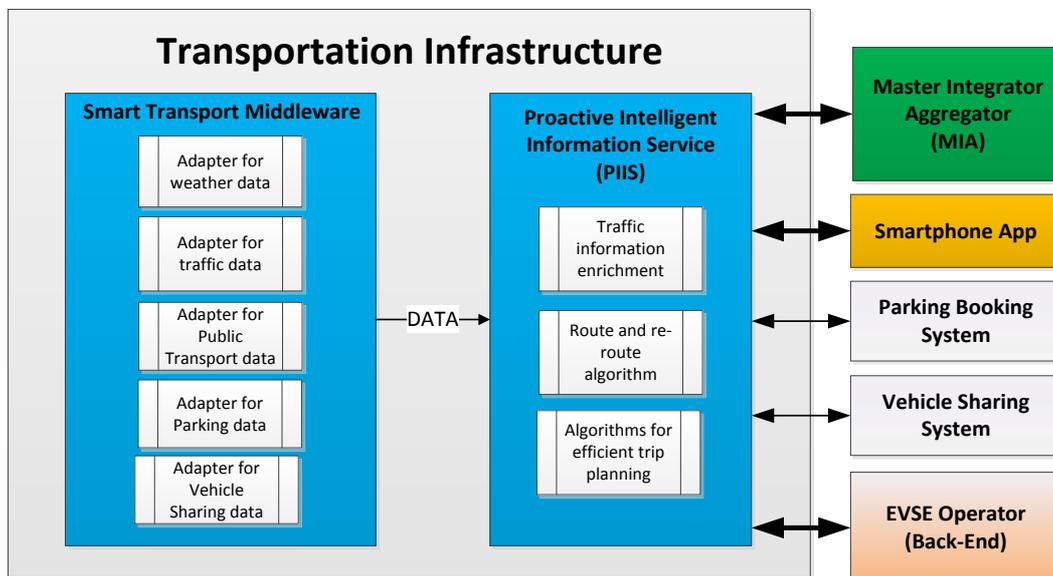


Figura 66. Diseño plataforma solución: infraestructuras de movilidad y comodidad

Los datos que recogen los distintos adaptadores se almacena en la base de datos ubicada dentro del STM. El servidor central puede acceder a estos datos recogidos por los diferentes adaptadores para proceder a una previsión de tráfico y decidir cómo movernos en la ciudad y llegar a nuestros destinos. Los módulos del STM proporcionan al sistema datos históricos relevantes para predecir y anticipar las congestiones de tráfico antes que se produzcan, además de proporcionar información estadística.

Veamos cómo estructurar los distintos módulos adaptadores de datos STM.

#### (i) WDA: adaptador de datos de meteorología

La información sobre las condiciones meteorológicas actuales y pronosticadas se obtendrá de proveedores externos de información meteorológica a partir del WDA ('Weather Data Adapter').

Para diseñar un modelo y acotar el problema seleccionamos los datos meteorológicos, que habitualmente se tienen en cuenta en cualquier posible desplazamiento. Son los referentes a la humedad, la temperatura, la velocidad del viento, la dirección del viento, la presión, la radiación solar y las condiciones de lluvia y hielo. Los datos meteorológicos de diferentes proveedores de información meteorológica se combinan para obtener la información más precisa en tiempo real. Se trata de asegurar que la información meteorológica esté siempre disponible incluso si alguno de los servidores del proveedor del tiempo falla o no responde. Toda la información solicitada se refiere siempre a una posición geográfica.

Los datos meteorológicos son recopilados a través de varias APIs de código abierto que proporcionan información del tiempo. Así el WDA se compone de varios módulos funcionales dentro del adaptador que solicitan la información necesaria a cada API, las cuales devuelven una respuesta, *en formato JSON o XML*. En primer lugar se depuran todas las respuestas, comprobando que no contengan valores nulos o valores alejados de la media. De este modo, se elimina cualquier error o discrepancia a priori, consiguiendo mejorar la precisión.

El diseño del WDA quedaría, por tanto, como mostramos en la siguiente figura:

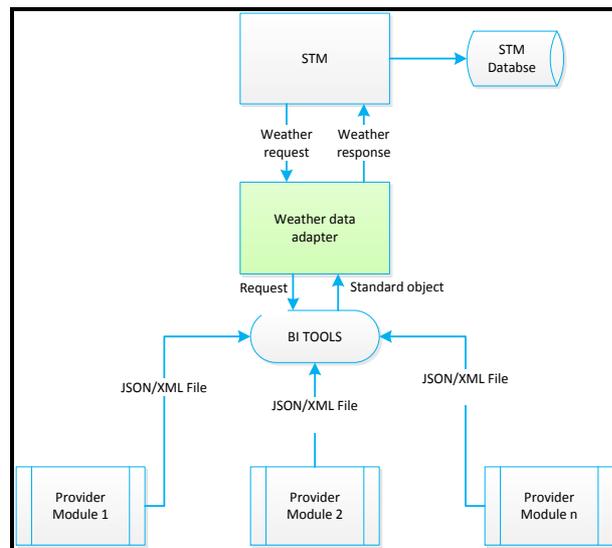


Figura 67. Diseño del WDA

Observamos que el WDA recibe los datos mediante archivos XML/JSON procedentes de los distintos proveedores. La disposición de los datos en los distintos archivos puede ser distinta, lo que nos lleva a utilizar herramientas de tratamiento de datos (business intelligence, BI) para seleccionar cuáles serán útiles, organizarlos y así poder dar una respuesta a la petición recibida por parte del sistema. Todas estas transacciones quedarán almacenadas en la base de datos.

Los procesos que incluye nuestro diseño son los siguientes:

- **Proceso GetCurrentWeather.**

Se trata de la función del WDA que permite obtener las condiciones actuales del tiempo y del viento para una posición determinada del GPS. Para ello, en primer lugar se conecta a la API de Google Maps para buscar la estación meteorológica más cercana según la posición GPS obtenida del usuario Mobincity. Con las diferentes APIs meteorológicas externas (Weather2 API, Weather Yahoo API y Wunderground API), obtenemos la información desde distintas fuentes, combinando los datos:

- Datos de posición de la estación meteorológica.
- Datos actuales de las condiciones climáticas.
- Datos actuales del estado del viento.
- Valor fecha y hora de la última actualización de los datos meteorológicos.

- **Proceso GetForecastDay.**

Permite obtener los datos de las condiciones meteorológicas previstas, a partir de las diferentes APIs externas (ForecastIO y wundergroundForecast). Utilizaremos este módulo para planificar una ruta según una fecha y hora seleccionada dentro del rango de días disponibles de pronóstico.

Del mismo modo que en el caso anterior, el adaptador devuelve un objeto de datos meteorológicos junto con información de las posibles alertas meteorológicas. Además, estos datos se pasan como entrada de datos a los algoritmos de predicción de tráfico, que veremos más adelante.

## (ii) TDA: adaptador de datos de tráfico

El adaptador de datos de tráfico (TDA, '*Traffic Data Adapter*') es el módulo diseñado para reunir la información de tráfico a partir de las diferentes fuentes disponibles: sensores, detectores de tráfico, detectores de visión o directamente de los sistemas de control de tráfico.

La información procedente de los diferentes proveedores de datos de tráfico es muy heterogénea. El TDA se encarga de reunir y analizar los datos de tráfico, procesarlos y homogeneizarlos para posteriormente usarlos en la optimización de rutas y representar visualmente el estado del tráfico a través de la interfaz de usuario.

El adaptador de datos de tráfico está compuesto por seis componentes, que mostramos en la siguiente figura.

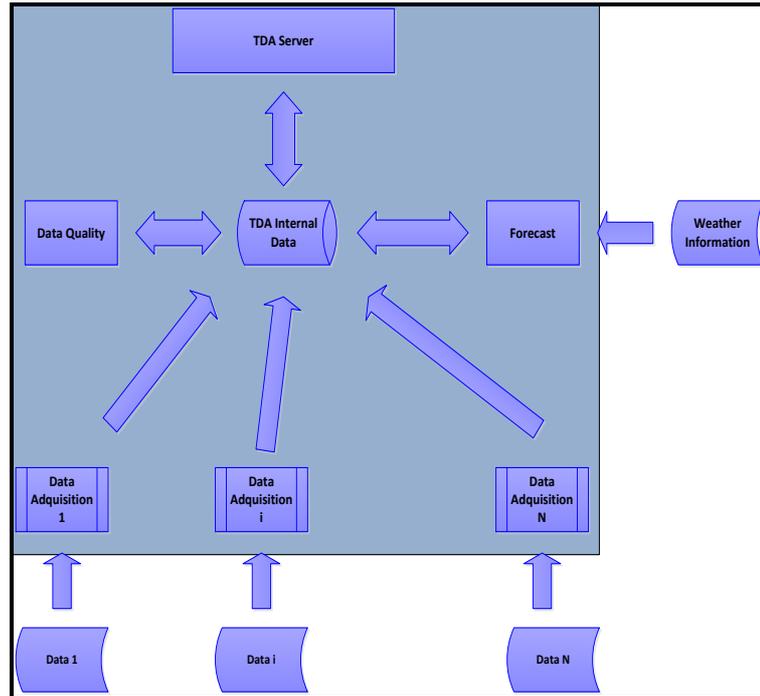


Figura 68. Estructura interna del TDA

El TDA va a disponer de un servidor que permite enviar al STM, mediante un servicio web, los últimos datos de tráfico procesados (en tiempo real), los datos históricos del tráfico y los datos de tráfico previstos. Este servicio web proporciona la información relevante (tiempo de ocupación, velocidad media, tiempo de viaje, distancia, número de paradas, retraso, costo, uso de combustible, emisiones CO2, emisiones contaminantes, nivel de servicio y carga de tráfico) para optimizar y representar tal información para todos los segmentos de las carreteras en la ciudad.

Utilizamos las fuentes de datos de tráfico, junto con la información meteorológica pronosticada, para conseguir un mejor cálculo de la situación del tráfico en un futuro próximo. Las formas de cómo predecir el tráfico será el objetivo de los algoritmos de predicción y toma de decisiones, como vemos en los siguientes puntos del capítulo.

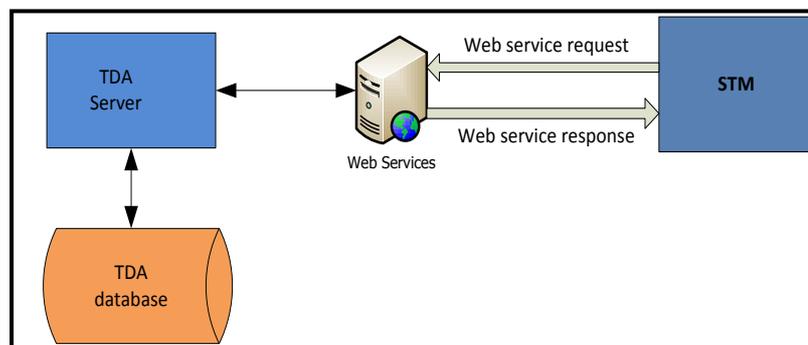


Figura 69. Interacción entre el TDA y el STM

Podemos agrupar los tipos de datos que necesita el TDA en cuatro grupos:

- (i) Histórico de datos, almacenados tal y como se reciben de cada uno de las fuentes (Data acquisition).
- (ii) Histórico de datos procesados. Se trata de un primer tratamiento de los datos históricos recibidos por el TDA (Data Quality).
- (iii) Promedio de datos, que representan el comportamiento del tráfico.
- (iv) Datos que incluyen los parámetros del modelo de pronóstico y lo datos del pronóstico de tráfico (Forecast).

Para diseñar la base de datos del STM requerimos una definición abstracta de varias estructuras de datos, como mostramos en la siguiente tabla. Estas estructuras de datos forman la base de datos interna del TDA.

Attribute	Units	Description	Measuring method
Occupancy	Percentage (%)	Percentage of the total integration time that a section of the link is occupied by vehicles. Proportional to the density under certain simplifying assumptions	Basic variable supplied by traffic sensors
Time Average Speed	Km / h	Average speed of all vehicles in a section of the link	Estimated from one loop for a given average vehicle length
Space Average Speed	Km / h	Average speed of all vehicles that travel the entire link.	Determined by measuring or estimating the travel time
Intensity	Vehicles/h	Number of vehicles per unit of time through a section of the link	Basic variable supplied by traffic sensors
Classification	Vehicles/h	Intensity for each vehicle type.	Complexity of calculation depends on class types. The simplest classification is based on the vehicle length. Complex classifications are based on weight, number of axes, etc.

Travel time	Seconds	The time taken by a vehicle to go through the entire link	Requires monitoring the vehicle on the link or at least its identification at the beginning and end of the link. Can be estimated from other variables (intensity and occupancy) using a statistical model
Gap	Seconds	Time in seconds between two consecutive vehicles	Basic variable supplied by traffic sensors
Distance	Meters	Length of the link	Known for each link
Number of stops	Number	Average number that a vehicle stops traveling the link	Requires monitoring the vehicle on the link. Can be estimated using a traffic model of the link based on basic variables like Intensity and Occupancy
Delay	Seconds	Time difference between the real travel time and the travel time in free flow in a link.	Determined from the travel time and a basic traffic model
Cost	Euros	Cost of money that a vehicle incurs in travel the link	Estimated using models that include traffic behavior, vehicle composition, social cost, etc.
Fuel usage	Liters/km	Fuel used traveling the link	Estimated using models that include traffic behavior and vehicle composition.
CO2 emissions	Gr/Km	Emissions per vehicle traveling through the link	Estimated using models that include traffic behavior and vehicle composition
Pollutant emissions	Gr/Km	Emissions per vehicle traveling the link	Estimated using models that include traffic behavior and vehicle composition

LOS	0: Unknown, 1: Free, 2: Dense, 3: Congestion	Indicates the qualitative traffic status	Estimated from the speed, occupancy and intensity, etc
Traffic Load	Number of vehicles/se cond	Represents the quantitative traffic status	Calculated from intensity and occupancy

Tabla 18. Atributos de objetos de tráfico

El resto de componentes del TDA son los siguientes módulos:

- **Módulo de calidad de datos:** Este modulo permite regularizar los datos, es decir, identificar los datos ausentes y/o de baja calidad para sustituirlos por un conjunto de datos que representan el comportamiento habitual de las variables en un periodo de tiempo dado.
- **Módulo de adquisición de datos:** Los componentes de adquisición de datos obtienen los datos de tráfico a medida que son generados por las fuentes con que interactuamos y los sistemas de control de tráfico, utilizando un protocolo común para integrar los diferentes sistemas. Antes de almacenar los datos, se analizan mediante el proceso de calidad de datos con el fin de adaptarlos para poder integrarlos.
- **Módulo de previsión:** La función del módulo es el control predictivo del tráfico. Para predecir la información del tráfico, es necesario definir un modelo que caracterice su comportamiento. Éste será el objetivo de los siguientes puntos del capítulo.

En la siguiente figura se muestra, a modo de ejemplo, para un día completo, los datos originales de la intensidad del tráfico (representados en rosa), los datos estacionales (en azul) y los datos estocásticos resultantes (en rojo).

El análisis de estos datos estocásticos permite la definición del modelo. En el caso del ejemplo que mostramos, se trata de un modelo autorregresivo AR(p) con orden de modelo  $p \geq 5$ . Veremos qué significa esto en los próximos puntos del capítulo.

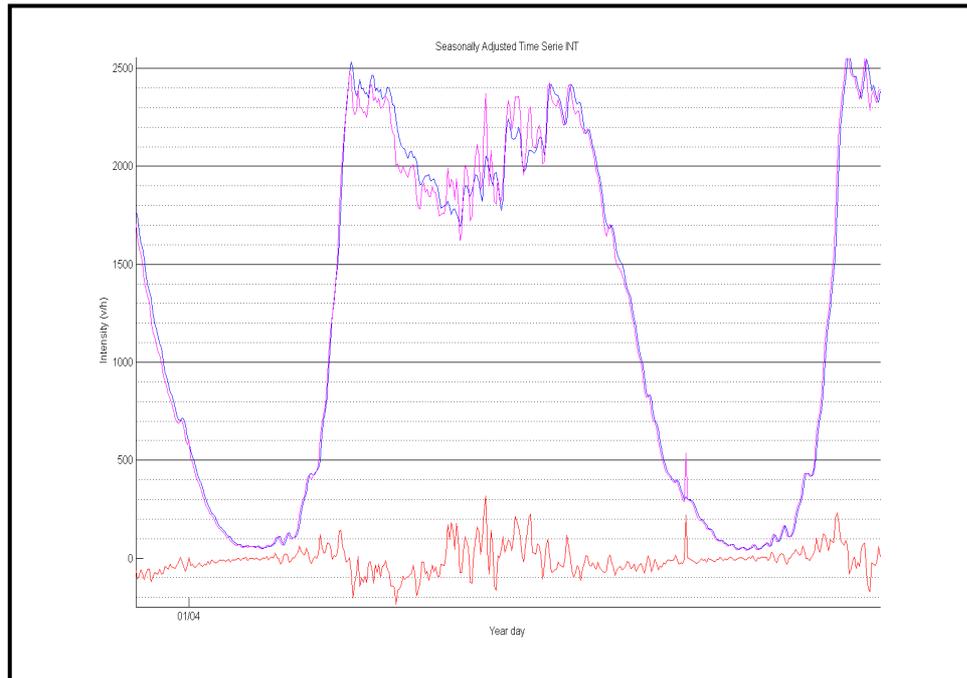


Figura 70. Datos de comportamiento del tráfico para un día (series temporales).

### (iii) PTDA: adaptador de datos de transporte público

El adaptador de datos de transporte público (PTDA, '*Public Transport Data Adapter*') obtiene datos sobre medios de transporte público (datos relacionados con el transporte urbano en las ciudades -autobús, metro, tranvía y tren- y datos relacionados con los sistemas de uso compartido de vehículos y de bicicletas) para poder ser utilizado como entrada en el sistema.

El objetivo del adaptador es integrar estos datos junto con el resto de datos recogido por los otros adaptadores, incluyendo la comodalidad como alternativa para la planificación del viaje.

El PTDA utiliza como punto de partida los datos de la plataforma Google GTFS utilizando la API de código abierto de Google Directions. A partir de una opción de transporte público seleccionada esta API devuelve la información sobre los diferentes medios de transporte público disponibles para una ruta determinada, mostrando diferentes combinaciones.

Para lograr el objetivo del adaptador se han diseñado varios procedimientos utilizando servicios web para obtener diferentes rutas comodales teniendo en cuenta las restricciones definidas por el usuario. Estas restricciones se encuentran almacenadas en la base de datos general a medida que son emitidas por el usuario y se pueden modificar en cualquier momento desde la plataforma móvil. Por lo tanto el usuario puede determinar sus restricciones deseadas para cada planificación de ruta. A continuación se describen las funcionalidades diseñadas.

- **Proceso GetPublicTransportationRoute.**

Se trata del proceso más relevante de este adaptador. Se ha diseñado para interactuar con el proveedor de datos externo obteniendo diferentes alternativas de viaje utilizando varios modos de transporte público.

El tiempo de viaje puede estar limitado a cualquier momento partiendo de un lugar de inicio y final, hora de salida y otras preferencias del usuario como la distancia máxima a pie, transportes prohibidos, número máximo de transferencias y precio máximo del viaje.

Una vez interpretados y filtrados los datos obtenidos, el adaptador devolverá una matriz de rutas que contiene las diferentes rutas disponibles, representadas en un objeto compuesto por diferentes pasos. Para cada paso se describen varias variables como se describe en la siguiente tabla:

Variable	Description	Mobincity
Instructions	Internal step containing a detailed description	Route description for Mobincity user
Distance	Contains the distance covered by this step until the next step	Routing algorithms inputs / Mobincity user information
Duration	Contains the typical time required to perform the step, until the next step	Routing algorithms inputs / Mobincity user information
Start location	Contains the location of the starting point of this step, as a single set of lat and lng fields.	Routing algorithms inputs
End location	Contains the location of the last point of this step, as a single set of lat and lng fields.	Routing algorithms inputs
Overview polyline	Contains an array indicating the order of any waypoints in the calculated route.	Routing algorithms inputs / Mobincity user information
Public media details	Contains public media specific information:  Num stops, lines, stops name, etc  Vehicle characteristics  Agencies contact information  Expected number of seconds between similar departures	Mobincity user information

**Tabla 19. Variables de la matriz de rutas**



En este sentido, el PDA proporcionará al usuario los estacionamientos más cercanos y las plazas libres disponibles (con o sin capacidad de carga) en cada uno de ellos, permitiéndole reservar un plaza de estacionamiento a través del sistema.

El PDA está compuesto principalmente por cuatro elementos como se muestra en la siguiente imagen, descritos a continuación:

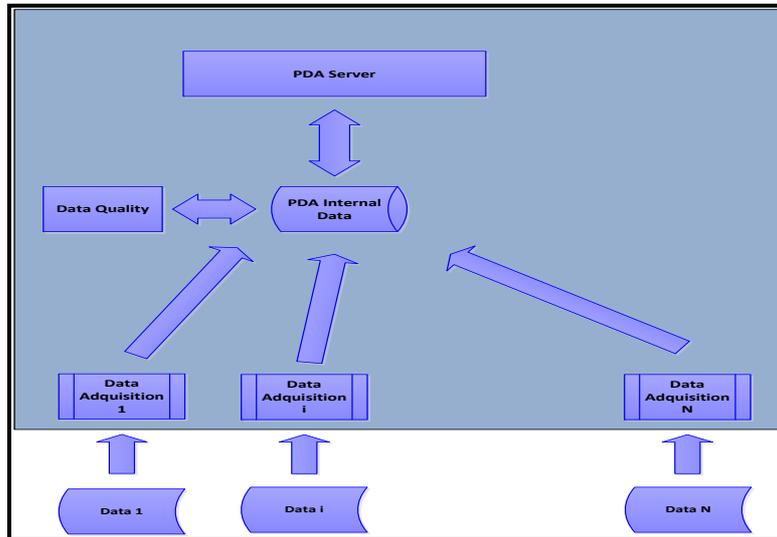


Figura 72. Estructura PDA

- **Componentes de adquisición de datos:** Los componentes de adquisición de datos obtienen los datos de estacionamiento a medida que son generados por los sistemas de control de estacionamiento o los proveedores de información de estacionamiento, utilizando un protocolo común para la integración de los diferentes sistemas. Antes del almacenar los datos, se analizaran a través del proceso de calidad de datos con el fin de adaptarlos y poder integrarlos en la base de datos.
- **Módulo de calidad de datos:** El proceso consiste en la identificación de datos ausentes y/o de baja calidad, los cuales serán sustituidos por un conjunto de datos que representan el comportamiento habitual de las variables en este periodo de tiempo.
- **Base de datos interna:** Por un lado, se almacena los datos estructurales (estacionamiento y definición del área de estacionamiento) y, por otro lado, los datos dinámicos (disponibilidad y costos).

Attribute	Type of data	Units	Description
Identifier	Integer	Integer	Integer with the unique identifier of the parking
Description	String		String with the description of the parking

.GPS Location	Coordinate System	Latitude ,Longitude	Coordinates of the parking in latitude-longitude coordinate system
Price	Double	Euros (€)	Price in euros per hour for parking slots without charging facilities
Pricecharge	Double	Euros (€)	Price in euros per hour for parking slots with charging facilities
FreeSlots	Integer	Slots	Number of free slots without charging facilities
FreeSlotscharge	Integer	Slots	Number of free slots with charging facilities
TotalSlots	Integer	Slots	Number of total slots in the parking without charging facilities
TotalSlotscahrge	Integer	Slots	Number of total slots in the parking with charging facilities

Tabla 20. Estructura del objeto del adaptador de datos de estacionamiento

Además, incluye una estructura para almacenar los datos de las reservas de estacionamientos.

Attribute Type of Units data			Description
Identifier	Integer	Integer	Integer with the unique identifier of the parking
Status	Boolean	0: Ok. 1: Error on booking	Booking with the result of the booking
SlotBooked	String		booked slot's description
SlotType	Integer	[0,1]	:0: Without recharging capabilities 1: With recharging capabilities

Tabla 21. Estructura de las reservas del adaptador de estacionamiento.

- **Servidor PDA:** El servidor permite enviar al STM, mediante un servicio web, la información relevante de todos los estacionamientos registrados en la base de datos de una ciudad. Para cada posición GPS recibida, el STM verificará en su base de

datos interna si contiene información de estacionamientos cercanos que no se hayan incluido en un periodo superior a cinco minutos desde la integración de los datos. Si está disponible, el servicio web devolverá toda la información relevante, de lo contrario, el STM realizará una nueva consulta a los sistemas externos de estacionamiento con el fin de obtener la información actualizada e integrarla en la base de datos.

#### **(v) eSDA: adaptador de datos e-sharing**

Hemos diseñado el sistema de e-sharing (eSDA, '*e-Sharing Data Adapter*') principalmente para tiempos cortos y viajes de corta distancia como una extensión de la red de transporte, proporcionando un servicio público para mejorar las opciones de movilidad. Este adaptador interactúa con diferentes plataformas de e-sharing para informar al usuario sobre las plataformas disponibles cuando esté planificando una ruta futura. Este adaptador se diseña basándose en las principales plataformas e-sharing de movilidad hoy en día: Car-Sharing y Bike-Sharing.

Car-Sharing y Bike-Sharing constituyen dos servicios en los que los clientes pueden compartir o alquilar vehículos y bicicletas respectivamente por un período de tiempo (por hora o día) entre el intercambio de estaciones. Para cubrir estas funciones dentro del adaptador de datos e-sharing, se ha utilizado, en primer lugar, la API de Car2Go, que ofrece servicios de compartición de vehículos en ciudades europeas y norteamericanas, y, en segundo lugar, el proveedor JCdecaux para la integración del alquiler de bicicletas en el sistema.

Los procesos que interactúan con las plataformas de e-sharing permiten, por un lado, obtener información sobre la disponibilidad de los diferentes vehículos de intercambio compartido (automóviles y bicicletas) y, por otro lado, en algunos casos, la disponibilidad de reservar un vehículo para uso futuro.

Se trata de los procesos **Get e-SharingFEV** y **Get e-SharingBike**. Se han diseñado estos procesos para interactuar con los proveedores de datos externos obteniendo información relacionada con el FEV compartido y con el uso compartido de bicicletas según una posición GPS, como el país, el nombre y número de estación, dirección, capacidad total y número de bicicletas disponibles.

Estos procesos devuelven tres estructuras de datos diferentes que ayudan al usuario a seleccionar y reservar el FEV y/o bicicleta más adecuados:

- Lugares de estacionamiento disponibles alrededor de la posición GPS recibida (coordenadas, nombre, capacidad total, plazas utilizadas y disponibilidad de carga en caso de FEV).

- Características del FEV disponible alrededor de la posición GPS recibida (dirección, coordenadas, estado del exterior e interior, porcentaje de batería, nombre y número de identificador).
- Ranura disponible de estacionamiento y los datos de la cuenta de usuario con el fin de realizar la reserva.

El adaptador e-sharing se pone en funcionamiento cuando el STM recibe una solicitud de un usuario registrado con un contrato de uso de las plataformas e-sharing integradas en el sistema. Seguidamente, el adaptador solicita al proveedor externo disponibilidad de la flota de vehículos devolviendo como resultado la información de los lugares de estacionamiento disponibles, las características del vehículo y la plaza disponible con el fin de reservar el vehículo seleccionado.

Además, se ha diseñado un procedimiento de autenticación específico con el fin de gestionar los accesos seguros a las funciones protegidas de las plataformas e-sharing integradas en el adaptador. Este control de seguridad se realiza utilizando el sistema OAuth, basado en el protocolo RFC 5849, que permite la autorización segura mediante un método sencillo y estándar a partir de aplicaciones web. El sistema de movilidad primero tiene que obtener permiso del propietario de las plataformas e-sharing integradas, a través del intercambio de un token criptográfico con el objetivo de hacer innecesario que el sistema externo comparta sus credenciales con el adaptador de datos e-sharing.

### **4.3.2 Comunicaciones con las fuentes externas y modelo de datos**

Una vez identificadas las fuentes externas, es imprescindible analizar cómo serán las comunicaciones con ellas y qué modelo de datos necesitaremos, tal y como habíamos anunciado en nuestros objetivos a inicio de capítulo.

Además, teniendo en cuenta las distintas posibilidades de movilidad en la ciudad, es necesario tener en cuenta la comodidad y proporcionar los datos necesarios a los usuarios para implementar un plan de viaje integral comodal. Los beneficios potenciales son la reducción de la congestión de tráfico y la limitación de las emisiones medioambientales.

Veamos a continuación cómo hemos diseñado las comunicaciones y cuáles han sido los modelos de datos necesarios para implementarlas.

#### **1. Comunicaciones con las fuentes externas**

Para lograr la integración de alternativas comodales, los adaptadores de datos externos, ya estudiados en la sección anterior, deben interactuar con las correspondientes

interfaces externas para obtener la información necesaria. En este punto presentamos el diseño UML de las comunicaciones de estos adaptadores de datos con las interfaces externas:

- i. Comunicación con la infraestructura de datos meteorológicos.
- ii. Comunicación con la infraestructura de datos de tráfico.
- iii. Comunicación con la infraestructura de transporte público.
- iv. Comunicación con la infraestructura de estacionamientos públicos/privados y reservas.
- v. Comunicación con las plataformas externas e-sharing y reservas.
- vi. Comunicación con la infraestructura FEVSE.

Veamos los diseños UML que han sido necesarios para su implementación final:

### **i. Comunicación con la infraestructura meteorológica**

Hemos desarrollado una interfaz responsable de la comunicación con la infraestructura meteorológica, a la que denominamos interfaz AI.1.

Como hemos visto en el punto anterior, se han diseñado e implementado dos procesos (*GetCurrentWeather* y *GetForecastDay*) para interactuar con las interfaces de datos meteorológicos externas.

El intercambio de información entre la interfaz externa y el adaptador de datos meteorológicos a través de la interfaz AI.1, se realiza según el siguiente diseño UML:

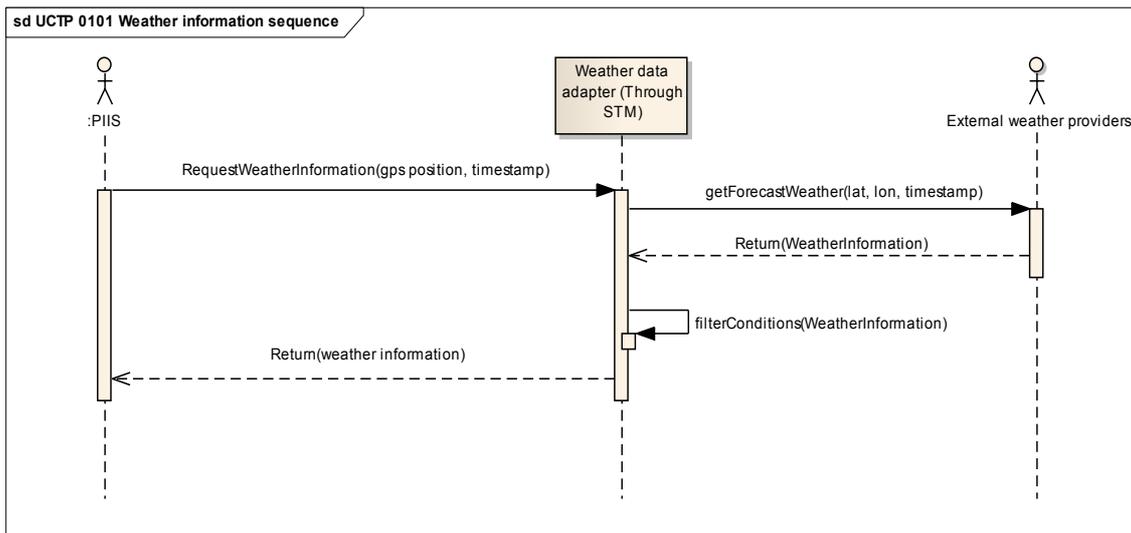


Figura 73. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.1

En el diagrama vemos que el usuario, a través del servidor central, lanza una petición de información meteorológica usando para ello el servicio web correspondiente, adjuntando los datos necesarios, como su posición. Esta petición es recibida por el WDA que inmediatamente se pone en contacto con los proveedores externos. En cuanto recibe respuesta, contrasta éstas con la ubicación del usuarios y en cuanto son tratados los datos, emite la respuesta al servidor central. Para realizar este proceso se necesitan ciertos modelos de datos que definimos en la siguiente sección (4.3.3) del capítulo.

## ii. Comunicación con la infraestructura de tráfico

La comunicación con la infraestructura de tráfico se consigue a través de la que denominamos interfaz AI.2.

El intercambio de información entre la interfaz externa y el adaptador TDA a través de la interfaz AI.2, se realiza según el diagrama UML mostrado en la siguiente figura. En él el proceso central es el que hemos denominado *GetTrafficData*.

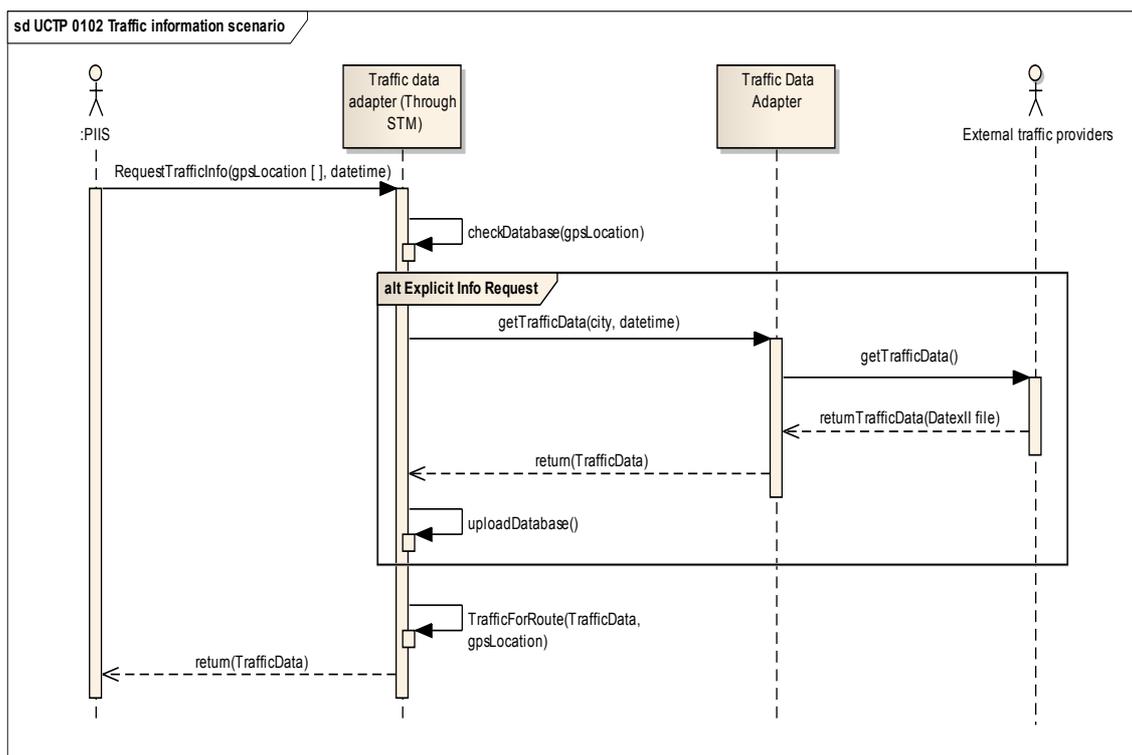


Figura 74. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.2

En el diagrama vemos que el proceso se inicia con la petición de datos de tráfico por parte del PIIS mediante el procedimiento *RequestTrafficInfo*, que llega al TDA. En este momento el TDA lanza el procedimiento *GetTrafficData* que permite interactuar con las interfaces de los proveedores externos de datos de tráfico y conseguir los datos

pedidos, devolviéndolos al servidor como salida del procedimiento lanzado *RequestTrafficInfo*.

### **iii. Comunicación con la infraestructura de transporte público**

Se pretende mejorar la accesibilidad de las zonas que utilizan modos de transporte público, combinando varias alternativas en combinación con los FEV.

Hemos desarrollado una interfaz responsable de la comunicación con la infraestructura de transporte público, que denominamos interfaz AI.3. Esta interfaz recopila datos relacionados con el transporte urbano en las ciudades (autobús, metro, tranvía y tren) para proporcionar rutas cómodas teniendo en cuenta las diferentes preferencias y restricciones del usuario: (i) distancia máxima a pie, (ii) número máximo de transferencias necesarias entre diferentes medios de transporte, (iii) medios de transporte público prohibidos por el usuario, y (iv) precio máximo que el usuario está dispuesto a pagar por el viaje seleccionado.

Como hemos visto, se han diseñado e implementado dos procesos (*GetPublicTransportationRoutes* y *AvailablePublicTransport*) que permiten interactuar con las interfaces externas de transporte público. Para ello, se utiliza la API de Google Directions perteneciente a la plataforma de Google GTFS que devuelve información sobre los diferentes medios de transporte público disponibles para una ruta determinada. Una vez obtenida esta información, es filtrada por el adaptador de transporte según las preferencias del usuario, que se convertirá en una entrada de datos para los algoritmos de enrutamiento. Dicha información, se divide en dos conjuntos diferentes de datos:

- **Información estática:** Información general de las agencias de transporte público disponibles dentro de una zona determinada (nombre de la empresa, dirección URL del sitio web, dirección, número de teléfono y tipo de agencia). Esta información se obtiene a través de la función de servicio web *GetPublicTransportationRoutes* cuyo detalle y estructura de datos utilizada se describen en el siguiente punto del capítulo.
- **Información dinámica:** Información de planificación de rutas de transporte público proporcionada por los proveedores externos para cada solicitud de ruta diferente (distancia recorrida, duración, ubicación de inicio y fin, número de paradas, líneas, características del vehículo, etc). Se ofrecerán varias alternativas en diferentes etapas utilizando diferentes modos de transporte para permitir al usuario seleccionar las alternativas de ruta más adecuadas. Dicha información de obtiene a través de la función de servicio web *AvailablePublicTransport* cuyo detalle y estructura de datos utilizada se describen en el siguiente punto del capítulo.

El intercambio de información entre la interfaz externa y el adaptador PTDA a través de la interfaz AI.3, se realiza según el siguiente UML.

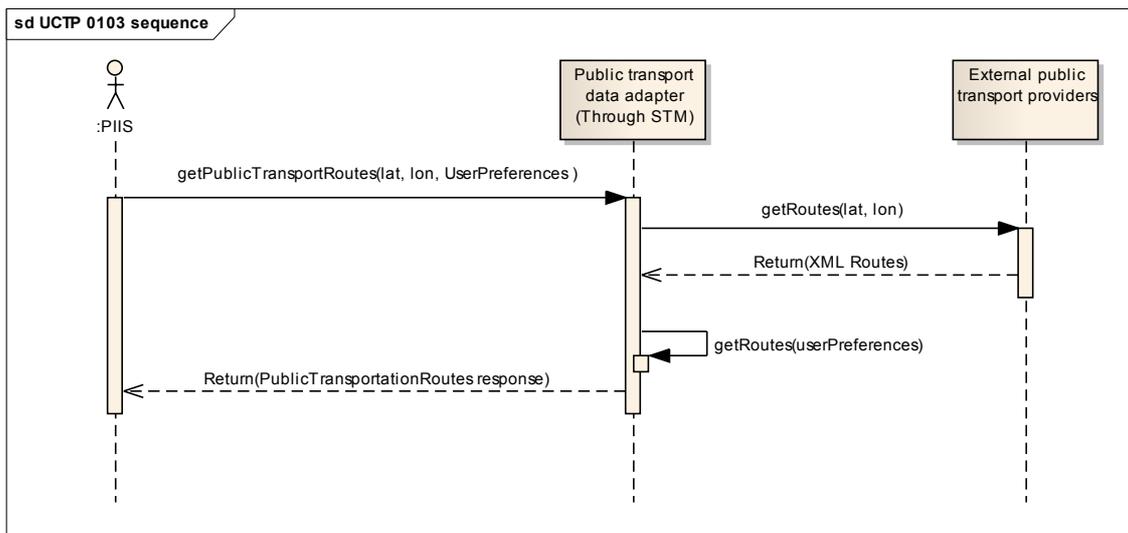


Figura 75. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.3

#### iv. Comunicación con la infraestructura de estacionamiento

El sistema de movilidad debe proporcionar información personalizada a los usuarios sobre dónde aparcar su FEV. Esto permite evitar el tráfico generado por los vehículos en busca de aparcamiento.

Hemos diseñado una interfaz responsable de la comunicación con la infraestructura de estacionamiento. La denominamos interfaz AI.4. Esta interfaz permite al adaptador PDA recopilar datos de diferentes fuentes externas sobre los estacionamientos más próximos en la zona seleccionada y las plazas libres disponibles (con o sin capacidad de recarga en cada uno de ellas). Estos datos se tienen en cuenta en el plan de ruta del usuario y son necesarios para el módulo de reservas de estacionamiento.

Podemos clasificar los datos obtenidos sobre el estado del aparcamiento más cercano en dos conjuntos distintos:

- **Información estática:** Información general de los diferentes estacionamientos disponibles dentro de una zona determinada (descripción del estacionamiento, identificador y localización).
- **Información dinámica:** Información sobre la situación actual de los estacionamientos más cercanos para una ruta concreta. Dicha información contiene dos grupos de datos relacionados para definir el tipo de estacionamiento sin recarga y el tipo de estacionamiento con recarga.

Ambos tipos de datos se obtendrán a través de la función de servicio web *GetNearestParkings* utilizada en el intercambio de información entre la interfaz externa

y el PDA a través de la interfaz AI.4. En el siguiente UML presentamos el diseño llevado a cabo.

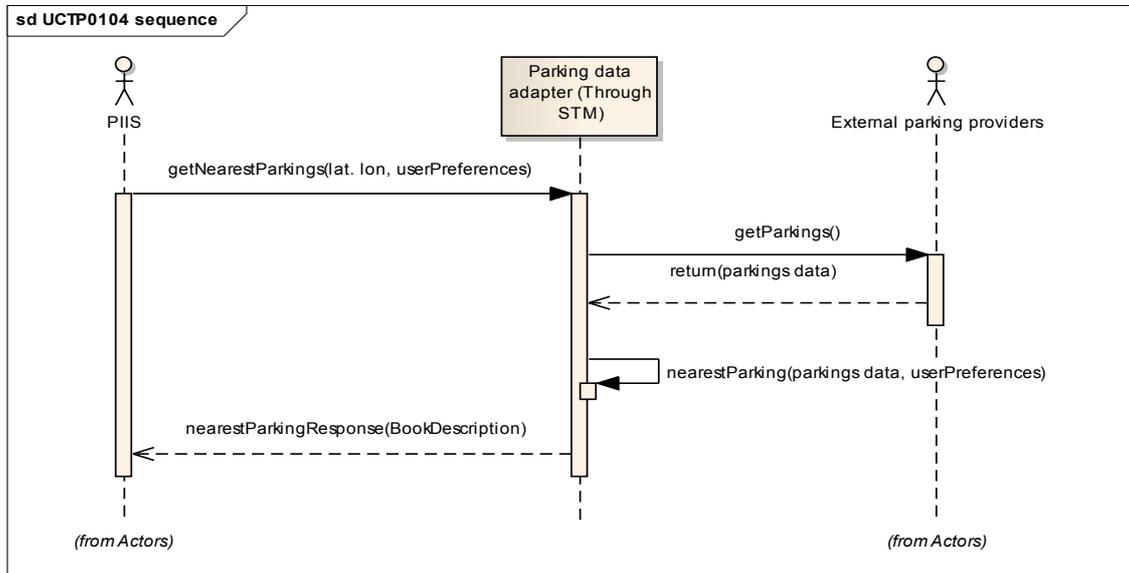


Figura 76. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.4

En el diseño UML vemos que el usuario, a través del servidor central, lanza una petición de localización de estacionamiento. Esta petición es recibida por el PDA que inmediatamente se pone en contacto con los proveedores externos. En cuanto recibe respuesta, contrasta éstas con las preferencias del usuarios y en cuanto son tratados todos los datos, emite la respuesta al servidor central, utilizando para ello el modelo de datos que detallamos en la sección 4.3.3 del presente capítulo.

Dentro del adaptador PDA se ha implementado una función de reserva que tiene como objetivo permitir a cualquier usuario reservar una plaza de estacionamiento con o sin capacidad de carga dependiendo de las preferencias del usuario si lo solicita.

Basándonos en la interfaz AI.4 se ha diseñado una nueva interfaz, que denominamos AI.7, para el servicio web *BookParkingSlot* (dejamos el detalle técnico a disposición del lector en [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/)) encargada de intercambiar información entre la interfaz externa y el PDA para confirmar la reserva según disponibilidad de las plazas en una zona determinada. En el siguiente diseño UML se puede ver los pasos a seguir en la comunicación.

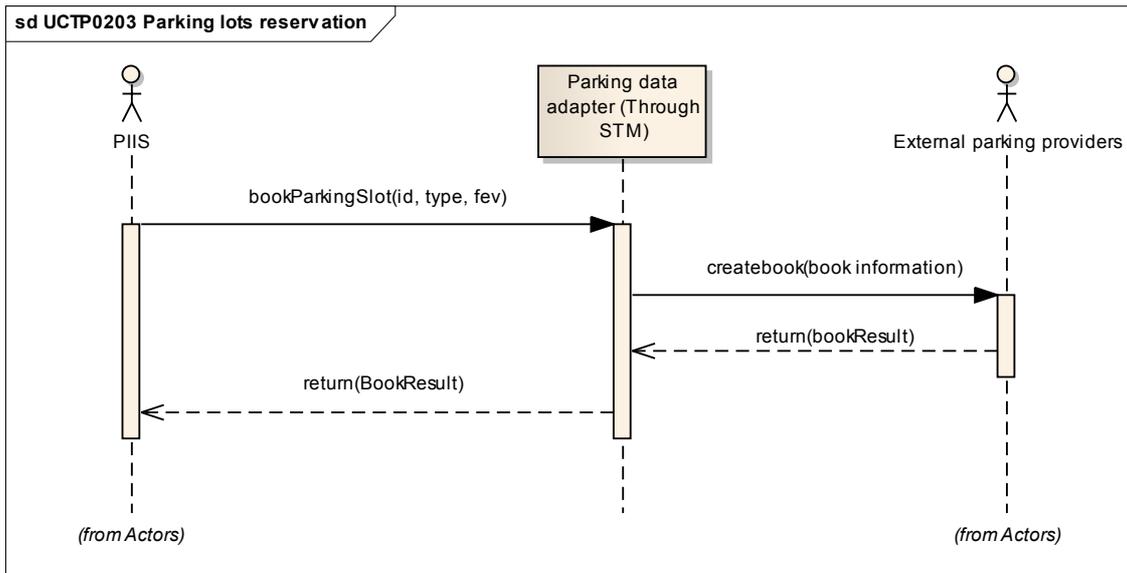


Figura 77. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.7

Cabe mencionar que esta función va ligada al escenario de opciones de comodidad, donde un usuario puede reservar una plaza de aparcamiento de carga, dejando su coche cargando y seleccionando las mejores alternativas de transporte público para viajar por la ciudad.

#### v. Comunicación con la infraestructura e-sharing

Como responsable de la comunicación con la infraestructura e-sharing hemos desarrollado la que hemos denominado interfaz AI.5. Esta interfaz permite obtener los datos sobre las tecnologías e-sharing disponibles de diferentes proveedores externos, principalmente Car-Sharing y Bike-Sharing descritas anteriormente, con el fin de obtener diferentes rutas de comodidad para compartir transporte (bicicletas o vehículos) en una zona específica.

Se han diseñado e implementado dos procesos (*GetEsharingEV* y *GetEsharingBike*) que permiten comunicarse con las interfaces de e-sharing externas proporcionando a los algoritmos de enrutamiento de Mobincity la capacidad de obtener rutas de comodidad teniendo en cuenta las diferentes restricciones y preferencias del usuario.

En la siguiente figura presentamos el diagrama UML utilizado obtener los datos de estos proveedores externos de e-sharing.

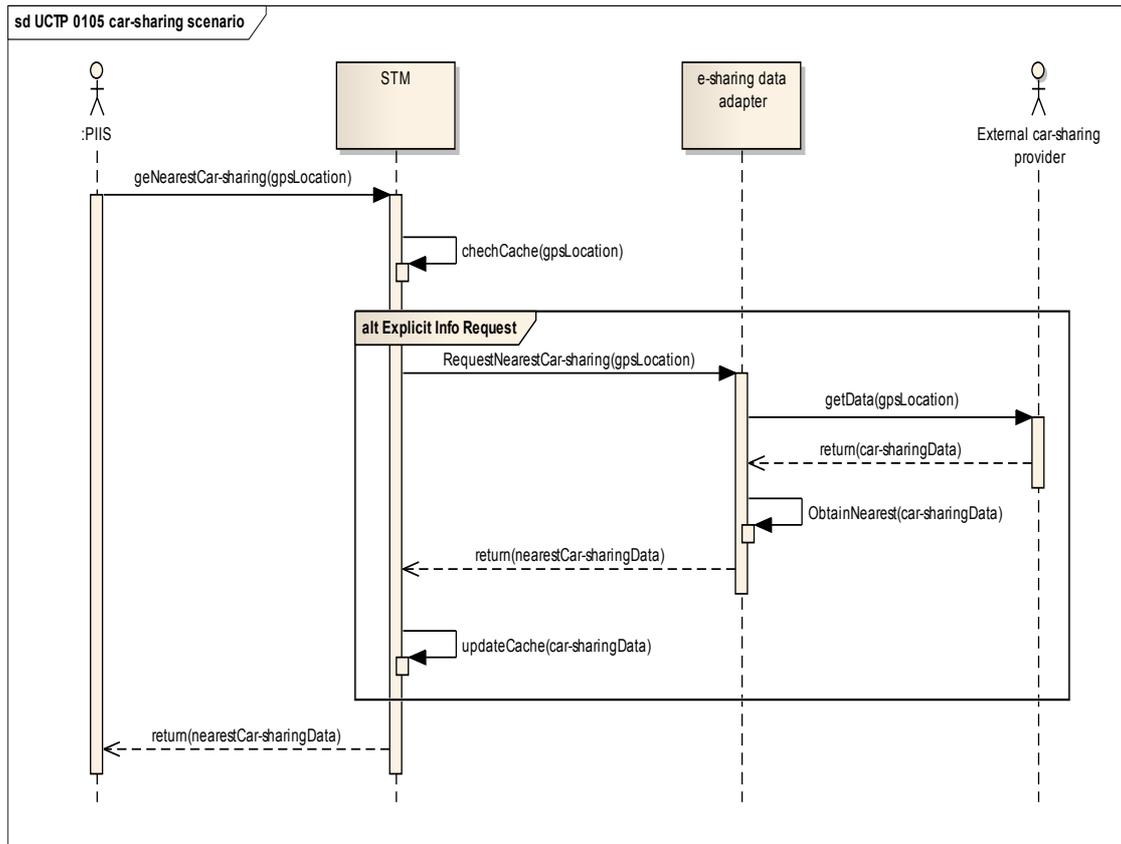


Figura 78. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.5

Dentro del adaptador eSDA se ha diseñado una funcionalidad que permite al usuario realizar una reserva en las plataformas e-sharing externas. Se trata de los procesos *createBook* y *deleteBook*, que permiten intercambiar datos entre la interfaz externa de e-sharing y el adaptador a través de la que denominamos interfaz AI.8 para realizar una reserva o cancelarla respectivamente.

En la siguiente figura presentamos el diagrama UML del flujo de comunicación en el proceso de reserva.

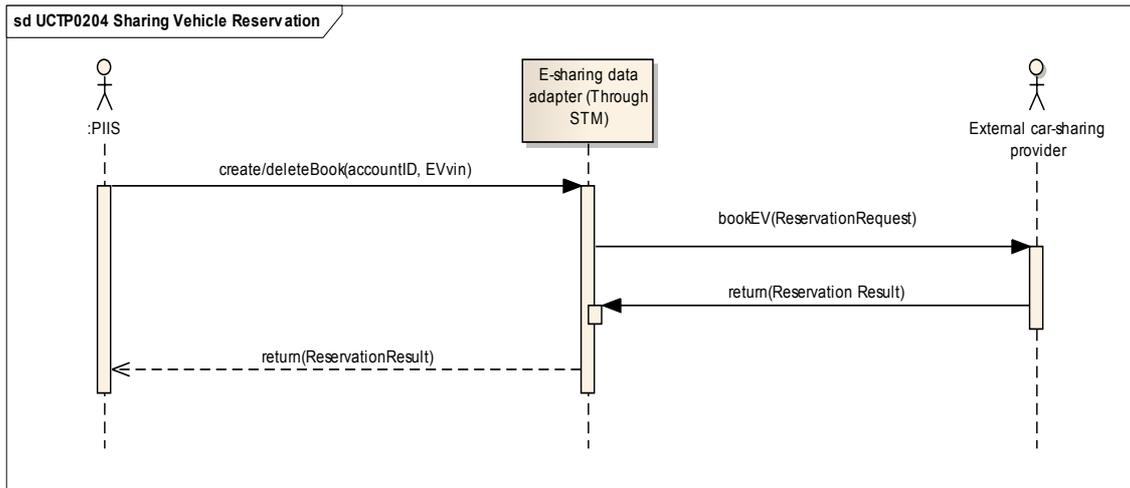


Figura 79. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz AI.8

Además, para utilizar este proceso es necesario conocer el identificador del vehículo y el identificador único de la cuenta, devuelto por los procesos de solicitud de disponibilidad de vehículos e-sharing *GetEsharingEV* o *GetEsharingBike*.

#### **vi. Comunicación con la infraestructura FEVSE**

La misma interfaz AI.5 también va a ser responsable de la comunicación con la infraestructura FEVSE ('Full *Electric Vehicle Supply Equipment*'), permitiendo al sistema recopilar información del operador FEVSE (Back-End) y los actores de la red (*minorista / FEVSO - Electric Vehicle Supply Equipment Operators-, operadores DER - Distributed Energy Resources- o DSO - Distribution System Operators-*) sobre los cambios en la infraestructura de carga que puedan afectar a la planificación del viaje provocando un proceso de reencaminamiento. Si en la planificación del viaje se da como resultado la reserva de un cierto punto con servicio de carga, el servidor central debe comunicarse con la infraestructura de carga a través de esta interfaz con el fin de tener los datos actualizados en tiempo real.

En el proceso de intercambio de información, cabe destacar que los datos se dividen en dos conjuntos distintos:

- **Datos estáticos:** Información general y propiedades del FEVSE utilizados por el servidor central para presentarla en la interfaz gráfica de los usuarios FEV. Estos datos no dependen de ningún usuario FEV o sesión de carga, por lo que contiene los siguientes datos:
  - Información general: ID del operador FEVSE y datos de contacto
  - Características del FEVSE como pueden ser la ubicación geográfica, el ID del punto de carga, el tipo de enchufe, la corriente máxima del enchufe, las opciones de identificación y pago, y los horarios.

El operador FEVSE se comunicará con el servidor central en el momento que se

produzca cualquier cambio de parámetros FEVSE, tales como nuevo FEVSE, cambio tipo de enchufe o potencia máxima o cambio de pago, entre otras.

- **Datos dinámicos:** Disponibilidad futura y estado actual de los puntos de carga. Dichos datos están relacionados con:
  - Disponibilidad de carga: el operador FEVSE informa al servidor central sobre los fallos y duración de los trabajos de mantenimiento planificados y acerca de la duración de los tiempos de carga reservados. Por lo tanto, estos datos representan la indisponibilidad del FEVSE o punto de carga a futuro.
  - Estado actual de los puntos de carga: el operador FEVSE informa periódicamente sobre el estado actual, en particular libre u ocupado y, en este último caso, proporciona información sobre los parámetros de la sesión de carga.
  - Cobro de reservas: la información sobre el identificador del usuario FEV con los datos de inicio y fin de la reserva se transmiten al operador FEVSE para realizar el cobro de la reserva.

Para gestionar de manera óptima ambos tipos de datos, estáticos y dinámicos, se ha diseñado una base de datos relacional. En la siguiente figura mostramos las distintas tablas implementadas, que enumeramos a continuación.

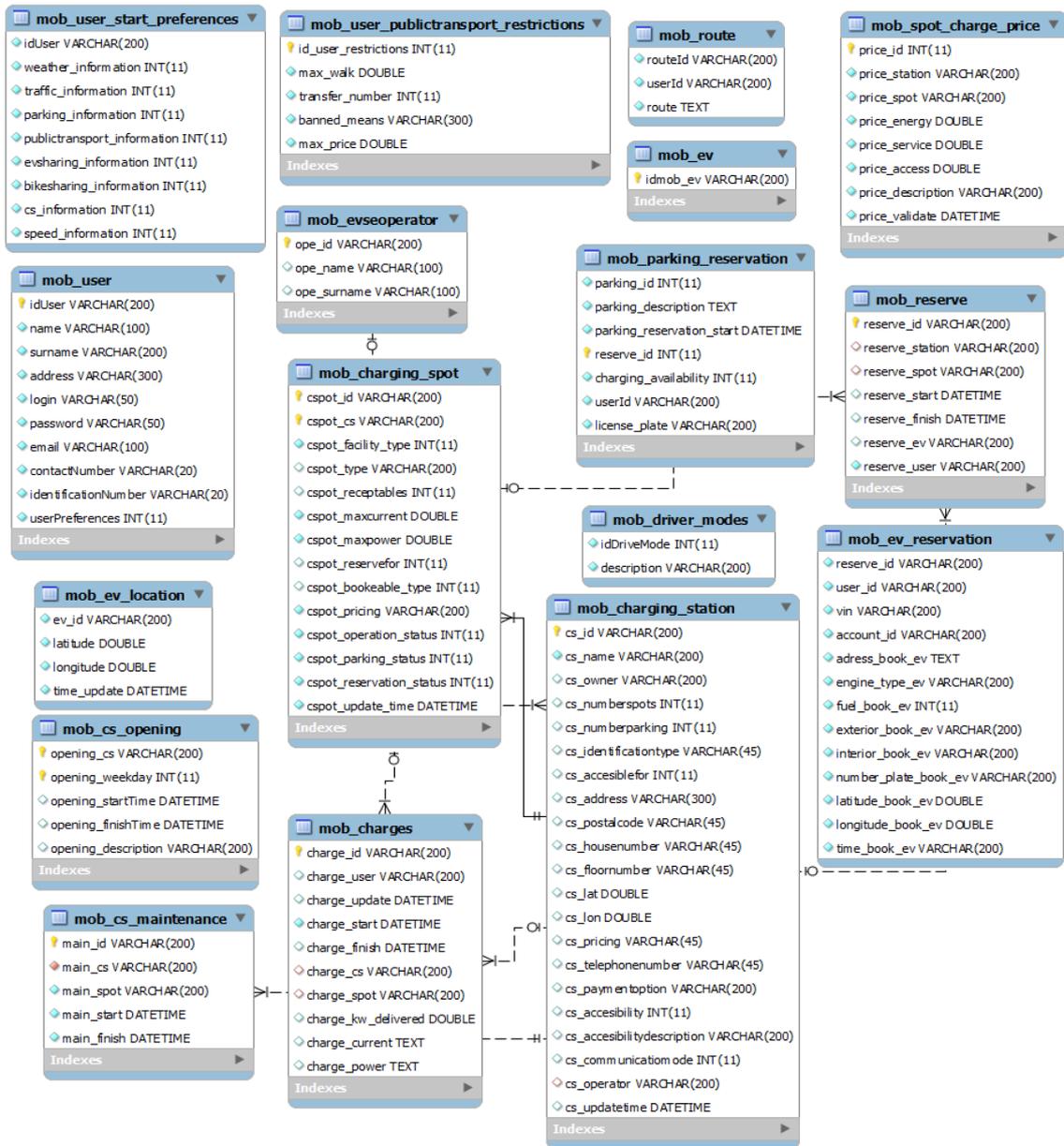


Figura 80. Estructura de base de datos FEVSE (interfaz AI.5)

- i. Tablas relacionadas con el usuario. Es importante tener en cuenta los datos del usuario, registrados en la tabla `mob_user`, y sus preferencias, registradas en la tabla `mob_user_start_preferences`. En esta tabla `mob_user_start_preferences` es donde quedan registradas las distintas opciones del usuario en cuanto a querer usar o no otros medios de transporte en la ciudad, la comodidad.
- ii. Tabla asociada a las restricciones del transporte público: `mob_user_publictransport_restrictions`.
- iii. Tabla asociada a la ruta a llevar a cabo: `mob_route`.
- iv. Tabla asociada a la viabilidad de aparcamiento: `mob_parking_reservation`.

- v. Tabla asociadas a el FEV, específicamente su posición en cada momento: `mob_ev`, `mob_ev_location`.
- vi. Tabla asociada a los datos de disponibilidad de las CS: `mob_cs_opening`, `mob_cs_maintenance`. La tabla `mob_charging_station` contiene los detalles de las CS, muchos de cuyos campos actúan como claves primarias de las anteriores.
- vii. Tablas asociadas a el proceso de carga: `mob_charges`, `mob_charging_spot`.
- viii. Tabla asociada a el coste de carga, integrándose así con el proveedor de energía: `mob_spot_charge_price`.
- ix. Tablas de reservas, como `mob_ev_reservation` y `mob_reserve`, que registran los detalles del FEV que reserva y del momento de inicio y fin de carga reservada respectivamente.

En la siguiente figura presentamos el diagrama UML utilizado para intercambiar datos a través de la interfaz AI.5.

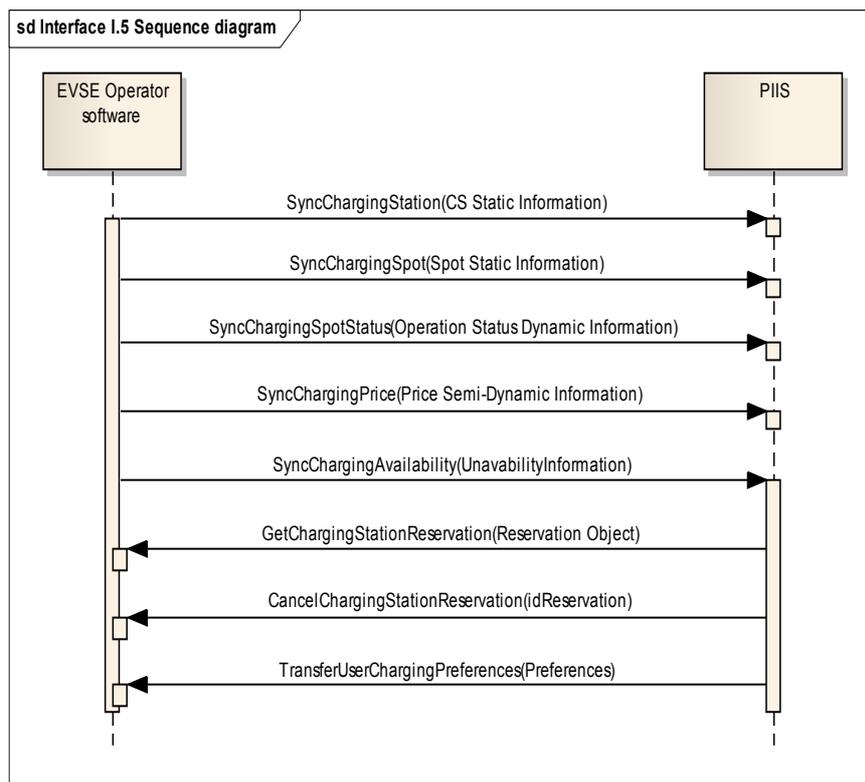


Figura 81. Caso de Uso (UML): Diagrama de secuencia interfaz I.5

Es importante observar en la figura el orden y sentido de ejecución de cada proceso en la comunicación entre el FEVSE y el servidor central, pues de ello dependerá la implementación posterior. A continuación describimos cada uno de estos procesos y qué permiten llevar a cabo.

- **Proceso *SyncChargingStation***, para obtener información acerca de las propiedades generales del FEVSE.
- **Proceso *SyncChargingSpot*** para obtener información sobre las propiedades de un punto de carga individual.
- **Proceso *SyncChargingSpotStatus*** para sincronizar periódicamente la información del estado actual de un punto de carga individual.
- **Proceso *SyncChargingPrice*** para obtener información sobre el precio actual del servicio de carga proporcionado por el FEVSE, ejecutado cuando la tarifa se modifica.
- **Proceso *SyncChargingUnavailability*** para obtener información futura de disponibilidad de un punto de carga, ejecutado cuando se produzca un evento de reserva fuera del sistema de electromovilidad o cuando se planifica un servicio de mantenimiento.
- **Proceso *GetChargingStationReservation***, que permite al FEVSEO obtener información dinámica sobre la reserva de un punto de carga.
- **Proceso *CancelChargingStationReservation***, que permite al FEVSEO obtener información dinámica sobre la cancelación de una reserva para un punto de carga.
- **Proceso *SetUserChargingPreferences***, que permite al FEVSEO obtener información sobre las preferencias de carga enviadas a través de la aplicación de Smartphone del usuario Mobincity, en el caso en que los datos no se obtengan del FEV (IEC 15118).

## **2. Modelo de datos en las comunicaciones**

Vamos a detallar el modelo de datos que requiere la implementación de los diseños UML anteriormente desarrollados.

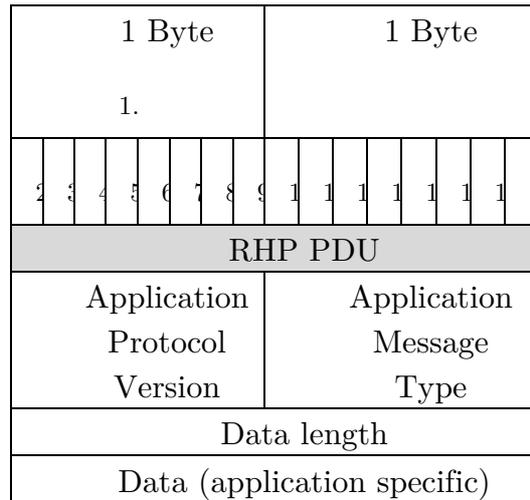
Este modelo define el módulo de gestión y tratamiento de datos del sistema de movilidad, denominado MIA (*Master Integration Aggregator*). El MIA recoge los datos del usuario sobre el origen y destino del FEV, los datos de la infraestructura de transporte, aparcamientos, datos del servicio de la red de energía, ubicación, disponibilidad y precios de las estaciones de carga, información procedente de medios de transporte alternativos y preferencias para el modo de conducción del usuario.

El MIA, ubicado en el sistema de información del FEV del usuario, se implementa como punto central para la adquisición de datos relevantes del sistema a través de un proceso inicial de validación del usuario en el PIIS y la interfaz I.2, directamente conectada a éste.

Para efectuar las correspondientes peticiones al servidor para suscribirse a los distintos servicios, hemos diseñado los siguientes procedimientos. Además se requieren también diseñar los modos en que el MIA puede presentar los datos procesados al usuario (respuestas a las peticiones): lo denominamos protocolo HMI (*Human Machine Interface*)

**Estructura de datos HMI**

El primer paso es diseñar un cliente HMI cuya estructura de datos es la siguiente:



**Figura 82.** Estructura de datos HMI.

En la figura presentamos un paquete modelo a utilizarse en los procesos de comunicación de nuestro sistema. Se trata de un modelo estándar de paquete de datos cuyas características describimos a continuación.

**Tamaño de datos utilizados**

En el diseño que proponemos utilizamos las componentes del entorno de trabajo ezC2X (*ver referencia web [K]*). Este entorno utiliza GeoNetworking y IPv6-over-GeoNetworking via red adaptativa híbrida ITS-G5 y LTE con selección de red óptima en tiempo real, además de proporcionar una adecuada colección de librerías C++ disponibles en Linux y Windows, para su integración en nuestro prototipo final.

La principal diferencia entre la escritura y la lectura de datos, en este caso, reside en la cantidad de bytes que puede mover el puntero correspondiente en el buffer que contendrá el *payload* tras que sea creada una variable para un tamaño previamente especificado. La información relevante necesaria implementar la escritura y la lectura de datos la obtenemos de ezC2X:

- ✓ Read/Write uint16\_t - Advance the writer pointer by 2 bytes
- ✓ Read/Write uint32\_t - Advance the writer pointer by 4 bytes

**Especificaciones: Formato general para las comunicaciones con el usuario.**

El formato general que siguen las instrucciones que componen nuestros distintos procesos es el mostrado a continuación, donde la variable “*appMsgType*” indica la funcionalidad seleccionada. Si el mensaje recibido fuese desconocido, es decir, *appMsgType = unknown*, entonces no se procedería a una reconstrucción del mensaje y el receptor sería avisado mediante un mensaje de error:

*Query* → *appMsgType = oddnumbers*

*Response* → *appMsgType = even numbers*

Una vez recibido un mensaje, para su posterior reconstrucción es vital conocer el orden de escritura de las variables y los datos en el buffer: es la base de una comunicación eficiente. Presentamos parte del código desarrollado para mostrar un ejemplo de cómo se codifica un mensaje:

```
private void writeToStream(RhpHeader requestHeader, RhpData data, int val1, int
val2)
{
    dataOutputStream.writeByte(requestHeader.getProtocolVersion());

    dataOutputStream.writeByte(requestHeader.getFlagAndType());

    dataOutputStream.writeShort(requestHeader.getExporterHandle());

    dataOutputStream.writeShort(requestHeader.getPayloadLength());

    dataOutputStream.writeShort(data.getExporterId());

    dataOutputStream.writeByte(data.getProtocolVersion());
    dataOutputStream.writeByte(data.getMessageType());

    dataLength = sizeof(val1) + sizeof(val2) → e.g. dataLength = 8

    dataOutputStream.writeShort(8); // Write the whole length of all data
    dataOutputStream.writeInt(val1); // now write the values to stream step by
step
    dataOutputStream.writeInt(val2);

    dataOutputStream.flush();
}
```

Enumeramos a continuación las distintas funcionalidades MIA implementadas para la comunicación con el usuario. El detalle del tipo de datos utilizado para cada una de estas funcionalidades puede consultarse en la url [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/). Hemos decidido dejarlo así como anexo para evitar el tamaño excesivo del presente documento.

- **Procesos iniciales de validación del usuario en el servidor central PIIS**

Hemos diseñado un proceso de acceso (*login*) para validar al usuario en el servidor central PIIS. Se requiere que el usuario se identifique como un usuario válido con su *nickname* y password. Una vez identificado, el proceso permite al usuario validar sus preferencias.

El desarrollo de las tablas que esbozan el modelo de datos utilizado y la estructura de los distintos procedimientos del MIA pueden verse en la url [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/), encontrándose en estos anexos los aspectos de desarrollo técnico que hemos necesitado en nuestra investigación.

- **Procesos de suscripción al servicio de posición, al servicio de información de tráfico (service for traffic light information) y al servicio de estado de batería (service for battery state)**

Estas funciones permiten habilitar o deshabilitar el servicio de obtención de la información de la posición, de tráfico y del estado de la batería en un momento dado. Las variables asociadas, como es lógico, tomarán el valor 0 para deshabilitarlo y el valor 1 para su habilitación.

- **Proceso de control de la máxima velocidad permitida y de petición de velocidad actual y recomendada (current and recommended speed)**

Esta función permite obtener la máxima velocidad (km/h) permitida y las velocidades actual y recomendada. (ambas en km/h).

- **Procesos utilizados en las comunicaciones con las fuentes externas, que hemos detallado en la sección anterior.** Enumeramos a continuación los distintos procesos desarrollados, dejando el detalle de su estructura y el tipo de datos utilizados para comunicarnos con cada uno de los adaptadores (WDA, TDA, PTDA, PDA y eSDA) en los anexos a este capítulo que pueden verse en la url [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/).

- Procesos de la interfaz AI.1: comunicación con la infraestructura meteorológica. Se trata de los procesos *GetCurrentWeather* y *GetForecastDay* usados en nuestros diseños UML de la interfaz AI.1.
- Procesos de la interfaz AI.2: comunicación con la infraestructura de tráfico. Se trata del proceso *GetTrafficInformation* usado en nuestro diseño UML de la interfaz AI.2.

- Procesos de la interfaz AI.3: comunicación con la infraestructura de transporte publico. Se trata de los procesos *GetPublicTransportationRoutes* y *AvailablePublicTransport* usados en nuestros diseños UML de la interfaz AI.3.
- Procesos de la interfaz AI.4: comunicación con la infraestructura de estacionamiento. Se trata del proceso *getNearestParkings* usado en nuestro diseño UML de la interfaz AI.4.
- Procesos de la interfaz AI.5: comunicación con la infraestructura e-sharing y FEVSE. Se trata de los procesos usados en nuestros diseños UML de la interfaz AI.5. Entre ellos destacamos los procesos *GetNearestBikes* y *getNearestEVSharing*. Estos procesos facilitan la información referida a las estaciones de e-sharing (de bicicletas y de FEVs, respectivamente) más cercanas que se encuentran en un cierto radio a nuestro alrededor. La información será recogida por el eSDA (detallado ya en el punto anterior del presente capítulo) para posteriormente ser modificado por el PIIS en function de las preferencias del usuario recibidas.
- Procesos de la interfaz de comunicación con las reservas de estacionamiento. Se trata de los procesos usados en los diseños UML de la interfaz AI.7.
- Procesos de la interfaz de comunicación con las reservas e-sharing. Se trata de los procesos usados en los diseños UML de la interfaz AI.8.
- **Comunicaciones usuario-servidor central: MIA-PIIS.** Los procesos de comunicación entre el usuario, a través de las interfaces que forman el MIA, y el servidor central son los siguientes:
  - MIA→PIIS
    - ✓ Transmisión de mensajes con la información de la posición del FEV. Cuando la opción esta habilitada, el MIA enviará al PIIS la latitud, longitud y encabezados de cada punto de inicio y fin para cada petición de planificación de ruta.
    - ✓ Transmisión de mensajes con la información del estado de la batería actual del FEV. Cuando la opción está habilitada, el MIA enviará al PIIS el estado actual de la batería (en porcentaje), el tiempo de carga restante y el momento en qué se requerirá hacer la carga.
    - ✓ Transmisión de mensajes con la información del alcance restante (en km) del FEV basado en el nivel actual de la batería en para cada petición de planificación de ruta.
    - ✓ Transmisión de mensajes con la información de configuración de ruta seleccionada por el usuario FEV (fecha y hora de salida, y llegada,

preferencias de viaje, etc.) para cada solicitud de planificación de ruta seleccionada por el usuario FEV.

- PIIS→MIA
  - ✓ Transmisión de mensajes con la información de disponibilidad de estaciones de carga a lo largo de la ruta.
  - ✓ Transmisión de mensajes con la información del semáforo (GLOSA). Cuando está habilitada la opción, el PIIS notificará al MIA con el aviso de velocidad optimizada identificado por la luz verde a lo largo de la ruta actual.
  - ✓ Transmisión de mensajes con la información de eventos imprevistos que afecten el curso normal del viaje a lo largo de la ruta.
  - ✓ Transmisión de mensajes con la información de diferentes rutas alternativas proporcionadas por los algoritmos.
  - ✓ Transmisión de mensajes con la información con los diferentes niveles de estado del tráfico para cada tramo de ruta alternativa.

Todas las funciones involucradas en la comunicación bidireccional entre el usuario, a través del MIA, y el servidor central tienen su soporte en los interfaces de comunicación y el modelo relacional diseñado. En la url [www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/](http://www.esystec.es/victorfdez/PhD.anexos/) podemos ver el detalle técnico del modelo de datos creado para estos procesos.

Veamos a continuación cómo resolver el último de los problemas planteados y que necesitamos resolver para obtener la solución de interoperabilidad que perseguimos: cómo diseñar una adecuada lógica para hacer viable la predicción del tráfico y la toma posterior de decisiones. Es decir, necesitamos prever la dinámica del tráfico (predecir y anticipar las congestiones de tráfico antes de que ocurran, por ejemplo) para poder decidir sobre cómo movernos en la ciudad y poder llegar a nuestros destinos.

### 4.3.3 Predicción del tráfico

Para evitar que el tráfico afecte a cómo movernos en la ciudad y poder llegar donde decidamos en cada momento, hemos dotado al PIIS de una capacidad de predicción del tráfico que le permita tomar decisiones y gestionar la movilidad en la ciudad. Esta predicción del tráfico exige diseñar un sistema basado en el autoaprendizaje de la propia dinámica urbana y la explotación de los datos recopilados de las fuentes externas. A este sistema lo denominamos ATMS (*Adaptive Traffic Management System*)

Para diseñar este sistema necesitamos, en primer lugar, modelar el entorno de movilidad y, en segundo lugar, diseñar un algoritmo para predecir y anticipar las congestiones de tráfico antes de que ocurran. Además, este algoritmo va a estimar el

error cuadrático medio cometido en nuestras predicciones para garantizar una mejora continua del sistema de gestión de movilidad en la ciudad.

### **1. Modelado del entorno de movilidad: capas de transporte y energía**

Para elaborar un modelo del entorno de movilidad de la ciudad objeto de implantación del sistema necesitamos tener en cuenta las redes de transporte y de energía.

La **capa de transporte** combina los sistemas de transporte privado y público comodales. Los componentes de nuestro modelo de la capa de transporte son los siguientes:

- El mapa de **nodos**, representativos de cruces, paradas de autobuses o tranvías, ubicaciones de estaciones de carga, áreas de estacionamiento, vehículos e-sharing, y puntos de interés para el usuario.
- La red de vías, entre ellas las carreteras (aunque esto puede cambiar muy seguramente en el futuro), representadas por las **aristas**, es decir, caminos fijos entre nodos.

La **capa de energía** requiere un modelado de la red de distribución. Los elementos de nuestro modelo son:

- Las distintas **áreas de carga**, donde pueden haber una o varias CS. En nuestro modelo consideramos que la ciudad objeto de nuestra implantación puede tener más de un área de carga. Por tanto, sea  $N$  el número de áreas de carga consideradas.
- Sea  $LA_i$  el área de carga  $i$ -ésima, siendo  $i$  el número identificativo de cada área de carga,  $1 \leq i \leq N$ .
- Como hemos comentado, cada área de carga dispone de una o varias CS, que denominamos **nodos**. Sea  $N_i$  el número de nodos de cada estación de carga  $LA_i$ . Estas  $N_i$  estaciones están unidas entre ellas por las líneas de alimentación.
- Estas líneas de alimentación quedan representadas por el conjunto  $A_i$  de márgenes o **aristas**. Así el conjunto de  $N_i$  nodos representa un área de carga ( $LA_i$ ), y cada uno de los  $N_i$  nodos puede albergar dos tipos de carga: (i) servicio de carga lenta (SC), y (ii) servicio de carga rápida (FC).

Cada vez que un área de carga recibe una petición de reserva, se le asigna un tiempo de disponibilidad en una estación del área para el tipo de servicio demandado, SC o FC. Estos tiempos definen sobre el área de carga  $LA_i$  un vector  $T_i = \{t_{i(1)}, t_{i(2)}, \dots, t_{i(m_i)}\} = \{t_{i(k)}\}_{k=1}^{m_i}$  formado por los tiempos de disponibilidad reservados para cada una de las  $m_i$  cargas reservadas en el área  $LA_i$  para un solo día de trabajo.

En general, para cada área de carga  $LA_i$ , tendremos el siguiente conjunto de vectores:

$$\{(n_{i(1)}^S, n_{i(1)}^F, t_{i(1)}), \dots, (n_{i(m_i)}^S, n_{i(m_i)}^F, t_{i(m_i)})\} = \{(n_{i(k)}^S, n_{i(k)}^F, t_{i(k)})\}_{k=1}^{m_i},$$

$$1 \leq i \leq N$$

siendo  $n_{i(k)}^S$  y  $n_{i(k)}^F$  el número de servicios SC y FC, respectivamente, disponibles en el área de carga  $LA_i$  en cada intervalo de tiempo  $t_{i(k)} \in T_i$  para cada área.

Podemos concluir que el entorno de movilidad en la ciudad queda modelizado según un conjunto de nodos y aristas que permite discretizar los distintos puntos y trayectos en que se encuentre un usuario. Con esto hemos conseguido que la posición de cada uno de los elementos móviles en la ciudad no constituya una variable aleatoria continua sino discreta. Esta solución de discretización permite desarrollar el algoritmo de predicción que vemos a continuación.

## **2. Algoritmo de predicción de tráfico**

El algoritmo de predicción de tráfico define la lógica de negocio del sistema ATMS. Para diseñar este algoritmo seguimos los siguientes pasos:

- i. Formalización del problema de predicción.
- ii. Validación del modelo propuesto: funciones de autocorrelación simple y parcial.
- iii. Diseño del algoritmo de predicción de tráfico.
- iv. Prueba del cálculo de la autocorrelación simple y parcial para la validación del modelo.
- v. Estimación del error cometido en las predicciones para mejorar el sistema de forma continua.
- vi. Simulación y conclusiones.

Veamos el detalle de la solución propuesta.

### **i. Formalización del problema de predicción**

Formalizar el problema planteado implica representar matemáticamente el tráfico en la ciudad en cada instante de tiempo  $t$  y analizar cómo esta medida del tráfico en dicho instante  $t$  depende de los instantes anteriores. Esta recurrencia en la medida del tráfico permite definir unos patrones cuyas similitudes medimos con herramientas estadísticas como análisis de correlaciones entre los patrones obtenidos. Análogamente obtenemos el tráfico en un instante posterior (predicción) en función del tráfico medido en el instante actual y anteriores. A continuación describimos cómo se obtiene esta predicción.

Denotemos por  $Y_t$  la variable aleatoria representante de la previsión del tráfico en el instante  $t$ . El hecho de que para cada valor de  $t$  tengamos una variable aleatoria lleva a

una familia no numerable de variables aleatorias continuas que dependen del tiempo (*instante en que medimos la previsión del tráfico*).

Dado que es imposible conocer exactamente el tráfico en cada instante futuro, es importante proceder a discretizar esta familia de variables aleatorias continuas. Para ello, efectuamos previsiones de tráfico sólo en determinados momentos del día, representados por *slots*. Sea  $I = \{k \in \mathbb{Z} \mid k \leq t\}$  el conjunto de índices representantes de estos slots, es decir, de las distintas observaciones del tráfico a lo largo del día, siendo  $t$  la observación del tráfico que queremos predecir. Obtenemos una serie de variables aleatorias  $\{Y_t, t \in I\}$  ordenadas temporalmente y dependientes entre sí. Veamos cómo estudiar la relación causal entre las variables aleatorias de esta serie.

La previsión del tráfico en el instante  $t$ ,  $Y_t$ , depende del tráfico en los momentos anteriores. Es por ello que podemos expresarla como una recurrencia dependiente de la serie de variables aleatorias que representan el tráfico en los momentos anteriores a  $t$ , es decir,  $\{Y_{t-i}, i \geq 1\}$ . Suponiendo que podemos aproximar  $Y_t$  por una combinación lineal de  $\{Y_{t-i}, i \geq 1\}$ , tenemos:

$$p(Y_{t-i}, 1 \leq i \leq p) = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i}.$$

siendo  $\{a_i \mid 0 \leq i \leq p\}$  los coeficientes de dependencia entre la previsión del tráfico en el instante actual y las anteriores. Es necesario garantizar que la dependencia lineal entre  $Y_t$  y  $\{Y_{t-i}, i \geq 1\}$  es válida para una predicción de tráfico lo más cercana posible a la realidad. Esto lo hacemos en el próximo punto (ii) mediante las denominadas funciones de autocorrelación simple y parcial.

El error cometido al aproximar  $Y_t$  por  $p(Y_{t-i}, 1 \leq i \leq p)$  es:

$$e_t = Y_t - \left( a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} \right).$$

Es decir,  $Y_t$  puede expresarse como la serie temporal

$$Y_t = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} + e_t.$$

Esta formulación define el modelo de estimación de  $Y_t$  que denominamos autorregresivo de orden  $p$ , ya que nuestra variable aleatoria  $Y_t$  depende de las  $p$  observaciones anteriores. La base matemática de esta formulación es la *teoría de series temporales*, cuyo estudio detallado puede verse en [32] y [31].

Veamos cómo determinar los valores de los  $p+1$  parámetros  $\{a_j\}_{j=0}^p$  que definen la función matemática  $\mathbf{p}(\{Y_{t-k}\}_{k=1}^p, \{a_j\}_{j=0}^p)$  que mejor aproxima las mediciones de tráfico del día  $Y_t$  a partir de  $\{Y_{t-k}\}_{k=1}^p$ , es decir,  $Y_t = \mathbf{p}(\{Y_{t-k}\}_{k=1}^p, \{a_j\}_{j=0}^p)$ . La función  $\mathbf{p}$  es la función de regresión lineal y para el cálculo de los coeficientes (ó pesos)  $\{a_0, a_1, \dots, a_p\}$  que la determinan vamos a exigir que el error cuadrático medio al aproximar  $Y_t$  por  $\mathbf{p}(Y_{t-i}, 1 \leq i \leq p)$  sea mínimo. Veamos cómo hacer esto.

Sea  $N$  el número de datos obtenidos a partir de nuestras mediciones de tráfico en instantes anteriores. Definimos el error cuadrático medio como:

$$E_2(p) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\mathbf{p}(Y_{t-i}, 1 \leq i \leq p) - Y_t)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left( a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} - Y_t \right)^2}.$$

En lugar de minimizar el error cuadrático medio, vamos a minimizar su cuadrado para simplificar los cálculos asociados:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\mathbf{p}(Y_{t-i}, 1 \leq i \leq p) - Y_t)^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left( a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} - Y_t \right)^2 = E(a_0, a_1, \dots, a_p).$$

Para minimizar esta expresión, aplicaremos los teoremas correspondientes de cálculo diferencial de varias variables reales, empezando por el cálculo de las derivadas parciales respecto a cada variable  $a_i$  e igualando el gradiente de esta función  $\mathbf{E}$  a cero para obtener los puntos críticos de  $\mathbf{E}$ .

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0 \rightarrow \sum_{t=1}^N 2 \left( a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} - Y_t \right) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = 0 \rightarrow \sum_{t=1}^N 2 \left( a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} - Y_t \right) Y_{t-k} = 0$$

Desarrollando las ecuaciones obtenemos el siguiente sistema de  $p+1$  ecuaciones lineales con  $p+1$  incógnitas:

$$\left\{ \begin{array}{l} N a_0 + \sum_{i=1}^p a_i \left( \sum_{t=1}^N Y_{t-i} \right) = \sum_{t=1}^N Y_t \\ a_0 \sum_{t=1}^N Y_{t-k} + \sum_{i=1}^p a_i \left( \sum_{t=1}^N Y_{t-i} Y_{t-k} \right) = \sum_{t=1}^N Y_t Y_{t-k}, \quad 1 \leq k \leq p \end{array} \right\}.$$

Resolviendo el sistema conseguimos los pesos  $(a_0, a_1, \dots, a_p)$ .

**ii. Validación del modelo: funciones de autocorrelación simple y parcial**

Es importante observar que el error cometido al predecir el tráfico en el instante  $t$  puede depender del error cometido al predecir el tráfico en instantes anteriores. Para estudiar la relación que existe entre la predicción del tráfico en un instante dado  $k$  y la predicción  $k$  instantes de tiempo atrás y validar que esta dependencia es lineal, calculamos el denominado coeficiente de autocorrelación simple de orden  $k$ , es decir,

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^N (Y_t - \mu)(Y_{t-k} - \mu)}{(n - k) \sum_{t=1}^N (Y_t - \mu)^2 / n},$$

donde  $\mu$  es la media de la variable aleatoria  $Y_t$ , es decir, el valor medio del tráfico en el instante  $t$ . Este valor medio se obtendrá a partir de los datos históricos de tráfico de que dispondremos, como vemos en el próximo punto (iii) donde describimos el algoritmo de predicción diseñado.

Este conjunto de coeficientes  $\rho_k$  forma la denominada función de autocorrelación simple (SAF), es decir,  $\text{SAF}(0) = \rho_0 = 1$ ,  $\text{SAF}(k) = \rho_k$ ,  $1 \leq k \leq p$ . Como correlaciones que son, los valores de  $\rho_k$  se encuentra en el rango  $[-1,1]$ , indicando 1 una perfecta correlación y -1 una perfecta anticorrelación.

Para validar el modelo planteado para el cálculo de  $Y_t$  (y con ello la predicción del tráfico en el instante  $k$ ) no es suficiente con el cálculo de la autocorrelación simple. Necesitamos además analizar la dependencia que existe entre los errores cometidos en las distintas predicciones pero eliminando el posible efecto de los resultados intermedios entre dos predicciones dadas. Definimos el coeficiente de autocorrelación parcial de orden  $k$ ,  $R_k$ , como la correlación entre dos muestras separadas en  $k$  períodos de tiempo cuando se suprime la dependencia lineal entre las dos muestras debido a valores intermedios. Estos coeficientes  $R_k$  constituyen la función de autocorrelación parcial (PAF). Esta función es la representación de los coeficientes de autocorrelación parcial basados en el retardo. Veamos cómo calcularla.

Una vez calculados los coeficientes de autocorrelación simple  $\rho_k$ , las ecuaciones de Yule-Walker ([32]) nos permiten afirmar que estos  $\rho_k$  son combinación lineal de los coeficientes de autocorrelación simple de orden menor, es decir,  $\rho_i, i < k$ .

$$\rho_k = \sum_{j=1}^p \alpha_j \rho_{k-j}, \quad 1 \leq k \leq p.$$

Las constantes de proporcionalidad  $\alpha_j$  y, con ellas, los coeficientes de autocorrelación parcial  $R_k$  pueden calcularse matricialmente como sigue:

$$R_1 = \rho_1$$

$$\begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_0 \\ \rho_1 & \rho_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * \\ \alpha_2 \end{bmatrix}, R_2 = \alpha_2$$

$$\begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & \rho_0 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * \\ * \\ \alpha_3 \end{bmatrix}, R_3 = \alpha_3$$

Recurrentemente pueden obtenerse así los coeficientes  $R_k$ , que definen la función de autocorrelación parcial  $PAF(k) = R_k$ .

El hecho de que los coeficientes SAF no se anulen rápidamente mientras que los primeros coeficientes PAF formen una sucesión rápidamente convergente a cero implica que el comportamiento de la serie temporal considerada sigue un modelo lineal autorregresivo de al menos orden 2 (como consecuencia de las ecuaciones de Yule-Walker, [32]), es decir,  $p \geq 2$ . Ambas funciones, SAF y PAF, determinan así la validez del modelo autorregresivo de orden  $p$ .

### iii. Diseño del algoritmo de predicción de tráfico

Las características del comportamiento del tráfico (*temperatura durante el día, movimientos turísticos, vacaciones escolares, invierno, etc.*) determinan las tareas de predicción definiendo unas condiciones de entorno y/o iniciales. Mediante observación directa, podemos ver que el tráfico presenta un patrón diario repetitivo:

- Hacia la noche alcanza niveles acercándose al cero. Esto asegura un comportamiento estacionario desde un punto de vista estadístico.
- El comportamiento del tráfico es similar entre semana. Es decir, puede observarse un mismo patrón en el tráfico durante los días laborables, por ejemplo.

Una vez obtenida la serie temporal  $Y_t = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} + e_t$  y diseñado el modo en que vamos a validar su dependencia lineal, es decir, mediante las funciones SAF y PAF, el siguiente paso es descomponer  $Y_t$  en dos componentes, una con la información estacionaria y otra con la información estocástica, que es la que caracteriza el comportamiento variable y las variaciones de tráfico entre días aparentemente similares. Esta componente estocástica, imposible de calcular con exactitud, es menor cuanto menor sea el error cuadrático medio y es la que necesitamos estimar para conseguir la predicción de tráfico que buscamos. Veamos cómo obtener, o componer, la predicción de la serie de datos final.

En la siguiente figura resumimos los procesos que hemos llevado a cabo para predecir el tráfico en un instante  $t$ . Estos procesos conforman el algoritmo de predicción del tráfico.

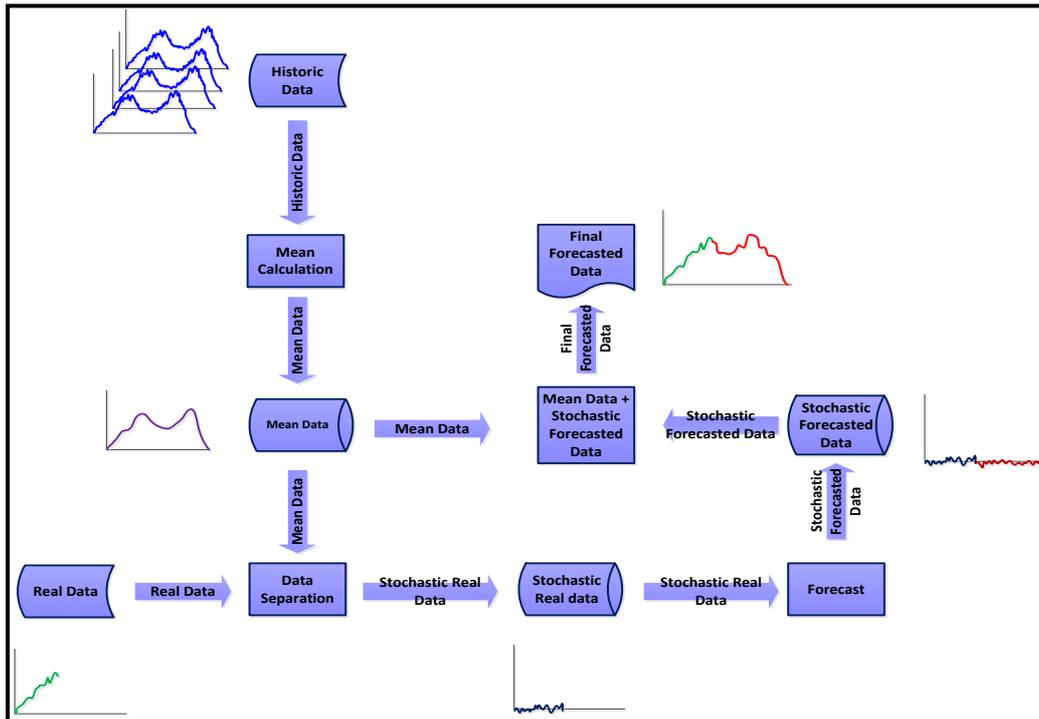


Figura 83. Algoritmo de predicción del tráfico (ATMS)

Como hemos mencionado, las series de datos se descomponen en dos partes: la parte estacionaria y la estocástica.

1. En primer lugar, a partir de datos históricos del tráfico, obtenemos los valores medios en cada momento del día. Se trata de la parte estacionaria o determinista del proceso.
2. Restando estos valores medios a los datos (reales) que tenemos en un instante  $t$  obtenemos las variaciones de tráfico (datos estocásticos de tráfico) que se producen en cada momento  $t$  del día respecto a la media calculada.
3. A partir de estos datos estocásticos en un instante  $t$  aproximamos el valor de las variaciones de tráfico en los instantes siguientes. Esto lo hacemos tomando el modelo desarrollado y minimizando el error cuadrático medio entre las variaciones de tráfico en el instante  $t$  y las que calculamos mediante el modelo.

Los resultados nos permiten calcular unos coeficientes que generan un nuevo modelo con el que generar nuevas series que comparamos con las anteriores, y así sucesivamente.

De este modo obtenemos las series temporales estocásticas correspondientes a varios momentos del día.

4. Finalmente sumamos esta parte estocástica a la parte determinista obtenida en el punto 1. Así conseguimos la serie final que predice el tráfico en un instante  $t$  a partir de los anteriores.

#### iv. Prueba del cálculo de la autocorrelación simple y parcial para la validación del modelo

En el siguiente gráfico se muestra un día completo (2 de abril de 2015) con los datos originales (en rosa), los datos estacionarios (en azul) y los datos estocásticos resultantes (en rojo):

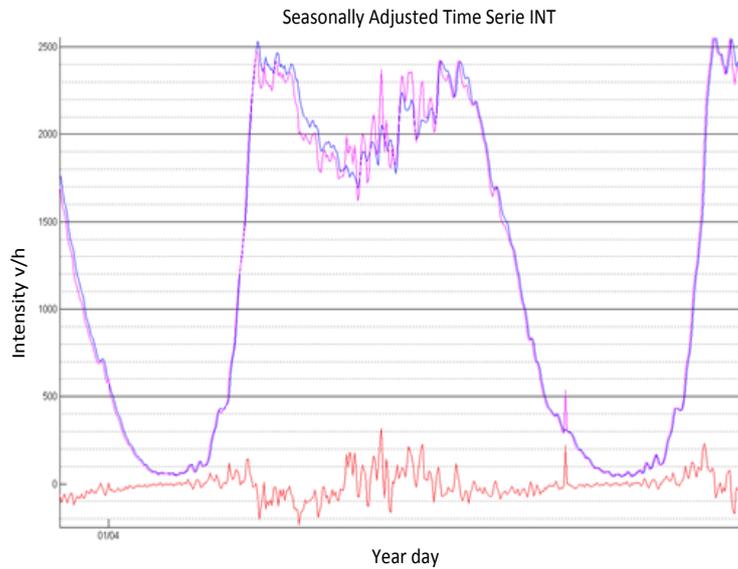


Figura 84. Ejemplo de series de predicción de tráfico obtenidas.

Para este día calculamos en primer lugar la función de autocorrelación simple (SAF) de nuestra serie  $Y_t$  y obtenemos la siguiente figura, en donde entre líneas azules mostramos el rango de valores en que deberían encontrarse (según Yule-Walker, [32]) los valores de la SAF para no considerarlos significativos.

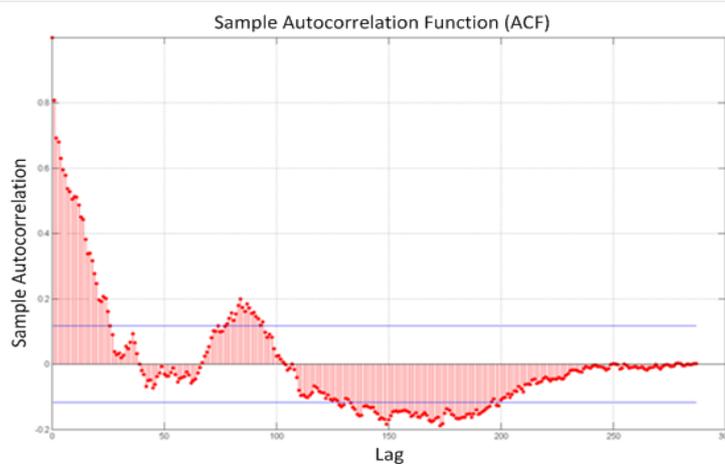


Figura 85. Función de autocorrelación simple (SAF).

Esta SAF presenta una convergencia lenta y demasiados términos significativos. Los coeficientes SAF no convergen rápidamente a cero, lo que significa, como ya hemos anticipado, que el modelo de dependencia tiene que ser lineal autorregresivo. Necesitamos conocer el orden de dependencia o autorregresión. Por tanto es necesario realizar un análisis adicional mediante la función de autocorrelación parcial (PAF) con el fin de fijar el orden del modelo, generalmente inferior a 5.

En la siguiente figura se muestra la función de autocorrelación parcial. La PAF indica que los coeficientes de mayor valor son el primero y el tercero y, a partir de ellos, la cancelación relativamente rápida de los coeficientes del PAF implica que la serie temporal tiene, por lo menos, un comportamiento de modelo autorregresivo de segundo orden AR(2).

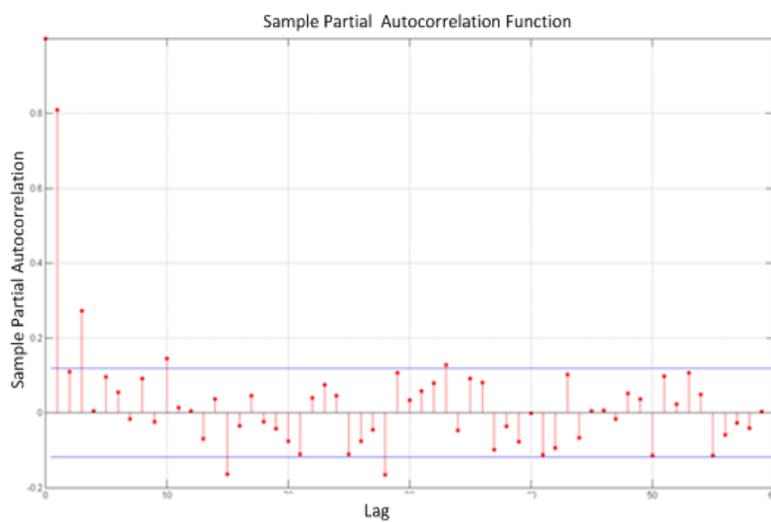


Figura 86. Función de autocorrelación parcial (PAF).

Sólo nos quedaría estimar el error cometido con la predicción de tráfico obtenida.

#### v. Estimación del error cometido en las predicciones para mejorar el sistema de forma continua.

Para describir cómo estimar el error de predicción tomemos un caso práctico que nos permita presentar en detalle los pasos seguidos.

Seleccionamos un modelo autorregresivo de segundo orden, es decir,  $p=2$ , dado por:

$$y_t = 0.9y_{t-1} - 0.5y_{t-2}$$

Este modelo genera la serie de la siguiente figura:

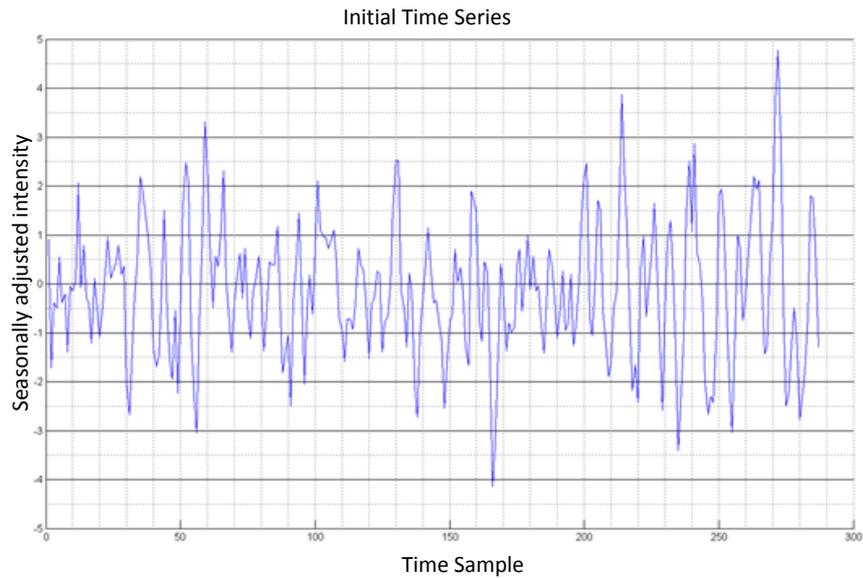


Figura 87. Modelo inicial generado, autorregresivo de orden 2.

A partir del histórico tomado de datos reales (correspondiente al día 2 de abril de 2015) y minimizando el error cuadrático medio entre este histórico de datos y los datos obtenidos para el instante  $t$  según el modelo considerado, obtenemos los pesos correspondientes. El modelo asociado a estos datos es:

$$y_t = 0.8667 y_{t-1} - 0.4173 y_{t-2}$$

Este modelo permite generar nuevas series de datos, que presentamos en la siguiente figura (en azul las series iniciales y en rojo las resultantes tras la aplicación del modelo obtenido):

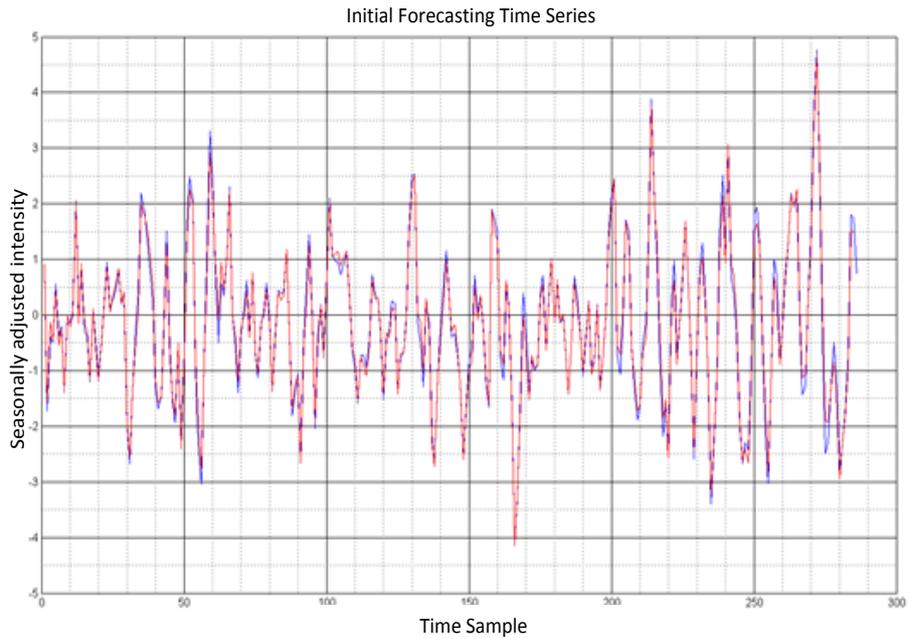


Figura 88. Series de datos iniciales vs resultantes

La diferencia entre ambas series representa el error cuadrático medio, como se muestra en el siguiente gráfico.

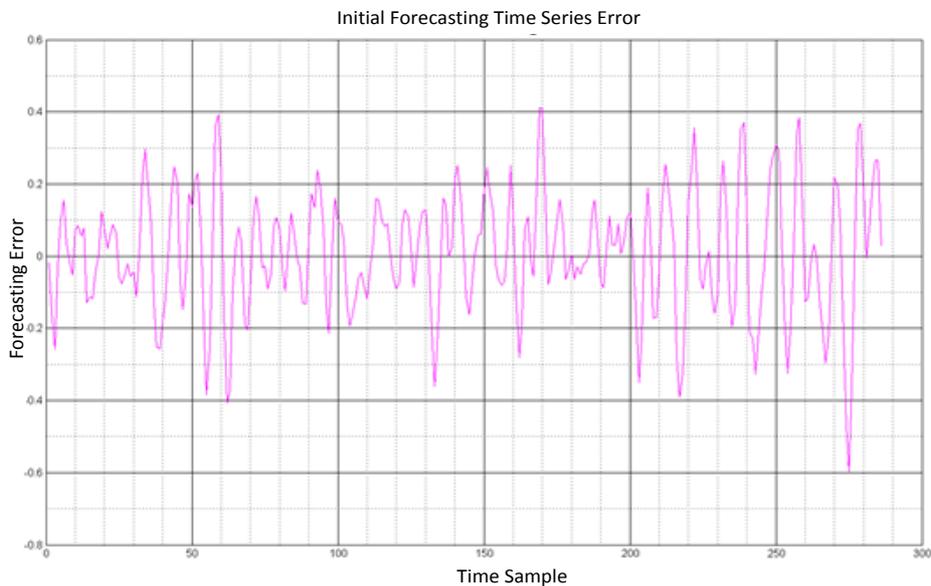


Figura 89. Error de predicción de las series de datos generadas por el modelo autorregresivo de orden 2.

Podemos concluir que el error de predicción se encuentra en un rango de valores aceptable y que, aunque es mejorable, esta prueba permite ilustrar cómo calcular el error de predicción en una situación real para mejorarlo de forma continua. Para minimizar el error se exige, en este caso, que el valor de dependencia  $p$  sea superior a 2

y cuanto mayor sea el histórico de datos que podamos usar mucho mejor será nuestra predicción. De este modo es cómo procederemos a la mejora continua de la predicción de tráfico efectuada.

## vi. Simulación y conclusiones

Veamos una simulación para mostrar cómo funciona el algoritmo de predicción de tráfico diseñado.

En las siguientes figuras representamos la serie de datos estacionaria (tras haber calculado los valores medios en cada momento del día a partir de los históricos que teníamos) y la serie de datos final, resultado de la predicción del tráfico en tres momentos del día.

En la siguiente figura presentamos los datos de tráfico del día 2 de abril tomados a las 2:15 (datos correspondiente a la muestra que enumeramos como 27) y la predicción de tráfico obtenida a partir de los datos de la muestra anterior.

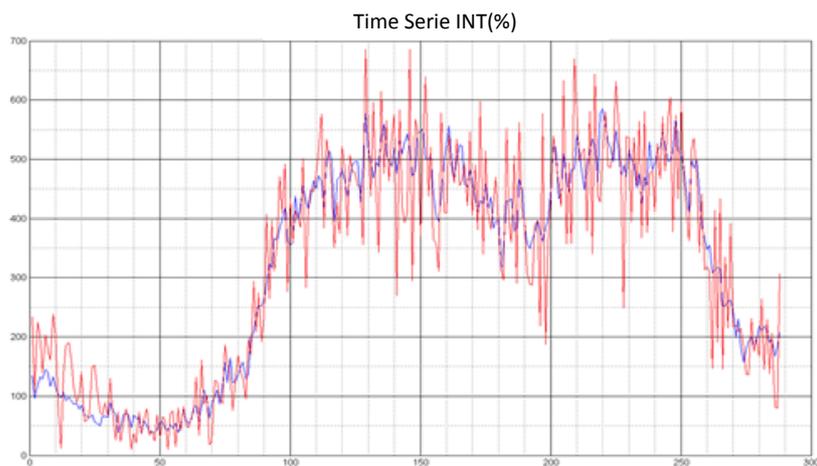


Figura 90. Series de predicción (rojo) vs deterministas (azul) –muestra 27 02:15–

Análogamente, en la siguiente figura presentamos los datos de tráfico del mismo día tomados a las 11:35 (datos correspondiente a la muestra que enumeramos como 139) y la predicción de tráfico obtenida a partir de los datos de la muestra anterior.

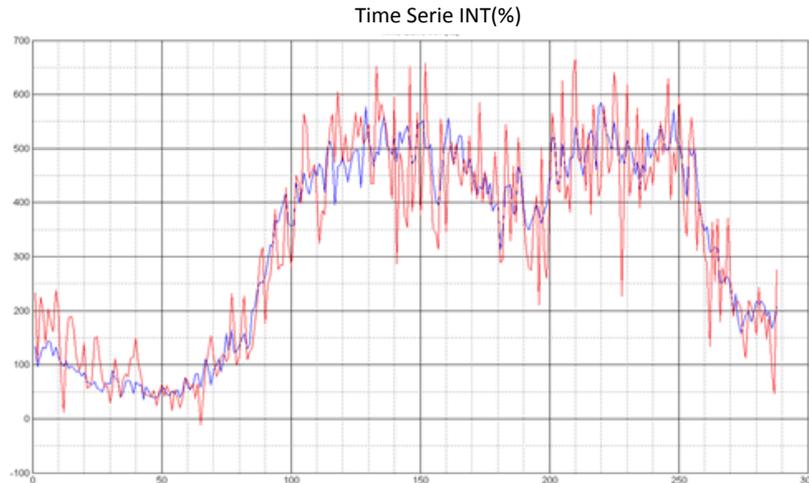


Figura 91. Series de predicción (rojo) vs deterministas (azul) –muestra 139 11:35–

En esta última figura presentamos los datos de tráfico del mismo día tomados a las 23:15 (datos correspondiente a la muestra que enumeramos como 279) y la predicción de tráfico obtenida a partir de los datos de la muestra anterior.

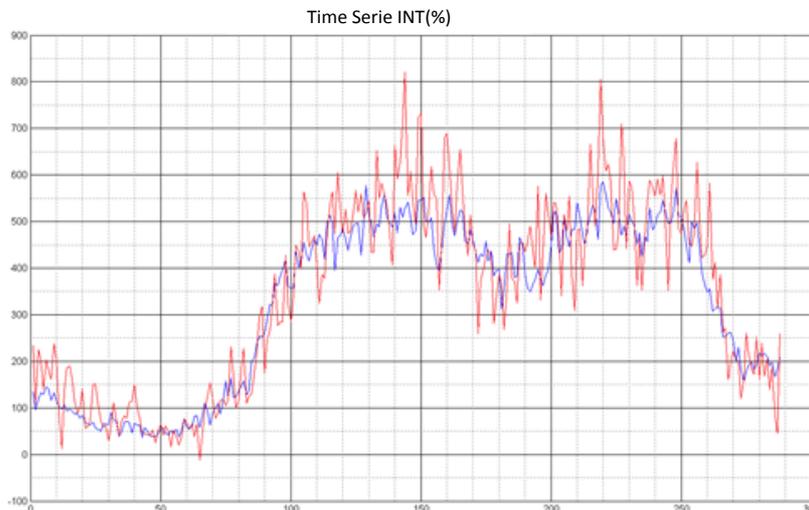


Figura 92. Series de predicción (rojo) vs deterministas (azul) –muestra 279 23:15–

Puede observarse, por tanto, cómo hemos utilizado, tal y como hemos diseñado en el algoritmo, el componente estocástico para pronosticar valores futuros y combinar los datos pronosticados con los datos medios con el fin de obtener los datos resultantes. Con esta simulación hemos comprobado cómo utilizar el algoritmo de predicción diseñado y lo muy similares que pueden llegar a ser las predicciones de tráfico a sus datos reales.

## 4.4 Conclusiones. Impacto en el futuro ecosistema europeo de ciudades inteligentes.

Según los desafíos planteados por la Comisión Europea para el crecimiento sostenible de la SmartCity a través de las TIC, la investigación llevada a cabo conduce al diseño y desarrollo de un nuevo sistema de interoperabilidad integrado en la ciudad. Este sistema, Mobincity, permite la interacción entre el FEV y el resto de agentes externos implicados en la movilidad, como hemos visto.

De este modo, concluimos que el mayor impacto de la implementación del sistema de interoperabilidad se da en los siguientes aspectos:

- **Mejora de la eficiencia energética e incremento de la autonomía del FEV.** Uno de los retos consiste en alcanzar las máximas tasas de eficiencia energética en las estrategias de carga (desde la red energética) del FEV mediante la habilitación del servicio V2G. La reducción estimada del consumo de energía global en Mobincity se estima que alcance porcentajes cercanos al 40%, debido fundamentalmente a la comodidad y la eficiencia en el uso de transporte en la ciudad, mejorado por el estudio de la predicción del tráfico. Esta reducción del consumo energético implicará un aumento del rango de autonomía en el mismo porcentaje para un futuro ecosistema europeo de ciudades inteligentes. Teniendo en cuenta que los FEVs actuales tienen una autonomía media de 150 km, la implantación del sistema de interoperabilidad se estima que permita aumentar este rango en 210 km (un aumento del 40% aprox. tal y como hemos dicho).

Además de lo comentado, el uso de FEV contribuirá de manera significativa a la reducción de emisiones GEI (*Gases Efecto Invernadero*) en comparación con los vehículos de combustión.

- **Reducción del coste de mantenimiento del FEV junto con un mayor rendimiento:** Relacionado con el coste global del FEV, los compradores de vehículos tienen en cuenta cada vez más los costes ocasionados por la propiedad (*precio del vehículo, abastecimiento, seguros, impuestos, mantenimiento, etc*) en lugar del precio inicial del vehículo. La puesta en marcha de la predicción de tráfico permitirá evitar atascos de tráfico y permitirá modos de conducción que optimizarán la eficiencia de los FEV. En consecuencia reducirá el tiempo de funcionamiento del motor consiguiendo un aumento de la vida útil del FEV. De este modo, tendrá un efecto importante en el coste de mantenimiento del FEV.
- **Integración continua del FEV en las redes energéticas inteligentes y en la infraestructura existente:** La integración de los resultados conseguidos permite interactuar con las redes energéticas sin la intervención del usuario para

gestionar la demanda de energía adaptando estrategias de facturación, además de interactuar con la infraestructura de transporte utilizando información sobre el entorno del FEV en tiempo real. Los resultados conseguidos de una adecuada implantación serán muy beneficiosos para los conductores.

- **Fortalecimiento de la competitividad global de los sectores europeos del automóvil, las TIC y la batería:** La implementación y puesta en marcha de los resultados conseguidos aportará beneficios potenciales para todo el sector de los FEV (*incluidos los sectores de la automoción, las TIC y las baterías*), ya que mejorará el rendimiento de los FEV, contribuyendo al amplio despliegue del FEV en Europa. Más concretamente, se fortalecerá la competitividad del sector TIC, gracias al desarrollo de los sistemas de comunicación y aplicaciones basadas en TIC, y también del sector automovilístico, ya que los componentes necesarios en el sistema serán finalmente fabricados e instalados en vehículos.

Actualmente, aproximadamente el 2% del mercado de vehículos nuevos en todo el mundo es sobre FEV, pero teniendo en cuenta las estimaciones de la Comisión Europea, este porcentaje podría aumentar hasta el 5,5% de las ventas globales en 2020 y más del 15% de las entregas en 2050. Aunque ahora, tras las lentas tasas de penetración de los últimos años, parece difícil lograr estos objetivos, los beneficios derivados de nuestros resultados y futuras investigaciones al respecto contribuirán, sin lugar a dudas, a lograr este objetivo.

# Líneas futuras de investigación

*“Algunos misterios siempre escapan a la mente humana. Para convencernos de ello, sólo hay que echar un vistazo a las tablas de los números primos, y ver que no reina ni orden ni reglas”*

~ Evariste Galois (1811-1832)

A pesar de los resultados obtenidos todavía queda mucho por hacer para conseguir lo que se planteó Europa hace muchos años: evolucionar del concepto ‘clásico’ de ciudad al nuevo concepto de ‘SmartCity’. Para ello, los primeros pasos han sido éstos, siendo primordial una solución inteligente de mejora de la movilidad para los FEVs a escala europea. Uno de los puntos clave, como hemos visto, es una infraestructura de carga inteligente.

El elemento clave que caracteriza a la SmartCity es la tecnología. La implementación de los avances tecnológicos obtenidos en este trabajo permitirá que las ciudades sean entornos más saludables, seguros y atractivos para el desarrollo económico, y mejorará su sostenibilidad energética y medioambiental.

En la actualidad la Comisión Europea sigue promocionando el desarrollo de nuevas soluciones o evoluciones de las existentes en el contexto de la SmartCity. Por ejemplo, un problema que necesariamente hay que resolver para el buen funcionamiento de la infraestructura es llegar a acuerdos de tarificación (*aunque ya no de roaming, al menos en Europa, como ya conocemos*) entre todo tipo de operadores y países implicados, así como acuerdos en los organismos públicos para conseguir impulsar las soluciones desarrolladas.

Para avanzar en el desarrollo de la SmartCity es necesario normalizar las soluciones que se integran en ella y su interoperabilidad. La **falta de normalización** es, en cualquier campo, una **barrera importante** para la implantación masiva de soluciones. Muchas de las normas diseñadas todavía están en desarrollo. Los resultados conseguidos en nuestro trabajo pueden contribuir a establecer una infraestructura de carga y de transporte europea estandarizada con soluciones cruciales para la mejora de la movilidad inteligente dentro de la SmartCity. Ello permite que este nuevo concepto de ciudad se encuentre preparado para cuando el FEV se convierta en un producto habitual en el mercado. De este modo, **la normalización obtenida garantiza la interoperabilidad, principio básico de la sostenibilidad de la solución hacia el futuro.**

Dentro de los ‘*challenges*’ propuestos por la Comisión Europea en su programa H2020, principalmente ‘*Green Vehicles*’ y ‘*Smart Cities*’, existen varias áreas de trabajo entre las que destacamos “***Electric vehicles’ enhanced performance and integration into the transport system and the grid***”<sup>####</sup>. Esta área de trabajo se centra en la mejora de la batería del FEV (*eficiencia energética, seguridad, fiabilidad, vida media, etc*). Es por ello que Europa solicita soluciones, principalmente basadas en el desarrollo de TIC, que contribuyan a la mejora de la eficiencia energética además de proporcionar una predicción precisa de la autonomía, ofreciendo opciones y servicios personalizados al conductor. Las soluciones propuestas deben ser compatibles con los vehículos de altas potencias, que es otro de los grandes retos hoy en día en Europa. Una de nuestras líneas de investigación actuales (siguiendo el programa de trabajo 2018-2020 -*H2020*-) consiste en hacer evolucionar nuestro sistema a un nivel más alto que dé cabida también a vehículos de alta potencia como autobuses, furgonetas o camiones eléctricos.

El trabajo aquí presentado es susceptible de ser implementado en la práctica en ciudades como Valencia, donde ya hay iniciativas en marcha. El desarrollo y puesta en marcha de un proyecto de esta naturaleza únicamente requeriría del apoyo de instituciones locales, de proveedores de energía y de fabricantes de vehículos, en especial enfocados a FEV. El resto sería trabajo de implantación de los resultados conseguidos.

---

<sup>####</sup> <https://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/gv-8-2015.html>

Para concluir este trabajo nos gustaría acabar como hemos empezado, con una cita de Nikola Tesla, que, como dijo Arquímedes, ha sido nuestra piedra angular profesional y personalmente:

*«Arquímedes fue mi ideal [...] El inventor debe ofrecer al mundo creaciones que realmente funcionan. [...] Nuestros primeros esfuerzos son puramente instintivas incitaciones de una vívida e indisciplinada imaginación. Pero esos impulsos tempranos, aunque no son inmediatamente productivos, son de tanto valor que podrían darle forma a nuestros mismos destinos».*

~ Nikola Tesla (1856-1943)



# Referencias

## 1 Referencias bibliográficas

- [1] D. H. Stefanov, Zeungnam Bien and Won-Chul Bang, "The smart house for older persons and persons with physical disabilities: structure, technology arrangements, and perspectives,". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 228-250, June 2004.
- [2] S. Helal, C. Chen, E. Kim, R. Bose and C. Lee, "Toward an Ecosystem for Developing and Programming Assistive Environments,". *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 8, pp. 2489-2504, Aug. 2012.
- [3] A. Rajabzadeh, A. R. Manashty and Z. F. Jahromi, "A generic model for smart house remote control systems with software and hardware simulators," *Information and Knowledge Technology (IKT), 2013 5th Conference on*, Shiraz, 2013, pp. 262-267.
- [4] I. Celino and S. Kotoulas, "Smart Cities [Guest editors' introduction]," *IEEE Internet Computing*, vol. 17, no. 6, pp. 8-11, Nov.-Dec. 2013.
- [5] G. J. Ren and J. Sanz, "An Integrated Approach to Transforming the City Ecosystem," *2011 Annual SRII Global Conference*, San Jose, CA, 2011, pp. 501-505.
- [6] W. Shuai, P. Maillé and A. Pelov, "Charging Electric Vehicles in the Smart City: A Survey of Economy-Driven Approaches,". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 8, pp. 2089-2106, Aug. 2016.
- [7] F. Zhu, Z. Li, S. Chen and G. Xiong, "Parallel Transportation Management and Control System and Its Applications in Building Smart Cities," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 1576-1585, June 2016.
- [8] S. Lumbreras, A. Ramos, F. Bañez, L. Olmos, P. Panciatici, C. Pache, J. Maeght. Large-scale transmission expansion planning: from zonal results to a nodal

- expansion plan. IET Generation Transmission & Distribution. vol. 11, no. 11, pp. 2778-2786, Agosto 2017. [Online: Junio 2017]
- [9] R.G.Gago, S.F. Pinto, J.Silva. G2V and V2G electric vehicle charger for smart grids. Smart Cities Conference (ISC2), 2016 IEEE International.
- [10] Janssen, J. A. Applied semi-Markov processes. Springer Science+ Business Media, 2009.
- [11] Rolink, J. A. Estimation of the availability of grid-connected electric vehicles by non-homogeneous semi-Markov processes. In IEEE (Ed.), PowerTech, 2011 IEEE Trondheim, 2011 (pp. 1-7).
- [12] Z. Fan, Q. Chen, G. Kalogridis, S. Tan and D. Kaleshi, "The power of data: Data analytics for M2M and smart grid," 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012, pp. 1-8.
- [13] D. Menniti, N. Sorrentino, A. Pinnarelli, A. Burgio, G. Brusco and G. Belli, "In the future Smart Cities: Coordination of micro Smart Grids in a Virtual Energy District," Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014 International Symposium on, Ischia, 2014, pp. 676-682.
- [14] ISO/DIS 11345-1: Advanced automation technologies and their applications. Part 1: Framework for enterprise interoperability. 2009.
- [15] Daclin, N., Chen, D., Vallespir, B.: Methodology for enterprise interoperability. In: 17th IFAC World Congress (IFAC 2008), Seoul, South Korea, July 6-11, 2008.
- [16] Clark, T., Moon, T.: Interoperability for joint Coalition Operations. Australian Defence Force Journal 51, 2001.
- [17] Chalmeta, R.; Grangel, R. Performance Measurement Systems for Virtual Enterprise Integration. Taylor & Francis. Computer Integrated Manufacturing. ISBN 0951-192X . Págs. 73-84. 2005
- [18] ISO/TC/SC 69 Electric road vehicles and electric industrial trucks. IEC 61851-1ed2.0 Electric vehicle conductive charging system– Part 1: General requirements; 2010.
- [19] S.S. Hosseini, A. Badri and M. Parvania. "The Plug-in Electric Vehicles for Power System Applications: The Vehicle to Grid (V2G) Concept". In Proc. 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, pages1101-1106, 2012.
- [20] D. Cerero-Tejero, E.F. Camacho, "Simulador de vehículos eléctricos en Matlab". Actas de las XXXVI Jornadas de Automática, 2 - 4 de septiembre de 2015. Bilbao ISBN 978-84-15914-12-9. 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC).
- [21] L. A. Hurtado, P. H. Nguyen and W. L. Kling, "Agent-based control for building energy management in the smart grid framework," IEEE PES Innovative Smart

- Grid Technologies, Europe, Istanbul, 2014, pp. 1-6.
- [22] James A. Momoh, Y. Wang (1997). Artificial Neural Network Based Load Forecasting Center for Energy Systems and Control (CESaC), 0-7803-4053-1/97 IEEE.
- [23] Demuth, H. (2001). Neural Network Toolbox: For Use with Matlab. Mathworks.
- [24] Kempton, W. A. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. Journal of Power Sources, (pp. 268-279). Elsevier, 2005.
- [25] Çinlar, Erhan. "Markov Renewal Theory". Advances in Applied Probability. Applied Probability Trust, Vol 1, No. 2: 123–187, 1969. JSTOR 1426216.
- [26] Choungmo Fofack, Nicaise; Nain, Philippe; Neglia, Giovanni; Towsley, Don. "Analysis of TTL-based Cache Networks". Proceedings of 6th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. Retrieved Nov 15, 2012.
- [27] Fernández, V., Kremer, Zsolt, Varesi, A., Green Mobility Grid into the Smart City. European Project Space: Cases and Examples. ScitePress Science and Technology Publications. 2015. ISBN 978-989-758-034-5
- [28] J. García-Villalobos, I. Zamora, J.I. San Martín, F.J. Asensio, V. Aperribay, Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 38, October 2014, Pages 717-731, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.040>.
- [29] Panetto, H.: Meta-modèles et modèles pour l'intégration et l'interopérabilité des applications d'entreprises de production. In: Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nancy 1, 2006.
- [30] Chen, D., Dassisti, M., Elveaeter, B.: Enterprise interoperability framework and knowledge corpus – final report, Interop deliverable DI.3. May 2007.
- [31] Edward W. Frees, Richard A. Derrig, Glenn Meyers. Predictive modeling applications in actuarial science: Volume I: Predictive Modeling Techniques. 2014.
- [32] P.Daniel, Análisis de series temporales, Alianza ISBN 978-84-206-9128-2 84-206-9128-3, 2005.
- [33] C4ISR Architecture Working Group: Levels of Information Systems Interoperability (LISI). United States of America Department of Defense, Washington DC. March 30, 1998.
- [34] Sandels, C. A. Vehicle to Grid—Monte Carlo simulations for optimal Aggregator strategies. International Conference on Power System Technology, IEEE, (pp. 1-8). Monte Carlo, 2010.
- [35] Cipoletta Tomassian, Georgina, Gabriel Pérez Salas, Ricardo J. Sánchez. "Políticas integradas de infraestructura, transporte y logística; experiencias internacionales y

- propuestas iniciales”, en serie Recursos Naturales e Infraestructura N<sup>o</sup> 150, mayo 2010.
- [36] Kamboj, S. A. Exploring the formation of electric vehicle coalitions for vehicle-to-grid power regulation. AAMAS workshop on Agent Technologies for Energy Systems. ATES, 2010.
- [37] A.K. Jain and R. C. Dubes, Algorithms for clustering data, Prentice Hall, 1988.
- [38] E. Dijkstra, “A note on tow problems in connexion with graphs,” in Numerische Mathematik, 1959, pp. 269-271.
- [39] N.N.a.B.R.P.E. hrt, “A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths,” in IEEE Transactions on system science and cybernetics SSC4, vol. 2. , 1968, pp. 100-107.
- [40] A.V.Goldberg, “Point-to-point shortest path algorithms with preprocessing,” in SOFSEM, 2007.
- [41] H.K.a.R.W.A.V. Goldberg, “Better Landmarks within Reach.,” in In the 9th DIMACS Implementation Challenge: Shortest Paths., 2006.
- [42] H.K.a.R.W.A.V. Goldberg, “ Reach for A\*: Efficient Point-to-Point Shortest Path Algorithms.,” in In Proc. 7th International Workshop on Algorithm Engineering and Experiments., SIAM, 2006.
- [43] Bernus, P. “Business Evolution and Enterprise Integration-Concept Group”. Ed.Chapman Hall, 1997
- [44] Kaplan, S. M. (2009). Smart Grid. Electrical Power Transmission: Background and Policy Issues. The Capital.Net, Government Series. Pp. 1-42.
- [45] Smart Grid - The New and Improved Power Grid: A Survey; IEEE Communications Surveys and Tutorials 2011; X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang; doi:10.1109/SURV.2011.101911.00087.
- [46] Fluhr, J. and Ahlert, K.H. and Weinhardt, C. “A stochastic Model for Simulating the Availability of Electric Vehicle for Services to the Power Grid”. System Sciences (HICSS), 2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, pg 1-10, 2010.
- [47] Kempton, W. and Tomic, J. “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”. Journal of Power Sources 144, pg 268-279, 2005, Elsevier
- [48] ACEA position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles. Brussels, 4 May 2012
- [49] Di Giorgio A., Liberati F., Canale S., “Electric vehicles charging control in a smart grid: A model predictive control approach” , Control Engineering Practice, Elsevier, 22, 147-162 (2014), ISSN: 0967-0661, IF 1.814 ,

DOI:10.1016/j.conengprac.2013.10.005.

- [50] Oddi G., Pietrabissa A., Liberati F., Di Giorgio A., Gambuti R., Lanna A., Suraci V., Delli Priscoli F., “An any-sink energy-efficient routing protocol in multi-hop wireless sensor networks for planetary exploration”, *International Journal Of Communication Systems*, Special Issue “Energy Efficient Networking”, Wiley, 2015, ISSN: 1074-5351, IF 1.099, DOI: 10.1002/dac.3020, online.
- [51] Chen, D., Doumeingts, Guy: *European initiatives to develop interoperability of enterprise applications—basic concepts, framework and roadmap*. Elsevier. *Annual Reviews in Control*, Volume 27, Issue 2, 2003, Pages 153-162.
- [52] Legner, C., Wende, K.: *Towards an Excellence Framework for Business Interoperability*. BLED 2006 Proceedings, 29.
- [53] Chen, D., Doumeingts, G., Vernadat, F.: *Architectures for enterprise integration and interoperability: Past, present and future* Original Research Article *Computers in Industry*, Volume 59, Issue 7, September 2008, Pages 647-659.
- [54] E.R.A.-P.L.K.S. Massoud Amin, “Traffic Prediction and management via RBF neural nets and semantic control,” in *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Oxford, Blackwell Publisher, 1998, pp. 315-326.
- [55] Binney D. The knowledge management spectrum - understanding the KM landscape, *Journal of Knowledge Management*, 5, 1, 33-42. 2001
- [56] Boisot, M. H. *Knowledge Assets: Securing Competitive Advantage in the Information Economy*. Oxford. University Press, Oxford. 1998.
- [57] Borghoff, U., Schlichter, J. *Computer-Supported Cooperative Work: Introduction to Distributed Applications*. Springer, 2000.
- [58] Chalmeta, R., Campos, C., Grangel, R.. *Referente Architectures for Enterprise Integration*. *Journal of Systems and Software* 57 (3), 175-191. Elsevier, 2001.
- [59] Chalmeta, R., Grangel, R. *ARDIN extension for Virtual Enterprise Integration*. *Journal of Systems and Software* 67, 141-152. Elsevier, 2003.
- [60] Chalmeta, R. *Virtual Transport Enterprise Integration*. *Journal of Integrated Design and Process Science* 4 (4), 45-56. IOS Press Publishes, 2000.
- [61] Cornellá, Alfons. "Infonomia.com: La empresa es información". Ediciones Deusto, Noviembre 2000.
- [62] Coviello, A. et al. *Standardised KM Implementation Approach*. European KM Forum. IST Project No 2000 – 26393. 2001.
- [63] Davenport T., De Long, David, Beer, M. “Successful Knowledge Management Projects,” *Sloan Management Review*, Winter, 43-57. 1998
- [64] Davenport, T.; Prusak, L. “Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know”, Harvard Business School Press. 1998.

- [65] Deek F. P., McHugh J. A. Computer-Supported Collaboration with Applications to Software Development. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [66] Ellis, C.A., Gibbs, S.J. & Rein, G.L. "Groupware: Some Issues and Experiences" Readings in Groupware and Computer-Supported Cooperative Work. Morgan Kaufmann Publishers 2003, pp. 9-28
- [67] Fernández, E.; Montes, J.M.; Vázquez, C.J. "Tipología e implicaciones estratégicas de los recursos intangibles. Un enfoque basado en la teoría de recursos". Revista Asturiana de Economía, nº 11, pp. 159-183, 1998.
- [68] Lindvall, M. Rus, I. Sinha, S. Technology Support for Knowledge Management. Lecture Notes in Computer Science. Volume 2640. November 2003
- [69] Newman, B.D. and Conrad, K.W., KM Characterization Framework, The Knowledge Management Theory Papers, 1999. Also published in the Proc. of the Third Int. Conf. on Practical Aspects of Knowledge Management (PAKM2000) Basel, Switzerland, 30-31. Octubre. 2000.
- [70] Nonaka, I. Takeuchi, H. The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press, Inc. 1995.
- [71] Skyrme, D. Knowledge management solutions - the IT contribution. ACM SIGGROUP Bulletin Volume 19 , Issue 1. Pages: 34 – 39. 1998
- [72] Zack M.H. Developing a Knowledge Strategy California Management Review, Vol. 41, No. 3, Spring, pp. 125-145, 1999.
- [73] F. Fuchs., On Preprocessing the ALT-Algorithm. Master's Thesis, Institute for Theoretical Informatics, Faculty of Computer Science, University of Karlsruhe, 2010.
- [74] EU Commission. Communication of European commission to European parliament: an energy policy for Europe; 2007.
- [75] Di Giorgio, A.; Liberati, F.; Canale, S., "Optimal electric vehicles to grid power control for active demand services in distribution grids," Control & Automation (MED), 2012 20th Mediterranean Conference on, pp. 1309-1315, 3-6 July 2012. <http://dx.doi.org/10.1109/MED.2012.6265820>
- [76] Di Giorgio, A.; Liberati, F.; Canale, S., "IEC 61851 compliant electric vehicle charging control in smartgrids," Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on, pp. 1329-1335, 25-28 June 2013. <http://dx.doi.org/10.1109/MED.2013.6608892>
- [77] ISO/TC/SC 69 Electric road vehicles and electric industrial trucks. IEC 61851-1ed2.0 Electric vehicle conductive charging system– Part 1: General requirements; 2010.
- [78] IEC 62196-1 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets –

Conductive charging of electric vehicles – Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories

- [79]Di Giorgio, A.; Liberati, F., “Model Predictive Control-based approach for Electric Vehicles charging: power tracking, renewable energy sources integration and driver preferences satisfaction”, in *Plug-In Electric Vehicles in Smart Grid: Management and Control Strategies*, Springer, 2014.
- [80]Di Giorgio, A.; Liberati, F., Near real time load shifting control for residential electricity prosumers under designed and market indexed pricing models, *Applied Energy*, Volume 128, 1 September 2014, Pages 119-132, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.032>.
- [81]Di Giorgio, A.; Pimpinella, L.; Mercurio, A., "A feedback linearization based Wind turbine control system for ancillary services and standard steady state operation," *Control & Automation (MED)*, 2010 18th Mediterranean Conference on , vol., no., pp.1585,1590, 23-25 June 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/MED.2010.5547821>
- [82]Masoum, A., Deilami, S., Masoum, M., Abu-Siada, A., Islam, S., July 2014. Online coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grid with distributed wind power generation systems. In: *PES General Meeting - Conference Exposition, 2014 IEEE*. pp. 1–5.
- [83]Palensky, P., Dietrich, D., Aug 2011. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* 7 (3), 381–388.
- [84]Peeters, E., Belhomme, R., Batlle, C., Bouard, F., Karkkainen, S., Six, D., Hommelberg, M., June 2009. Address: Scenarios and architecture for active demand development in the smart grids of the future. In: *Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on*. pp. 1–4.
- [85]Pieltain Fernandez, L., Roman, T., Cossent, R., Domingo, C., Frias, P., Feb2011. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *Power Systems, IEEE Transactions on* 26 (1), 206–213. 865
- [86]Pudjianto, D., Ramsay, C., Strbac, G., March 2007. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. *Renewable Power Generation, IET* 1 (1), 10–16.
- [87]Putrus, G., Suwanapingkarl, P., Johnston, D., Bentley, E., Narayana, M., Sept2009. Impact of electric vehicles on power distribution networks. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*. pp. 827–831.
- [88]Rawlings, J., Angeli, D., Bates, C., Dec 2012. Fundamentals of economic model predictive control. In: *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on*. pp. 3851–3861.
- [89]Tremblay, O., Dessaint, L.-A., Dekkiche, A.-I., Sept 2007. A generic battery model

- for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In: Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE. pp. 284–289.
- [90] Walling, R., Saint, R., Dugan, R., Burke, J., Kojovic, L., July 2008. Summary of distributed resources impact on power delivery systems. Power Delivery, IEEE Transactions on 23 (3), 1636–1644.
- [91] Burkholder D. y Protter P. Joseph Leo Doob, 1910-2004. Stochastic Processes and their Applications, Vol. 115, 1061-1072, 2005.
- [92] Kuo H. Introduction to stochastic integration. Springer, 2006.
- [93] Chung K. L. Markov chains with stationary transition probabilities (Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften in Einzeldarstellungen Band 104). Springer, 1960.
- [94] Bardossy, A. and Plate, E. J. (1991). Modeling daily rainfall using a semi-Markov representation of circulation pattern occurrence. Journal of Hydrology, 122, 33-47.
- [95] Maddala G S. Econometrics. New York: McGraw-Hill, 1977. 516 p.
- [96] Rajaraman, A., Leskovec, J., Ullman, J.D. (2013). Mining of Massive Datasets.
- [97] Nowinski, J. L. (1981). Infinite-Dimensional Euclidean Spaces. In Applications of Functional Analysis in Engineering (pp. 45-57). Springer US.
- [98] Kelley, John L. (1975). General Topology. Springer-Verlag. ISBN 0-387-90125-6.
- [99] Cannon, R. L., Dave, J. B., Bezdek, J. C. (1986). Efficient Implementation of the Fuzzy c-Means Clustering Algorithms.
- [100] Bezdek, J. C., Ehrlich, R., Full, W. (1984). FCM: The Fuzzy c-Means Clustering Algorithm.
- [101] Munkres, James (1999). Topology. Prentice-Hall. ISBN 0-13-181629-2.
- [102] Charu C. Aggarwal, Stephen C. Gates, Philip S. Yu. On the merits of building categorization systems by supervised clustering, Proceedings of the fifth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Pages 352 – 356, 1999.
- [103] Aldrich, John (1997). ‘R.A. Fisher and the making of maximum likelihood. 1912–1922’. Statistical Science 12 (3): 162-176. doi:10.1214/ss/1030037906. MR 1617519.
- [104] Cipoletta Tomassian, Georgina. “Desafíos actuales de las políticas de infraestructura y transporte en América Latina y el Caribe”, Documento de Trabajo de USI/DRNI/CEPAL, Santiago de Chile. 2011.
- [105] Correa, Germán. “Políticas integradas de logística y movilidad: el concepto de comodalidad”, borrador de documento interno de trabajo de USI/DRNI/CEPAL, Santiago de Chile, julio 2011.

- [106] Janssen, J. A. Methodology and Computing in Applied Probability. In J. a. Janssen, Numerical Solution of non-Homogeneous Semi-Markov Processes in Transient Case (pp. 271-293). Springer. 2001.
- [107] Ning Un, J. Z. Particle Swarm Optimization-Based RBF Neural Network Load Forecasting Model. Computer Research and Development (ICCRD), (pp. 82-85). Shangai, China, 2008.
- [108] Quinn, C. A. The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services. Journal of Power Sources, (pp. 1500-1509). 2010.
- [109] XIE FeiXiang, H. M. Research on Electric Vehicle Charging Station Load Forecasting. IEEE Advanced Power System Automation and Protection (APAP). ISBN: 978-1-4244-9622-8. 2011.
- [110] N. Tcholtchev, L. Farid, F. Marienfeld, I. Schieferdecker, B. Dittwald and E. Lapi, "On the interplay of open data, cloud services and network providers towards electric mobility in smart cities," Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops), 2012 IEEE 37th Conference on, Clearwater, FL, 2012, pp. 860-867.
- [111] N. Huerta-Medina and E. L. Corominas, "A set of software tools for management and simulation of a Lighting Smart Grid," New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), 2013 International Conference on, Gijon, 2013, pp. 1-6.
- [112] M. Roscia, M. Longo and G. C. Lazaroiu, "Smart City by multi-agent systems," Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2013 International Conference on, Madrid, 2013, pp. 371-376.
- [113] B. Ponte, D. de la Fuente, R. Pino and P. Priore, "Multiagent system for intelligent Water Demand Management," New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), 2013 International Conference on, Gijon, 2013, pp. 1-7.
- [114] R. Giesecke, "The electric mobility business ecosystem," Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on, Monte-Carlo, 2014, pp. 1-13.
- [115] S. Misbahuddin, J. A. Zubairi, A. Saggaf, J. Basuni, S. A-Wadany and A. Al-Sofi, "IoT based dynamic road traffic management for smart cities," 2015 12th International Conference on High-capacity Optical Networks and Enabling/Emerging Technologies (HONET), Islamabad, 2015, pp. 1-5.
- [116] S. Djahel, R. Doolan, G. M. Muntean and J. Murphy, "A Communications-Oriented Perspective on Traffic Management Systems for Smart Cities: Challenges and Innovative Approaches,". IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 1, pp. 125-151, Firstquarter 2015.

- [117] Q. Ploussard, L. Olmos, A. Ramos, L. Söder, A novel power grid reduction technique for a transmission expansion planning problem using a weighted signed graph model, 25th Anniversary Conference of the ACO Program - ACO25. Atlanta, Estados Unidos de América, 09-11 Enero 2017

## 2 Referencias web

- [A] Programa H2020 Europa. <http://www.es horizonte2020.es/>
- [B] Cordis Europa I+D+i. [http://cordis.europa.eu/programme/rcn/664087\\_es.html](http://cordis.europa.eu/programme/rcn/664087_es.html),  
<http://cordis.europa.eu/projects>
- [C] Proyecto INTEROP: Interoperability research for networked enterprises applications and software. [http://cordis.europa.eu/project/rcn/71148\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/71148_en.html)
- [D] Proyecto SMARTV2G. <http://smartv2g.eu/>,  
[http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/99306_en.html)
- [E] Proyecto MOBINCITY. <http://mobincity.eu/>,  
[http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/104177_en.html)
- [F] Proyecto FISPACE. <http://www.fispace.eu/>,  
[http://cordis.europa.eu/project/rcn/110987\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/110987_en.html)
- [G] Perfil LinkedIn Víctor Fernández Pallarés. <https://es.linkedin.com/in/vfernandezpa>
- [H] <https://www.b2match.eu/ict2015/participants/251>
- [I] MatSim – Multi-Agent based simulation [online]. <http://www.matsim.org/>, acceso 20 Junio 2015.
- [J] OpenStreetMap contributors. Open Street Map (OSM) database, and export tools [online]. <http://www.openstreetmap.com>, acceso 20 Junio 2015.
- [K] Framework for cooperative driver assistance systems with Car2X communication: ezC2X. <https://www.ezcar2x.fraunhofer.de/>
- [L] Gestore Mercati Energetici, GME. <http://www.mercatoelettrico.org/it/>

## Apéndice. Listado de publicaciones

A continuación se presenta el listado de publicaciones desarrolladas.

1. Víctor Fernández Pallarés. ‘Interoperability for Enterprise Software and Applications: Proceedings of the Workshops and the Doctorial Symposium of the Second IFAC/IFIP I-ESA International Conference: EI2N, WSI, IS-TSPQ 2006’. Published Online<sup>§§§§§</sup>: 22 Enero 2010. DOI: 10.1002/9780470612200.ch34
2. Chalmeta, R., Fernández, V., SEMF Testing Methodology for an Inter-eBusiness Software development (ACOS'06). 5th WSEAS International Conference on Applied Computer Science. Hangzhou (156): 16-04-2006. Ed. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). ISBN 9608457432.
3. Zuccaro L., Di Giorgio A., Fernandez Pallares V., Ratej J., “Smart vehicle to grid interface project: Electromobility management system architecture and field test results”, IEEE International Electric Vehicle Conference IEVC14, IEEE, pp. 1-7, Firenze, IT, December 17 - 19, 2014, DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056175. ISBN: 978-1-4799-6075-0

---

<sup>§§§§§</sup> <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470612200.ch34/summary>