

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación



**OPTIMIZACIÓN DE LA  
MOVILIDAD ELÉCTRICA DE ÚLTIMA  
MILLA CON ENERGÍAS  
RENOVABLES**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Manuel Fuentes Gomariz**

Máster Universitario en Sistemas Electrónicos

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE  
TELECOMUNICACIÓN

**Doctorado en Ingeniería de Sistemas Electrónicos**

**OPTIMIZACIÓN DE LA  
MOVILIDAD ELÉCTRICA DE ÚLTIMA  
MILLA CON ENERGÍAS  
RENOVABLES**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Manuel Fuentes Gomariz**

Máster Universitario en Sistemas Electrónicos

Bajo la dirección de:

Dr. José Manuel Moya Fernández

Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Madrid, 2024

Título: OPTIMIZACIÓN DE LA MOVILIDAD ELÉCTRICA DE ÚLTIMA MILLA  
CON ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Manuel Fuentes Gomariz

Programa de Doctorado: Doctorado en Ingeniería de Sistemas Electrónicos

Dirección de tesis:

Dr. José Manuel Moya Fernández (Director)

Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

*Para mí hija y mi mujer que al igual que los átomos los tres  
formamos una molécula con un objetivo común en este mundo*

# Agradecimientos

---

A mi esposa y mi hija, por estar siempre a mi lado y transmitirme la energía necesaria para dar el paso definitivo en la culminación de este trabajo de tesis.

A mi director de tesis, Dr. José Manuel Moya, por su continuo apoyo y valiosa retroalimentación en este trabajo multidisciplinar que ha constituido esta tesis.

A todos los agentes públicos que han participado a lo largo del desarrollo del proyecto GESMOL, como CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), la empresa Global Forecasters S.L. (spin-off de CIEMAT), y a las demás empresas y personas que han contribuido en este esfuerzo.

Finalmente, al Dr. Jesús Fraile Ardanuy, con quien colaboré en el proyecto VE2, que, aunque interrumpido abruptamente por causas externas, permitió materializar los estudios y trabajos que llevamos a cabo hasta el último momento.

# Abstract

---

Transportation with internal combustion vehicles is one of the largest sources of air pollution in urban areas. In this thesis work, work has been carried out throughout the entire study to verify the suitability of the use of light electric vehicles so that they become a key element in modal transport in cities.

With the experience acquired in the direction of the GESMOL project "Impact of Energy Management on the Development of LEVS as an Alternative Mode of Transport in Urban and Metropolitan Mobility Solutions" focused on verifying the viability of different mobility systems of the employees in a work center with light electric vehicles, where experimental data was obtained from both the energy area and the social area, thanks to the design and development of prototypes adapted to the topic where information and to constant feedback from employees based on surveys and interviews throughout the study.

Also to the participation in the VE2 project "Intelligent Building Energy Management System using Electric Vehicles", where the Polytechnic University of Madrid also participated, although due to issues beyond the control of Public Research Organizations the project ended abruptly, although in the time it lasted it was possible to study in the area of type B segment electric vehicles and integration energy with buildings, the distribution network and its batteries.

Finally, as a case study, and with feedback from the projects and contributions made, an application with light etheric vehicles was detected in mobility systems or bicycle loan systems in urban areas to be able to respond to transportation needs. last mile, focusing on optimally resolving employee trips to the workplace from a public transport node and vice versa, with the ability to be energy self-sufficient with renewable energy using

photovoltaic energy integrated into buildings (BIPV), which results in a mobility system with a zero-emission system that does not need electrical energy from the distribution network to operate.

Specifically, the system of shared electric bicycles between a public transport center and a work center is mathematically modeled and optimized to minimize the number of trips of the electric bicycle delivery vehicle between parking lots to satisfy demand, while minimizing consumption total energy of the system.

The entire mobility system works entirely with energy generated by BIPV and the results show that for the worst day of the year in solar radiation, the batteries of electric vehicles end the day with energy stored in their batteries to start a new day. The proposed system manages photovoltaic energy using only the batteries of electric vehicles, without requiring supporting energy storage devices. Using experimental data from the aforementioned projects, a reuse rate of 7.6 people per electric bicycle has been achieved.

El transporte con vehículos de combustión interna representa una de las principales fuentes de contaminación en las zonas urbanas. En esta tesis se ha explorado la idoneidad del uso de vehículos eléctricos ligeros como una pieza clave en el transporte modal urbano.

A partir de la experiencia en la dirección del proyecto GESMOL, “Impacto de la Gestión Energética en el Desarrollo de LEVs como Modo de Transporte Alternativo en Movilidad Urbana y Metropolitana”, se ha comprobado la viabilidad de distintos sistemas de movilidad para empleados utilizando vehículos eléctricos ligeros. Este proyecto proporcionó datos experimentales tanto en el ámbito energético como social, gracias al diseño y desarrollo de prototipos adaptados a la temática y la constante retroalimentación mediante encuestas y entrevistas a lo largo del estudio.

Asimismo, se participó en el proyecto VE2, “Sistema Inteligente de Gestión Energética del Edificio utilizando Vehículos Eléctricos”, en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid. Aunque el proyecto finalizó abruptamente por causas externas, se logró estudiar la integración energética de vehículos eléctricos tipo segmento B con edificios y la red de distribución, así como la gestión de sus baterías.

Como caso de estudio, se exploró la aplicación de vehículos eléctricos ligeros en sistemas de movilidad o préstamos de bicicletas en zonas urbanas para satisfacer las necesidades del transporte de última milla. El sistema propuesto se basa en la autosuficiencia energética mediante energías renovables, utilizando energía fotovoltaica integrada en edificios BIPV. Este modelo resultó en un sistema de movilidad con cero emisiones que no requiere energía de la red de distribución para operar.

El sistema de bicicletas eléctricas compartidas se optimizó matemáticamente para minimizar el número de viajes del vehículo eléctrico de

reparto entre estaciones de aparcamiento de las bicicletas eléctricas, asegurando una mayor eficiencia energética. Los resultados muestran que, incluso en los días con menor radiación solar, las baterías de los vehículos eléctricos logran almacenar suficiente energía para comenzar un nuevo día. Este sistema gestiona la energía fotovoltaica utilizando exclusivamente las baterías de los vehículos eléctricos, sin la necesidad de dispositivos de almacenamiento adicionales. Los datos experimentales de los proyectos evaluados permitieron lograr una tasa de reutilización de 7,6 personas por bicicleta eléctrica.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iv</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Abreviaturas y Acrónimos</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivación.....	1
1.2. Contexto.....	7
1.3. Problema de investigación.....	11
1.4. Objetivos .....	17
1.5. Metodología, Estructura y Medios de la Tesis .....	22
1.5.1. Estructura .....	24
1.5.2. Medios.....	26
1.6. Contribuciones .....	27
1.7. Publicaciones .....	31
<b>2. Estado del Arte</b> .....	<b>35</b>
2.1. Sistemas de movilidad eléctrica .....	36
2.2. Vehículos Eléctricos.....	44
2.3. Almacenamiento de energía .....	49
2.4. Estaciones de Recarga .....	51
2.5. Energía Fotovoltaica.....	57
<b>3. Metodología, Materiales y Métodos</b> .....	<b>61</b>

3.1. Metodología.....	62
3.1.1. Métodos y Materiales .....	64
3.2. Vehículos eléctricos ligeros.....	67
3.2.1. Prototipo para obtener el par motor .....	70
3.2.2. Prototipo estudio del almacenamiento energético .....	74
3.2.3. Prototipo de estación de recarga de bicicletas eléctrica .....	79
3.3. Diagnóstico de Movilidad-Social.....	84
3.3.1. Aplicación para la gestión de los datos del estudio. ....	89
3.3.2. Monitorización en trayecto de las bicicletas eléctricas .....	91
3.3.3. Gestión del sistema de movilidad de las bicicletas eléctricas.....	96
<b>4. Datos Empíricos .....</b>	<b>99</b>
4.1. Evaluación Vehículos eléctricos ligeros.....	99
4.1.1. dDemanda de energía .....	102
4.1.2. Estudio del almacenamiento de energía.....	107
4.1.3. Estudio de la estación de recarga .....	116
4.2. Evaluación de Movilidad .....	119
4.3. Sistema Movilidad Commuter.....	127
4.3.1. Condiciones de contorno .....	128
4.3.2. Diseño de trayectos Commuter .....	135
4.3.3. Recorridos caso Commuter .....	143
<b>5. Parámetros de Movilidad .....</b>	<b>148</b>
5.1. Parámetros energéticos en los desplazamientos.....	148
5.1.1. Parámetros energéticos caso Commuter.....	148
5.1.2. Parámetros de la estación de recarga.....	155
5.2. Parámetros de los Sistemas de Movilidad .....	156
5.2.1. Parámetros Sistemas de Movilidad Internos .....	157
5.2.2. Parámetros Sistema Movilidad Commuter .....	163
<b>6. Movilidad Última Milla con Energías Renovables.....</b>	<b>166</b>
6.1. Parámetros Movilidad-Social .....	166
6.1.1. Operativa de los Sistemas de Movilidad .....	170

6.2. Modelo y predicción del consumo energético del sistema .....	174
6.3. Estudio de la recarga con energía fotovoltaica .....	183
6.4. Optimización y Restricciones .....	188
6.5. Resultados y Discusión.....	194
<b>7. Conclusiones y Trabajo Futuro.....</b>	<b>202</b>
7.1. Resumen de los trabajos realizados .....	202
7.2. Principales conclusiones .....	204
7.3. Trabajo Futuro.....	207
<b>Referencias .....</b>	<b>215</b>

# Lista de Figuras

---

Figura 1. Calentamiento antropogénico 1850-1900 y 2010-2019 [1].....	2
Figura 2. Emisiones GEI antropogénicas anuales totales [2] .....	2
Figura 3. Emisiones GEI por sectores económico [7] .....	4
Figura 4. Reducción emisiones GEI entre 1990 y 2012 [14] .....	6
Figura 5. Alemania, 80% de generación con renovables para 2050 [14] .....	6
Figura 6. Menor coste de tecnologías que mitigan el cambio climático [1] .	12
Figura 7. Sombras en los PV de los parkings de bicicletas [21] .....	13
Figura 8. Camión de balanceo de bicicletas eléctricas biciMAD .....	14
Figura 9. Operativa de balanceo de bicicletas eléctricas biciMAD.....	14
Figura 10. Estadísticas plataforma web biciMAD .....	15
Figura 11. Operarios repartiendo bicicletas eléctricas con camioneta.....	39
Figura 12. Sistema compartido de e-bikes en (UTK) EEUU [25].....	41
Figura 13. Evolución ventas de vehículos eléctricos ligeros en China [40].	42
Figura 14. Propuestas infraestructuras urbanas para movilidad [45] .....	43
Figura 15. Estimación coste fabricación Vs peso Vs autonomía [48] .....	45
Figura 16. Influencia del peso sobre la potencia frente a la velocidad.....	47
Figura 17. Baterías de respaldo para la red eléctrica [56] .....	50
Figura 18. Flujos de energía en u sistema aislado H2V .....	51
Figura 19. Instalación de la Microgrid de [26] .....	52
Figura 20. Estación de recarga PV para LEV “Electrocampus” [73].....	53
Figura 21. Parking BiciMAD con carga PV .....	53
Figura 22. ESS y su interacción con el “Capabus” [74].....	54
Figura 23. Coche solar HERMES construido para Phaethon 2004.....	55

Figura 24. Localización horaria de una flota de EV.....	56
Figura 25. Energía almacenada en EVs a la red eléctrica [81] .....	56
Figura 26. Generación PV vs el consumo y el soporte de la red [88].....	58
Figura 27. Autoconsumo, Bat. EV caso 1, consumo hogar [93] .....	59
Figura 28. Autoconsumo, Bat. EV caso 2, consumo hogar [93] .....	59
Figura 29. Edificio con integración fotovoltaica en su fachada .....	60
Figura 30. Metodología y fases del proyecto.....	63
Figura 31. Bicicletas eléctricas seleccionadas .....	68
Figura 32. Prototipo para obtener el Par motor.....	70
Figura 33. Aplicación LabVIEW® para el prototipo Par motor .....	71
Figura 34. Señales controlador a distintas velocidades motor DC.....	72
Figura 35. Señales controlador y asistencia al pedaleo en el motor AC .....	73
Figura 36. Señales controlador a distintas velocidades motor AC .....	74
Figura 37. Diagrama de la bancada de estudio de baterías simple .....	75
Figura 38. Diagrama ampliación de la bancada de estudio de baterías .....	75
Figura 39. Diagrama evolución de la bancada de baterías.....	76
Figura 40. Aplicación para el ensayo en la bancada de baterías.....	77
Figura 41. Mejoras App ensayo de la bancada de baterías.....	77
Figura 42. Diseño del circuito de integración de la bancada baterías .....	78
Figura 43. Diseño PCB del circuito de la bancada baterías .....	79
Figura 44. Ubicación estación de recarga de bicicletas eléctricas .....	80
Figura 45. Foto de la estación de recarga de las bicicletas eléctricas .....	80
Figura 46. Diagrama de conexiones de la estación de recarga .....	81
Figura 47. Aplicación para la monitorización de la estación de recarga.....	81
Figura 48. Diagrama de conexiones de la estación de recarga .....	82

Figura 49. Evolución de la monitorización de la estación de recarga .....	83
Figura 50. Ubicación CIEMAT y la Ciudad Universitaria .....	85
Figura 51. Mapa de pendientes CIEMAT en porcentaje .....	86
Figura 52. Presentación de las bicicletas eléctricas a los empleados.....	87
Figura 53. Actualización de la consulta a la base de datos desde la web ...	90
Figura 54. Resultado de una consulta a la base de datos desde la web .....	91
Figura 55. Circuito PIC® para medidas de bicicleta eléctrica .....	92
Figura 56. Esquema PCB del circuito impreso PIC y GPRS/GPS.....	93
Figura 57. Imagen del prototipo Módulo GPRS/GPS.....	94
Figura 58. Esquema y diseño PCB de la “mochila” GPS/GPRS .....	95
Figura 59. Imagen del desarrollo de la “mochila” GPS/GPRS.....	96
Figura 60. Captura de la pantalla de inicio de la Web .....	97
Figura 61. Acceso al foro y a la solicitud BIPA .....	98
Figura 62. Resultado bancada motores BIPA1 y BIPA3 .....	105
Figura 63. Resultado bancada motor BIPA 2.....	106
Figura 64. Resultado bancada motores de varias BIPA .....	106
Figura 65. Gráfico de ciclado acelerado de una Batería Pb-acido .....	108
Figura 66. Gráfico de ciclado acelerado de una Batería Litio-Ion.....	108
Figura 67. Gráfica evolución capacidad batería de plomo .....	110
Figura 68. Gráfica del ciclado acelerado de una Batería Litio-Ion.....	110
Figura 69. Número de ciclos para cada tipo de batería .....	111
Figura 70. Gráfica de la Batería1 de litio-ion 36 V 10 Ah .....	112
Figura 71. Gráfica de la Batería2 de litio-ion 36V 10Ah .....	113
Figura 72. Gráfica de la Batería6 de plomo-ácido 24V 12Ah .....	114
Figura 73. Gráfica de la Batería3 de plomo-ácido 24V 12Ah .....	115

Figura 74. Gráficas de resultados totales de cada BIPA (1, 2 y 3) .....	118
Figura 75. Mapa situación de las entradas y de edificios del CIEMAT ....	120
Figura 76. Mapa Curvas de niveles en el CIEMAT .....	122
Figura 77. Elección de la muestra .....	125
Figura 78. Concentración media anual 2006 de NO <sub>2</sub> en Madrid.....	129
Figura 79. Concentración media anual 2024 de NO <sub>2</sub> en Madrid.....	129
Figura 80. Emisiones aproximadas de CO <sub>2</sub> por medio de transporte.....	130
Figura 81. Mapa velocidades medias de vehículos a motor en Madrid.....	132
Figura 82. Consumo de energía por kilómetro y pasajero .....	133
Figura 83. Comparativa entre diferentes tipos de transporte.....	134
Figura 84. Carriles bici distribuidos por el territorio de Madrid .....	135
Figura 85. Mapa de los radios de acción Commuter .....	136
Figura 86. Recorrido Commuter0 .....	137
Figura 87. Pendientes en el recorrido Commuter0 .....	138
Figura 88. Cargas del recorrido Commuter0 de las BIPA 1, 2 y 3 .....	140
Figura 89. Recorrido Commuter1 .....	144
Figura 90. Pendientes en el recorrido Commuter1 .....	144
Figura 91. Recorrido Commuter2 .....	145
Figura 92. Pendientes en el recorrido Commuter2 .....	145
Figura 93. Recorrido Commuter3 .....	146
Figura 94. Pendientes en el recorrido Commuter3 .....	146
Figura 95. Diagrama de los parámetros del recorrido Commuter0 .....	149
Figura 96. Diagrama de las cargas realizadas Commuter0 .....	150
Figura 97. Parámetros totales BIPA1 y BIPA4 .....	152
Figura 98. Parámetros medios por recorrido Commuter1 y Commuter2 .....	154

Figura 99. Comparativa consumos y uso.....	155
Figura 100. Modo de acceso del personal al centro de trabajo .....	168
Figura 101. Trayecto nuevo sistema de movilidad.....	175
Figura 102. Distribución de llegadas del personal del CIEMAT .....	176
Figura 103. Parking de 25 bicicletas eléctricas BiciMAD.....	177
Figura 104. Trayecto de la Pickup EV para reponer bicicletas eléctricas	178
Figura 105. Grafica de parámetros energéticos de U75 en la BIPA7 .....	181
Figura 106. Grafica de parámetros energéticos de U122 en la BIPA 7 ....	181
Figura 107. Edificio 42, antes y después BIPV ©CIEMAT.....	183
Figura 108. Potencial fotovoltaico en España PVGIS.....	184
Figura 109. Diagrama módulos BIPV en fachadas Sur y Este.....	185
Figura 110. Producción fotovoltaica promedio mensual .....	187
Figura 111. Energía solar estimada generada el día de diciembre .....	187
Figura 112. Sistema de movilidad de bicicletas eléctricas propuesto .....	193
Figura 113. Consumo de energía por hora del sistema propuesto .....	197
Figura 114. Demanda energía del sistema vs energía solar disponible...198	
Figura 115. Proceso de carga del sistema.....	199
Figura 116. Carga y descarga del pickup EV y evolución SOC .....	200
Figura 117. Carga y descarga de bicicletas eléctricas y evolución SOC...201	
Figura 118. Diagrama de bloques del sistema identificación de usuario..207	
Figura 119. Diseño general del remolque.....	208
Figura 120. Diseño de la pieza de cerrojo .....	209
Figura 121. Vistas del sistema de cerrojo.....	209
Figura 122. Esquema eléctrico cerrojos .....	210
Figura 123. Cuadro recarga del remolque.....	211

Figura 124. Esquema eléctrico cuadro recarga del remolque.....	211
Figura 125. Vista general del sistema Movilidad BIPA .....	213
Figura 126. Imagen aérea del sistema Movilidad BIPA.....	214

# Lista de Tablas

---

Tabla 1. Suministro de energía, medidas de mitigación.....	9
Tabla 2. Transporte, medidas de mitigación .....	10
Tabla 3. Asentamientos e infraestructura, medidas de mitigación.....	10
Tabla 4. Evaluación de la propuesta, medidas de mitigación.....	17
Tabla 5. Opinión usuarios sobre sistema movilidad bicicleta eléctrica.....	43
Tabla 6. Resultados corrientes instantáneas .....	103
Tabla 7. Información climatológica sobre Madrid.....	131
Tabla 8. Pesos a desplazar en el recorrido Commuter0 .....	139
Tabla 9. Constantes energéticas en el recorrido Commuter0.....	139
Tabla 10. Parámetros de carga del recorrido Commuter0.....	141
Tabla 11. Parámetros energéticos del recorrido Commuter0 .....	149
Tabla 12. Densidades energéticas teóricas recorrido Commuter0 .....	151
Tabla 13. Días acumulados por bicicletas eléctricas .....	152
Tabla 14. Pesos a desplazar en los recorridos Commuter1 y 2.....	153
Tabla 15. Modo de acceso del personal al centro de trabajo CIEMAT .....	169
Tabla 16. Características principales del sistema de atención personal...	171
Tabla 17. Características principales de los sistemas automáticos .....	172
Tabla 18. Características de los parques comunitarios de bicicletas .....	173
Tabla 19. Sistema de movilidad Última Milla .....	174
Tabla 20. Especificaciones de bicicletas eléctricas .....	179
Tabla 21. Consumos medios datos experimentales [17] .....	179
Tabla 22. Recorridos se realizados por U75 y U122.....	180
Tabla 23. Consumo eléctrico de dos usuarios en una misma ruta .....	182

Tabla 24. Estimación promedio producción eléctrica PV kWh .....	186
Tabla 25. Parámetros del modelo de optimización.....	189
Tabla 26. Variables enteras del modelo de optimización.....	190
Tabla 27. Energía demandada por el sistema propuesto.....	196

# Abreviaturas y Acrónimos

---

UPM	Universidad Politécnica de Madrid
ETSIT	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación
LSI	Laboratorio de Sistemas Integrados perteneciente al Departamento de Ingeniería Electrónica, de la ETSIT
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
INNPACTO	Programa Nacional de Cooperación Público-Privada para la realización conjunta de proyectos de I+D+i
GESMOL	Impacto de la Gestión Energética sobre el Desarrollo de los LEVS como Modo de Transporte Alternativo en las Soluciones de Movilidad Urbana y Metropolitana. Proyecto financiado por parte del Ministerio de Fomento en base al Séptimo Programa Marco de la Unión Europea (FP7/2007-2013) en virtud del acuerdo de subvención nº270833
VE2	Sistema Inteligente de Gestión Energética del Edificio utilizando Vehículos Eléctricos. Proyecto del Programa Nacional de Cooperación Público-Privada, Subprograma INNPACTO (IPT-2012-1072-120000)
V2B	Vehicle to Building
BIPV	Energía Fotovoltaica Integrada en Edificios (Integrated Photovoltaics)
EV	Electric Vehicle
LEV	vehículos eléctricos ligeros
BIPA	Bicicleta Inteligente de Pedaleo Asistido
ESS	Energy Storage System

PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System Interactive Maps
BMS	Sistema de Gestión de Batería (Battery Management System)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
PIC	Peripheral Interface Controller
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
PCB	Printed Circuit Board
SOC	State Of Charge

# ***1. Introducción***

En este capítulo de introducción se presenta la motivación, el contexto y el problema de investigación del trabajo desarrollado en esta tesis. Además, se ofrece una visión general de la estructura del documento y se destacan las principales contribuciones de la misma

## ***1.1. Motivación***

*“Las actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero, han causado inequívocamente el calentamiento global, con una temperatura superficial global en 2011-2020 que superó el 1,1°C por encima de 1850-1900. Las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero han seguido aumentando, con contribuciones históricas y actuales desiguales derivadas del uso insostenible de la energía, el uso y el cambio de uso de la tierra, los estilos de vida y los patrones de consumo y producción entre regiones, entre países y dentro de ellos entre los individuos...”*

*La temperatura de la superficie mundial fue 1,09°C (0,95 a 1,20) °C más alta en 2011-2020 que en 1850-1900, con aumentos mayores sobre la tierra 1,59°C [1,34 a 1,83]°C que sobre el océano 0,88°C (0,68 a 1,01) °C. La temperatura de la superficie global en las dos primeras décadas del siglo XXI (2001-2020) fue 0,99°C (0,84 a 1,10) °C más alta que la del período 1850-1900.*

*La temperatura de la superficie global ha aumentado más rápidamente desde 1970 que en cualquier otro período de 50 años durante al menos los últimos 2000 años.” [1]*

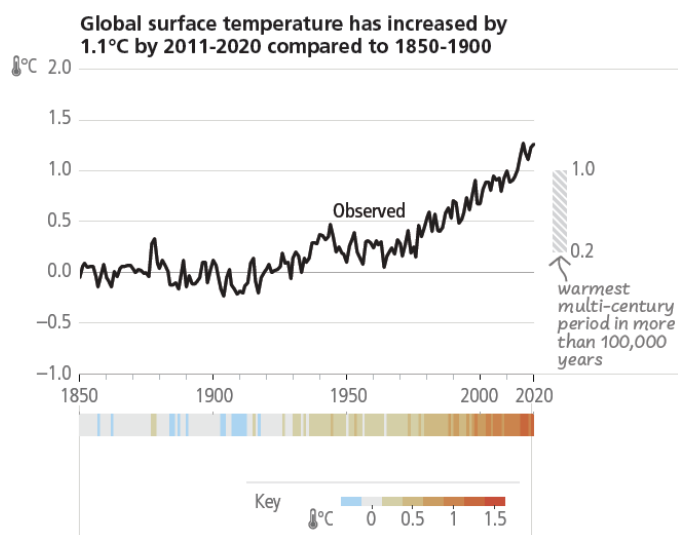


Figura 1. Calentamiento antropogénico 1850-1900 y 2010-2019 [1]

Uno de los agentes que está acelerando el calentamiento global es la emisión de gases de efecto invernadero GEI por parte del ser humano. Ya no se trata solo de la gravedad que tendrá el calentamiento global a largo plazo, sino que, a corto plazo, estamos experimentando un aumento insostenible de gases, como el dióxido de nitrógeno NOx, que son perjudiciales para la salud en las grandes metrópolis.

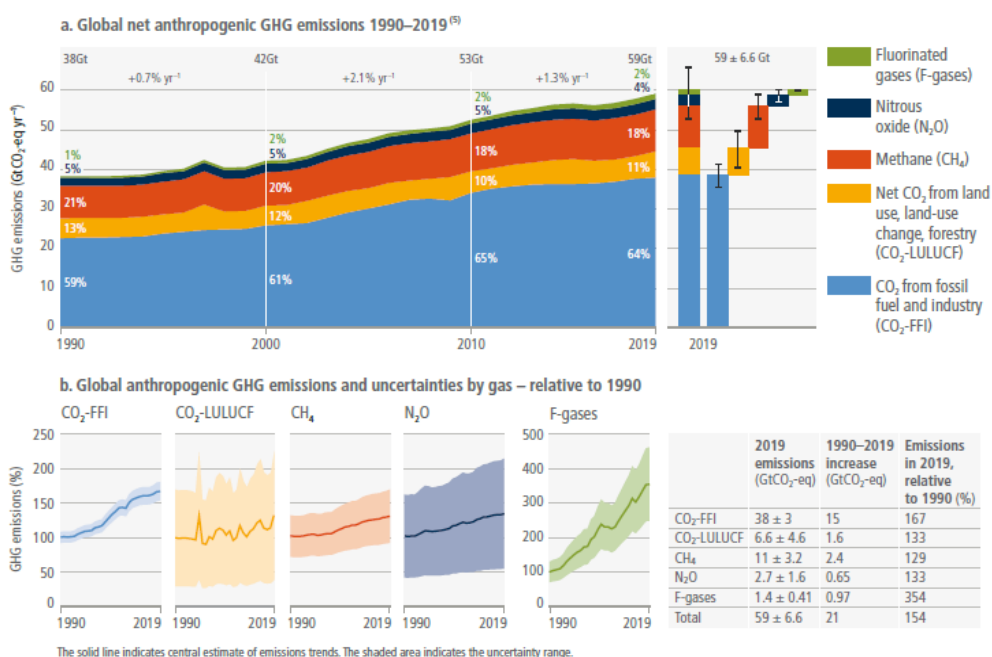


Figura 2. Emisiones GEI antropogénicas anuales totales [2]

En la Figura 2 las emisiones GEI debidas a las actividades humanas están representadas en Giga tonelada de CO<sub>2</sub>-equivalente al año, GtCO<sub>2</sub>-eq/año.

Desde que en el 11 de diciembre de 1997 la gran mayoría los países industrializados se comprometieron en reducir los gases de efecto invernadero en el protocolo de Kioto, la gran mayoría de estos países están tratando de reducir su consumo total de combustibles fósiles con el objetivo principal de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero GEI, que son responsables principalmente del calentamiento global, el cambio climático y el deterioro de la calidad del aire en las ciudades [3].

En septiembre de 2016, 27 países, que representan casi el 40% de las emisiones mundiales de GEI (incluyendo China y Estados Unidos), ratificaron el Acuerdo de París para mantener un aumento de la temperatura global por debajo de los dos grados Celsius por encima de los niveles preindustriales durante el siglo actual [4] [5], porque por encima de esa cifra, el cambio climático empieza a ser cada vez más peligroso para el ser humano y para la supervivencia del planeta. En ese mismo acuerdo, se comprometieron a continuar los esfuerzos para limitar el aumento a los 1,5 grados.

Los datos recogidos en el informe de la Organización Meteorológica Mundial [6] indican que, para cada año comprendido entre 2024 y 2028, se prevé que la temperatura media cerca de la superficie del conjunto del planeta sea entre 1,1 °C y 1,9 °C superior al período de referencia de 1850-1900.

El transporte es uno de los sectores económicos que intervinieron en alrededor de un 14% de las emisiones de efecto invernadero en el año 2010.

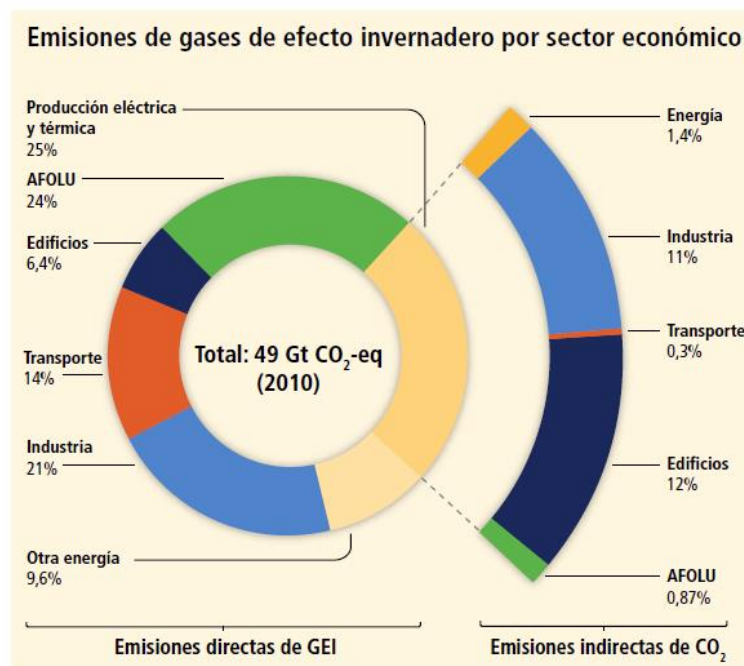


Figura 3. Emisiones GEI por sectores económico [7]

En la Figura 3, los datos de las emisiones de la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU) comprenden las emisiones terrestres de CO<sub>2</sub> debidas a incendios forestales, incendios de turba y descomposición de turba que se aproximan al flujo neto de CO<sub>2</sub> procedente del subsector de la silvicultura y otros usos del suelo (FOLU)

Las ciudades en todo el mundo están viendo una explosión de la demanda de transporte. El tráfico de automóviles cuesta a las ciudades miles de millones de euros al año en pérdidas de productividad, contaminación, accidentes y el propio uso del vehículo. El sector del transporte cada vez crece más y se posiciona como uno de los principales aportadores de contaminantes del aire a lo largo de todo el planeta, aumentando las cifras de emisiones en los últimos estudios de las emisiones totales de GEI en la Unión Europea (UE) [8] [9].

Por ello, es necesaria la intervención en el sector económico del transporte con el objetivo de reducir su aportación neta en la generación de gases de efecto invernadero [10] y en las grandes ciudades la reducción de gases perjudiciales para la salud. Actualmente en la mayoría de las grandes ciudades se están aplicando

políticas encaminadas a mitigar en gran parte la tendencia irreversible del cambio climático y ayudar a mejorar la calidad de vida de los habitantes de las grandes urbes.

Hoy en día, el 50% de la población vive en ciudades (alcanzando el 69% en la Unión Europea) y se estima que más del 60% de la población mundial vivirá en zonas urbanas en 2030 [11], aumentando aún más la presión sobre los ambientes urbanos. La gran mayoría de los gobiernos están ayudando a fomentar la venta de vehículos menos contaminantes, en base a diferentes modalidades de ayudas y de excepciones de impuestos, ya que durante décadas, la industria de los vehículos privados se centró sólo en bajar el precio final del vehículo manteniendo en la medida de lo posible la relación aumento de potencia/seguridad/reducción de consumo; sin preocuparse hasta hace pocos años de la relación de emisiones generadas de los vehículos por km recorrido. Además los ayuntamiento de las grandes ciudades están aplicando medidas de restricción de circulación de los vehículos más contaminantes por los centros urbanos, porque la contaminación atmosférica localizada, producida principalmente por vehículos de motor, causa más de 3,7 millones de muertes al año [12] [13].

Otro participante en el aumento de los Gases de Efecto Invernadero es la obtención de energía por medio de tecnologías de generación en base a la quema de combustibles fósiles, por ello en algunos países también se está fomentando la obtención de energía con tecnologías de generación renovable con el objetivo de reducir la huella de carbono con la generación de energía por medio de tecnologías basadas en los combustibles fósiles.

Uno de los casos más destacable y ejemplo a seguir es el de Alemania el cual encabezó la revolución energética europea sustituyendo los tecnologías de generación eléctrica en base a combustibles fósiles y tecnologías de generación que utilizan combustibles con cierto riesgo de operación como la energía nuclear [14], el aumento de la energía renovable de Alemania contribuyó a una reducción del 27 por ciento en sus emisiones de gases de efecto invernadero.

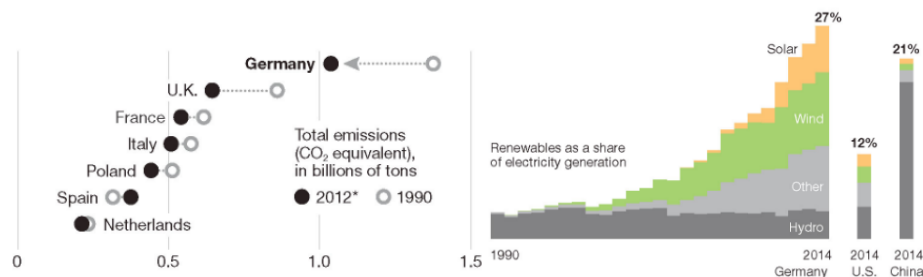


Figura 4. Reducción emisiones GEI entre 1990 y 2012 [14]

Alemania con un consumo de 463 TWh en 2023 es actualmente el mayor consumidor de energía eléctrica de toda Europa y aun así está mostrando al resto de países del mundo que es posible un cambio de modelo energético en un periodo relativamente corto, tal y como se muestra en la Figura 5. Alemania está apoyando su transición agresiva a las energías renovables, con objetivos de hasta un 80% de generación con energías renovables. El apoyo se basa en una cultura respetuosa del medio ambiente, un deseo colectivo de abandonar las energías sucias con el medio ambiente y las delicadas de operar como la energía nuclear.

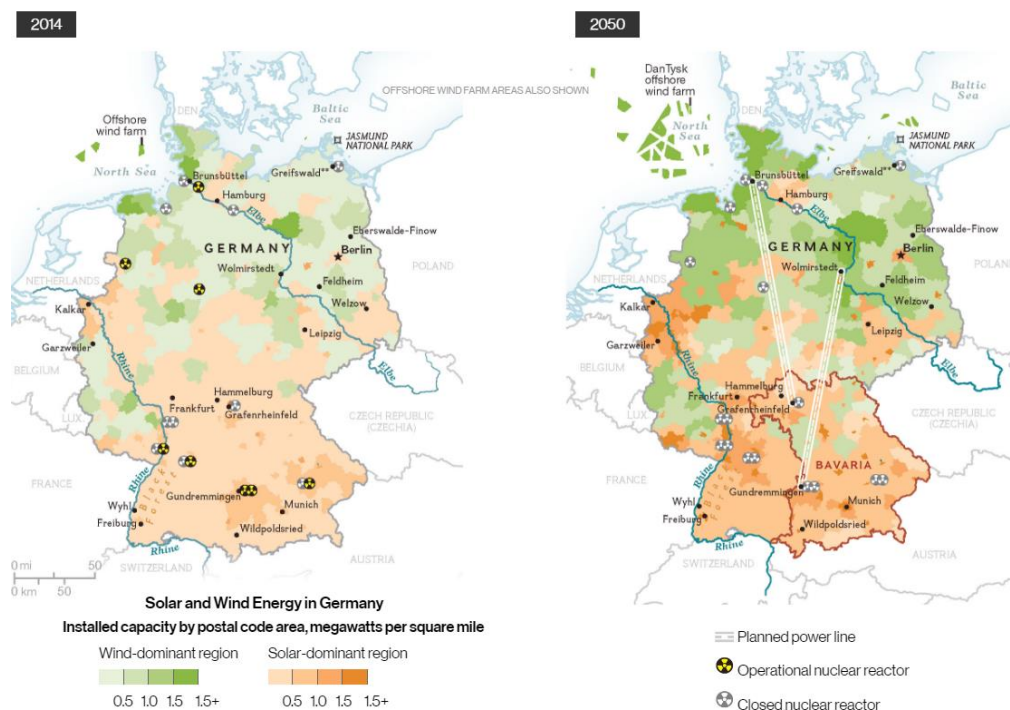


Figura 5. Alemania, 80% de generación con renovables para 2050 [14]

Uno de las herramientas más importantes que está utilizando el gobierno alemán para alcanzar sus objetivos es crear nuevas leyes que permiten a los ciudadanos a beneficiarse del autoconsumo de su energía generada en sus domicilios con energías renovables y de vender su energía sobrante a la red. Aunque en menor medida que el sector de la generación de la energía, Alemania está también fomentado el uso de los vehículos eléctricos y por ello sus grandes marcas de automóviles Mercedes-Benz, BMW, Volkswagen y Audi están ofreciendo más de dos docenas de modelos de vehículos eléctricos. El problema básico es que los automóviles siguen siendo demasiado caros, y necesitan de más incentivos para que puedan ser asequibles para todos los ciudadanos. El objetivo de este trabajo de tesis es centrarse en los beneficios de los vehículos eléctricos ligeros, además el uso de la bicicleta es cada vez mayor para los desplazamientos urbanos en las ciudades alemanas. En 2023 se vendieron en Alemania alrededor de 2,1 millones de bicicletas eléctricas de y bicicletas eléctricas de pedaleo asistido. La bicicleta se ha convertido en un símbolo de un estilo de vida sano y moderno, y es una parte crucial de cualquier estrategia de transporte urbano. Actualmente cada vez se hacen más esfuerzos sustanciales en la mejora de las infraestructuras de alta calidad y en el desarrollo de conceptos modernos para mejorar el acceso y la experiencia del uso de las bicicletas. En los últimos años cada vez son más populares los sistemas de bicicleta compartida, los grandes parkings de bicicleta privada cerca de los nudos de transporte público masivo y los sistemas de bicicletas eléctricas compartida.

## ***1.2. Contexto***

*“Muchas opciones de adaptación y mitigación pueden contribuir a afrontar el cambio climático, pero ninguna de ellas basta por sí sola. Para que la implementación de las opciones sea efectiva, se necesitan políticas y cooperación en todas las escalas; y para fortalecerla, se requieren respuestas integradas que vinculen la adaptación y la mitigación con otros objetivos sociales.” [7].*

En las siguientes tablas se muestra a modo de resumen, cuáles son las medidas de mitigación sectorial en base a los sectores de: suministro de energía, transporte y asentamientos humanos e infraestructura. Los datos de se han obtenido del quinto Informe de Evaluación sobre Cambio Climático [7] del IPCC, creado con la finalidad de proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.

En las siguientes tablas Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3. se utiliza los siguientes códigos de colores: **en azul se muestran los co-beneficios potenciales**, y **en rojo se muestran los efectos colaterales**.

Todos los co-beneficios y los efectos colaterales adversos y su efecto positivo o negativo general dependen de las circunstancias locales, así como de la práctica, el ritmo y la magnitud de la aplicación. También se indica codificado con abreviaturas entre paréntesis los calificadores de incertidumbre que indican el nivel de evidencia y acuerdo sobre el efecto correspondiente. Abreviaturas para la evidencia: **l** = limitada, **m** = media, **s** = sólida. Abreviaturas para el nivel de acuerdo: **b** = bajo, **m** = medio, **a** = alto.

Tabla 1. Suministro de energía, medidas de mitigación

Suministro de energía			
Medidas de mitigación Sectoriales	Efectos sobre los objetivos/preocupaciones adicionales		
	Económicos	Sociales	Ambientales
Sustitución de la energía térmica de carbón por energía nuclear	Seguridad energética (reducción de la exposición a la volatilidad del precio de los combustibles) ( <i>m/m</i> ); impacto sobre el empleo local (si bien su efecto neto es incierto) ( <i>b/m</i> ); legado/costo de residuos y reactores abandonados ( <i>m/a</i> )	Impacto variable en la salud debido a la disminución de la contaminación atmosférica y los accidentes en la minería del carbón ( <i>m/a</i> ), accidentes y tratamiento de residuos nucleares, extracción y procesamiento del uranio ( <i>m/b</i> ); problemas de seguridad y desechos ( <i>s/a</i> ); riesgo de proliferación ( <i>m/m</i> )	Impacto combinado en el ecosistema debido a la reducción de la contaminación atmosférica ( <i>m/a</i> ) y la extracción del carbón ( <i>b/a</i> ), accidentes nucleares ( <i>m/m</i> )
Sustitución de la energía térmica de carbón por energías renovables (eólica, fotovoltaica, solar por concentración, hidroeléctrica, geotérmica, bioenergía)	Seguridad energética ( <i>s/m</i> ); impacto sobre el empleo local (si bien su efecto neto es incierto) ( <i>m/m</i> ); gestión del agua (energía hidroeléctrica) ( <i>m/a</i> ); medidas suplementarias para satisfacer la demanda (de energía fotovoltaica y eólica y, en menor grado, solar por concentración) ( <i>s/a</i> ); aumento del uso de metales críticos para la fabricación de células fotovoltaicas y turbinas eólicas de tracción directa ( <i>s/m</i> )	Reducción del impacto en la salud debido a la reducción de la contaminación atmosférica (excepto la bioenergía) ( <i>s/a</i> ) y los accidentes en minas de carbón ( <i>m/a</i> ); contribución al acceso a la energía (al margen de la red de suministro) ( <i>m/a</i> ); amenaza de desplazamientos de población (debido a grandes proyectos hidroeléctricos) ( <i>m/a</i> )	Impacto combinado en el ecosistema debido a la reducción de la contaminación atmosférica ( <i>m/a</i> ) y la extracción de carbón ( <i>b/a</i> ), impacto en el hábitat (energía hidroeléctrica) ( <i>m/m</i> ), impacto en el paisaje y la fauna y flora silvestres ( <i>m/m</i> ); disminución/aumento del uso de agua (para generar energía eólica y fotovoltaica) ( <i>m/m</i> ); bioenergía, energía solar por concentración, geotérmica e hidroeléctrica procedente de embalses ( <i>m/a</i> )
Sustitución de la energía térmica de carbón por energía de origen fósil con captura y almacenamiento de CO2	Conservación o efecto de bloqueo del capital humano y físico en el sector de los combustibles fósiles ( <i>m/m</i> ); seguimiento a largo plazo del almacenamiento de CO2 ( <i>m/a</i> )	Impacto en la salud por riesgo de fugas de CO2 ( <i>m/m</i> ) y aumento de las actividades en la cadena de suministro de energía ( <i>m/a</i> ); problemas de seguridad (almacenamiento y transporte de CO2) ( <i>m/a</i> )	Impacto en el ecosistema debido a actividades adicionales en el abastecimiento de energía ( <i>m/m</i> ) y aumento del uso de agua ( <i>m/a</i> )
Prevención de fugas, captura o tratamiento de metano	Seguridad energética (posibilidad de usar gas en algunos casos) ( <i>b/a</i> )	Reducción del impacto en la salud debido a la disminución de la contaminación atmosférica ( <i>m/m</i> ); seguridad laboral en la minería del carbón ( <i>m/m</i> )	Reducción del impacto en el ecosistema debido a la disminución de la contaminación atmosférica ( <i>b/m</i> )

Tabla 2. Transporte, medidas de mitigación

Transporte			
Mitigación Sectorial	Efectos sobre los objetivos/preocupaciones adicionales		
	Económicos	Sociales	Ambientales
Reducción de la intensidad de carbono de los combustibles	Seguridad energética (diversificación, disminución de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) ( <i>m/m</i> ); desbordamientos tecnológicos ( <i>b/b</i> )	Impacto variable en la salud debido al <b>aumento/reducción</b> de la contaminación atmosférica urbana procedente del uso de <b>electricidad e hidrógeno (<i>s/a</i>)</b> , <b>diésel (<i>b/m</i>)</b> y <b>problemas de seguridad vial (<i>b/b</i>)</b> , si bien se <b>reduce el impacto en la salud</b> debido a la disminución de la contaminación acústica ( <i>b/m</i> ) provocada por los vehículos ligeros	Impacto combinado en el ecosistema del uso de electricidad e hidrógeno debido a la <b>reducción de la contaminación atmosférica urbana (<i>m/m</i>)</b> y el <b>uso de materiales (minería insostenible) (<i>b/b</i>)</b>
Reducción de la intensidad energética	Seguridad energética (reducción de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) ( <i>m/m</i> )	Reducción del impacto en la salud debido a la <b>disminución de la contaminación atmosférica urbana (<i>s/a</i>)</b> ; seguridad vial (resistencia frente a los choques dependiendo de los estándares establecidos) ( <i>m/m</i> )	Reducción del impacto en los ecosistemas y la biodiversidad debido a la <b>disminución de la contaminación atmosférica urbana (<i>m/a</i>)</b>
Desarrollo urbano compacto y mejora de las infraestructuras de transporte	Seguridad energética (reducción de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) ( <i>m/m</i> ); productividad (reducción de la congestión y los tiempos de trayecto en las ciudades, transporte asequible y accesible) ( <i>m/h</i> )	Impacto combinado en la salud para las modalidades no motorizadas debido al <b>aumento de la actividad física (<i>s/a</i>)</b> , <b>aumento potencial de la exposición a la contaminación atmosférica (<i>s/a</i>)</b> , reducción de la contaminación acústica (debido al cambio de modalidad y la reducción de los trayectos) ( <i>s/a</i> ); acceso equitativo a las oportunidades de empleo debido a la movilidad ( <i>s/a</i> ); seguridad vial (debido al <b>cambio de modalidad</b> ) ( <i>s/a</i> )	Reducción del impacto en el ecosistema debido a la <b>disminución de la contaminación atmosférica urbana (<i>s/a</i>)</b> y la <b>competencia por el uso del suelo (<i>m/m</i>)</b>
Reducción de la distancia y los desplazamientos	Seguridad energética (reducción de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) ( <i>s/a</i> ); productividad (reducción de la congestión y los tiempos de trayecto en las ciudades, desplazamientos a pie) ( <i>s/a</i> )	Reducción del impacto en la salud (para las modalidades de transporte no motorizadas) ( <i>s/a</i> )	Impacto combinado en los ecosistemas debido a la <b>disminución de la contaminación atmosférica urbana (<i>s/a</i>)</b> , <b>rutas nuevas o más cortas (<i>s/a</i>)</b> ; reducción de la competencia de las infraestructuras de transporte por el uso del <b>suelo (<i>s/a</i>)</b>

Tabla 3. Asentamientos e infraestructura, medidas de mitigación

Asentamientos humanos e infraestructura			
Mitigación Sectorial	Efectos sobre los objetivos/preocupaciones adicionales		
	Económicos	Sociales	Ambientales
Desarrollo e infraestructura compactos	Aumento de la innovación y el uso eficiente de los recursos ( <i>s/a</i> ); mayores alquileres y valor de la propiedad ( <i>m/m</i> )	Mejora de la salud debido al <b>aumento de la actividad física: véase Transporte</b>	Conservación de los espacios abiertos ( <i>m/m</i> )
Aumento de la accesibilidad	Ahorro en los desplazamientos al lugar de trabajo ( <i>s/a</i> )	Mejora de la salud debido al <b>aumento de la actividad física: véase Transporte</b> ; aumento de la interacción social y la salud mental ( <i>m/m</i> )	Mejora de la calidad del aire y reducción de los impactos en el ecosistema y la salud ( <i>m/a</i> )
Uso mixto del suelo	Ahorro en los desplazamientos al lugar de trabajo ( <i>s/a</i> ); mayores rentas y valor de la propiedad ( <i>m/m</i> )	Mejora la salud debido al <b>aumento de la actividad física (<i>s/a</i>)</b> ; aumento de la interacción social y la salud mental ( <i>b/m</i> )	Mejora de la calidad del aire y disminución de los impactos en el ecosistema y la salud ( <i>m/a</i> )

### ***1.3. Problema de investigación***

La mayoría de los países del mundo están intentando reducir su consumo total de combustibles fósiles con el principal objetivo de reducir sus emisiones de GEI, que son los principales responsables del calentamiento global, el cambio climático y el deterioro de la calidad del aire en las ciudades [4].

La energía solar es una fuente abundante de energía renovable/sostenible, que tiene un enorme potencial para reducir la huella de gases de efecto invernadero [15]. Hoy en día, el 50% de la población vive en ciudades (llegando al 69% en la Unión Europea) y se estima que más del 60% de la población mundial total vivirá en zonas urbanas en 2030 [16], aumentando la presión sobre los entornos urbanos.

Las bicicletas se pueden utilizar en zonas urbanas para reducir la contaminación del aire, la congestión del tráfico, las emisiones de ruido y el consumo de energía, permitiendo un estilo de vida personal más saludable [17]. Por este motivo, los gobiernos están impulsando diferentes iniciativas para utilizar la bicicleta como alternativa al vehículo motorizado privado [18]. En los últimos años han surgido diferentes tipos de programas públicos de bicicletas compartidas en muchas ciudades de todo el mundo [19] [20].

Uno de los aspectos para asegurar el éxito de los nuevos sistemas de movilidad que aparezcan en los entornos urbanos, es que deben estar alineados a los objetivos y tendencias que se describen en el informe realizado por el grupo IPPC [1], como que la generación de electricidad con energías renovables es cada vez más competitivo en precio y la mayor tendencia de la electrificación de los desplazamientos de las personas, como se muestra en Figura 6

### Renewable electricity generation is increasingly price-competitive and some sectors are electrifying

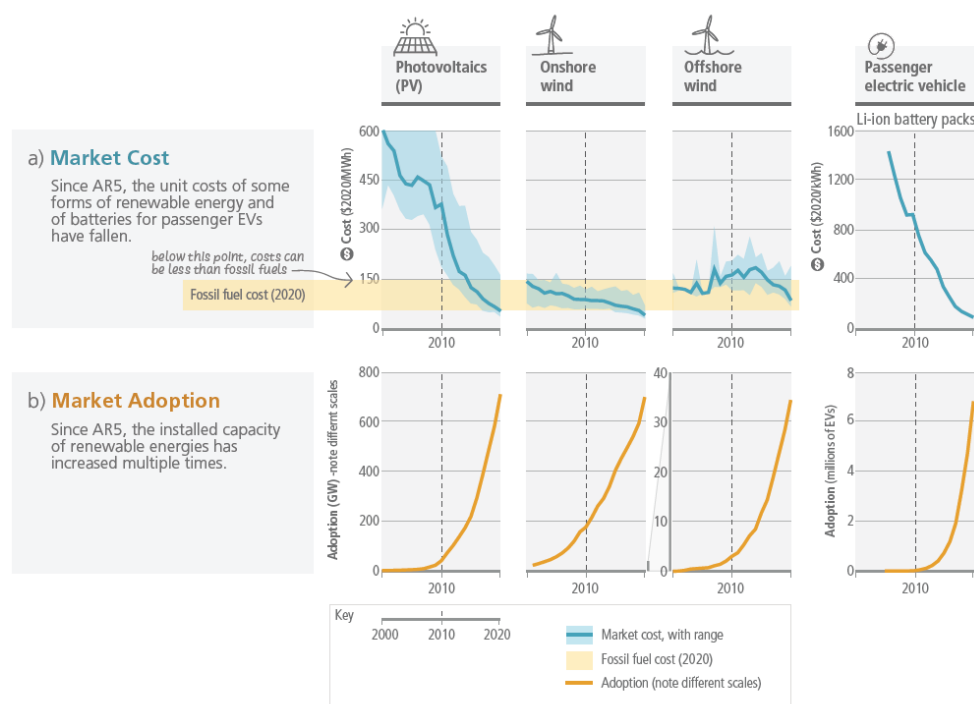


Figura 6. Menor coste de tecnologías que mitigan el cambio climático [1]

Aunque la incorporación, en los sistemas de movilidad de bicicletas eléctricas compartidas, de tecnologías de generación de energía renovable con paneles fotovoltaicos y que este tipo de recurso energético sea la única fuente de energía para abastecer al sistema no es lo único que hay que hacer, este tipo de iniciativas deben ir acompañadas por un estudio de viabilidad del mismo, hay trabajos [21] donde se estudia la viabilidad de la autosuficiencia energética de las estaciones de aparcamiento de bicicletas tradicionales donde se incorpora un sistema de gestión que necesita de energía para su funcionamiento, aunque estas bases de aparcamiento pueda estar cerca de la red distribución eléctrica se opta casi siempre por la autosuficiencia energética normalmente con la instalación de paneles fotovoltaicos en una pérgola o en el mismo monolito del sistema de gestión del aparcamiento de las bicicletas tradicionales, por ello es necesario un estudio para detectar los inconvenientes y los aspectos a tener en cuenta para asegurarse el óptimo funcionamiento del sistema, y obtener la correcta ubicación de los paneles

fotovoltaicos y la incorporación de baterías de respaldo para asegurarse la energía necesaria para que pueda funcionar el parking de bicicletas tradicionales.

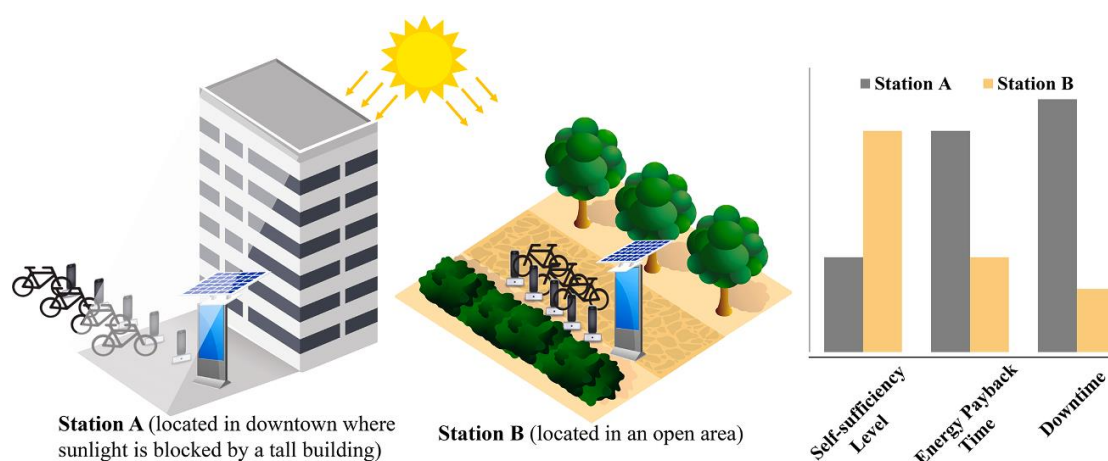


Figura 7. Sombras en los PV de los parkings de bicicletas [21]

Además de este trabajo hay otros trabajos que reflejan la importancia de la planificación de la generación renovable para casarla con la demanda energética de la carga, pudiéndose ser demanda en la red eléctrica o aplicable en menor dimensión al parking de bicicletas tradicionales, por su carácter variable en la generación, como en este trabajo [22], que estudia el grado de éxito que está teniendo la implantación de la reconversión de los sistemas de generación tradicionales en sistemas de generación renovable en Alemania, tal y como se describía en la página 7, con el objetivo de la transformación del mix eléctrico alemán para que dependa de las energías renovables variables como la fotovoltaica y la eólica.

Expuestos algunos de los retos a los que se tienen que enfrentar los sistemas de movilidad con bicicletas tradicionales y eléctricas alimentados con energía solar fotovoltaica, se presenta a continuación un sistema de bicicletas compartidas actual que están distribuidas en diferentes estaciones aparcamiento repartidas por

la ciudad, en las cuales los usuarios pueden recoger una bicicleta en cualquier estación y devolverla en cualquier otra ubicada dentro de la red. Estos sistemas deben ser gestionados y mantenidos por operadores, quienes son los responsables de monitorear las estaciones de aparcamiento y mover las bicicletas desde las estaciones más cargadas de bicicletas a otras estaciones más vacías, en una operativa de balanceo de las bicicletas disponibles en cada parking del sistema. Normalmente estos operadores utilizan un vehículo con motor de combustión interna diésel para mover las bicicletas entre diferentes estaciones, como se muestra en la Figura 8. Esta gestión reduce los problemas que surgen cuando un usuario en particular no encuentra una bicicleta disponible para usarla en una estación de aparcamiento del sistema, o no puede devolver la bicicleta en una estación de aparcamiento porque está completa de bicicletas eléctricas.



Figura 8. Camión de balanceo de bicicletas eléctricas biciMAD



Figura 9. Operativa de balanceo de bicicletas eléctricas biciMAD

Las bicicletas compartidas se pueden utilizar en viajes de punto a punto o en combinación con otros modos de transporte en las ciudades, aumentando la flexibilidad de las infraestructuras de transporte público. Por ejemplo, uno de los puntos más débiles de un sistema de transporte público son los viajes de acceso (es decir, para llegar a las estaciones de transporte público) y de salida (es decir, desde las estaciones de transporte público hasta el destino final). Las bicicletas se pueden utilizar para cubrir estos viajes específicos, reduciendo el tiempo total de viaje puerta a puerta, haciendo que la combinación bicicleta-transporte público sea más competitiva en comparación con los automóviles privados [23].

La página web del sistema biciMAD, muestra en la pestaña estadísticas datos de uso del sistema, como la media de usos por bicicleta y día que en esta consulta es de 3,46.



Figura 10. Estadísticas plataforma web biciMAD<sup>1</sup>

El uso de la bicicleta tiene algunas desventajas, como la convivencia con otros vehículos en las vías destinadas al tráfico, la exposición a las condiciones climáticas (calor, frío, lluvia, viento, etc.), dificultad para transportar cargas y esfuerzo físico en ciudades con desniveles en sus vías. Las bicicletas eléctricas son bicicletas asistidas con propulsión eléctrica que pueden eliminar algunos de estos problemas, manteniendo todos los beneficios del ciclismo tradicional. Los usuarios de bicicletas eléctricas pueden llegar más lejos, más rápido y con menos esfuerzo

<sup>1</sup> <https://www.bicimad.com/>

que los usuarios de bicicletas tradicionales, aumentando la autonomía diaria recorrida [17]. Aun así, en este tipo de bicicletas se pueden pedalear, con algo más de esfuerzo, cuando se ha agotado la batería o se ha producido un fallo en sistema de motorización eléctrica.

Hay trabajos que han demostrado la viabilidad y el ahorro económico de introducir vehículos eléctricos en operaciones logísticas urbanas de última milla [24]. Algunos programas de uso compartido de bicicletas eléctricas han surgido en diferentes entornos urbanos: es decir, campus universitarios, como el campus de Knoxville (UTK) de la Universidad de Tennessee en EE. UU. [25] y en diferentes ciudades europeas. En estos sistemas de bicicletas eléctricas compartidas, las baterías se pueden cargar directamente cuando las bicicletas eléctricas están estacionadas o se pueden cambiar por otras completamente cargadas en las estaciones de carga. En ambos casos, el proceso de carga extrae energía eléctrica de la red y no hay un reparto optimizado de las bicicletas eléctricas entre diferentes parkings de estacionamiento. Además, hay que tener en cuenta que cuando se quiere abastecer al sistema con energía fotovoltaica, esta suele tener una curva de generación diaria que hay que casar lo máximo posible con el momento de estacionamiento de los vehículos eléctricos para satisfacer la demanda energética de los mismo en el momento de su uso y esta curva es muy variable [26].

Por ello, en este trabajo de tesis se pretende resolver las diferentes situaciones para poder converger en una solución que resuelva los desplazamientos con vehículos eléctricos ligeros a los empleados en las situaciones propuestas y que el sistema sea con emisiones cero y autosuficiente energéticamente con energías renovables.

## 1.4. Objetivos

“Para todos los sectores principales existen opciones de mitigación. La mitigación puede ser más costo-efectiva si se utiliza un enfoque integrado que combine medidas dirigidas a reducir en los sectores de uso final el empleo de la energía y la intensidad de los gases de efecto invernadero, des-carbonizar el suministro de energía” [7].

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior estamos inmersos en una época de cambio de modelo energético en casi todos los sectores económicos, por ello en este trabajo de tesis se pretende enfocarse en evaluar una propuesta combinando parte de los siguientes sectores: suministro de energía, transporte, infraestructuras urbanas.

En base a las Tablas 1, 2 y 3 del apartado anterior, se presenta la Tabla 4 creada en base a los efectos sobre los objetivos y preocupaciones adicionales de las medidas de mitigación sectorial respecto a la aplicación del sistema que se propone en esta tesis.

Tabla 4. Evaluación de la propuesta, medidas de mitigación

SECTORES	PROPUESTA: OPTIMIZACIÓN DE LA MOVILIDAD ELÉCTRICA DE ÚLTIMA MILLA CON ENERGÍAS RENOVABLES			
	Mitigación Sectorial	Efectos sobre los objetivos/preocupaciones adicionales		
		Económicos	Sociales	Ambientales
Suministro de energía	Sustitución de la energía térmica de carbón por energías renovables (eólica, fotovoltaica, solar por concentración, hidroeléctrica, geotérmica, bioenergía)	Seguridad energética ( <i>s/m</i> ); impacto sobre el empleo local (si bien su efecto neto es incierto) ( <i>m/m</i> ); medidas suplementarias para satisfacer la demanda (de energía fotovoltaica y eólica y, en menor grado, solar por concentración) ( <i>s/a</i> ); aumento del uso de metales críticos para la fabricación de células fotovoltaicas ( <i>s/m</i> )	Reducción del impacto en la salud debido a la reducción de la contaminación atmosférica ( <i>s/a</i> ) y los accidentes en minas de carbón ( <i>m/a</i> ); contribución al acceso a la energía (al margen de la red de suministro) ( <i>m/a</i> );	Impacto combinado en el ecosistema debido a la reducción de la contaminación atmosférica ( <i>m/a</i> ) y la extracción de carbón ( <i>b/a</i> ), disminución del uso de agua (para generar energía fotovoltaica) ( <i>m/m</i> );

<b>Transporte</b>	Reducción de la intensidad de carbono de los combustibles	Seguridad energética (diversificación, disminución de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) <b>(m/m)</b> ; desbordamientos tecnológicos <b>(b/b)</b>	Impacto variable en la salud debido a la <b>reducción</b> de la contaminación atmosférica urbana procedente del uso de electricidad <b>(s/a)</b> , se <b>reduce el impacto en la salud</b> debido a la <b>disminución</b> de la contaminación acústica <b>(b/m)</b> provocada por los vehículos ligeros	Impacto combinado en el ecosistema del uso de electricidad debido a la <b>reducción</b> de la contaminación atmosférica urbana <b>(m/m)</b> y el uso de materiales (minería insostenible) <b>(b/b)</b>
	Reducción de intensidad energética	Seguridad energética (reducción de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) <b>(m/m)</b>	Reducción del impacto en la salud debido a la <b>disminución</b> de la contaminación atmosférica urbana <b>(s/a)</b> ; seguridad vial (resistencia frente a los choques dependiendo de los estándares establecidos) <b>(m/m)</b>	Reducción del impacto en los ecosistemas y la biodiversidad debido a la <b>disminución</b> de la contaminación atmosférica urbana <b>(m/a)</b>
	Desarrollo urbano compacto y mejora de las infraestructuras de transporte de modalidad	Seguridad energética (reducción de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) <b>(m/m)</b> ; productividad (reducción de la congestión y los tiempos de trayecto en las ciudades, transporte asequible y accesible) <b>(m/h)</b>	Impacto combinado en la salud para las modalidades no motorizadas debido al <b>aumento</b> de la actividad física <b>(s/a)</b> , aumento potencial de la exposición a la contaminación atmosférica <b>(s/a)</b> , reducción de la contaminación acústica (debido al cambio de modalidad y la reducción de los trayectos) <b>(s/a)</b> ; acceso equitativo a las oportunidades de empleo debido a la movilidad <b>(s/a)</b> ; seguridad vial (debido al cambio de modalidad) <b>(s/a)</b>	Reducción del impacto en el ecosistema debido a la <b>disminución</b> de la contaminación atmosférica urbana <b>(s/a)</b> y la competencia por el uso del suelo <b>(m/m)</b>
	Reducción de la distancia y eliminación de los desplazamientos	Seguridad energética (reducción de la dependencia del petróleo y la exposición a la volatilidad del precio del petróleo) <b>(s/a)</b> ; productividad (reducción de la congestión y los tiempos de trayecto en las ciudades, desplazamientos a pie) <b>(s/a)</b>	Reducción del impacto en la salud (para las modalidades de transporte no motorizadas) <b>(s/a)</b>	Impacto combinado en los ecosistemas debido a la <b>disminución</b> de la contaminación atmosférica urbana <b>(s/a)</b> , rutas nuevas o más cortas <b>(s/a)</b> ; reducción de la competencia de las infraestructuras de transporte por el uso del suelo <b>(s/a)</b>
	Desarrollo e infraestructura compactos	Aumento de la innovación y el uso eficiente de los recursos <b>(s/a)</b> ; mayores alquileres y valor de la propiedad <b>(m/m)</b>	Mejora de la salud debido al aumento de la actividad física	Conservación de los espacios abiertos <b>(m/m)</b>
<b>Asentamientos humanos e infraestructura</b>	Aumento de la accesibilidad	Ahorro en los desplazamientos al lugar de trabajo <b>(s/a)</b>	Mejora de la salud debido al aumento de la actividad física, aumento de la interacción social y la salud mental <b>(m/m)</b>	Mejora de la calidad del aire y reducción de los impactos en el ecosistema y la salud <b>(m/a)</b>
	Uso mixto del suelo	Ahorro en los desplazamientos al lugar de trabajo <b>(s/a)</b> ; mayores rentas y valor de la propiedad <b>(m/m)</b>	Mejora la salud debido al aumento de la actividad física <b>(s/a)</b> ; aumento de la interacción social y la salud mental <b>(b/m)</b>	Mejora de la calidad del aire y <b>disminución</b> de los impactos en el ecosistema y la salud <b>(m/a)</b>

Con los datos mostrados se puede intuir que el sistema que se propone podrá tener una mitigación considerable en los sectores de suministro de energía, transporte y asentamientos humanos e infraestructura.

La propuesta trata de estudiar un caso real, primero en los desplazamientos internos en un centro de trabajo y finalmente, existiendo la necesidad de desplazamiento a un centro de trabajo en días laborables, proponiendo un nuevo sistema que gestione los desplazamientos de los empleados con vehículos eléctricos ligeros que cubra los trayecto desde un nodo de transporte público hasta el centro laboral y que además, estos vehículos y el sistema, obtengan la energía de forma totalmente renovable, con objeto de mitigar el cómputo total de las emisiones GCI en los desplazamientos “emisiones GCI por el transporte” mitigando además el computo de las emisiones GCI por la obtención de energía en base a tecnologías de generación por quema de combustible fósiles “emisiones GCI por el suministro de energía” obteniendo la energía para la operativa de los desplazamientos de los vehículos eléctricos en base a tecnologías de generación de energía renovable, todo ello controlado por un sistema de gestión optimizado para cubrir la demanda de energía de los vehículos eléctricos con la generación de energía renovable.

En este trabajo se diseña un sistema de bicicletas eléctricas compartidas, para satisfacer los viajes de los empleados entre un punto de la red de transporte público masivo hasta el centro de trabajo de los empleados. Se pretende que el estudio de viabilidad del sistema sea lo más cercano a los parámetros aplicables a un sistema real, por ello se utilizan datos empíricos obtenidos, tanto de vehículos eléctricos, parámetros de movilidad, etc. del proyecto experimental realizado con empleados de un centro de trabajo y con diferentes usos y tecnologías de bicicletas eléctricas [17].

En esta tesis se trabaja en diferentes áreas que unen transversalmente los sectores de suministro de energía, transporte e infraestructuras urbanas. Esas áreas son:

**Movilidad**, en esta área se pretende asegurar de forma objetiva que el estudio soluciona un problema de transporte y de infraestructura para el mismo.

**Almacenamiento de energía**, en este enfoque el objetivo es que el sistema minimice al máximo el almacenamiento y evitar la incorporación de batería de respaldo.

**Estaciones de recarga**, en este apartado se pretende que los vehículos eléctricos del sistema de movilidad no necesiten conectarse a la red eléctrica para obtener la energía necesaria de operación y que esta la obtengan de tecnologías de generación renovable, y así reducir el consumo de energía de la red producida con tecnologías de generación fósil. Se pretende diseñar un sistema de movilidad eléctrica de energía cero.

**Energía Fotovoltaica**, tal y como se ha expuesto anteriormente la energía se obtendrá de generación fotovoltaica, y se calculará la potencia instalada necesaria para cubrir las necesidades del sistema, sin tener que recurrir al sistema convencional de distribución de energía.

Por lo tanto, se plantea un escenario en el que se pretende gestionar la movilidad del desplazamiento de los empleados de un centro de trabajo desde/hacia un punto de transporte público masivo.

Se propone el estudio y el desarrollo de técnicas proactivas de optimización energética renovable para maximizar su uso en sistemas de movilidad urbana/metropolitana. Para alcanzar los objetivos propuestos se desarrollarán modelos sobre la demanda de energética de los vehículos eléctricos a estudio, se estudiará y calculará el recurso renovable necesario para el funcionamiento del sistema y por último se aplicará en un escenario de movilidad de transporte de trabajadores desde/hacia un punto transporte público a su centro de trabajo.

Es importante remarcar que a todos los efectos se procurará que esta tesis doctoral ofrezca resultados útiles y aplicables en un escenario real y de actualidad, pudiendo extrapolar el mismo a otros escenarios similares, tratando de cubrir el importante salto existente entre las soluciones propuestas por la industria y los investigadores en lo que se refiere al uso de algoritmos de optimización y soluciones aplicables en situaciones reales.

Dado el carácter multidisciplinar del estudio propuesto se pretende alcanzar una serie de objetivos tanto desde el punto de vista social como desde el punto de vista tecnológico, alineados a un objetivo común: un sistema de movilidad con vehículos eléctricos de cero-emisiones y autosuficientes energéticamente para atender las necesidades de desplazamiento de los trabajadores desde un nodo de transporte público hasta su centro de trabajo y viceversa. Para llegar a este objetivo común se establecen los siguientes objetivos en las diferentes áreas implicadas en la movilidad con vehículos eléctricos como social, transporte y energía:

- Conocer las necesidades de movilidad de los empleados de un centro de trabajo, realizar encuestas y entrevistas para conocer la opinión de los empleados respecto a la puesta en marcha del proyecto piloto y el interés por participar. Realizar un estudio estadístico sobre el perfil de los posibles usuarios, ventajas que ofrece, tiempos de desplazamiento, consumo de energía y coste. Lanzar diferentes pilotos de sistemas de movilidad en el centro de trabajo y supervisar su ejecución.
- Conocer los procesos de carga y descarga de las baterías de las bicicletas eléctricas. Diseñar y desarrollar un sistema que los reproduzca de forma controlada. Diseñar y desarrollar un sistema con el que realizar pruebas mecánicas y eléctricas a los motores de las bicicletas eléctricas. Realizar una instalación que sirva de aparcamiento de las bicicletas eléctricas y que a la vez sirva de estación de recarga.
- Diseñar y desarrollar un circuito para la monitorización de las magnitudes energéticas de las bicicletas eléctricas. Incorporar en las bicicletas eléctricas un sistema que envíe los datos registrados las magnitudes energéticas y que añada la posición GPS, mediante comunicación GPRS. Crear una base de datos donde registrar los diferentes parámetros de cada uno de los procesos energéticos.
- Estudiar la viabilidad de un nuevo sistema de movilidad que cubra las necesidades de los desplazamientos de los empleados desde su domicilio y

el centro de trabajo y viceversa. Verificar la autonomía que ofrecen las distintas tecnologías de bicicleta eléctrica y de sus baterías.

- Seleccionar o diseñar el sistema de movilidad que mejor se adapte a las necesidades en un centro de trabajo como el CIEMAT.
- Diseñar e innovar un sistema de aparcamiento móvil de bicicletas eléctricas capacidad de recarga mediante distintas fuentes de energía, incluida una con energías renovables.
- Realizar un estudio que demuestre la viabilidad de un nuevo sistema de movilidad que cumpla con las expectativas de transporte de los empleados desde nodo de transporte público hacia un centro de trabajo, y que el sistema obtenga la energía suficiente para su funcionamiento de un sistema de energía renovable.

### ***1.5. Metodología, Estructura y Medios de la Tesis***

Lo que se pretende es entender el comportamiento de los vehículos eléctricos en el contexto de movilidad a estudio, por lo que se analizarán tanto las percepciones sociales, operativas, los ciclos de vida de sus elementos energéticos y la vida útil de los mismos. El objetivo es identificar “la problemática” relacionada con el consumo, eficiencia, durabilidad, autonomía y fiabilidad que afectan a variables de movilidad.

En este apartado se propone una metodología de investigación para afrontar los desafíos planteados en esta propuesta de tesis. La metodología propuesta pretende abordar cada objetivo práctico mediante la realización de las etapas de investigación secuencial descritas a continuación:

#### **Analizar el estado de la técnica específico**

La investigación sobre la resolución de un problema se centra en la comprensión de los procesos para llegar a una solución en el contexto del conocimiento disponible. Por lo tanto, la comprensión de la cuestión de la eficiencia

energética en los sistemas de movilidad de última milla es esencial para alcanzar resultados óptimos en términos de mejorar el ahorro energético y reducir el impacto económico y ambiental. El primer paso consiste en realizar un análisis exhaustivo del área específica concerniente a cada objetivo particular.

### **Definir el marco de aplicación**

Cada problema de movilidad de última milla tiene características específicas y cada entorno tiene características específicas de generación, es necesario tener en cuenta estas especificidades para definir el marco de aplicación.

### **Diseñar e implementar optimizaciones del consumo de energía**

En este paso nos enfrentamos a la meta de diseñar e implementar algoritmos de optimización basados en el análisis de los marcos de aplicación y modelado, considerando los compromisos del modelo. Los algoritmos de optimización resultantes están destinados a reducir el consumo de energía del sistema de movilidad, buscando una solución de cero costes energéticos y cero emisiones. Es importante estudiar los algoritmos de optimización en el área considerando también nuevos enfoques para abordar cada reto específico de la investigación.

### **Evaluación del rendimiento**

Para evaluar los algoritmos propuestos se propone el siguiente procedimiento:

- Definir métricas relevantes para estimar el rendimiento del algoritmo.
- Definir y configurar el escenario de evaluación teniendo en cuenta los marcos de aplicación y modelado.
- Realizar un análisis teórico para estudiar los posibles rangos de optimización en el escenario propuesto. Los escenarios pueden consistir en simulaciones, infraestructuras reales o ambas para asegurar la repetitividad.
- Analizar los resultados obtenidos, extraer conclusiones y posibles orientaciones futuras.

### ***1.5.1. Estructura***

La tesis se estructura en tres secciones diferenciadas:

**Primera sección:** Introducción, Estado del Arte, Metodología, Materiales y Métodos

**Segunda sección:** Datos Empíricos, Parámetros de Movilidad

**Tercera sección:** Movilidad Última Milla con Energías Renovables, Conclusiones y Trabajo Futuro

Debido al carácter multidisciplinar de este estudio, cada sección consta de sus correspondientes capítulos organizados de tal modo que se pueda abordar las diferentes áreas de conocimiento tanto tecnologías como sociales en un solo documento, procurando que esta organización genere un hilo conductor que conecte las diferentes temáticas tratadas en esta tesis.

En la primera sección **Introducción, Estado del Arte, Metodología, Materiales y Métodos**, donde se describe la motivación y contexto background del problema, tratando de evaluar con informes de otros ámbitos la necesidad real de un sistema como el que se propone y su idoneidad como palanca de cambio de la actual gestión de la movilidad con transporte en base a combustibles fósiles en las ciudades. En el estado del arte, se destaca las limitaciones de los enfoques actuales y las restricciones que son necesarias a tener en cuenta para una solución realista. En las áreas de Metodología, Materiales y Métodos se describe de forma sintetizada los diferentes prototipos diseñados y desarrollados en el proyecto [17] que con la realimentación de las encuestas y entrevistas de los empleados, conforman el sistema a estudiar y que sirven como generadores de datos empíricos que realimentan las siguientes secciones de este estudio y finalizando en la alimentación al modelo de optimización del caso de estudio.

En la segunda sección **Datos Empíricos, Parámetros de Movilidad**, se detallan todas las acciones realizadas en el proyecto, en caminadas a verificar la viabilidad de los pilotos puestos en marcha de sistemas de movilidad con bicicletas eléctricas para los empleados de un centro de trabajo con una gran extensión, tanto para los desplazamientos internos como finalmente para los desplazamientos Commuter que tratan de los trayectos realizados desde los hogares de los empleados hasta el centro de trabajo realizados exclusivamente con bicicletas eléctricas. En el área de Datos empíricos se muestran todos los prototipos realizados para la obtención de información referentes a los módulos energéticos de las bicicletas eléctricas como los motores, baterías, etc. y los pilotos de sistemas de movilidad puestos en marcha en el proyecto. En el área de Parámetros de Movilidad, se centra en el estudio de los datos empíricos obtenidos por los prototipos y pilos de movilidad puestos en marcha en el proyecto, obteniendo resultados experimentales que sirven de semilla para definir el sistema a estudio en este trabajo de tesis.

En la tercera sección **Movilidad Última Milla con Energías Renovables, Conclusiones y Trabajo Futuro**, se detalle el caso a estudio y donde se realizan los diferentes modelos de optimización con los datos obtenidos experimentalmente en los anteriores apartados, obteniéndose como resultado un sistema de movilidad que cumple con las restricciones planteadas y concluyendo con la demostración de un sistema diferente a lo existente y que contribuye a mejorar la aplicación de los sistemas de movilidad con bicicleta eléctrica en entornos de urbanos de última milla con cero emisiones contaminantes y con cero consumo energético en la red distribución de energía local, autoabasteciendo con energías renovables en base a una instalación fotovoltaica integrada en los edificios BIPV y evitando la sobrecarga a causa de la demanda de energía del sistema en las subestaciones de la distribución eléctrica en el la zona de implantación del sistema de movilidad. En área de Trabajo Futuro se propone continuar con nuevo sistema de movilidad que mejoraría el propuesto en base a la utilización de un sistema de parking móvil.

### ***1.5.2. Medios***

El proyecto de tesis se realiza dentro del equipo de trabajo en eficiencia energética en centros de datos del Laboratorio de Sistemas Integrados (LSI) perteneciente al Departamento de Ingeniería Electrónica, de la ETSI Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

El grupo LSI tiene una amplia experiencia en la optimización del consumo de energía utilizando metaheurísticas para el desarrollo de estrategias proactivas.

El grupo LSI proporciona el equipo, hardware y software necesarios para desarrollar, probar y validar el trabajo propuesto, así como el equipo necesario para diseñar, implementar y probar cualquier hardware y fundamentalmente software que se desarrolle durante la ejecución de este proyecto de tesis.

El autor de esta tesis dirigió el proyecto GESMOL [17] “Impacto de la Gestión Energética sobre el Desarrollo de los LEVS como Modo de Transporte Alternativo en las Soluciones de Movilidad Urbana/Metropolitana”, un proyecto de investigación que recibió financiación por parte del Ministerio de Fomento en base al Séptimo Programa Marco de la Unión Europea (FP7/2007-2013) en virtud del acuerdo de subvención nº270833, del cual se han utilizado los datos obtenidos en el mismo para parte del desarrollo de esta tesis. En las tareas y trabajos del proyecto para el desarrollo de prototipos y mantenimiento de los mismos se tuvo el apoyo de dos técnicos de Formación Profesional y en el trabajo de ingeniera social enfocadas a las encuestas y entrevistas se contó con la participación de la cooperativa Goteo. Cultura sostenible. El proyecto presentaba el estudio del impacto de la gestión energética y social sobre el desarrollo de las bicicletas eléctricas de pedaleo asistido, como modo de transporte alternativo individual en los desplazamientos de los trabajadores dentro de los centros de trabajo y entre sus casas desde/hacia el trabajo, con el propósito de la búsqueda de nuevas soluciones de movilidad urbana/metropolitana.

Por otra parte, el autor de esta tesis participó en el proyecto (VE2) “Sistema Inteligente de Gestión Energética del Edificio utilizando Vehículos Eléctricos”,

donde sobre todo se puede revisar el estado del arte de los coches eléctricos y las diferentes tecnologías y gestión de recarga de los mismos. Programa Nacional de Cooperación Público-Privada, Subprograma INNFACTO (IPT-2012-1072-120000). Participaron la empresa N2S y los Organismos Públicos de Investigación Universidad Politécnica de Madrid y CIEMAT. El objetivo principal del proyecto VE2 era el desarrollo de una plataforma que gestionara de forma efectiva, la interacción entre los vehículos eléctricos conectados a la red eléctrica de un edificio y el propio consumo eléctrico del edificio, permitiendo una reducción del coste total de energía eléctrica de dicho edificio con el apoyo de los vehículos eléctricos. Pero por cuestiones ajenas a los Organismos Públicos de Investigación el proyecto finalizó abruptamente, aunque en el tiempo que duró se pudo estudiar en el área de los vehículos eléctricos tipo segmento B y la integración energética con los edificios, la red de distribución y sus baterías.

## ***1.6. Contribuciones***

En este trabajo de tesis se expone un sistema de movilidad de bicicletas eléctricas compartidas impulsado por energía generada con energías renovables utilizando BIPV, como una solución de transporte de última milla, para que los usuarios puedan realizar los recorridos desde un nodo de transporte público a su centro de trabajo y viceversa y del que se enumeran a continuación las contribuciones más importantes:

- 1- Se demuestra que, al aplicar un algoritmo de optimización basado en datos experimentales, es posible incrementar la tasa de uso de bicicletas eléctricas en un sistema de uso compartido. Este aumento se observa específicamente en los desplazamientos matutinos desde un nodo de transporte público masivo hacia un centro de trabajo, alcanzando una reutilización promedio de 3,8 usos por bicicleta eléctrica. Al sumar los desplazamientos de regreso por la tarde, también con un promedio de 3,8 usos, se obtiene un total de 7,6 usos por bicicleta eléctrica al día. Este resultado supera significativamente

el promedio de 3,4 usos diarios por bicicleta eléctrica registrado en el sistema de movilidad BiciMAD, según las estadísticas publicadas en su sitio web en la pestaña de estadísticas, en la página 11.

- 2- Basándose en los datos experimentales de consumo del sistema de movilidad, los resultados obtenidos de la optimización del uso del sistema y la energía solar disponible en la zona de estudio, se demuestra en la página 194, que el sistema es energéticamente autosuficiente incluso en un día de diciembre, estadísticamente el de menor radiación solar del año según la herramienta PVGIS, en la página 183. Además, no solo el sistema opera de manera eficiente en el peor día de radiación solar del año, sino que, iniciando con un estado de carga SOC del 11,11% para la flota de bicicletas eléctricas, al final de la jornada se alcanza un SOC del 91,07%, tras un consumo del 18% para los desplazamientos diarios. Esto demuestra que, con un SOC inicial del 91,07%, la flota podría operar durante cinco días adicionales sin depender de nueva energía solar. En cuanto al vehículo PickUP, comenzando con un SOC del 33,3% tras el peor día de radiación solar y realizando los recorridos necesarios para redistribuir las bicicletas eléctricas, finaliza la jornada con un SOC del 64,22% tras un consumo del 46,2%. Esto indica que el PickUP podría operar un día más sin necesidad de recarga solar. Estos resultados confirman que el sistema es energéticamente autosuficiente, sin generar sobrecargas en los puntos de distribución eléctrica del entorno urbano. Esto asegura la viabilidad de implementar sistemas de movilidad compartida de bicicletas tradicionales y eléctricas autosuficientes energéticamente en áreas urbanas, como se planteaba en otros estudios mencionados en la página 11.
- 3- Se demuestra que la integración de sistemas de captación de energía solar fotovoltaica en las fachadas de edificios BIPV puede alimentar un

sistema de movilidad de última milla basado en bicicletas eléctricas que permite el desplazamiento de los empleados desde un nodo de transporte público hasta su centro laboral y viceversa. A diferencia de otros sistemas de captación de energía fotovoltaica, los BIPV no buscan maximizar la captación de radiación solar, sino incorporar los módulos fotovoltaicos como un elemento constructivo multifuncional. Además de su función ornamental y su capacidad como aislante térmico, estos módulos generan energía a partir de la radiación solar capturada en su ubicación en el edificio, tal como se detalla en la página 183. Asimismo, se evidencia que el sistema de movilidad propuesto, diseñado para resolver los problemas de desplazamiento de última milla en entornos urbanos, es un aliado clave para aprovechar la energía fotovoltaica barata y abundante que se espera que prolifere en los próximos años. Este enfoque permite evitar la sobrecarga de redes eléctricas de distribución ya saturadas en zonas urbanas. Este diseño optimizado, que armoniza la generación renovable variable, como la energía fotovoltaica, con la demanda energética del sector transporte que es uno de los sectores mayores consumidores de energía, puede contribuir modestamente a los objetivos de sostenibilidad propuestos [27]. Como se mencionó en capítulos anteriores, en la página 7, en países como Alemania, que aspiran a alcanzar un 80 % de generación renovable para 2050, este tipo de soluciones resulta fundamental para lograr dichos objetivos. Estudios recientes destacan la relevancia de coordinar la generación renovable con la demanda para cumplir estas metas ambiciosas [22].

- 4- Se ha demostrado que resolver las necesidades de desplazamiento de última milla de los empleados de un centro de trabajo, como se evidenció en los resultados de las encuestas y entrevistas realizadas a los empleados del caso de estudio en la página 166, permitiría reducir significativamente el uso de vehículos particulares para desplazarse

desde sus hogares al centro laboral. Esto conllevaría una disminución en el número de vehículos motorizados de combustión interna, reduciendo la contaminación atmosférica local y liberando espacio en las vías de circulación, tal como se analiza en estudios como el realizado en las calles de Bogotá [28]. Además, esta medida aportaría beneficios adicionales, como evitar la saturación de los flujos de desplazamiento hacia los centros laborales en las ciudades y reducir los tiempos de viaje de los empleados. Esto sería posible gracias a la integración del sistema de movilidad de última milla con los sistemas de transporte público masivo, tales como autobuses interurbanos con vías dedicadas Bus VAO, trenes de cercanías, líneas de metro y autobuses urbanos.

5- Se demuestra la viabilidad de realizar desplazamientos a eventos utilizando vehículos eléctricos alimentados exclusivamente con energía fotovoltaica, como se expuso en el estudio [29], derivado del proyecto VE2. Este estudio se basó en el uso de cuatro minivanos eléctricos, cada una con capacidad para seis pasajeros, y un total de cuatro conductores para transportar a 72 pasajeros. El tiempo máximo promedio de espera para que un pasajero abordara una minivan fue de nueve minutos, y todos los desplazamientos se completaron en una hora. El análisis comparativo evidencia que el nuevo sistema de movilidad con bicicletas eléctricas para última milla presenta ventajas significativas frente al sistema de minivanos, entre ellas:

- Menor consumo energético diario: 12,7 kWh/día en el sistema de última milla frente a 32,46 kWh/día en el sistema de minivanos.
- Mayor número de desplazamientos: 95 en el sistema de última milla frente a 72 en el sistema de minivanos.
- Reducción en el número de vehículos y operarios: 1 vehículo Pickup con un operario en el sistema de última milla, en comparación con 4 minivanos y 4 operarios en el sistema de minivanos.

- Menor ocupación de la vía pública: Las bicicletas eléctricas requieren menos espacio en los trayectos que las minivanes.
- Reducción en el tiempo de desplazamiento por pasajero: En el sistema de última milla, el transporte es a demanda, ya que los empleados pueden acceder inmediatamente a una bicicleta eléctrica al salir de la estación de metro para llegar al centro de trabajo. En contraste, los asistentes al congreso en el sistema de minivanes deben esperar un promedio máximo de 9 minutos para iniciar el trayecto.

Este análisis resalta cómo el sistema de movilidad de última milla basado en bicicletas eléctricas no solo complementa, sino que mejora al de las minivanes eléctricas, consolidándose como una opción aún más eficiente y sostenible

### ***1.7. Publicaciones***

Los resultados de esta tesis doctoral, junto a las investigaciones relacionadas en los proyectos mencionados en el apartado anterior y de los estudios realizados se han publicado en conferencias y revistas internacionales, las contribuciones que se describen a continuación:

En el trabajo “Analysis of the impact of charging of Plug-in Hybrid and Electric Vehicles in Spain” [30]. En este estudio se examina el impacto de las diferentes tasas de penetración de vehículos eléctricos híbridos enchufables PHEV y vehículos eléctricos puros EV en el sistema eléctrico español. Se emplea un modelo estocástico para evaluar el viaje promedio y determinar los horarios de llegada y salida, con el objetivo de evaluar la disponibilidad de los vehículos para la carga. Si la carga se realiza sin una adecuada coordinación, el pico de potencia en las redes de distribución eléctrica puede aumentar considerablemente a medida que crecen las tasas de penetración. Para mitigar este efecto, se propone un novedoso método de carga que reduce el pico de potencia y optimiza las zonas valle

fuera de los picos de demanda, sin la necesidad de implementar comunicación bidireccional entre todos los agentes involucrados.

En el trabajo “Evaluation of the utilization of electric vehicles for building energy management in hotels” [31]. Con el objetivo de facilitar el despliegue de vehículos eléctricos y contribuir a la reducción de sus costes finales, se propone el aprovechamiento de las baterías de estos vehículos cuando se encuentran estacionados, con el fin de minimizar el coste total de la electricidad de los edificios, una aplicación conocida como Vehículo a Edificio V2B. Se presenta una evaluación económica de los vehículos eléctricos en el sistema de gestión energética de edificios, determinando la capacidad óptima de almacenamiento y su número equivalente en vehículos eléctricos, distribuidos eficientemente para maximizar tanto la eficiencia energética como los ahorros económicos. La variación del estado de carga SOC durante los primeros días, especialmente en comparación con días posteriores, resalta la necesidad de una estrategia personalizada de carga y descarga. En particular, se observan diferencias significativas en los ciclos de carga y descarga dependiendo del SOC inicial. Por ejemplo, al comenzar con un SOC del 30% o 40%, es posible aplicar un ciclo completo, logrando así los máximos ahorros, mientras que a un SOC más alto o más bajo se presentan limitaciones que afectan los beneficios obtenidos. Además, la programación de la carga en períodos de menor demanda energética permite optimizar los costes, resaltando la importancia de una gestión eficiente del SOC para maximizar los beneficios económicos. Este enfoque demuestra cómo la integración de bicicletas eléctricas en sistemas optimizados puede ofrecer soluciones sostenibles y económicas, mejorando tanto la viabilidad económica como ambiental en el contexto de la movilidad urbana de última milla.

En este trabajo “Determining Electric Vehicle Charging Point Locations Considering Drivers’ Daily Activities” [32]. Se ha abordado la modelización del comportamiento temporal y espacial de los vehículos eléctricos EV mediante un modelo de microsimulación basada en actividades ActBM para la región de Flandes, Bélgica. Considerando que todos los vehículos eléctricos se encuentran completamente cargados al inicio del día, este modelo de movilidad permite

determinar qué porcentaje de vehículos no pueden cubrir sus trayectos diarios programados y requieren ser recargados durante el día. Además, asumiendo una tarifa variable de electricidad, un algoritmo de optimización determina cuándo y dónde los EV pueden ser recargados al mínimo coste para sus propietarios. Esta optimización tiene en cuenta la restricción de movilidad individual de cada vehículo, ya que solo pueden cargarse cuando el automóvil está detenido y el propietario está realizando una actividad. A partir de esta información, se obtiene la demanda eléctrica agregada para Flandes, identificando las zonas más congestionadas en horas críticas. En cuanto al sistema de bicicletas eléctricas de última milla, este enfoque se alinea con los resultados obtenidos, ya que la mayor parte de la carga se realiza durante la jornada laboral. Este análisis resalta la necesidad de una infraestructura de carga bien distribuida, adaptada a las particularidades de movilidad de cada área.

En este trabajo "Feasibility study of an electric shuttle fleet fed by solar power" [29]. Se plantea la viabilidad de un servicio de flota de minibuses eléctricos, minivans, para ser utilizado en la 6ª Conferencia Internacional sobre Tecnología de la Información Sostenible SEIT 2016, realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid UPM, situada en el Campus de Excelencia Internacional de Moncloa. En este contexto, se presenta un estudio de viabilidad en el que se calcula el número mínimo necesario de minivans eléctricas, para atender la demanda de asistentes que se desplazan desde la estación de metro hasta el lugar de la conferencia. Con esta información, se evalúa la energía total requerida para transportar a estos asistentes utilizando minivans eléctricas, considerando la generación de energía a partir de paneles fotovoltaicos conectados a la red en el lugar del evento, diseñando un servicio con una flota de minivans eléctricas libre de emisiones GEI. Los resultados muestran que es completamente viable diseñar un servicio de transporte eléctrico sin emisiones, incluso en escenarios en los que se requiera un mayor número de vehículos. En este caso, la capacidad total de generación de energía solar supera ampliamente la demanda energética de la flota eléctrica, lo que demuestra la viabilidad de una solución de transporte sostenible basada en

fuentes renovables. Este enfoque también se alinea con sistemas de movilidad de última milla como bicicletas eléctricas, donde la optimización del uso de energía limpia y la reducción de emisiones juegan un papel fundamental para mejorar la sostenibilidad urbana. La integración de soluciones como estas contribuye al desarrollo de un transporte eficiente y ecológico en áreas urbanas congestionadas.

En este artículo “Feasibility study of a building-integrated PV manager to power a last-mile electric vehicle sharing system” [33]. Se analiza un modelo de sistema de vehículos compartidos con energía solar que utiliza energía fotovoltaica integrada en edificios BIPV, lo que dio como resultado un sistema de movilidad de sin emisiones de Gases de Efecto Invernadero GEI, ni consumo de energía de la red de distribución de energía para el transporte de empleados de última milla. Como caso de estudio, se modela matemáticamente y se optimiza un sistema de bicicletas eléctricas compartidas entre un nodo de transporte público y un centro de trabajo para minimizar el número de viajes de bicicletas para satisfacer la demanda de traslado de los empleados, minimizando al mismo tiempo el consumo total de energía del sistema. Funcionando todo el sistema de movilidad íntegramente con energía fotovoltaica y almacenando la energía en las baterías de los vehículos eléctricos.

## ***2. Estado del Arte***

En estos últimos años coincidiendo con el desarrollo de esta tesis que comenzaba ya en su inicio con unas motivaciones concretas y enfocadas a participar, aunque fuera aportando un mínimo grano de arena, en el tren de acciones globales encaminadas a la mejora de la vida urbana en las grandes ciudades de los países desarrollados tal y como enunciaba el panel de expertos en cambio climático [7], y que se ha plasmado en la introducción de esta tesis. A medida que han ido pasando los años, aunque se hayan implantado normativas y acciones por parte de los gobiernos de algunos países alineadas con las propuestas y acuerdos históricos en las diferentes conferencias de las Naciones Unidas sobre cambio climático para combatir el cambio climático y así acelerar e intensificar las acciones e inversiones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. Como en la última que se celebró del 30 de noviembre al 12 de diciembre de 2023 en Dubái (Emiratos Árabes Unidos) y que en el balance final de la misma los responsables de las negociaciones de casi 200 países reconocieron por primera vez la necesidad de abandonar los combustibles fósiles. "Aunque en Dubái no hemos pasado página a la era de los combustibles fósiles, este es el principio del fin", declaró Simon Stiell [27]

Sin embargo, como ya se vaticinaba hace años al inicio de este trabajo de tesis, hay más temáticas o áreas que están interrelacionadas con la calidad de vida de las personas en las ciudades, tal y como nos anuncia a continuación Antonio Guterres el noveno Secretario General de las Naciones Unidas en el informe de las ciudades del mundo de 2022:

*“En 2016, la comunidad internacional adoptó la Nueva Agenda Urbana para aprovechar el poder de la urbanización sostenible para lograr nuestros objetivos globales de sociedades pacíficas y prósperas en un planeta saludable. A pesar de los avances logrados desde entonces, la pandemia de COVID-19 y otras crisis han planteado enormes desafíos. Las zonas urbanas fueron particularmente afectadas por la pandemia, lo que subraya la importancia de intensificar los esfuerzos para*

*construir un mundo más sostenible y un futuro urbano equitativo. La localidad es el espacio donde conectamos los puntos. Los ciudadanos y sus ciudades pueden encabezar innovaciones para cerrar las brechas de desigualdad, implementar acciones climáticas y garantizar una recuperación verde e inclusiva de la pandemia, especialmente porque se espera que la proporción de personas que viven en áreas urbanas crecerá al 68% para 2050.*

*El Informe de Ciudades del Mundo 2022 destaca que el desarrollo de la flexibilidad debe estar en el centro de las ciudades del futuro. El éxito de las ciudades, los pueblos y las zonas urbanas dependerá en gran medida de políticas que protejan y sostengan a todos, sin dejar a nadie atrás. Necesitamos inversiones verdes para patrones sostenibles de consumo y producción; planificación urbana receptiva e inclusiva; la priorización de la salud pública; e innovación y tecnología para todos.*

*Estas medidas ayudarán a las ciudades a adaptarse y responder a las crisis y tensiones y conducirán a nuestro mundo hacia un futuro urbano flexible, justo y sostenible.” [27]*

Palabras como las del Secretario General de las Naciones Unidas contribuyen a pensar que se ha acertado en el camino tomado en este trabajo de tesis y donde se espera contribuir, evaluando un sistema de movilidad novedoso que está alineado con las medidas anunciadas.

## ***2.1. Sistemas de movilidad eléctrica***

Las administraciones locales de las grandes ciudades de los países industrializados, con problemas de contaminación, se han centrado en aplicar diferentes modelos/restricciones urbanísticos y sistemas de movilidad que reduzcan paulatinamente los efectos nocivos de la contaminación en la población afectada.

De estos sistemas de movilidad podemos enumerar los sistemas basados en vehículos eléctricos:

**car-sharing:** se trata de un sistema de uso en alquiler de coches, en su gran mayoría eléctricos, que suelen encontrarse en cualquier punto aparcados dentro de una zona determinada de actuación del servicio de la empresa de gestión del sistema de vehículos compartidos. Este tipo de empresas no suelen tener parkings fijos, salvo las zonas de campas o bases centrales donde suelen llevar a los vehículos a cargar, cuando se detecta una baja carga del mismo, el vehículo está averiado o en espera de una revisión preventiva o inspección técnica. Los usuarios con ayuda de una aplicación móvil, cuando necesitan utilizar este servicio localizan en un mapa los vehículos disponibles más cercanos para poder ser usados en su trayecto. Algunas de estas empresas que operan en ciudades españolas son: Free2Move, WiBLE, Zity, ShareNow, GoTo y Voltio.

**moto-sharing:** se trata de un sistema de uso en modo alquiler de motocicletas eléctricas de baja potencia, que suelen encontrarse en cualquier punto aparcadas en las áreas de funcionamiento del sistema, en este caso por la permisibilidad de las autoridades locales se pueden encontrar aparcadas incluso encima de aceras (zonas de paso de los peatones) según las dimensiones de las mismas, las zonas de actuación están más delimitadas que las de los coches eléctricos, ya que este tipo de vehículos tienen mayores restricciones de uso en determinadas vías urbanas e interurbanas. Al igual que con los coches eléctricos este tipo de empresas no suelen tener parkings fijos, salvo las zonas de campas o bases centrales donde suelen llevar a los vehículos a cargar, y a realizar cualquier tipo de mantenimiento o gestión administrativa. Los usuarios base a una aplicación móvil, cuando necesitan utilizar este servicio localizan en un mapa los vehículos disponibles más cercanos para poder ser usados en su trayecto.

los sistemas de movilidad basados en vehículos eléctricos ligeros:

**scooter-sharing:** se trata de un sistema de uso de patinetes en alquiler en su gran mayoría para trayectos cortos. Las empresas de alquiler no suelen tener

parkings y si las tienen son zonas delimitadas con dos barras para que en las zonas concurridas por peatones en las ciudades no se encuentren patinetes en medio de la vía pública molestando el paso e incluso generando peligro a los mismos. Tampoco tienen bases de recarga en la vía pública, por lo tanto, no tienen ubicación fija y los usuarios los dejan y los cogen en el área delimitada como zona activa de servicio, aunque últimamente este tipo de sistema compartido de movilidad está en el punto de mira de las autoridades locales debido a los problemas de convivencia que está teniendo en las aceras con los viandantes y en las vías de circulación con el resto de vehículos.

**bikes-sharing:** se trata de un sistema de uso en alquiler de bicicletas en su gran mayoría para trayectos medios. En esta tipología hay empresas que utilizan bicicletas tradicionales sin motorizar y otras que utilizan bicicletas eléctricas motorizadas. Aunque en este trabajo de tesis se centra en las bicicletas eléctricas, según el uso, la orografía del terreno y la distancia a recorrer se podría utilizar también las bicicletas tradicionales. En este tipo de modalidad las empresas que usan bicicletas tradicionales no suelen usar parkings fijos, debido a que este tipo de bicicletas no necesitan recargar su batería para el desplazamiento (aunque sí tienen una pequeña batería para la geolocalización y sistema de cierre de las misma), las empresas que utilizan en su parque móvil bicicletas eléctricas sí optan por nodos o parkings fijos donde los usuarios deben dejar las bicicletas después de su uso, para que estas se le pueda activar un candado para su próximo uso y además se pueda recargar la batería de tracción de la misma. Las empresas de bicicletas eléctricas compartidas están extendiendo sus áreas de actuación en las ciudades que ya están implantadas.

Los gobiernos locales están facilitando la implantación, siguiendo unas normas, diferentes iniciativas para los sistemas de vehículos compartidos respetuosos con el medio ambiente. Después de varios años de proyecto técnico/experimental sobre la movilidad con bicicletas eléctricas [17], se concluyó que este tipo de vehículo eléctrico se puede utilizar en zonas urbanas para reducir la contaminación del aire, la congestión del tráfico, la emisión de ruido y el consumo

de energía, lo que permite un estilo de vida más saludable. Por esta razón, los gobiernos llevan promoviendo diferentes iniciativas para utilizar bicicletas como una alternativa a los vehículos de motor de combustión interna privados [18]. En estos trabajos se concluye que la mayoría de los usuarios que pueden subir la bicicleta a un medio de transporte público, al final viajan entre 2 y 5 kilómetros desde la parada del transporte público hasta el lugar de trabajo o casa. Los principales viajes que se realizan de este modo son para desplazarse al trabajo y para el desplazamiento de estudiantes a los centros de estudio, el gran condicionante de la elección de bicicleta/ transporte público o coche privado es el tiempo invertido por el desplazamiento en transporte público.

Diferentes tipos de programas públicos de bicicletas compartidas han ido surgido en muchas ciudades en todo el mundo en los últimos años [34] [19] [20]. Las bicicletas se distribuyen en diferentes estaciones de bicicleta en toda la ciudad y los usuarios pueden recoger una bicicleta desde cualquier estación de acoplamiento, devolviéndola a cualquier otra ubicada dentro de la red. Estos sistemas deben ser manejados y mantenidos por los operadores, quienes son responsables de monitorear las estaciones y mover las bicicletas de las estaciones con más bicicletas a las estaciones con menos bicicletas. Por lo general, estos operadores utilizan un vehículo con motor de combustión interna para repartir bicicletas entre diferentes estaciones de parking.



Figura 11. Operarios repartiendo bicicletas eléctricas con camioneta

La gestión que realizan los operarios, balanceando las bicicletas en las diferentes estaciones o parkings, reduce los problemas surgidos cuando un usuario

particular no puede disponer de una bicicleta libre para su uso en un parking o estación o no puede dejar una bicicleta en una estación ya que no hay sitio libre para aparcarla.

Otro aspecto negativo que está teniendo mucha relevancia en la operación de los sistemas de bicicletas compartidas es debido al robo y el vandalismo de las bicicletas y sus estaciones, aumentando el coste operación en reparaciones y reemplazos de bicicletas y por lo tanto reduciendo los beneficios del operador contratista [35].

Los sistemas de bicicleta compartida se pueden utilizar en viajes de punto a punto o puede combinarse con otros modos de transporte en las ciudades, lo que aumenta la flexibilidad de las infraestructuras de transporte público. Por ejemplo, uno de los puntos más débiles de un sistema de transporte público es acceder a ellos por la distancia que se encuentran desde el centro de trabajo o estudios y/o a la vivienda del usuario. Las bicicletas se pueden utilizar para cubrir estos viajes específicos, reduciendo el tiempo total del recorrido de puerta-a-puerta, haciendo la combinación de bicicleta-transporte público más competitivo en comparación con los automóviles privados [23]. Además si son bicicletas eléctricas, que utilizan para desplazarse el apoyo de un motor eléctrico, ayudan a realizar estos desplazamientos con menos esfuerzo y con una velocidad más constante [17].

Algunos programas de intercambio de bicicletas eléctricas han ido surgido en diferentes entornos urbanos en estos últimos años: como en un Campus Universitario, como el campus de la Universidad de Tennessee, Knoxville (UTK) en los Estados Unidos [25], donde se expone que la bicicleta eléctrica compartida produce menos gases de efecto invernadero GEI por persona que en comparación con otros modos de desplazamiento, este sistema se centra en utilizar baterías de intercambio para mantener en funcionamiento las bicicletas eléctricas.



Figura 12. Sistema compartido de e-bikes en (UTK) EEUU [25]

Desde hace años diferentes ciudades europeas como Copenhague [36] o Madrid [37], sus ayuntamientos comenzaron a poner en marcha sistemas similares. En estos sistemas de bicicletas eléctricas compartidas, las baterías se pueden cargar directamente cuando las bicicletas eléctricas están estacionadas o pueden intercambiarse por otras completamente cargadas en las estaciones de acoplamiento.

Debido a que la distancia a recorrer es un parámetro clave a la hora de la selección de la ubicación la estación de recarga o parking de las bicicletas eléctricas de uso compartido, se empezaron a plantear diferentes técnicas para poder seleccionar la ubicación ideal en base a parámetros introducidos o en aplicaciones tipo GIS “Geographic Information System” [38] y así comprobar con simulaciones si la ubicación estimada cumplía con los requisitos fijados en el plan de movilidad de la ciudad tales como acceso a la población, actividades y estaciones de transporte público. De este modo se pueden obviar ubicaciones que quedan relativamente aisladas de los flujos de movilidad. Al igual que en el caso de las bicicletas eléctricas, para ciudades con más densidad de población y mayor distancias que recorrer también se utilizan aplicaciones enfocadas a encontrar la ubicación adecuada de las estaciones de recarga de los vehículos eléctricos ligeros o scooter eléctricos [39].

Es evidente que a medida que va pasando el tiempo cada vez crece más el uso de los vehículos eléctricos ligeros en las grandes ciudades, por ejemplo en los países asiáticos como China este uso crece en comparación con las bicicletas tradicionales, para cubrir las distancias cotidianas y por ello cada vez es más necesario políticas de los gobiernos adaptadas al uso y convivencia de estos vehículos en los entornos urbanos [40], en otros países como la India el problema surge cuando esta aumentado significativamente el uso de los vehículos en las ciudades y al no tener un tejido industrial dedicado a la fabricación de vehículos eléctricos ligeros, se produce la convivencia de las bicicletas normales con pequeños vehículos de combustión interna haciendo cada vez más inhabitables las ciudades por el exceso de Gases Nocivos producidos por los motores de combustión interna [41].

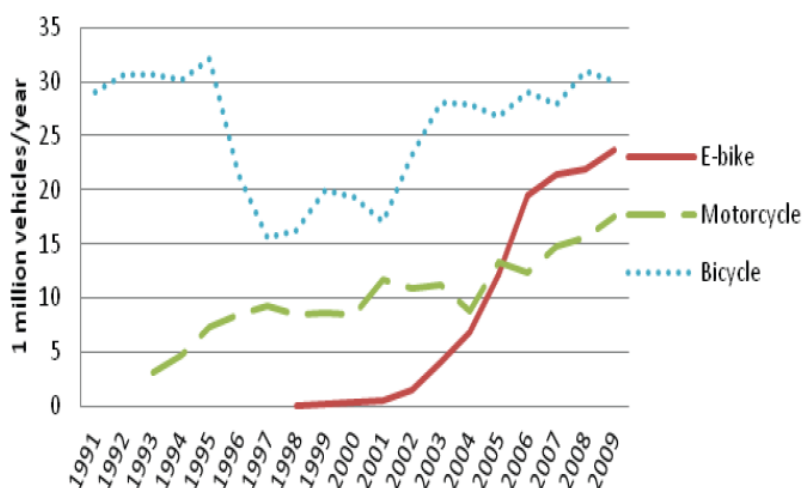


Figura 13. Evolución ventas de vehículos eléctricos ligeros en China [40]

Son muchos los trabajos donde se empiezan a presentar diferentes claves para conseguir un transporte sostenible y para guiar de alguna manera a las políticas de los países a no fallar en el intento, planificando desde el inicio de su implantación programas de movilidad sostenible y poniendo especial cuidado en las áreas emergentes de innovación como: nuevos sistema de movilidad, la logística urbana, la gestión inteligente de sistemas y la integración con la forma de vivir la ciudad [42].

También se están realizando estudios de los resultados obtenidos en experiencias piloto de sistemas de movilidad con bicicletas eléctricas compartidas [43], como en la Tabla 5 para identificar las barreras del uso de las mismas [44].

Tabla 5. Opinión usuarios sobre sistema movilidad bicicleta eléctrica

	<i>Very good</i>	<i>Good</i>	<i>Poor</i>	<i>Very poor</i>
Comfort	44%	50%	6%	0%
Convenience	50%	43%	6%	0%
Power	47%	47%	0%	6%
Stability	47%	35%	18%	0%

Como curiosidad hay trabajos [45] donde atacan el problema desde la infraestructura, diseñando infraestructuras urbanas como pasarelas con pequeña inclinación y cubiertas para que el desplazamiento en bicicleta no le afecte las inclemencias meteorológicas viento, lluvia, etc.

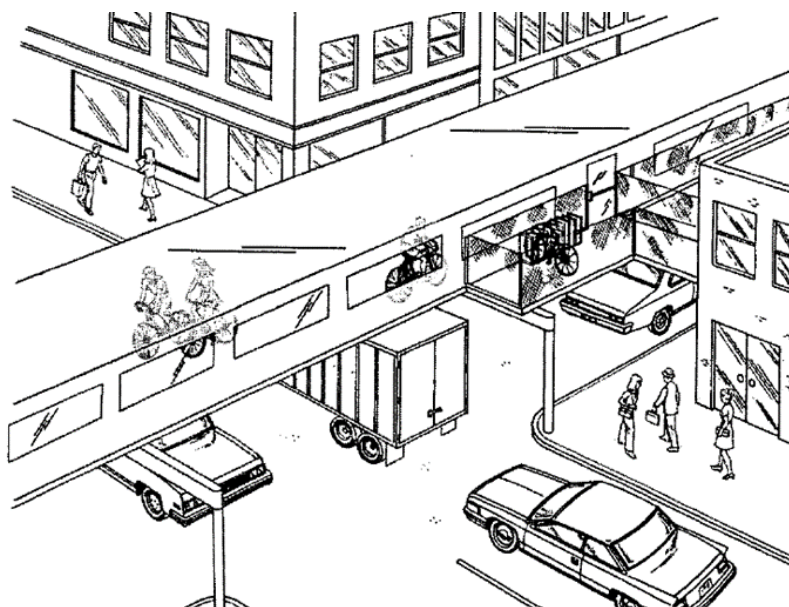


Figura 14. Propuestas infraestructuras urbanas para movilidad [45]

Para que un sistema compartido de bicicletas eléctricas se le pueda denominar como un sistema de Movilidad Sostenible, ha de considerar y compatibilizar cinco aspectos fundamentales:

- Las necesidades de desplazamiento individual
- Los medios e infraestructuras requeridos
- La calidad de vida y de salud de la comunidad en su conjunto
- Eficiencia Energética
- La capacidad de regeneración del medio ambiental en el que se enmarca

Por todo ello, la gestión de la movilidad supera el ámbito de la decisión individual. Es un tema que debe contemplarse desde una perspectiva colectiva y, por lo tanto, debe ser objeto para la búsqueda de consenso social y fruto de atención y acciones políticas de las administraciones competentes.

## ***2.2. Vehículos Eléctricos***

Aunque el vehículo eléctrico apareció antes que el vehículo de combustión interna en poco tiempo fue retirado por el vehículo convencional, debido sobre todo a los bajos costes que se llegaron a conseguir gracias a la producción en cadena tipo Henry Ford. El parámetro fundamental que desplazo hasta el olvido al vehículo eléctrico fue el incremento de la autonomía y por tanto de los kilómetros recorridos por depósito de los vehículos de combustión interna, que lo conseguía la alta densidad energética del combustible fósil.

Ha sido hace pocos años cuando los vehículos eléctricos han vuelto a aparecer en el mercado, los primeros en reaparecer han sido los vehículos eléctricos ligeros, han sido protagonistas de muchos trabajos de caracterización [46] [47] de los módulos energéticos de los que constan como: motor, controlador, batería. Debido a que muchos de los fabricantes de estos vehículos ligeros son asiáticos en el inicio de la comercialización de estos vehículos no existía una normativa clara al respecto y sumado a que parte de los fabricantes asiáticos no daban mucha

información de los mismos, era necesario caracterizar estos vehículos para estudiar su comportamiento.

Estos vehículos se les llama personales por que la gran mayoría solo puede llevar a un único pasajero tipo patinetes eléctricos y bicicletas eléctricas, ofrecen los beneficios al usuario de un vehículo eléctrico para desplazamientos cortos y a poca velocidad con la ventaja de ser más económicos, en el estudio [48] uno de los parámetros estudiados sobre su coste está en relación al peso del vehículo en fabricación.

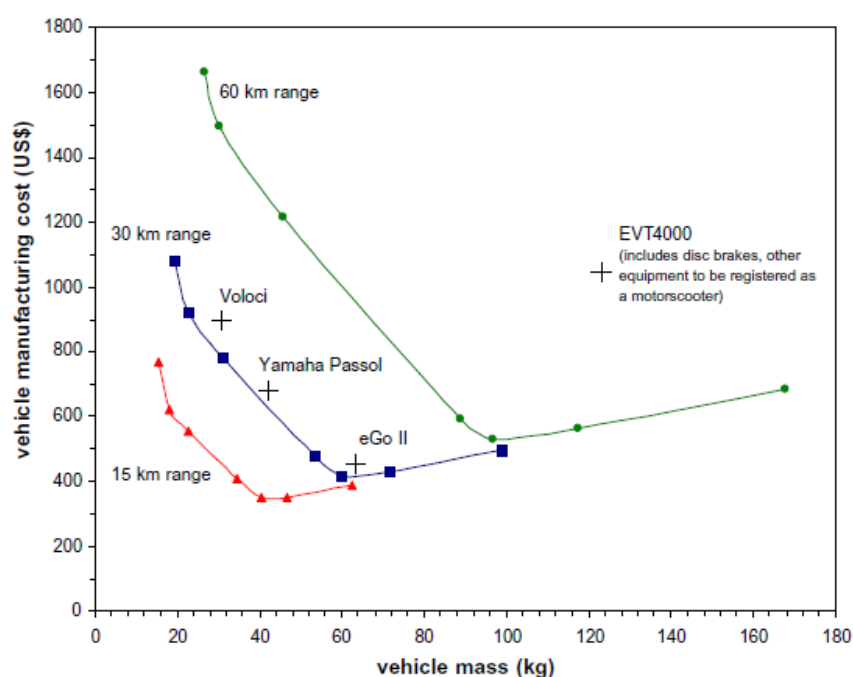


Figura 15. Estimación coste fabricación Vs peso Vs autonomía [48]

En el caso de los vehículos eléctricos de cuatro ruedas, tipo utilitarios con las mismas prestaciones que los coches de combustión interna, se enfrentan a una serie de barreras, de las cuales las más importantes son el elevado valor de compra de los vehículos eléctricos con mayores autonomías y los vehículos eléctricos de menor precio a la baja autonomía que los hace solo útiles para ambientes urbanos y por tanto hoy en día es difícil que sea la elección para una familia que tenga solo un coche para el uso urbano y largos desplazamientos. Cada vez más se empiezan

a implantar los vehículos eléctricos como solución en los tipos de operaciones de última milla de logística urbana, tal y como se plantea en el estudio [24].

Son los vehículos híbridos y posteriormente los vehículos eléctricos híbridos enchufables PHEV, los que han servido para allanar el camino en el mercado a los vehículos eléctricos puros, ya que durante mucho tiempo han demostrado ser una opción más en el mercado del automóvil, mejorando los parámetros de consumo de los vehículos de combustión.

No tiene mucho sentido hablar más de este tipo de vehículos debido a que ya están completamente asentados en nuestra sociedad, si acaso lo que más interesa ahora de los mismos es el aporte de cambio al sistema actual de transporte y en la integración al sistema energético.

Otro de los vehículos eléctricos que están creciendo cada vez más en número en las grandes ciudades, son las bicicletas eléctricas y en definitiva es en el vehículo eléctrico que nos vamos a centrar en este trabajo de tesis.

En los artículos [49] [50] se ofrece una caracterización sistemática, integral, teórica y experimental de bicicletas eléctricas. Identifican las necesidades y desafíos en el diseño de las bicicletas eléctricas, abordando por ejemplo, la relación potencia - peso – velocidad en diferentes casos, tal y como muestra en la Figura 16. En otros informes se estudia más opciones de la bicicleta eléctrica [45] como la simulación de una bicicleta híbrida [51].

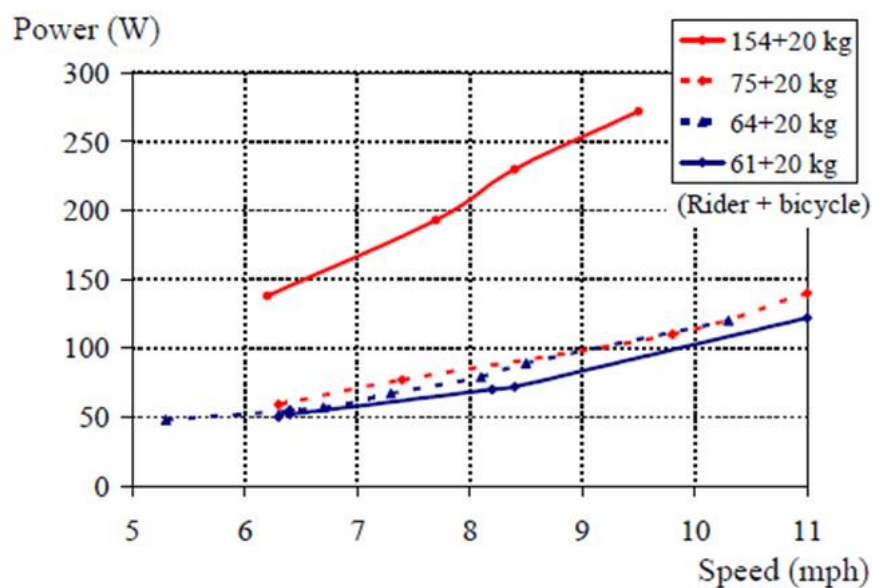


Figura 16. Influencia del peso sobre la potencia frente a la velocidad

Aunque en otros países existen diferentes normativas referentes al modo de funcionamiento de una bicicleta eléctrica este trabajo se centra en la normativa española. La bicicleta eléctrica de pedaleo asistido es una bicicleta convencional a la que se le ha acoplado un motor eléctrico en la rueda, que puede ser en delantera o en la trasera, o en el eje de pedaliar (menos común) para ayudar de forma síncrona con el movimiento de pedaleo en el avance de la misma. La energía necesaria para mover el motor se suministra por una batería recargable, que puede estar integrada en el chasis de la bicicleta eléctrica o puede ser portátil, que se suele recarga desde la red eléctrica. Según los proveedores y fabricantes, la autonomía suele ser de unos 40-80 km. (según tipo de batería, capacidad energética, el peso del ciclista y el uso que le dé) y una velocidad máxima del motor de 25 Km/h, según la Directiva 2002/24/CE<sup>2</sup>. Según la legislación, el motor debe de desconectarse automáticamente si se sobrepasa dicha velocidad, y tendrán la consideración de bicicletas a efectos de circulación, siempre que:

<sup>2</sup>[http://europa.eu/legislation\\_summaries/internal\\_market/single\\_market\\_for\\_goods/motor\\_vehicles/motor\\_vehicles\\_technical\\_harmonisation/l21024\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/motor_vehicles_technical_harmonisation/l21024_es.htm)

- No superen un peso de 40 Kg.
- Sólo proporcionen asistencia mientras se pedalea.
- El motor se desconecte a partir de 25 Km/h
- Tengan una potencia no superior a 250 W.

En otras regiones del mundo, la legislación sobre bicicletas eléctricas son diferentes y suelen permitir más potencia al motor y más velocidad. Por ejemplo, en Canadá las legislaciones definen las bicicletas eléctricas como “Una bicicleta con una batería añadida que acciona un motor que no excede 500 W y puede asistir el usuario hasta 32 km/h. En general, la legislación de los diferentes Estados de EEUU declara que el motor de la bicicleta eléctrica puede tener hasta 750 W y alcanzar un máximo de 32 km/h.

Se parte de la hipótesis de considerar que los vehículos eléctricos ligeros LEV pueden jugar un papel importante como soluciones realistas de movilidad y medioambientales, más aún si tenemos en cuenta el poco o nada consumo responsable de energía que en la actualidad hace la sociedad. Además, hay que tener en cuenta la necesidad de resolver los problemas de congestión y deficitaria calidad del aire en los grandes núcleos urbanos. Como se ha demostrado en países como Alemania, Suiza, EE.UU., Canadá, India o China, los vehículos eléctricos ligeros LEV y en especial las bicicletas eléctricas pueden representar un nuevo modo de transporte y servir de agente de cambio práctico y útil.

El éxito de estos vehículos como solución de movilidad urbana/metropolitana radica en las características de los mismos: saludable, cómodo, económico; accesible a un mayor rango de población independientemente de la edad, forma física y nivel económico, de fácil implantación; amplía el rango de acción en distancia y tiempos de otros modos de transporte (bicicletas, transporte público, etc.), que contribuyen a que la ciudad se viva con más intensidad y se disfrute más del paisaje urbano; etc.

### ***2.3. Almacenamiento de energía***

Los sistemas de almacenamiento de energía “Energy Storage System” ESS, de forma genérica se podría decir que es un dispositivo o grupo de dispositivos ensamblados entre sí, capaces de almacenar energía para suministrar energía eléctrica en un momento posterior. Según la forma que tiene el dispositivo para almacenar energía existen diferentes tecnologías de almacenamiento, en concreto para los vehículos eléctricos se buscan tecnologías de almacenamiento que posean alta densidad energética en definitiva que los dispositivos pesen poco para que no suponga un lastre para el vehículo tractor y que estos dispositivos procuren almacenar el máximo de energía posible.

El tipo de dispositivo de almacenamiento que suelen usar actualmente los vehículos eléctricos son las baterías electroquímicas, sobre todo las basadas en Litio. Como en este trabajo de tesis también se va hablar de generación renovable con paneles fotovoltaicos, decir que en estos casos también se pueden utilizar baterías de baja densidad energética más económicas, de alto peso ya que son baterías estacionarias y no hay que moverlas del sitio.

En definitiva, las tecnologías de almacenamiento son una pieza clave para el éxito de los vehículos eléctricos y la integración de las energías renovables. Por ello, son tecnologías que están en una continua etapa de investigación y desarrollo [52] [53], adaptándose a las necesidades de los nuevos sistemas energéticos [54]. Estas tecnologías son el punto de mira de los investigadores, para el diseño y desarrollo de modelos cada vez más precisos que puedan simular situaciones reales de operación, con los diferentes módulos del sistema energético [55].

En general, los sistemas de almacenamiento de baterías con baja potencia nominal y baja capacidad energética pueden suavizar la demanda lo suficiente con la ayuda de un sencillo proceso de gestión. Por ejemplo, con 1 kW de demanda máxima, se puede lograr una disminución del 30-45% en la variabilidad del perfil de demanda diaria con un sistema de batería de potencia nominal de 0,1 kW y capacidad de batería de hasta 0,6 kWh [56].

Sin embargo, en un sistema en el que se pretenda no percibir las variaciones de tensión, requiere una mayor capacidad y potencia del sistema de batería. En este caso, también se necesita una gestión más elaborada para utilizar eficientemente el sistema de baterías.

Siempre que se utiliza un sistema de almacenamiento basado en baterías hay que tener en cuenta las diferentes pérdidas por la naturaleza física de la propia batería y de los módulos de interconexión de potencia, convertidores, inversores, etc. Figura 17. Uno de los objetivos del trabajo de esta tesis es evitar en la medida que se pueda la inclusión de sistemas de almacenamiento de respaldo y trabajar con el almacenamiento incorporado en los propios vehículos eléctricos.

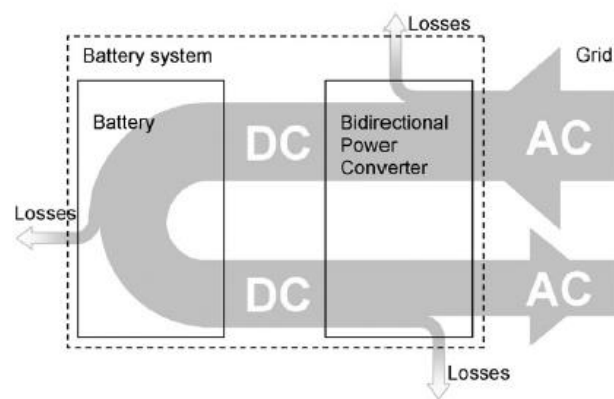


Figura 17. Baterías de respaldo para la red eléctrica [56]

Algunos casos donde se han desarrollado sistemas con batería de respaldo se ha tenido que calcular el impacto económico de las mismas [57] [58] [59], donde la dinámica del sistema de recarga trata sobre los flujos en diferentes direcciones de la energía entre el vehículo y la red “Grid to Vehicle” GV2 o para sistemas asilados “Home to Vehicle” H2V, como se muestra en la Figura 18.

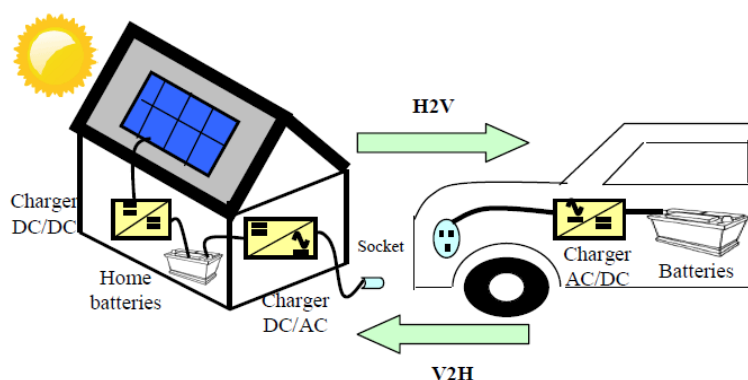


Figura 18. Flujos de energía en u sistema aislado H2V

En otros trabajos [60] [61] [62] [63] se enfocan el estudio de la forma de controlar la gestión de almacenamiento en las redes de sistemas de energía distribuida. Otras líneas de investigación que se abre con la llegada del vehículo eléctrico EV es la reutilización de las baterías del EV cuando ya no son útiles para las potencias demandas de la operación normal en la conducción de un EV y son solo para el uso de sistema de estacionarios de almacenamiento [64].

Como en el resto de tecnologías, es necesario un apoyo incondicional de las políticas de los gobiernos para que todos los ciudadanos, que puedan por sus tipologías de residencia, aprovechen y se beneficien del autoconsumo sin tener que dejar de lado la red de distribución en caso de necesidad y poder usarla sin penalización como se propuso en Alemania [65].

## ***2.4. Estaciones de Recarga***

En algunos de los sistemas de bicicletas eléctricas compartidas cuando una bicicleta tiene la batería descargada se la cambian por otra batería cargada, en la gran mayoría de los sistemas las baterías de las bicicletas se recargan directamente cuando las bicicletas están estacionadas en el parking a modo de estación de recarga. En ambos casos, el proceso de carga extrae energía eléctrica de la red, por lo tanto incrementan el consumo de energía de los nodos de la red eléctrica donde están situados y en definitiva a saturar la red transporte de energía

de las ciudades, que no se diseñaron para este cometido, otra restricción de las estaciones de recarga conectadas a la red eléctrica de las ciudades es que están limitadas a la capacidad máxima de potencia que entrega la red eléctrica donde están conectadas, con lo que conlleva a la limitación de la simultaneidad de carga de los vehículos eléctricos conectados a la red y por lo tanto a la energía disponible para el sistema

Son muchos los estudios donde hay un alto interés en utilizar las baterías de los vehículos eléctricos como sistemas de almacenamiento, es más algunos de los estudios proponen el uso de las baterías de los vehículos eléctricos para regular la generación de energía renovable como la de tecnología de generación eólica [66], además proponen utilizar energía acumulada en las baterías para volcarla en la red cuando sea necesario. Cuando el objetivo es cargar los vehículos eléctricos con energía eléctrica producida por generación fotovoltaica [67] [68], hay estudios [26] donde se propone la integración en el sistema de una batería de apoyo de plomo ácido para cubrir las necesidades de carga de los vehículos eléctricos cuando no se dispone de generación fotovoltaica, Figura 19.

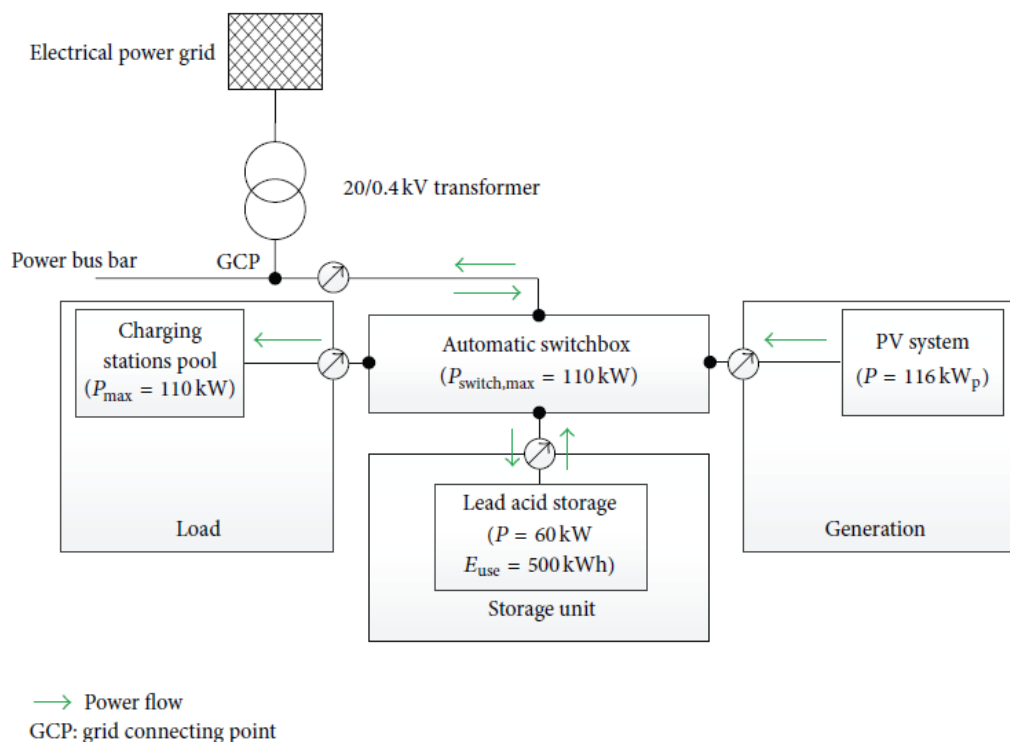


Figura 19. Instalación de la Microgrid de [26]

Cuando se incorpora una batería a un sistema de generación de energía fotovoltaica es necesario establecer los algoritmos necesarios para que la batería realice los ciclos de carga y descarga adecuados con la meta de obtener el mayor rendimiento de la batería, además de gestionar los puntos de recarga y el impacto en la red [69] [70] [71] [72]. Se encuentran trabajos prácticos donde se han realizado estaciones de recarga fotovoltaica para vehículos eléctricos ligero LEV, bicicletas eléctricas, ciclomotores y scooters y evalúan su comportamiento sin planificar la carga.



Figura 20. Estación de recarga PV para LEV “Electrocampus” [73]

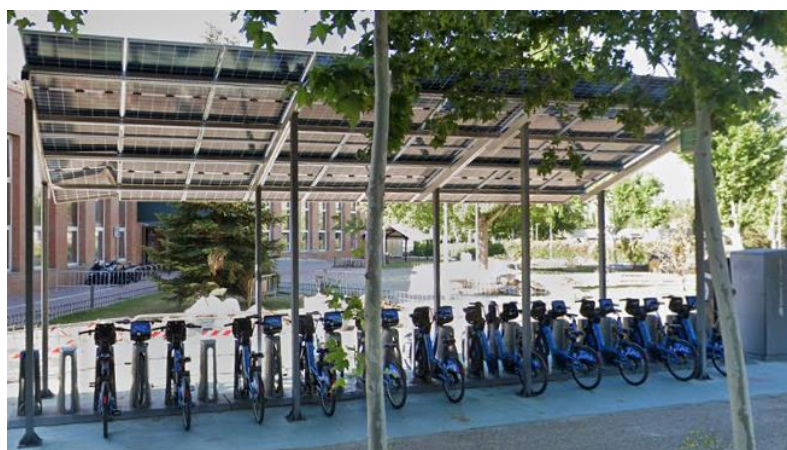


Figura 21. Parking BiciMAD con carga PV

También se muestran estudios de estaciones de carga para vehículos eléctricos pesados enfocados al transporte público como lo puede ser un autobús [74], en este trabajo, se propone que una red de transporte basada en un autobús eléctrico “Capabus” con integración de un supercapacitor puede trabajar en armonía con la red eléctrica. El perfil de carga de la red de transporte y la red están interconectados utilizando un sistema de almacenamiento de energía basado en un sistema de baterías de almacenamiento de energía ESS, que se utiliza en cada parada del autobús para cargar continuamente los supercapacitores para el funcionamiento del autobús y proporcionar soporte de red.

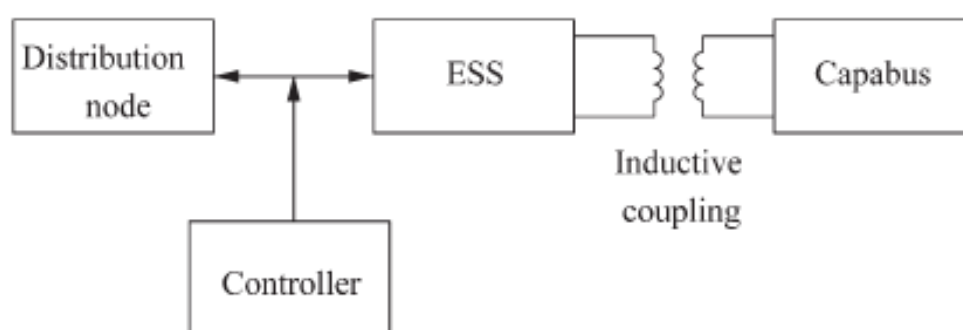


Figura 22. ESS y su interacción con el “Capabus” [74].

El aumento de la penetración en la red eléctrica del sistema de transporte público basado en autobús eléctrico mejoraría sustancialmente la eficiencia de la operación de la red y reducirá el consumo de petróleo por parte del sector de transporte.

Los vehículos eléctricos híbridos enchufables PHEVs se están promocionando como alternativa viable a los vehículos convencionales de combustión interna, por ello están siendo objeto de estudios para asegurar su viabilidad de su recarga eléctrica en convivencia de las cargas convencionales de la red [75] [76] [77] [78] se investiga el uso de sistemas fotovoltaicos como generadores auxiliares de potencia en vehículos híbridos. Esta tecnología ofrece una posibilidad aún no explotada con las ventajas de una nueva fuente de alimentación, que es ligera, silenciosa, sin mantenimiento y de trabajo continuo, mientras haya radiación solar.

Se puede conseguir una reducción notable de las emisiones de efecto invernadero si se consigue lograr una sinergia entre los avances tecnológicos, como el que se presenta en el trabajo [79], que trata de introducir células fotovoltaicas en el chasis del vehículo eléctrico, para que consiga una energía adicional en trayecto a la que almacena en las baterías.



Figura 23. Coche solar HERMES construido para Phaethon<sup>3</sup> 2004.

Los coches solares también se consideran en los estudios de las investigaciones aunque actualmente solo se presenta en los vehículos eléctricos comerciales como pequeño sistema de recargar fotovoltaica en el spoiler trasero para la batería de servicio.

Aunque los coches solares no se pueden utilizar actualmente para sustituir a los vehículos convencionales. Mientras que los coches híbridos y eléctricos ya se están utilizando durante muchos años y su cuota de mercado está aumentando cada vez más. En los vehículos 100% eléctricos también se investiga el uso de sistemas fotovoltaicos como generadores auxiliares de potencia [80] [81] [82].

En los artículos [83] [84] se discute la carga de varios vehículos eléctricos híbridos enchufables PHEV en un edificio de apartamentos, equipado con un sistema fotovoltaico PV y el mismo caso para un bloque de oficinas combinando con un sistema mixto de calor y potencia “Combined Heat and Power” CHP. Se examinan diferentes estrategias de carga y potencia que se evalúan en términos

---

<sup>3</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_car\\_racing](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_car_racing)

de su impacto en la red, el autoconsumo de la generación de electricidad local y el rango necesario de potencias. Llegan a la conclusión de que el impacto en la red de distribución eléctrica puede reducirse significativamente mediante el uso de estrategias sencillas de carga “Electric Vehicle” EV en un edificio residencial y en bloque de oficinas, que incorpora la carga de vehículos eléctricos EV. Esas estrategias incluyen complementar la carga nocturna con la carga diurna, en la siguiente figura se muestra la disponibilidad media durante un día de una flota de vehículos en el hogar, en el trabajo y en otros lugares (incluyendo los tiempos de trayecto) y un perfil de carga sintético residencial normal normalizado SLP. Con el objeto de planificar la carga de los EV y la toma de energía de las baterías de los vehículos eléctricos para dar soporte a la red.

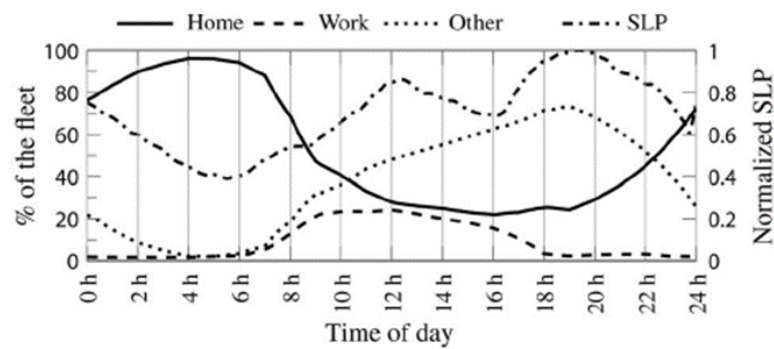


Figura 24. Localización horaria de una flota de EV

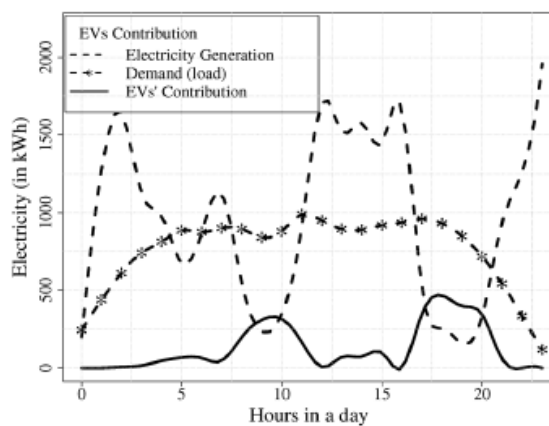


Figura 25. Energía almacenada en EVs a la red eléctrica [81]

## ***2.5. Energía Fotovoltaica***

La energía solar fotovoltaica es una fuente abundante de energía renovable y sostenible, que tiene un enorme potencial en la reducción de la huella de los gases de efecto invernadero.

En este trabajo de tesis se centra en el estudio del recurso fotovoltaico y es utilizará sin entrar en más detalle el resto de aplicaciones tecnológicas desarrolladas hasta la actualidad con referencia a la tecnología fotovoltaica, por la extensión del tema.

El creciente uso de la tecnología solar fotovoltaica como fuente de generación de energía, está llevando a los investigadores a diseñar modelos para poder calcular con diferentes aplicaciones el estudio del recurso solar de un determinado lugar. En la actualidad se han desarrollado aplicaciones para diferentes niveles de precisión, según la inclusión o no de influencias meteorológicas en la irradiación, como pueden ser la humedad, la nubosidad, temperatura, etc. [85].

En el caso de que se necesite resultados de simulación con bajos niveles de incertidumbre con respecto a los datos reales se suelen hacer campañas de medida in-situ, para luego correlacionar los datos estimados con los reales y poder ajustar los parámetros de las funciones de transferencia de los algoritmos de la predicción de recurso solar [86], esto supone un coste elevado en la campaña de medidas aunque es el técnica de predicción de recurso solar actual más precisa, y si además se suma a otros sistemas de verificación monitorización como las imágenes específicas de satélite se pueden abarcar estudios de modelado de comunidades enteras como en [15].

En otros casos, no es necesaria tanta precisión en la predicción del recurso solar y se puede optar por los perfiles medios anuales, mensuales y diarios que ofrecen herramientas que se realimentan de datos observacionales y datos

calculados, como es el caso de la herramienta web gratuita “Photovoltaic Geographical Information System” PVGIS<sup>4</sup> que se utiliza en el trabajo [87].

Los generadores de energía renovable distribuidos, como los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores, son difíciles de predecir, lo que hace que el problema de la demanda y el suministro sea más complejo que en el escenario tradicional de producción de energía, además de introducir inestabilidades en la red de distribución eléctrica, como huecos de voltaje, picos de máxima generación, etc. Por ello hay trabajos [88] [89] [90] que se dedican a intentar crear algoritmos para la gestión de la inyección de energía renovable en la red para su gasto en las cargas convencionales de la industria, los hogares, etc.

Otros ámbitos a estudio son la gestión del autoconsumo [91] y los modelos de control predictivo MPC para derivar la energía no aprovechada por el sistema a módulos energéticos consumidores de energía con cierta latencia de operación, como son los termos eléctricos calentadores de agua [92].

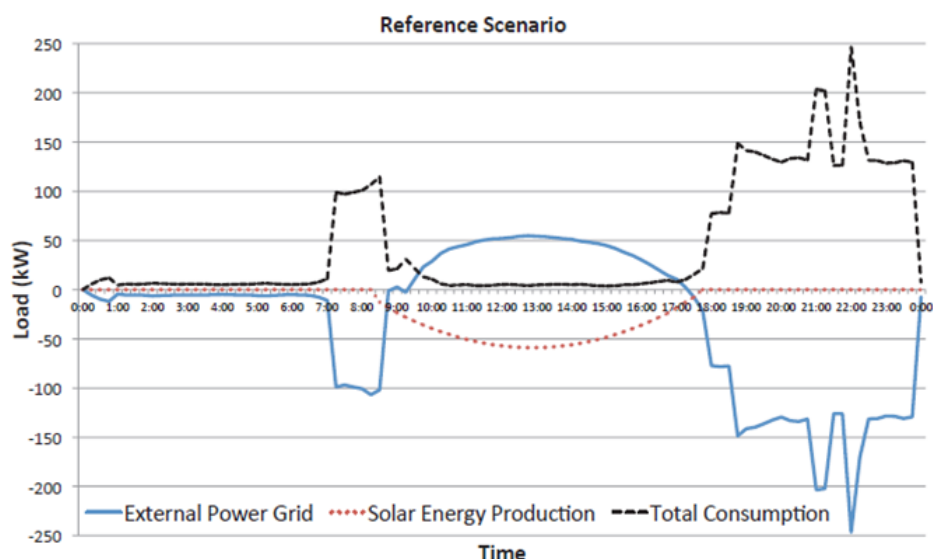


Figura 26. Generación PV vs el consumo y el soporte de la red [88]

<sup>4</sup> <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Cuando se recarga los vehículos eléctricos con energía renovable pueden reducir las emisiones de efecto invernadero producido por el sector de transporte y por el sector de suministro energía. En el siguiente trabajo [93] se analizan las sinergias entre sistemas fotovoltaicos y vehículos eléctricos tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista económico. En concreto, han desarrollado un modelo para determinar la cantidad de energía solar utilizada por el vehículo eléctrico, la carga de la red y el ahorro de costes para los propietarios de un vehículo eléctrico y un sistema fotovoltaico.

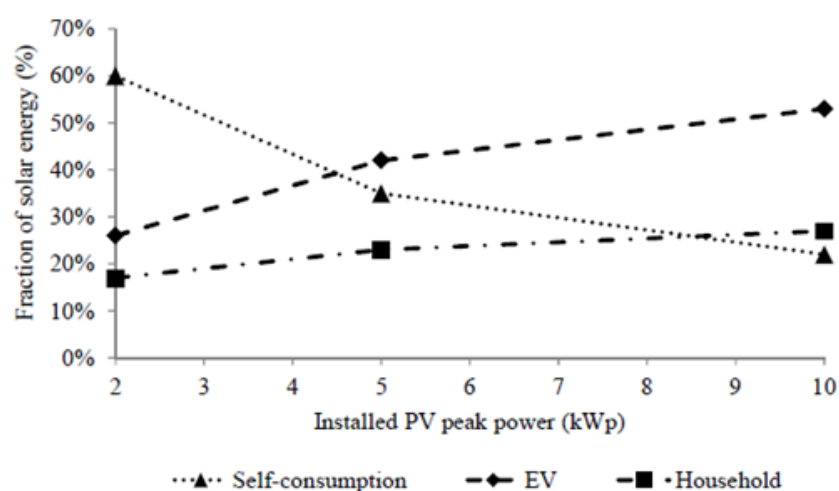


Figura 27. Autoconsumo, Bat. EV caso 1, consumo hogar [93]

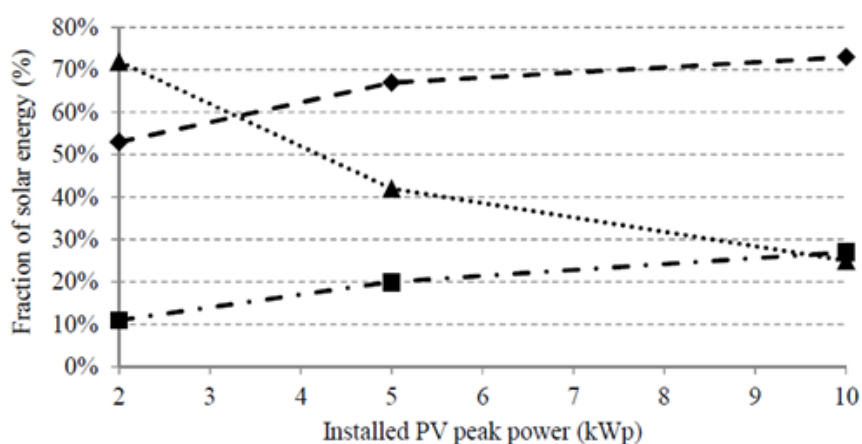


Figura 28. Autoconsumo, Bat. EV caso 2, consumo hogar [93]

Con la reducción de los precios de los paneles fotovoltaicos se está creando una tendencia de nuevos usos como elementos decorativos y de uso como de protección de aislamiento térmico en edificios [94] en vez de los paneles de piedra o metal que se utilizan normalmente para este propósito, esto abre un espacio físico para poder incorporar paneles solares en las grandes ciudades [16]. Aunque no suelen estar orientados de forma óptima, lo típico es que estén a un ángulo de  $90^\circ$  sobre el suelo y en orientaciones desde el este al oeste sin contar con las orientaciones hacia el norte, Figura 29. En definitiva, es una nueva oportunidad de sistemas de generación fotovoltaicos en las ciudades.



Figura 29. Edificio con integración fotovoltaica en su fachada

### ***3. Metodología, Materiales y Métodos***

El objetivo principal de este trabajo de tesis es estudiar un sistema de movilidad con vehículos eléctricos ligeros para fomentar estos modos de transporte dentro de los campus universitarios, grandes centros de trabajo, y/o a los trayectos desde un nodo de transporte público a las diferentes escuelas de un campus universitario o a los diferentes edificios de un gran centro de trabajo y, en definitiva, donde pueda ser útil e indirectamente influir en el modo de desplazamiento urbano en general.

Gracias al proyecto GESMOL [17], realizado en las instalaciones del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT<sup>5</sup> de Moncloa, se ha podido obtener datos empíricos que han ayudado a entender más en detalle las problemáticas y restricciones de un sistema de movilidad con vehículos eléctricos ligeros, y para posteriormente realizar las simulaciones para llegar a la síntesis del Caso a Estudio dentro del equipo de trabajo en eficiencia energética en centros de datos del Laboratorio de Sistemas Integrados LSI perteneciente al Departamento de Ingeniería Electrónica, de la ETSI Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Para desarrollar un estudio sobre movilidad dentro de un centro de trabajo como CIEMAT-Moncloa, resulta esencial entender las interacciones entre los componentes físicos (el espacio, la geografía y las infraestructuras), humanos, y técnicos. También entender la movilidad dentro de un centro laboral supone entender al grupo humano que lo compone, la geografía del espacio que ocupa y cómo se ha organizado según sus necesidades y actividades. Además, se trata de observar cuales son los modos de desplazamientos que utiliza para responder a sus

---

<sup>5</sup> <https://www.ciemat.es>

necesidades de movilidad, entender los problemas sufridos por el uso de ellos y cuáles son las posibles soluciones a esos problemas hacía una movilidad más sostenible. Igualmente es importante que el diseño, desarrollo y puesta en marcha de un sistema de estas características esté dimensionado en su justa medida a las necesidades, recursos e infraestructuras del centro.

### ***3.1. Metodología***

Si el establecimiento de objetivos y la consecución de los mismos es requisito imprescindible, el hacerlo bajo una metodología adecuada es labor necesaria para la coordinación de los diferentes agentes públicos, privados y sus respectivos equipos de trabajo involucrados en un proyecto. Dado el carácter multidisciplinar del proyecto [17], la división de tareas o hitos a realizar nace de una forma natural, por eso el esquema de trabajo se centró en la consecución de tareas por fases que permitiera la integración de los diferentes grupos de trabajo de una manera rápida, efectiva y precisa.

El proyecto se desarrolla en tres fases F1, F2 y F3, cada una de ellas están centradas en un escenario específico de movilidad urbana/metropolitana, a través de las cuales es posible recorrer todo el ciclo energético de una solución de movilidad basada en vehículos eléctricos ligeros, para poder gestionar de la mejor manera posible las pruebas a los diferentes vehículos eléctricos ligeros que constaban de bicicletas eléctricas, triciclos se decidió denominarlos a todos con el acrónimo BIPA<sup>6</sup> y posteriormente numerarlos para identificarlos de forma unívoca. Cada fase del proyecto se centra en un aspecto específico del ciclo energético comenzando por el consumo de los vehículos eléctricos ligeros y concluyendo con el

---

<sup>6</sup> BIPA; Este acrónimo se registró para denominar las Bicicletas Eléctricas de Pedaleo Asistido utilizadas en el proyecto (BIPA, Marca registrada el 28 de octubre de 2008 en la Oficina Española de Patentes y Marcas con el nº 2.827.349)

abastecimiento de los mismos. La Figura 30 muestra el diagrama secuencial de la Metodología del proyecto que se seguía para cada una de las 3 fases.

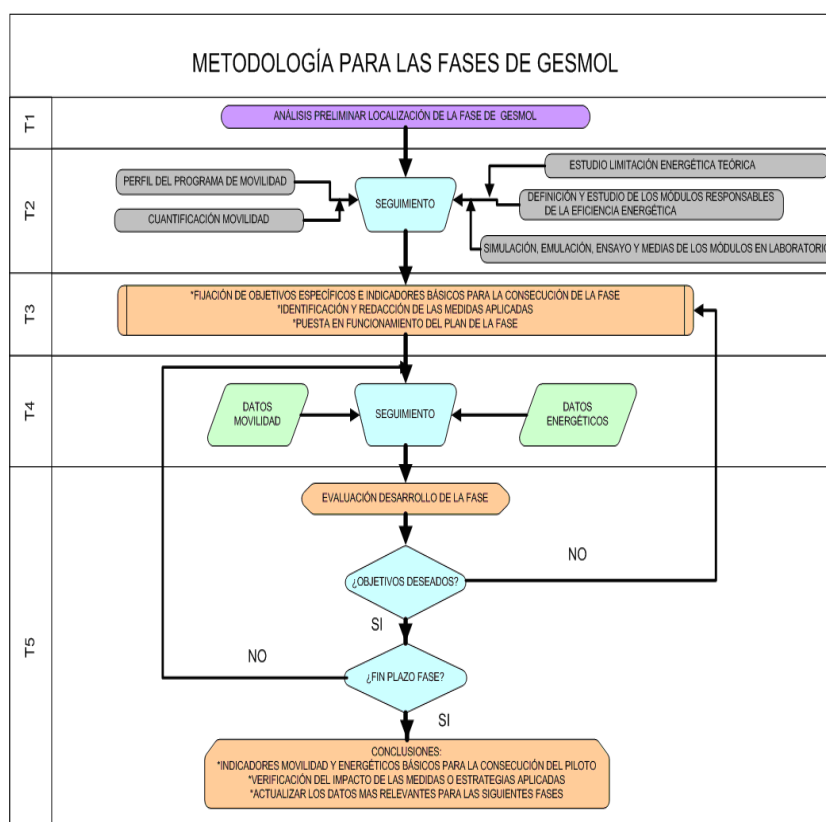


Figura 30. Metodología y fases del proyecto

Cada fase a su vez, consta de una serie de 5 tareas específicas caracterizadas para la consecución de las diferentes fases.

En la Fase 1 el programa piloto que se desarrolló en el Centro de CIEMAT-Moncloa trata de estudiar la movilidad relacionada en su centro de trabajo, plantear cuáles son sus problemas e intenta proponer soluciones alternativas. En esta fase se trata entender el comportamiento de los diferentes vehículos eléctricos ligeros, bicicletas eléctricas de pedaleo asistido, y se analizan los ciclos de vida de sus elementos energéticos con objeto de poder predecir el comportamiento energético y la vida útil de los mismos. El objetivo es identificar “la problemática” relacionada con el consumo, eficiencia, durabilidad, autonomía y fiabilidad que afectan a variables de movilidad.

La Fase 2 se centra en el estudio de la movilidad de los trabajadores de CIEMAT que utilizan las bicicletas eléctricas para desplazarse de casa al trabajo y del trabajo a casa, escenario commuter<sup>7</sup>. Así mismo plantea cuáles son sus problemas e intenta proponer soluciones alternativas. Además, se centra en poder predecir una serie de aspectos como son consumo, eficiencia, autonomía, durabilidad y fiabilidad, para poder hacer una planificación del abastecimiento en este escenario.

Finalmente, en la Fase 3 se plantea el estudio de movilidad en un contexto integrado de transporte público, es decir, la utilización de las bicicletas eléctricas como medio de transporte alternativo sumado al transporte público convencional. También se pretende obtener un cálculo de autonomía de las baterías de las bicicletas eléctricas, por lo que será posible determinar, como un objetivo muy ambicioso, dónde abastecer las bicicletas eléctricas y con qué tecnología energética.

### ***3.1.1. Métodos y Materiales***

Los datos obtenidos de la investigación provienen de un amplio y preciso trabajo de campo y de laboratorio. A su vez, se ha pretendido una retroalimentación transversal de los resultados obtenidos de la observación técnica, del diagnóstico social y de movilidad. La falta de determinados procedimientos de evaluación y de ensayos específicos, así como la escasa armonización entre distintos fabricantes y laboratorios dedicados a ensayos y modelización dan lugar a una gran disparidad de resultados. Los procedimientos actuales son escasos, así como incompletos y generalmente poco concluyentes, centrándose en los módulos energéticos individualmente sin tener en cuenta su interrelación. Debido a la inevitable conexión que existe entre los módulos energéticos, es necesario desarrollar

---

<sup>7</sup> *COMMUTER*; Persona que viaja diariamente una distancia considerable entre su lugar de residencia y el de trabajo; <http://www.wordreference.com>

procedimientos de ensayo y gestión global que abarquen todos los módulos energéticos implicados.

El objetivo del estudio estuvo centrado en contribuir a la optimización operacional y el consecuente aumento de fiabilidad de los módulos energéticos. En base a los resultados obtenidos se propuso una secuencia general de recomendaciones para el uso, control y mantenimiento de los módulos energéticos en las bicicletas eléctricas.

Para la realización de la investigación se procedió tanto a la realización de un trabajo de laboratorio como de campo. El trabajo de laboratorio consiste en la recopilación de datos primarios (encuestas y observaciones) y secundarios (estadísticas) en un gabinete o laboratorio y no en el terreno de los hechos. Es un método propio para el enunciado de hipótesis y construcción de modelos, que se contrastarán en el trabajo de campo. El trabajo de campo es un método de investigación sobre el terreno que permite recoger y conceptualizar los aspectos cualitativos y subjetivos para alcanzar una visión holística de los fenómenos.

La interrelación continua entre el trabajo de laboratorio y el estudio de campo aportó a la investigación una perspectiva más integral y completa del objeto de estudio

El trabajo realizado en este estudio se basa en el diseño y la aplicación de una metodología para modelar con precisión el consumo de energía de las bicicletas eléctricas en base al estudio de varios modelos y obtención del Par de los motores eléctricos para su posterior uso en los sistemas de movilidad. Se obtuvo parámetros obtenidos de datos empíricos que modelaban el consumo de energía de los diferentes vehículos eléctricos implicados en el sistema, donde se analizaban las diferentes variables involucradas en el consumo de estos vehículos como puede ser el peso del usuario a desplazar. Se estudió la relación entre la potencia del vehículo eléctrico y el peso a desplazar.

La definición, caracterización y estudio en todo el proyecto de los módulos responsables de la eficiencia energética de las bicicletas eléctricas fue fundamental

para poder desarrollar sistemas de supervisión, evaluación y control. Por ello se seleccionó diferentes procesos donde se trabajaría con los diferentes módulos energéticos:

Proceso Bancada de Baterías. La bancada de baterías es un sistema automatizado de ensayo que reproduce, mediante mecanismos de ciclado acelerado, el rendimiento energético de las baterías.

Proceso Bancada de Intemperie. En el que se centraliza la recarga de las bicicletas eléctricas utilizadas por los participantes.

Proceso Bancada de Motores y controladores. Donde se analiza la respuesta de la señal de los controladores y las propiedades eléctricas y mecánicas de los motores que usan las bicicletas eléctricas.

Proceso Base de Datos. Desde el que se guardan, gestionan y consultan los datos generados en los diferentes procesos energéticos.

Proceso Módulo PIC, Peripheral Interface Controller. El desarrollo del módulo PIC nació con la idea de poder estudiar la eficiencia energética de las bicicletas eléctricas mediante el registro y almacenamiento de los parámetros necesarios durante su uso, viéndose así el comportamiento dinámico.

Proceso Módulo GPRS/GPS. Módulo con el que se obtenían las medidas de las diferentes variables energéticas de las bicicletas eléctricas y que sumado a la posición GPS se transmitía a la Base de Datos.

Procesos de módulos energéticos, en estos procesos se realizaban las mejoras, actuaciones y control de los módulos energéticos requeridas en cada fase del proyecto.

Después de identificar los elementos que participan en un sistema de movilidad eléctrica y el estado del arte de los mismos, el estudio se centró en los diseños y desarrollos realizados en cada área para obtener los datos empíricos respectivos.

### ***3.2. Vehículos eléctricos ligeros***

El elemento consumidor de energía del sistema de movilidad que se quiere estudiar, son los vehículos eléctricos, en concreto dos tipos: vehículos eléctricos ligeros o bicicletas eléctricas de pedaleo asistido y un vehículo eléctrico de cuatro ruedas de segmento B (pequeños vehículos típicos para el uso urbano) o segmento C (vehículos eléctricos tipo SUV o pequeñas furgonetas).

Como ya se comentó anteriormente el objetivo de esta tesis es centrarse sobre todo en los vehículos eléctricos ligeros por eso se estudian en mayor detalle y para los vehículos eléctricos de cuatro ruedas se utilizan los datos suministrados por las empresas automovilísticas, ya que estas deben pasar a sus vehículos eléctricos las pruebas necesarias para cumplir con normas como la Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures, WLTP.

En el estudio que se realizó [17] se seleccionaron diferentes tipos de bicicletas eléctricas que cumplieran con los siguientes criterios técnicos y sociológicos.

En cuanto a la parte técnica, se buscaron bicicletas con materiales y componentes de los módulos energéticos cuyas características mecánicas, electrónicas y eléctricas fueran diferentes; y de alguna manera cubriera el amplio abanico de bicicletas eléctricas que existía en el mercado, añadiéndose elementos extra para probar componentes que pudieran ser útiles en futuras modificaciones. Se pretendió encontrar las bicicletas eléctricas representativas del mercado español y de sus diferentes productos que pudieran convenir para un uso público. Se seleccionaron aquellas cuyos módulos energéticos tuvieran características electrónicas, eléctricas o mecánicas diferentes; distintos tipos de tecnologías de baterías (Li-ión y Pb-ácido), transmisiones (cardán, cadena), motores (sin escobillas “AC”, y con escobillas “DC”), controladores (PWM y de señal continua) potencias representativas desde 180 W hasta 250 W. También se podría hacer diferencias respecto a la posición de los diferentes módulos en las bicicletas eléctricas, por ejemplo, motor (rueda delantera o trasera), batería (debajo del sillín o en la parte trasera), etc.

Se decidió trabajar en ámbito sociológico, con objeto de contrastar las medidas aplicadas con la retroalimentación de las opiniones anónimas de los participantes, además en cuanto a la parte social, se decidió incluir criterios económicos, estéticos, de comodidad y calidad, intentando que ambos criterios convergieran. En base a los requerimientos establecidos se buscaron bicicletas eléctricas de proveedores españoles con diferentes características: peso, tamaño, forma (plegable, normal, triciclo), color, complementos (luces, sillines, amortiguaciones, etc.). Después de en un estudio de los modelos disponibles en el mercado español se seleccionaron los siguientes cinco modelos de bicicletas eléctricas Figura 31.



Figura 31. Bicicletas eléctricas seleccionadas

Una bicicleta eléctrica plegable de marca Beixo motorizada por Cielo TEK con un Kit de conversión, con las siguientes características técnicas:

- Motor en el buje de la rueda delantera de 240 W de potencia.
- Batería de litio-polímero de 24 V, 10 Ah y 2 kg de peso.
- La autonomía de la batería de la bicicleta eléctrica, según el proveedor, permitía un uso de 30 kilómetros y el tiempo necesario para su completa recarga era de unas 5 horas.

Un triciclo eléctrico “Swing”, con las siguientes características técnicas:

- Motor en el buje de la rueda delantera de 250 W de potencia.
- Batería de litio-polímero de 36 V, 10 Ah y 3,5 kg de peso.

- La autonomía de la batería de la bicicleta eléctrica, según el proveedor, permitía un uso de 30 kilómetros y el tiempo necesario para su completa recarga era de unas 5 horas.
- Se eligió esta bicicleta eléctrica con la previsión de que los participantes pudieran llevar carga y para los que no se pudieran sentir seguros en una bicicleta de dos ruedas.

Una bicicleta eléctrica de marca Monty modelo E 45, con las siguientes características técnicas:

- Motor en el buje de la rueda trasera de 250 W de potencia.
- Batería de litio-polímero de 36 V, 10 Ah y 4 kg de peso.
- La autonomía de la batería de la bicicleta eléctrica, según el proveedor, permitía un uso de entre 30 km y 50 km el tiempo necesario para su completa recarga era de unas 6 horas.

Una bicicleta eléctrica de marca Ecobike modelo Elegance 24, con las siguientes características técnicas:

- Motor en el buje de la rueda trasera de 180 W de potencia.
- Batería de plomo ácido de 24 V, 12 Ah y 8 kg de peso.
- La autonomía de la batería de la bicicleta eléctrica, según el proveedor, permitía un uso de entre 30 km y 50 km el tiempo necesario para su completa recarga era de unas 4 horas.

Una bicicleta eléctrica de marca Ecobike modelo Elegance 36, con las siguientes características técnicas:

- Motor en el buje de la rueda trasera de 250 W de potencia.
- Batería de litio-polímero de 36 V, 10 Ah y 4 kg de peso.
- La autonomía de la batería de la bicicleta eléctrica, según el proveedor, permitía un uso de entre 50 km y 70 km el tiempo necesario para su completa recarga era de unas 6 horas.

### ***3.2.1. Prototipo para obtener el par motor***

Con el objetivo de poder tener datos empíricos de las potencias reales desarrolladas por los motores de las bicicletas eléctricas, se diseñó y posteriormente se desarrolló una bancada adaptada a medir el Par Nm de los motores de las bicicletas eléctricas.

En base a un equipo dinamómetro se ideó un soporte para poder acoplar los diferentes modelos de rueda y de hub motor de las bicicletas eléctricas, para esto se diseñó el soporte y eje de fricción que permitía acoplar la rueda y que esta transmitiera la energía mecánica en forma de movimiento al eje acoplado solidariamente al equipo de medida del dinamómetro. Todo ello controlado y monitorizado por un sistema LabVIEW®<sup>8</sup>. Después de una serie de plan de pruebas se fueron mejorando las funcionalidades del sistema y se construyó la bancada para el estudio de los motores de las bicicletas eléctricas Figura 32.



Figura 32. Prototipo para obtener el Par motor.

Para poder grabar los datos de los diferentes experimentos, se diseñó y se desarrolló una aplicación, con el software LabVIEW®, que registraba los datos de

---

<sup>8</sup> <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>

consumo de corriente, tensión, Par y revoluciones, representándolos en una gráfica en tiempo real Figura 33.



Figura 33. Aplicación LabVIEW® para el prototipo Par motor

Se realizaron diferentes modificaciones y actualizaciones a los diferentes elementos de la bancada y el software para poder tener opciones como ajustes de diámetros de rueda y topología del motor y correcciones de los parámetros para la calibración del sistema

En segundo término, el trabajo se centró en el estudio de las capacidades de utilización y adaptación a nuestras necesidades del dinamómetro. Se configuraron los Proporcional Integral Derivativo PID, y diseñaron tanto el circuito como el equipo de medidas necesario para la ejecución de esta tarea. Antes de comenzar con las pruebas de Par/Potencia de los motores de las bicicletas eléctricas para poder controlar las rampas simuladas de trabajo en la bancada de motores, se inició con el estudio de los controladores de las bicicletas eléctricas, para ello se planificó unas campañas de medidas en diferentes situaciones simuladas del funcionamiento real de los mismos.

Para ello se ancló la bicicleta eléctrica a un soporte, y se hizo funcionar su motor en diversas situaciones. Las medidas se realizaron por medio de un osciloscopio que almacena los datos en una tarjeta de memoria para poder tratar los archivos posteriormente. Además, en esta fase se empezó a adaptar el dinamómetro de la bancada de motores con los equipos auxiliares para poder realizar las medidas.

Se realizaron medidas de controladores de distintos tipos de motores de las bicicletas eléctricas, tanto de corriente alterna como continua. También se realizaron medidas a distintas velocidades con cada motor y se analizó la señal que aparece en los cables del controlador al realizar un giro manual o por fuerzas externas en el motor. Se comprobó que, en los controladores de corriente continua, la energía aportada al motor se compone de un tren de pulsos que según la proporción entre estado alto y estado bajo (duty cycle) hace que el motor gire a mayor o menor velocidad. Es decir, cuanto más tiempo se encuentra en estado alto, mayor velocidad de motor.

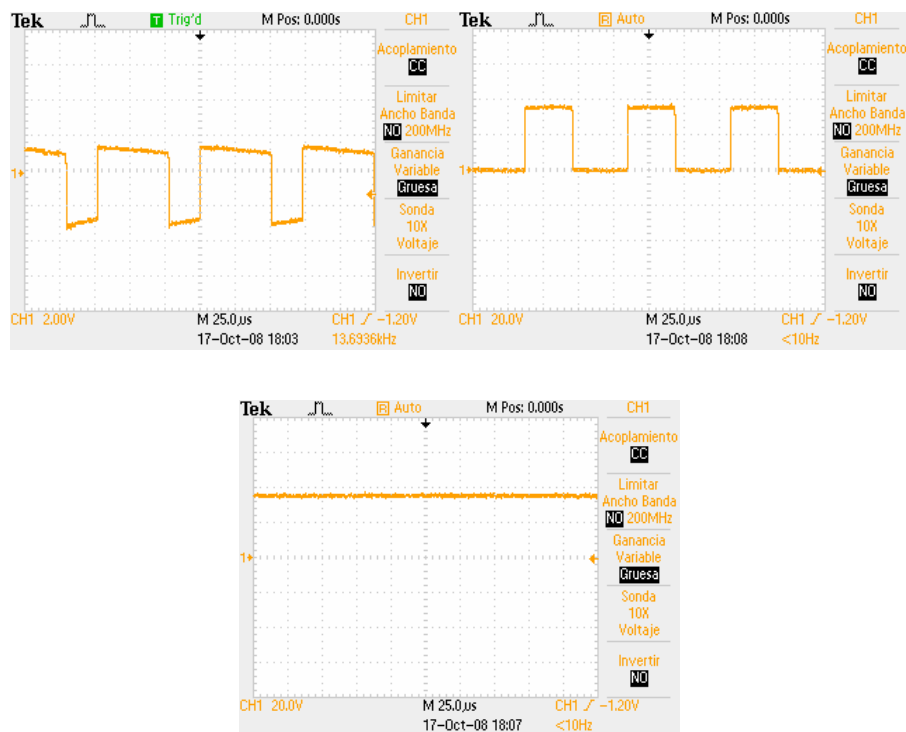


Figura 34. Señales controlador a distintas velocidades motor DC

En las gráficas mostradas en las figuras anteriores se puede observar el efecto comentado sobre la proporción entre el estado alto y bajo de la señal de alimentación del motor de corriente continua que incorporan algunas bicicletas eléctricas. En la Figura 34 se puede observar, por orden, los resultados para velocidad baja, intermedia y máxima.

Entre tanto en los motores de corriente alterna, se verificó que realizan una conversión PWM, Pulse Width Modulation, que transforma la corriente de las baterías en una señal trifásica. En este caso la velocidad de giro de los motores depende de la frecuencia de esta señal trifásica.

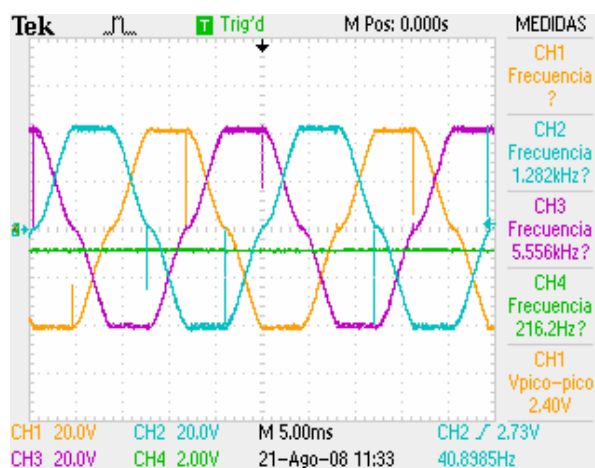


Figura 35. Señales controlador y asistencia al pedaleo en el motor AC

En la figura anterior se puede observar el comportamiento de las tres fases que alimentan el motor de la bicicleta eléctrica. En las siguientes gráficas se verifica el funcionamiento de una de esas fases a distintas velocidades, con una misma base de tiempos y a distintas frecuencias. Se puede observar, por orden, los resultados para velocidad baja, intermedia y máxima. Todos los motores brushless AC de las bicicletas eléctricas tienen el mismo comportamiento con mínimas diferencias.

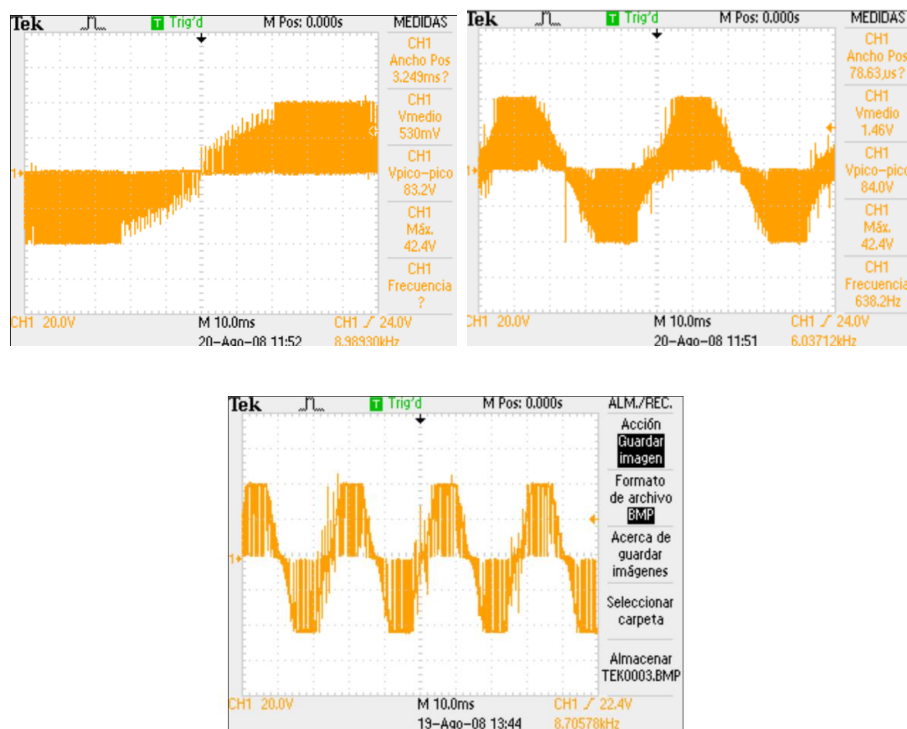


Figura 36. Señales controlador a distintas velocidades motor AC

### 3.2.2. Prototipo estudio del almacenamiento energético

Respecto al comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía, se trabajó en la emulación de la degradación real por ciclado de las baterías típicas usadas en las bicicletas eléctricas, se diseñó y posteriormente se desarrolló una bancada adaptada para medir ciclos acelerados de carga y descarga de las baterías a estudio.

Inicialmente, la bancada de baterías se diseñó para registrar y guardar los datos de tensión y corriente en el proceso de descarga de una única batería.

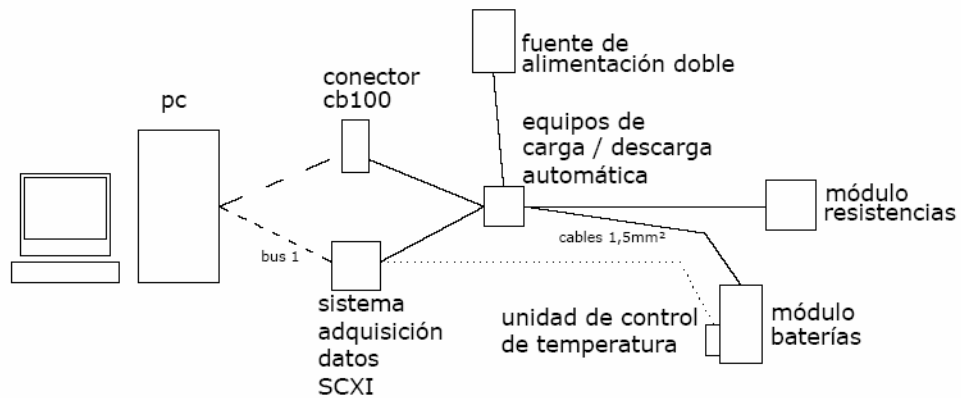


Figura 37. Diagrama de la bancada de estudio de baterías simple

Para ello se desarrolló una aplicación programada en LabVIEW® que permitía monitorizar los valores de voltaje y corriente de descarga de una batería fijando el límite de descarga. Cuando el sistema alcanzaba este valor límite se desconectaba automáticamente por medio de un relé. El sistema registraba datos cada cuatro segundos y en el inicio del estudio se almacenaba en el sistema de archivos del directorio del PC usado para la bancada. Se realizó una automatización del sistema, dotándole de procesos de carga y descarga autónomos. Esta modificación requirió de la instalación de un cargador y varios relés que controlaran el proceso de carga y de descarga de la batería.

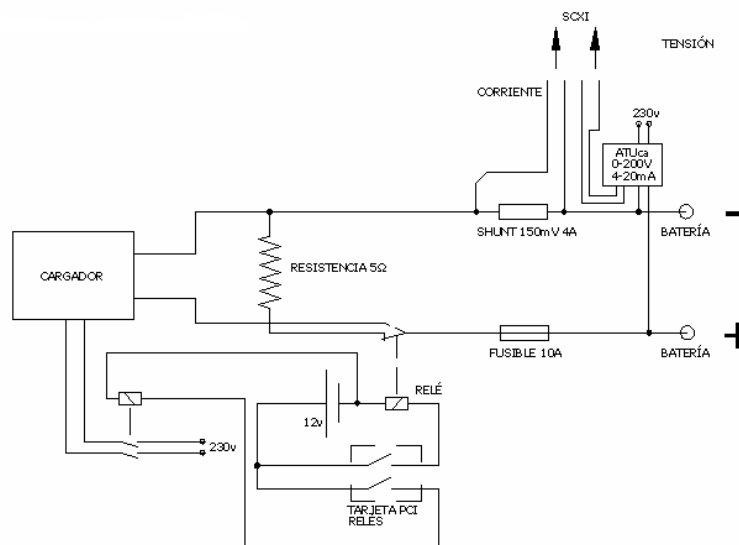


Figura 38. Diagrama ampliación de la bancada de estudio de baterías

El funcionamiento consistía en la implementación de una aplicación específica con el software LabVIEW®, en el que se determinaba un valor de corte para la descarga. Después de un tiempo prefijado comenzaba la carga hasta que de nuevo alcanzaba un valor mínimo de corriente. Es en ese momento, cuando el sistema se desconectaba y permanecía en reposo una hora, con el objeto de estabilizar los compuestos químicos de las baterías, hasta que se repetía el ciclo de carga/descarga.

Se realizó una mejora para poder tener simultáneamente dos baterías, realizando ciclos de carga y descarga automatizados. También se modificó la versión del programa original para que pudiera controlar ambas baterías durante sus ciclos simultáneamente. Se dispusieron 6 relés, dos de los cuales cortaban ambas entradas de cargadores, otros dos para las resistencias y los últimos para la salida de los cargadores.

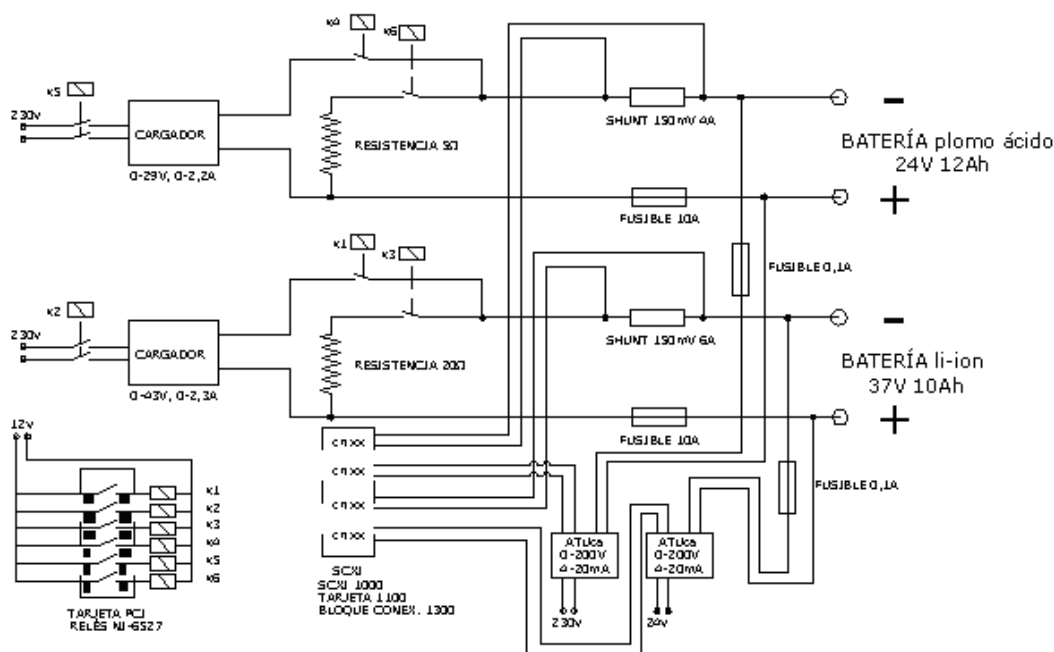


Figura 39. Diagrama evolución de la bancada de baterías

Se desarrolló una actualización en la bancada de baterías en la cual se instalaron termopares para controlar la temperatura de las mismas y se modificó el software para que enviase las medidas que recoge a una base de datos y así acceder con mayor facilidad a los mismos.

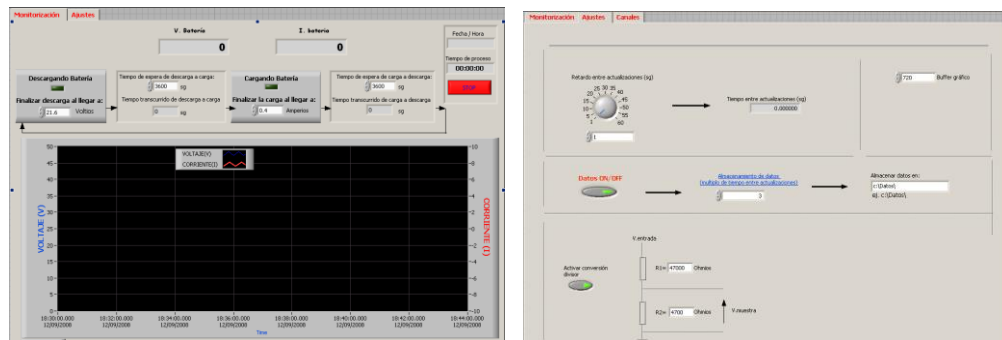


Figura 40. Aplicación para el ensayo en la bancada de baterías

A medida que se iban obteniendo datos de los ciclados de las primeras baterías se fueron añadiendo utilidades a la bancada de baterías para hacerla más versátil a las necesidades del estudio como, por ejemplo:

- Se desarrolló una actualización en la bancada de baterías en la cual se instalaron termopares para controlar la temperatura en los ciclos acelerados de la bancada.
- Con el objetivo de obtener más perfiles de degradación de diferentes modelos de baterías se modificó el software para identificar diferentes tipos de baterías con el objetivo de tener un fácil e intuitivo seguimiento de cada una de ellas.

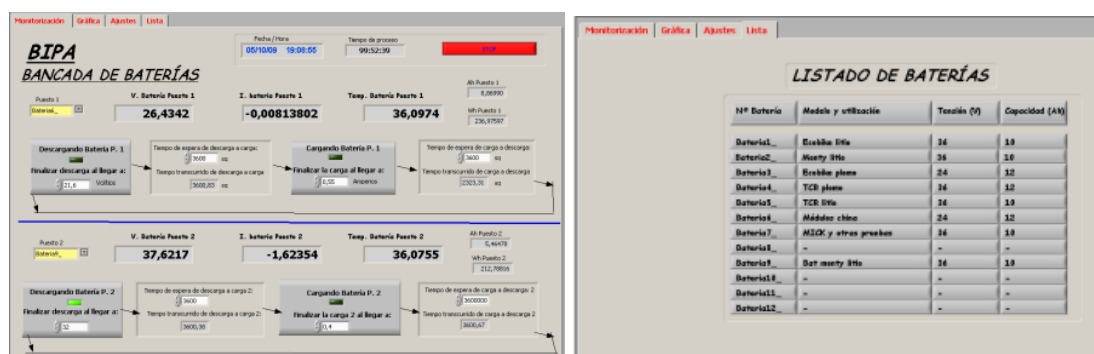


Figura 41. Mejoras App ensayo de la bancada de baterías

- Mejora de la bancada reubicando los diferentes dispositivos para hacer más accesibles sus componentes en caso de avería, también la sustitución de los convertidores ATUca<sup>9</sup> por divisores de tensión que nos permitieron un sistema más compacto, ocupando menos espacio y lograr una mayor precisión en las medidas. En la siguiente figura se presenta el circuito diseñado para este proceso.

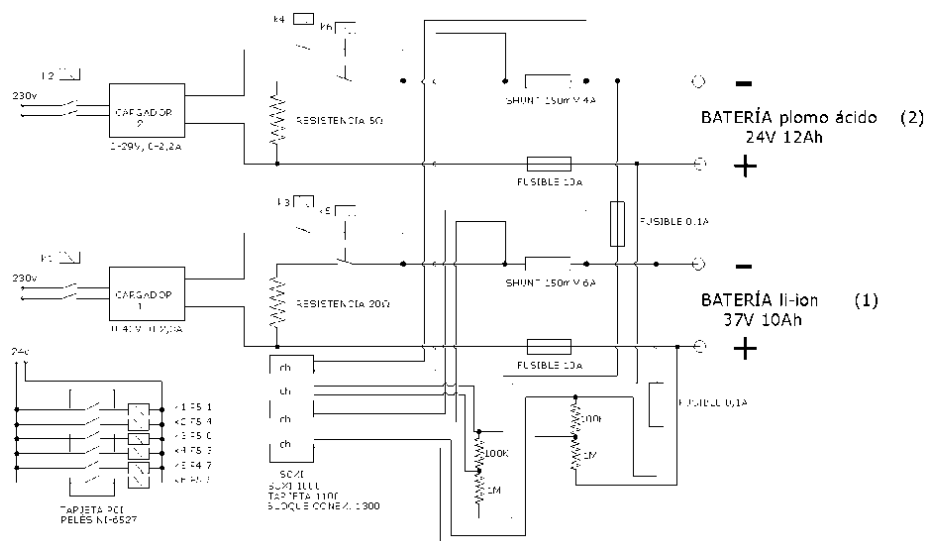


Figura 42. Diseño del circuito de integración de la bancada baterías

- Diseño definitivo de la PCB Figura 43 para sustituir la instalación existente con las modificaciones necesarias en cableado y equipos. Además, se amplió el número de baterías con las que se pueden trabajar.

<sup>9</sup> <https://www.saci.es/producto/convertidor-medida-atuca/>

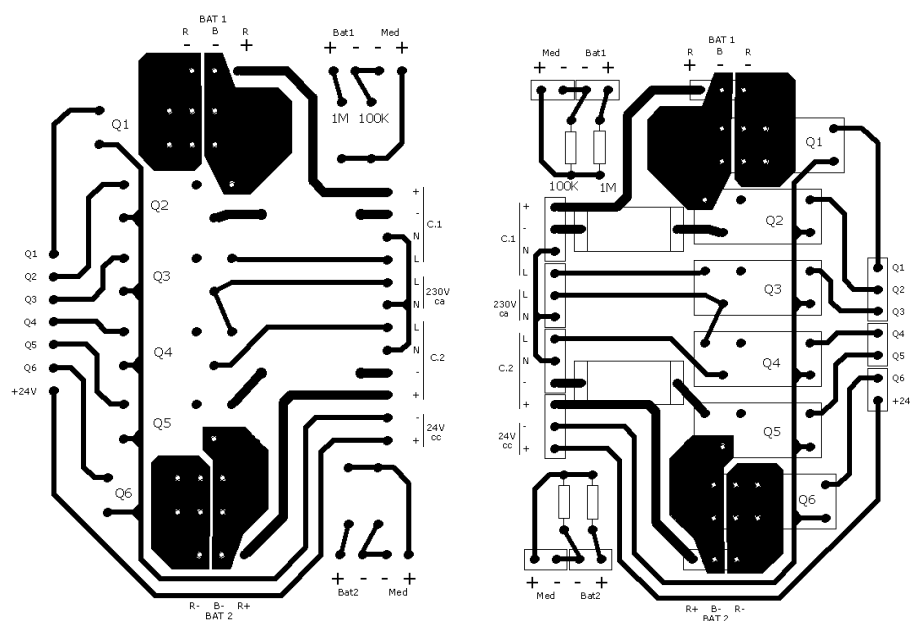


Figura 43. Diseño PCB del circuito de la bancada baterías

### 3.2.3. Prototipo de estación de recarga de bicicletas eléctrica

Unos de los aspectos claves para el estudio del comportamiento y la evaluación de las bicicletas eléctricas, fue el diseño y posteriormente el desarrollo de una estación de recarga de bicicletas eléctricas, la selección de la ubicación se determinó en base a las necesidades del proyecto [17].

Una vez elegida la ubicación de la estación de recarga se procedió a realizar la instalación de los armarios estancos y conducciones necesarias donde se ubicaron los sistemas de carga y control de las bicicletas eléctricas.

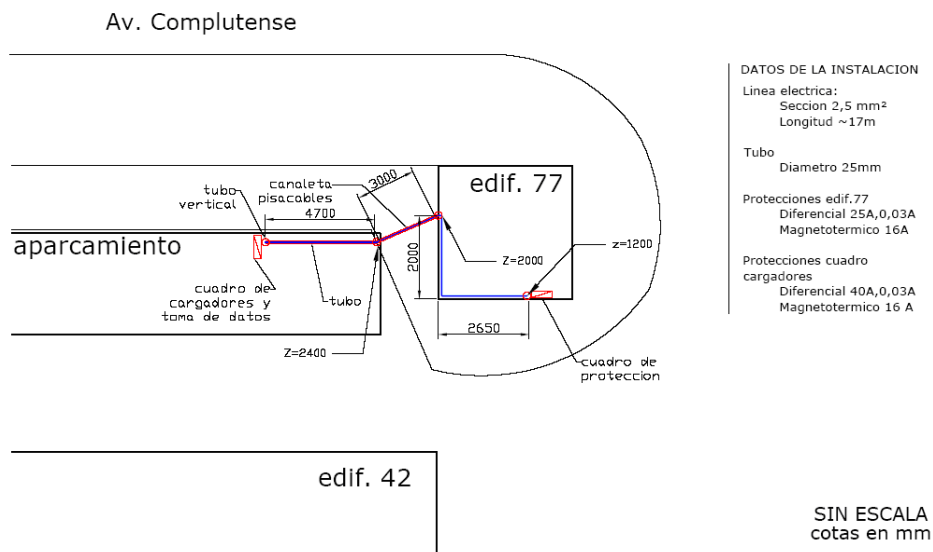


Figura 44. Ubicación estación de recarga de bicicletas eléctricas



Figura 45. Foto de la estación de recarga de las bicicletas eléctricas

Se definió un orden de estacionamiento, se nombraron las bicicletas eléctricas como BIPA, Bicicleta Inteligente de Pedaleo Asistido, y se numeraron para identificarlas. Se añadieron protecciones en el cuadro de cargadores para garantizar la seguridad de la parte exterior de la instalación y ambos cuadros.

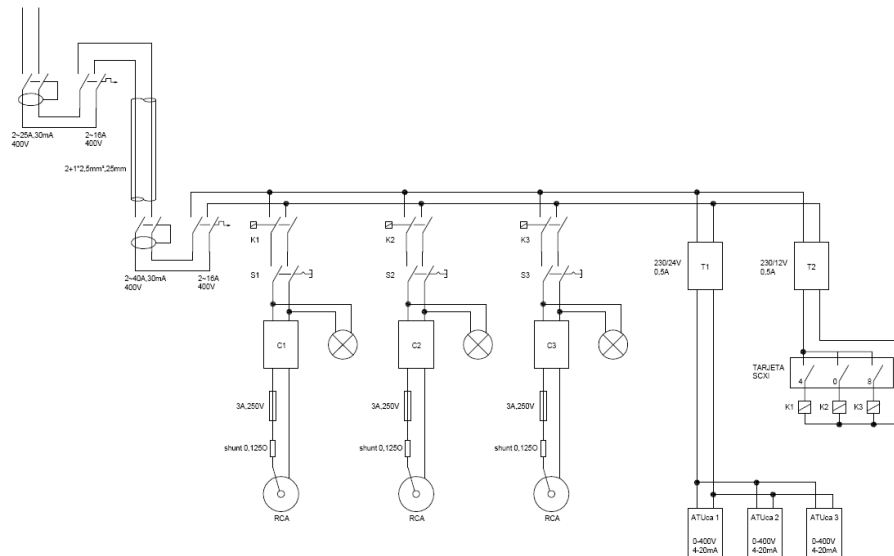


Figura 46. Diagrama de conexiones de la estación de recarga

Se desarrolló una aplicación para monitorizar los voltajes y corrientes de carga de las baterías de las bicicletas eléctricas y almacenar los datos en ficheros independientes. También se automatizó la instalación de forma que los cargadores se desconectaran tras haber finalizado la carga de las baterías.

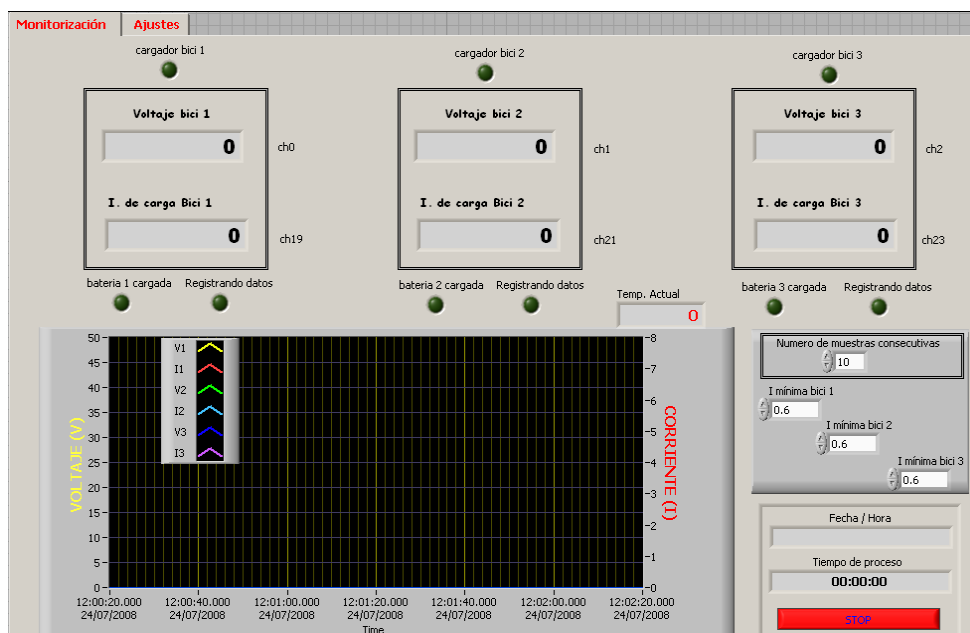


Figura 47. Aplicación para la monitorización de la estación de recarga

A medida que se fue avanzando en el estudio se fueron adquiriendo nuevas bicicletas eléctricas de pedaleo asistido, por ello se amplió la estación de recarga

para que tuviera mayor capacidad de carga bicicletas eléctricas, eso llevó a introducir mejoras en el sistema por los diferentes defectos encontrados, además de actualizar la estación de recarga con más puestos:

- Modificaciones físicas en el interior del cuadro, se añadieron nuevos cargadores, cableados y carriles DIN. Se realizó el diseño definitivo del circuito para este proceso Figura 48.

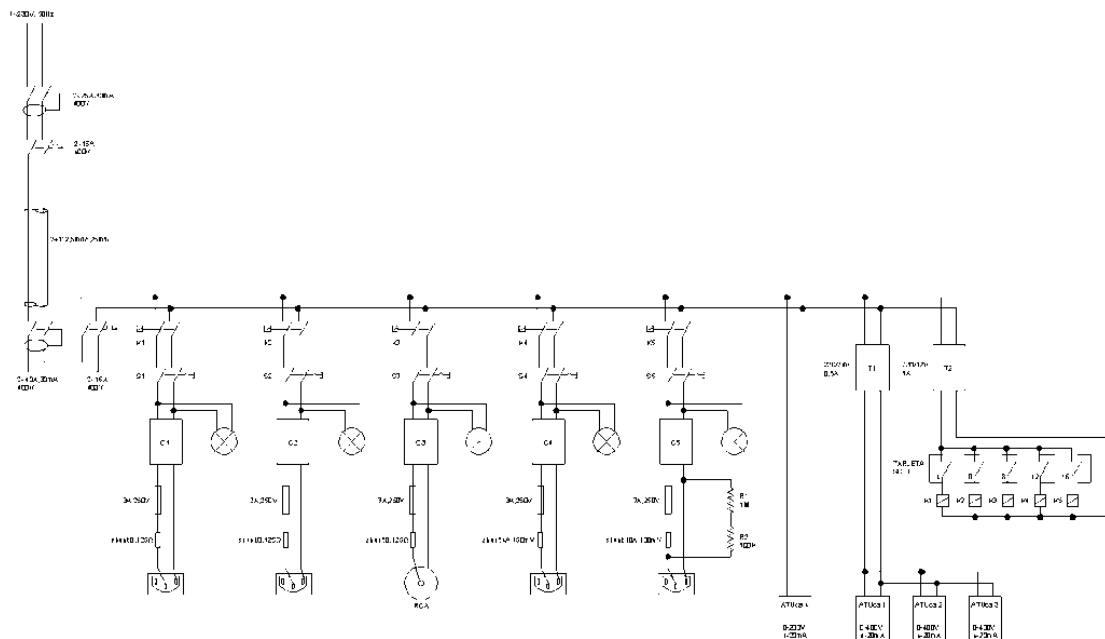


Figura 48. Diagrama de conexiones de la estación de recarga

- Reducción del riesgo de cortocircuitos gracias a la sustitución de los conectores RCA de la puerta del cuadro por conectores de tres patillas tipo informáticos.
- Modificación del software para ampliar el número de puestos de carga a supervisar, manteniendo la funcionalidad previa Figura 49.

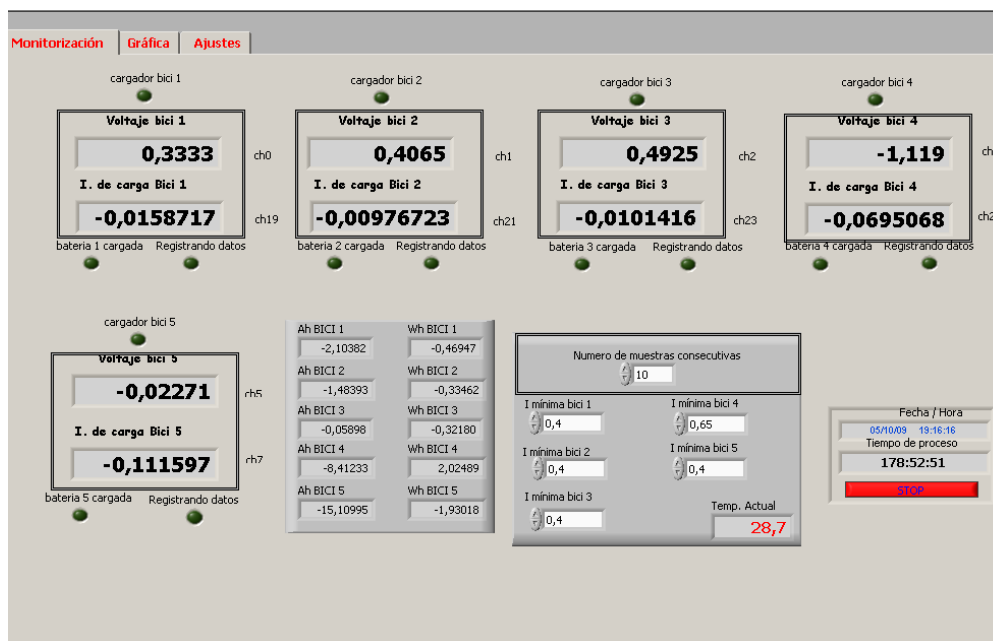


Figura 49. Evolución de la monitorización de la estación de recarga

- Mejora de la ventilación del cuadro que contenía al ordenador para evitar problemas en las épocas de calor.
- Instalación de una estructura de aparcamiento de bicicletas para evitar las caídas de las mismas.

La evolución de este sistema fue constante durante los meses de funcionamiento hasta llegar a un sistema de recarga y toma de datos inteligente y completamente automatizado.

La primera versión fue sin duda la más simple, dotando a la estación de un sistema de recarga manual. Un error en el diseño de la instalación hizo notable la necesidad de instalar sistema de protección con fusibles a la salida de los cargadores para evitar posibles problemas ya que tan solo el cargador de una de las bicicletas eléctricas, tenía fusibles internos, aunque sobredimensionados.

Una vez que la instalación comenzó a funcionar de forma autónoma, se comenzó a trabajar con datos de utilización diaria por parte de los usuarios, pero se detectaron problemas en los valores de tensión de los cargadores, dando valores de carga completa cuando en realidad no habían finalizado el estado de carga. Se

descubrió que fue por motivos de adaptación de impedancias, por ello se utilizó otra configuración que soluciono el problema.

La automatización del sistema de carga y la optimización del funcionamiento del programa supone una garantía para la buena praxis de los métodos de carga de las baterías. Con ello podemos asegurar el máximo número de ciclos de carga prolongando así la vida útil de las baterías. Además, la adquisición detallada de los datos nos permitió conocer el estado de las bicicletas eléctricas, el desgaste o uso que habían tenido e incluso poder hacer predicciones sobre el futuro comportamiento de los módulos energéticos, así como comparaciones entre cargas totales y cargas parciales a diferentes condiciones de temperatura de entorno.

### ***3.3. Diagnóstico de Movilidad-Social***

Además del estudio de los módulos energéticos que conforman el sistema de movilidad a estudio, no es menos importante estudiar e investigar las interacciones del sistema con los empleados que participaron en el proyecto y van a usar finalmente este sistema.

Por lo tanto, se trató de estudiar la movilidad relacionada en el centro de trabajo, CIEMAT. Lo que se pretendió fue entender el comportamiento de las flotas de las bicicletas eléctricas en este contexto, para lo que se analizaron tanto las percepciones sociales y operativas. Se pretendía identificar “la problemática” relacionada con el estudio de los módulos energéticos que afectan a variables de movilidad como el consumo, eficiencia, durabilidad y autonomía.

Lo primero fue establecer las condiciones de contorno de aplicación del sistema, realizando un análisis preliminar del piloto de movilidad localizado en el centro de trabajo CIEMAT. Se analizaron la meteorología de la zona de estudio como parámetro que puede determinar el tiempo de uso de las bicicletas eléctricas al año, Madrid posee unas condiciones climatológicas mejores que el resto de Europa y muchos estados de EEUU, por lo que la climatología no sería un

impedimento para el uso continuo de la bicicleta. también el estudio espacial y de infraestructuras para conocer tanto la concentración de los edificios dentro del centro como la división del CIEMAT en dos zonas diferenciadas, así como las características demográficas del centro de trabajo seleccionado como base de estudio de los potenciales usuarios de las bicicletas eléctricas. Se trató de abarcar los aspectos sociales, culturales, de infraestructuras, etc.; que están relacionados con la movilidad dentro del centro de trabajo.

El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT se encuentra situado junto a la Ciudad Universitaria, en la ciudad de Madrid. Es un centro de trabajo que se extiende sobre una superficie de 20 hectáreas Figura 50. Se distribuye en un área de forma rectangular dividida en dos por una calle del viario público. La parte urbanizada al oeste es de 0,11 x 0,23 km y se extiende sobre una superficie de 2,65 hectáreas. La sección oriental es de 0,38 x 0,27 km, es decir, unas 10,11 hectáreas. Ambas zonas están separadas por la Avenida Complutense que mide unos 8 metros de ancho.



Figura 50. Ubicación CIEMAT y la Ciudad Universitaria

En el área de infraestructuras se realizaron estudios de tiempos, distancias, pendientes Figura 51 se efectuaron 12 recorridos diferentes que permitieron concluir que la zona Oeste del centro apenas presenta desniveles significativos,

concentrándose la mayor parte estos en la zona Este. Se puede concluir que, de todos los recorridos realizados durante el estudio, 7 de ellos presentan un desnivel aproximado entre 0% y 3%, mientras que los 5 restantes presentan un desnivel de 3% y 7%.

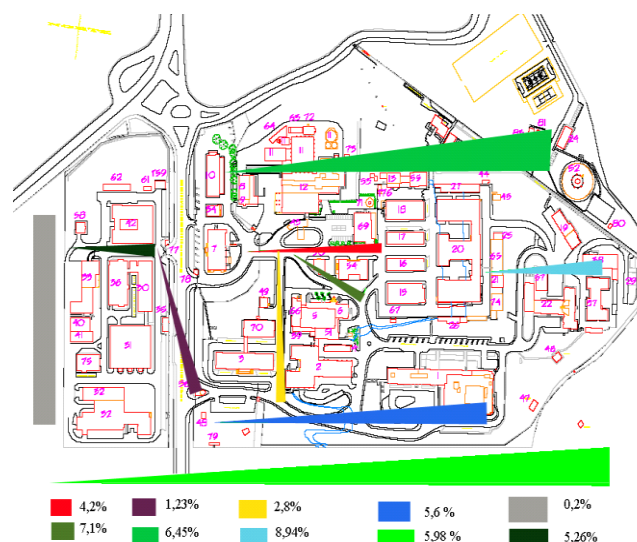


Figura 51. Mapa de pendientes CIEMAT en porcentaje

En el área social se realizó un diagnóstico demográfico de la comunidad laboral obteniendo los datos de base de los posibles usuarios del sistema. El elemento clave con el cual se pudo valorar la idoneidad del estudio desde su comienzo, fue la participación desinteresada de la mayoría de los empleados del centro de trabajo CIEMAT, por ello se quiso en todo momento hacerles partícipes de los diferentes estudios y trabajos.

Todo empezó con una presentación a los trabajadores del centro, mostrándoles las primeras bicicletas eléctricas adquiridas e informándoles de cómo se iba plantear el trabajo social en el estudio de movilidad eléctrica en el centro de trabajo Figura 52. A la presentación del estudio acudieron entre 100 y 200 personas, lo que constató el elevado interés por el estudio de movilidad eléctrica y las bicicletas eléctricas. Se presentaron varias bicicletas eléctricas a los empleados, mostrando a los visitantes las piezas clave de las bicicletas eléctricas y su funcionamiento mediante un taller paralelo.



Figura 52. Presentación de las bicicletas eléctricas a los empleados

Se animó a los empleados a rellenar una encuesta general sobre movilidad en CIEMAT que se realizó a través del sistema intranet permitiendo que todos los empleados pudieran acceder a la encuesta y rellenarla directamente mediante la web de forma anónima. La información recopilada recibió un tratamiento estrictamente estadístico y se le aplicó la ley de Protección de Datos de Carácter Personal<sup>10</sup>. A medio camino del estudio se lanzó una segunda encuesta para confirmar los datos de la primera y para obtener información adicional: opinión sobre el sistema bicicleta eléctrica interno de CIEMAT, percepción de los empleados sobre el estudio y predisposición de los empleados a usar las bicicletas en caso de establecerse un servicio como el caso de estudio, un posible servicio futuro de CIEMAT a Moncloa.

Una vez se recibió la confirmación de los empleados que querían participar en el estudio, se definieron diferentes sistemas de movilidad con bicicleta eléctrica en el centro de trabajo:

- Sistema bicicleta eléctrica compartida, se realizó un estudio del sistema compartido entre grupos de participantes del mismo edificio y departamento. Se distribuyó una bicicleta eléctrica por grupo: informática, prevención de riesgos laborales y mantenimiento.

---

<sup>10</sup> Ley Orgánica 15/1999, Protección de Datos de Carácter Personal; <https://www.boe.es>

- Sistema Unipersonal, se asignó las bicicletas eléctricas a un empleado de cada grupo: informática, prevención de riesgos laborales y mantenimiento.
- Dos o tres bicicletas eléctricas por grupo, se seleccionó un grupo donde se veía que las bicicletas eléctricas fueran a utilizarse de forma intensiva, se seleccionaron a 8 personas, trabajadores del servicio de mantenimiento, dispuestos a compartir dos o tres bicicleta eléctrica.

Se realizaron diferentes tipos de entrevistas a los participantes del estudio a largo de todo el estudio en un contexto múltiple: informales, semi-estructuradas y grupos de discusión. Se entrevistaron perfiles de trabajadores distintos, en una de ellas se entrevistó a un total de diez personas: dos del grupo de informática, dos del grupo de prevención de riesgos y seis del grupo de mantenimiento. La primera parte de las entrevistas trató los aspectos técnicos de las bicicletas eléctricas y del sistema de recarga. Se focalizó sobre la comodidad, el funcionamiento mecánico, eléctrico y técnico de las bicicletas eléctricas, la energía suministrada por la batería, el acelerador. La segunda parte de la entrevista trató los aspectos sociológicos, como la movilidad, la condición física de los entrevistados, la percepción predisposición del uso de bicicleta eléctrica, etc.

A lo largo del estudio, se hicieron encuentros conjuntos con los temas tratados en resto de entrevistas. Estos grupos de discusión sirvieron para contrastar y provocar debates entre los participantes del mismo grupo. Se cuestionaron temas referidos a la percepción que tenían del uso compartido de la misma bicicleta eléctrica, a los aspectos técnicos y a las comodidades de la bicicleta eléctrica compartida; a la percepción de seguridad y de movilidad en el CIEMAT.

Durante un tiempo, los participantes tuvieron que coger las bicicletas eléctricas cada día a primera hora de la jornada laboral y devolverlas a última hora. Las bicicletas eléctricas estaban en la estación de recarga, en la página 79 situada en frente del edificio 42. se colocaron cuenta-kilómetros en las bicicletas eléctricas y se pidió a los participantes de la muestra a apuntar los datos cada día, hasta que se pudiera desarrollar un sistema automatizado. Estas fichas

posibilitaron la obtención de un seguimiento semanal y animaron a los participantes a analizar los datos de la experiencia.

Con el fin de asegurar condiciones de seguridad idóneas, se decidió redactar un contrato de seguridad para el uso de las bicicletas eléctricas y el desarrollo del programa piloto dentro del CIEMAT. Este contrato establecía la responsabilidad de los participantes en cuanto al uso de las bicicletas y las normas de seguridad y de organización. Se añadió al estudio una póliza especial que asegurase a los usuarios de las bicicletas eléctricas.

### ***3.3.1. Aplicación para la gestión de los datos del estudio.***

A medida que crecía el volumen de datos en el estudio se estimó oportuno un sistema de comunicación automática con todos los prototipos y bancadas desarrolladas, el objetivo era poder tener automatizado la recolección de datos empíricos de los diferentes experimentos.

A diferencia de los módulos energéticos que al principio de las campañas de medida se utilizaba hardware calibrado con su software correspondiente como LabVIEW® que aseguraban medidas sin desviaciones, esta vez se buscó software libre para poder acometer las diferentes automatizaciones, para el almacenamiento de los datos se optó por el programa gestor de bases de datos MySQL<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> <https://www.mysql.com/>

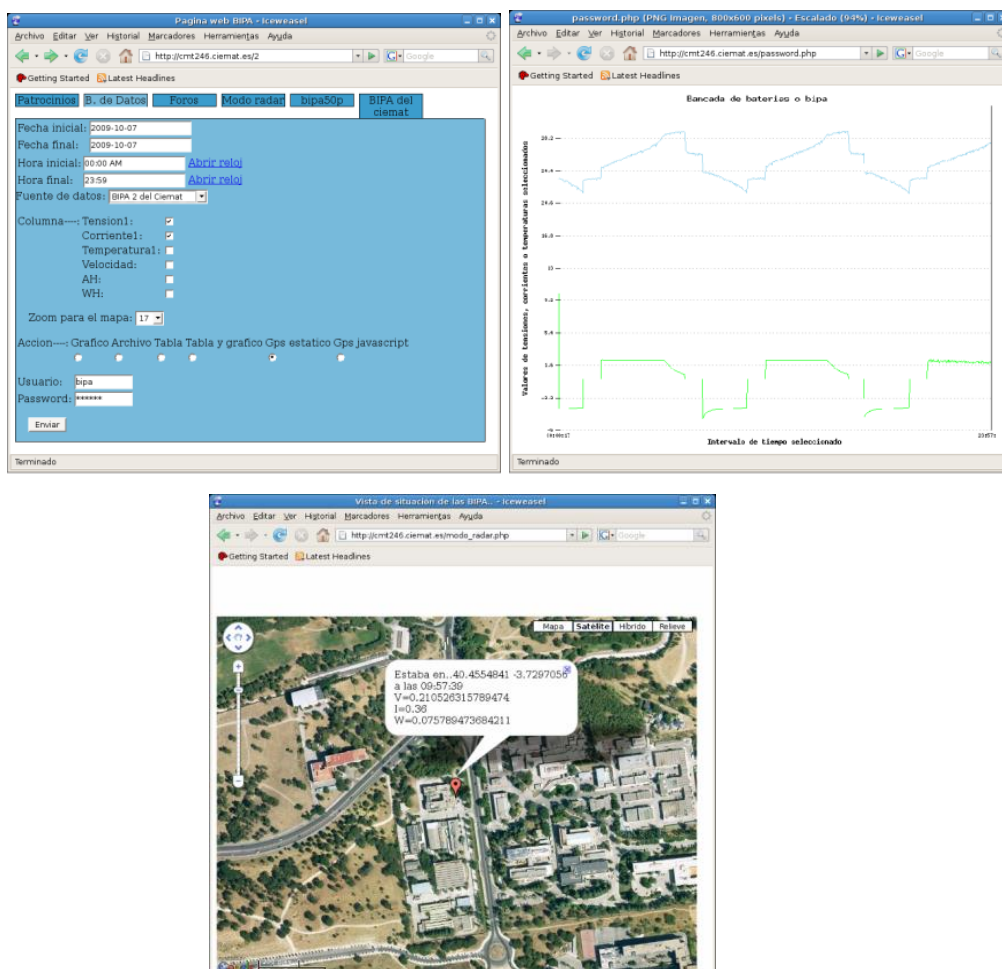


Figura 53. Actualización de la consulta a la base de datos desde la web

Se desarrollaron diferentes scripts para poder adaptar los datos recogidos en los experimentos a los requisitos y necesidades de la base de datos. Además, con el fin de poder consultar los datos fácilmente y poder obtener gráficos de los datos de las diferentes bancadas y prototipos, se desarrolló una página web en PHP<sup>12</sup> instalada en un servidor con sistema operativo debian<sup>13</sup>.

Las consultas a la base de datos en la web se podían realizar de dos vías: almacenándolos en un archivo para guardar los datos de la consulta para su

<sup>12</sup> <https://www.php.net/>

<sup>13</sup> <https://www.debian.org/>

posterior uso con otro tipo de utilidades externas que ofrezcan una funcionalidad distinta a las propias de esta página web y directamente presentando un gráfico Figura 54 con las curvas de tensiones, corrientes o temperaturas de las diferentes fuentes de datos seleccionadas indicado las fechas y horas de interés para que se presenten en el gráfico.

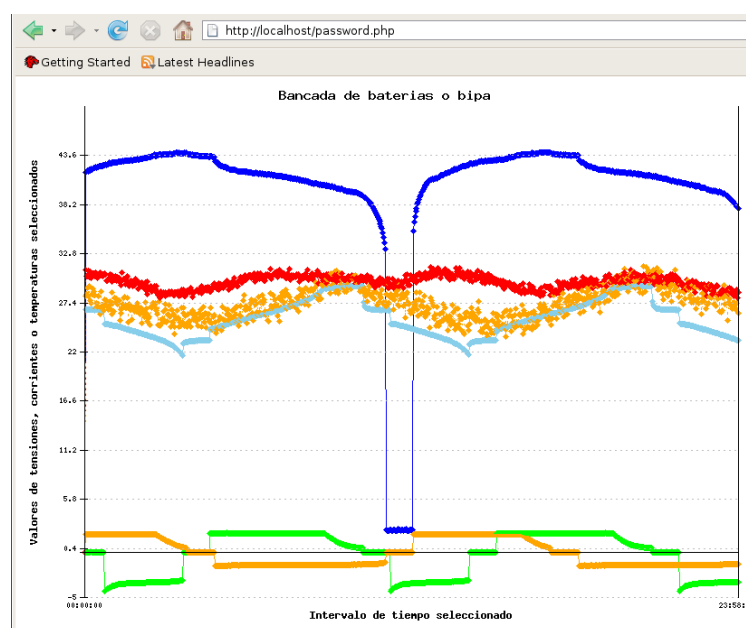


Figura 54. Resultado de una consulta a la base de datos desde la web

### ***3.3.2. Monitorización en trayecto de las bicicletas eléctricas***

Para la monitorización de las bicicletas eléctricas en movimiento se requería de un sistema sencillo robusto y ligero, en primera instancia se decidió utilizar una plataforma hardware configurable por software PIC<sup>®14</sup>, programable con la aplicación MPLAB<sup>®</sup> que se encarga de convertir la programación introducida en C a formato HEX que es el que utiliza el dispositivo. Una vez verificado su funcionamiento se diseñaron los circuitos oportunos para la funcionalidad deseada.

<sup>14</sup> <https://www.microchip.com/>



para extraerlos del equipo una vez estacionada la bicicleta eléctrica en su estación de recarga.

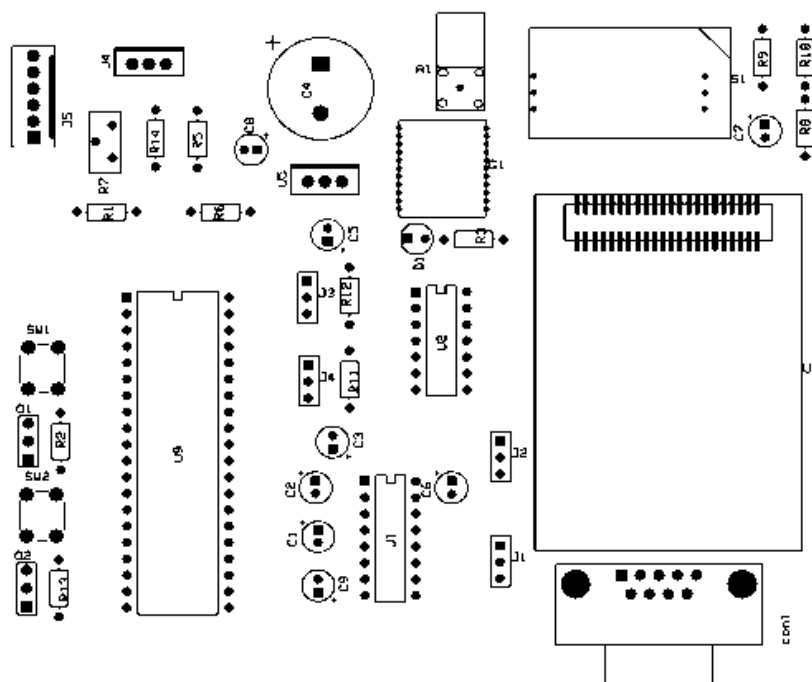


Figura 56. Esquema PCB del circuito impreso PIC y GPRS/GPS

Desde el inicio del estudio el desarrollo de este prototipo fue clave en su ejecución debido a que realimentaba al estudio de datos valiosos del comportamiento energético de las bicicletas eléctricas, se le dedico un gran esfuerzo, finalmente una vez realizado el plan de pruebas en paralelo y de forma independiente de los módulos GPRS/GPS y PIC®, se integraron en un mismo diseño PCB, realizado en Kicad<sup>15</sup>, para obtener una único dispositivo Figura 57.

<sup>15</sup> <https://www.kicad.org/>

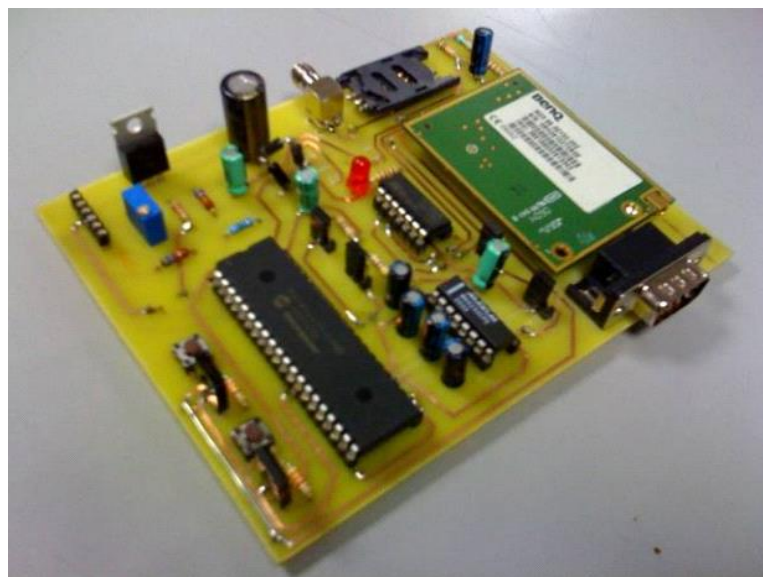


Figura 57. Imagen del prototipo Módulo GPRS/GPS

Una vez realizado el diseño y el desarrollo de la nueva tarjeta, se le sometió a un nuevo plan de pruebas. La conclusión final fue que se solucionaron algunos de los comportamientos erróneos, aunque otros persistían, y además aparecieron otros nuevos que fueron decisivos para tener que cambiar urgentemente de dispositivos para poder continuar con el estudio.

El objetivo del nuevo diseño era obtener un dispositivo que aportase información para la optimización energética (datos energéticos, posición, velocidad, fecha y hora) y permitiera actuar a distancia sobre las bicicletas eléctricas. Para ello, se cambió el microcontrolador anterior por otro que tuviera más funcionalidades integradas, eligiendo el MTX-65+G, de Matrix<sup>16</sup>, como equipo viable por la simplicidad del diseño y por la reutilización en su programación J2ME<sup>17</sup>. Se trabajó en el rediseño del esquema de un nuevo circuito de conexiones y se trasladó a una nueva PCB de adaptación de los circuitos de medidas y alimentación del nuevo dispositivo Figura 58.

---

<sup>16</sup> <https://www.matrix.es/>

<sup>17</sup> <https://www.oracle.com/>

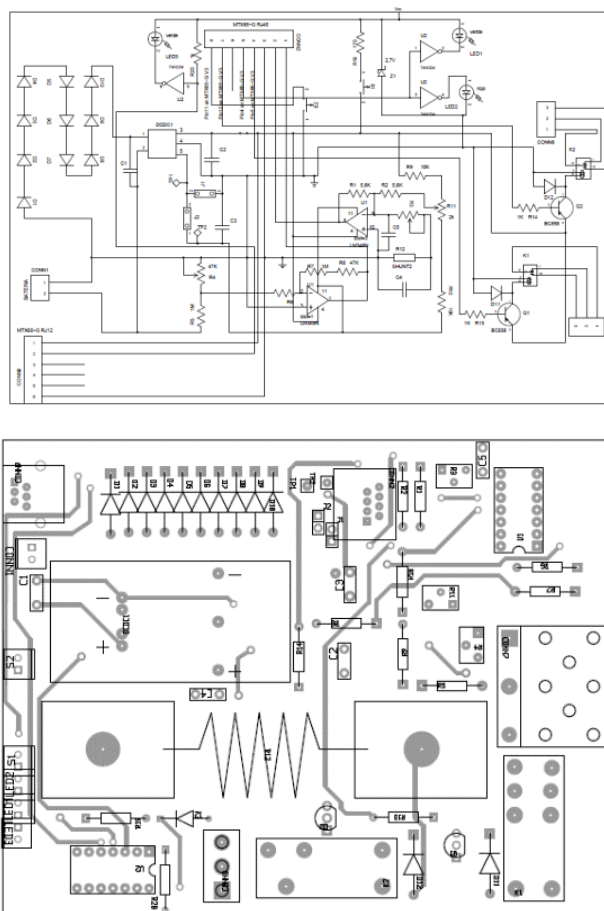


Figura 58. Esquema y diseño PCB de la “mochila” GPS/GPRS

Se diseñó y compiló aplicaciones específicas en J2ME, para la obtención de las medidas de tensión y corriente en la batería, posición del GPS, fecha y hora. Además, en algunas de las versiones se incluyó la posibilidad de interactuar a distancia cortando la alimentación, permitiendo o no la recarga, etc.

Una vez verificada la funcionalidad, realizando un plan de pruebas y verificación de la calidad de las medidas obtenidas, se integró el dispositivo, la nueva tarjeta de alimentación y adaptación de señales de media, en una caja estanca, para aislar el dispositivo y a la tarjeta de la intemperie, que se la denominó “mochila”.

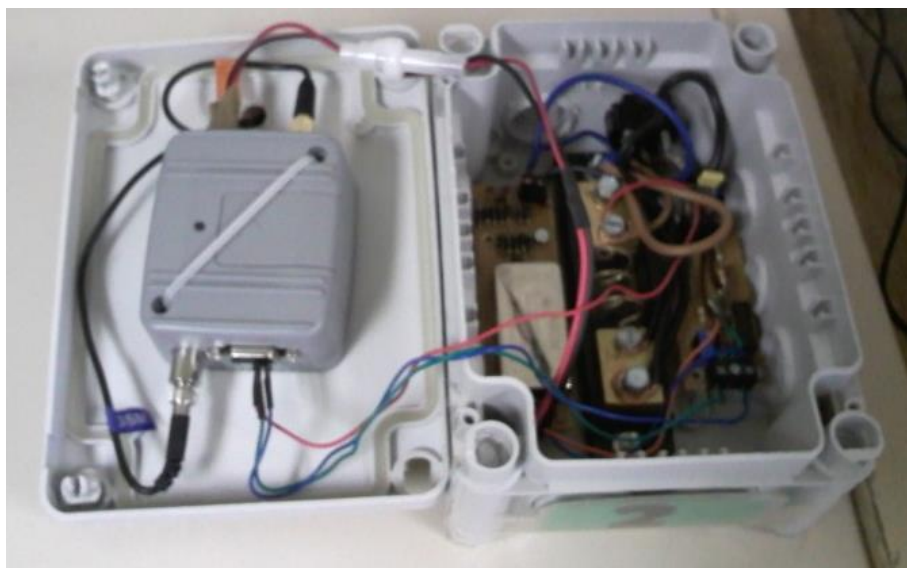


Figura 59. Imagen del desarrollo de la “mochila” GPS/GPRS

### ***3.3.3. Gestión del sistema de movilidad de las bicicletas eléctricas.***

Este sistema se diseñó y desarrolló, como una evolución natural de los logros alcanzados hasta el momento en el estudio de las bicicletas eléctricas en un contexto movilidad-energético en un centro de trabajo, una pieza clave fue la puesta en funcionamiento de la “mochila” Figura 59, ya que permitía la geolocalización de cada bicicleta eléctrica, toma de datos energéticos, he incluso la actuación a distancia de ciertas funcionalidades. Las mejoras fueron notables ya que un número mayor de personas tuvo acceso a las bicicletas eléctricas para moverse por el CIEMAT.

El sistema se inició como una aplicación web “BETA” Figura 60 entre unos determinados trabajadores que quisieron participar como voluntarios. Los usuarios que desearon utilizar el sistema de bicicleta eléctrica compartida por solicitud, firmaron el contrato de seguridad y responsabilidad y se registraron en un foro habilitado para el desarrollo de la experiencia que además aportó la funcionalidad adicional como herramienta de comunicación entre usuarios y personal técnico para intercambiar impresiones y recibir quejas/sugerencias sobre el servicio.



Figura 60. Captura de la pantalla de inicio de la Web

Además de la incorporación del acceso a un foro en PHP, se diseñó una aplicación web gráfica Figura 61 muy intuitiva con las instrucciones de uso integradas para que los usuarios reservaran las bicicletas eléctricas a utilizar. A las diferentes funcionalidades se accedía desde la página principal de la web desarrollada para el proyecto Figura 60, donde se le añadieron estos enlaces en dos pestañas, acceso al foro y acceso a la bicicleta eléctrica por solicitud desde “Bipa del Ciemat”. En BIPA del CIEMAT redireccionaba a una pantalla desde la cual se podía observar donde se encontraba sobre el mapa cada una de las bicicletas eléctricas en funcionamiento y en qué estado ocupado o libre, mediante un símbolo con el número de BIPA en forma de globo verde para el caso de BIPA libre o rojo para el contrario. Para hacer una reserva, bastaba con que el usuario situara el cursor del ratón sobre el globo verde de una de las BIPA y hacer clic, aparecía un popup señalando a la BIPA elegida, y en el que se si se accedía a “solicitar BIPA” nos llevaba a un registro donde se introducía el nombre de usuario y contraseña, del usuario dado de alta en el servicio movilidad. Una vez realizados todos los pasos para la solicitud de la bicicleta eléctrica deseada, en la pág. de consulta y reserva, mostraba la BIPA como ocupada, identificando la misma con un globo sobre mapa de color rojo y con el número de nuestra BIPA solicitada, se disponía de un tiempo prudencial para la recogida de la bicicleta eléctrica, ya que de caso contrario el globo de la BIPA volverá a mostrarse como libre mediante un globo verde y podrá ser solicitado por otro usuario siguiendo los pasos anteriores.

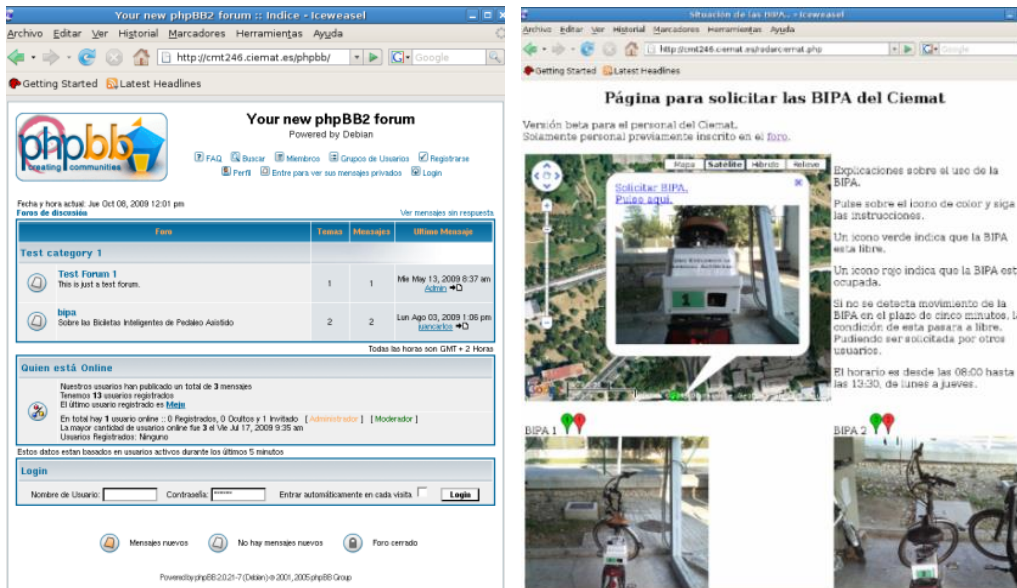


Figura 61. Acceso al foro y a la solicitud BIPA

## ***4. Datos Empíricos***

Una vez descritos los prototipos utilizados en el proyecto en esta sección se muestran los resultados de los datos empíricos obtenidos a lo largo del mismo. En estos datos se representa la evolución que han ido teniendo los prototipos a lo largo del estudio y sobre todo desde las etapas tempranas que fueron las que definieron el rumbo que iba adquiriendo el interés por un sistema de movilidad con bicicleta eléctrica u otro.

### ***4.1. Evaluación Vehículos eléctricos ligeros***

El principal consumidor de energía de un sistema de movilidad eléctrica es el motor del vehículo eléctrico. Tal y como se comentó en capítulos anteriores en este trabajo de tesis no se va profundizar en los vehículos eléctricos de segmento B o C, ya que están suficientemente caracterizados para las necesidades de este trabajo de tesis por sus fabricantes.

#### **Elección de las bicicletas eléctricas, seguridad, muestra y metodología.**

Como ya se ha comentado, tras un exhaustivo estudio de características técnicas, diseño, calidad, prestaciones y demás factores importantes a la hora de elegir el mejor modelo adecuado a las necesidades, se seleccionaron los modelos de la marca Ecobike Elegance 24, Elegance 36 y Monty E4. Estas bicicletas eléctricas se benefician de un diseño urbano con cuadro de “ola” de fácil acceso y todos los componentes necesarios para el uso cotidiano (guardabarros, trasportín, luces, manillar de gaviota, etc.).

Sin embargo, las tallas del cuadro resultaban insuficiente para personas por encima de 1,85 m de altura, y además las bicicletas eléctricas no incorporaban cesta en su versión estándar de venta. También, se verifico que la pata de cabra quedaba demasiado cerca del suelo y podría resultar peligrosa a la hora inclinarse para realizar un giro cerrado. La bicicleta eléctrica Monty tiene mayor eficiencia

en la frenada porque tiene freno de disco mecánico delantero mientras que las bicicletas eléctricas Ecobike tienen frenos V-brake (con zapatas). Las dos bicicletas Ecobike 24 y 36 llevan un acelerador, elemento útil para los usuarios, pero fuera de la legalidad para un uso fuera de un recinto privado, en las actuales versiones han mejorado el sistema de control del acelerador para que cumpla la normativa referente a desconectarse la acción del acelerador cuando se deja de pedalear. En general, los participantes han preferido tener una potencia máxima a la hora de subir las cuestas.

Las tres bicicletas eléctricas que se utilizaron en el CIEMAT tienen amortiguadores en la horquilla delantera. Es un sistema que puede hacer más cómoda la conducción, pero no se recomienda para bicicletas de uso colectivo dado que eleva el coste económico de la bicicleta y sus necesidades de mantenimiento. Por la posición erguida que adquiere el conductor en las bicicletas de carácter urbano, es más importante reforzar la amortiguación del sillín y, si es preciso, en la tija. Esta es una cuestión que hay que valorar también en el caso de llevar carga delicada, ubicando adecuadamente la misma en el eje más amortiguado.

La bicicleta eléctrica Beixo electra (Plegable) no tiene un tamaño adecuado para un uso público (Dimensiones plegada: 78 L x 53 alt x 32 an cm, tamaño de rueda de 20", carece de amortiguadores ni posibilidad de poner una cesta. Sin embargo, la Beixo electra lleva un sistema de transmisión que puede ser interesante para un uso colectivo (lleva un cardan aplicado a la bicicleta, shaft-drive system) porque es resistente, duradero y con bajas necesidades de mantenimiento. El triciclo eléctrico Swing de Ciclo TEK tampoco se ha considerado apropiado para un uso colectivo. La cadena de transmisión que lleva no está preparada para el uso de carga y motor eléctrico del conjunto, la cadena se rompió en el primer viaje de prueba. Los frenos son plenamente insuficientes y de muy baja calidad. Los triciclos con una distancia entre sus ejes traseros pequeña ofrecen una gran inestabilidad en su equilibrio a la hora de realizar las curvas. Además, el triciclo Swing tiene un acelerador que funciona sin que el usuario tenga que pedalear, lo que resulta inseguro e ilegal. Todo ello ha llevado a la eliminación de

éste vehículo para el uso de la muestra y permite afirmar que este triciclo no es aconsejable para un uso público,

En conclusión, las características básicas que deben reunir las bicicletas eléctricas de uso público son: deben ser homologadas de pedaleo asistido<sup>18</sup>, tener un tamaño adecuado para casi todas las alturas, disponer de un cuadro de ola o barra baja para mejorar la accesibilidad, conducción y permitir una posición erguida del ciclista, cestas y portabultos adecuados en tamaño y posición para llevar carga (en un centro de trabajo es imprescindible), ser de máxima comodidad (sillín) y potencia adecuada para todo tipo de peso.

A la hora de valorar una bicicleta de uso colectivo hace falta tener en cuenta los siguientes factores: comodidad y versatilidad, equilibrio entre sencillez, calidad y resistencia en todos sus componentes que ofrezcan unas bajas necesidades de mantenimiento, accesorios necesarios: portabultos o cestas para llevar pequeñas cargas, elementos de iluminación autónomos (por ejemplo, con dinamo en el buje) y cubre cadenas y guardabarros.

Un poco más avanzado el proyecto se realizó la adquisición de 5 bicicletas eléctricas del modelo Ecobike elegance. Este nuevo modelo difería del anterior en que se había sustituido la batería de Litio- Ión por una de litio-polímero siendo ligeramente superior. También se le habían introducido algunas mejoras en el diseño mecánico de la misma como, por ejemplo, la sustitución de los dispositivos de alumbrado, cambios de marchas más modernos, incorporación de gomas en el trasportín trasero y mejora global de la estética del conjunto. También se adquirieron 5 cestas delanteras de la misma marca diseñadas para este tipo de bicicletas.

---

<sup>18</sup> Directiva 2002/24/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de marzo de 2002, relativa a la homologación de los vehículos de motor de dos o tres ruedas y por la que se deroga la Directiva 92/61/CEE del Consejo

Características básicas según fabricante de las bicicletas eléctricas: marca Ecobike, Elegance 36 (nuevo modelo) de 250 W, batería de litio-polímero de 36 V y 10,5 Ah. Con una batería de 3,8 kg y una autonomía de 60 a 70 km, un tiempo de carga de 4 a 6 horas.

Con esta adquisición, el proyecto contaba con 10 bicicletas eléctricas en total, aunque funcionales solo 8, debido a que dos de ellas con baterías de plomo-acido, aparte de no ser las preferidas para los usuarios por el peso de más, que aportaba la batería, se deterioraron por causa de las baterías, dejando fuera de servicio las BIPA3 y 4. La forma de proceder fue asignar a cada una de las nuevas bicicletas eléctricas un distintivo diferente e incrementando con respecto a las que había para facilitar así su uso, que quedó del siguiente modo:

Bicicleta eléctrica Ecobike 36v litio → BIPA1.

Bicicleta eléctrica Monty 36v litio → BIPA2.

Bicicleta eléctrica TCR 36v litio → BIPA5.

Bicicletas eléctricas Ecobike 36v litio → BIPA6 a la 10.

Al inicio del estudio todas las bicicletas eléctricas quedaron ubicadas en la bancada de intemperie para el uso y control de los diferentes sistemas de movilidad implantados en el proyecto. Una vez construido el remolque aparcamiento se destinaron de la BIPA6 a la BIPA10 a éste para realizar las pruebas de movilidad centradas en este prototipo.

#### ***4.1.1. dDemanda de energía***

Para caracterizar de forma experimental el motor de las bicicletas eléctricas, tal y como se presentó en capítulos anteriores, en la página 70, se diseñó y desarrolló una bancada específica para el estudio del Par motor de los motores de las bicicletas eléctricas, y así obtener datos experimentales para poder determinar los parámetros que caracterice el comportamiento del motor de una bicicleta eléctrica. Cuando la electricidad pasa a través de los bobinados de cobre de las diferentes fases del hub del motor, crea un campo eléctrico que interactúa con el

campo magnético de los imanes permanentes del rotor, produciendo una interacción que produce una fuerza que hace girar la rueda de la bicicleta eléctrica que es solidaria al rotor del motor. De este modo la corriente eléctrica se convierte en Par magnético y en defectiva en Par mecánico que produce movimiento mecánico, impulsando a la bicicleta eléctrica.

Para poder establecer de forma sencilla y experimental los márgenes de rangos de corriente que se producen en una bicicleta eléctrica se realizó una campaña de medidas para diferentes condiciones de peso de diferentes bicicletas eléctricas y un usuario en movimiento, estableciendo los mismos tiempos de arranque y desplazamientos, con el fin de obtener la máxima corriente instantánea en diferentes situaciones de marcha, para establecer las pautas a seguir en este estudio. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 6. Resultados corrientes instantáneas

BIPA	Peso Total Kg	Arranque llano A	Desplazamiento llano A	Desplazamiento de subida A
1	90	12,1	4,5	13,3
2	93	15,6	3	17,5
3	95,4	11,2	5,4	11,8

De este modo se obtuvo el valor del Par Nm medio para poder desplazar un peso en conjunto de usuario y bicicleta eléctrica de alrededor de 100 kg, para tomarlo como referencia en el estudio experimental de la bancada de motores.

En los desplazamientos de subida el BMS, Battery management system, de las bicicletas eléctricas protege al pack de baterías cortando el suministro de corriente cuando el sistema de tracción eléctrica solicita a las baterías una corriente que se excede de un determinado nivel. Por ello y para simplificar el cálculo inicial se propone el estudio teórico en el contexto en el que la bicicleta eléctrica y el usuario alcanzan una velocidad de 10 km/h después de 3 s del arranque y con una masa total de 100 kg.

Distancia recorrida en una vuelta de la rueda  $r = 0,3(m)$  ;  $2\pi * 0,3 = 1,88 m$

$$\text{Aceleración necesaria: } a = \frac{v_f - v_o}{t} \quad E. 1$$

$$v_f = 10 \text{ km/h} = 2,77 \text{ m/s} ; v_o = 0 \text{ km/h} ; t = 3 \text{ s}$$

$$a = \frac{v_f - v_o}{t} \rightarrow v_f = v_o + a * t \rightarrow v_f = a * t \rightarrow a = \frac{v_f}{t} \rightarrow a = \frac{2,77 \text{ m/s}}{3 \text{ (s)}} \rightarrow a = 0,92 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Energía cinética necesaria: } E_c = \frac{1}{2} m v_f^2 \quad E. 2$$

$$m = 100 \text{ kg}$$

$$E_c = \frac{1}{2} * 100(\text{kg}) * (2,77 \text{ m/s})^2 \rightarrow E_c = 50 * 7,67 \text{ kg} * \text{m}^2/\text{s}^2$$

$$E_c = 383,64 \text{ kg} * \text{m}^2/\text{s}^2 \rightarrow E_c = 383,64 \text{ J}$$

$$\text{Desplazamiento angular: } S = \frac{1}{2} a t^2 \quad E. 3$$

$$a = 0,92 \text{ m/s}^2 ; t = 3 \text{ s}$$

$$S = \frac{1}{2} * 0,92 \text{ m/s}^2 * 9 \text{ s}^2 \rightarrow S = 4,14 \text{ m}$$

$$4,14 \text{ m} / 1,88 \text{ m} = 2,2 \text{ vueltas} \rightarrow 2,2 \text{ vueltas} * 2 \pi = 13,82 \text{ rad}$$

Aproximando el resultado para simplificar el cálculo del momento de inercia, se propone el dato de par motor  $M$  Nm cuando tiene que arrancar la bicicleta eléctrica, por lo tanto, se toma el valor del momento de torsión inicial.

$$W = E_{c_f} - E_{c_i} \quad E. 4$$

$$v_o = 0 \text{ km/h} \rightarrow W = E_{c_f} - 0$$

$$W = M \omega \quad E. 5$$

$$M = \frac{W}{\omega} \rightarrow M = \frac{383,64 \text{ J}}{13,82 \text{ rad}} \rightarrow M = 27 \text{ Nm}$$

El cálculo teórico muestra que es necesario un Par M inicial medio de  $M = 27 \text{ Nm}$ , en el arranque de la bicicleta eléctrica para mover una masa de  $100 \text{ Kg}$ .

En las siguientes graficas se presentan algunos de los resultados obtenidos por los diferentes motores de las bicicletas eléctricas en la bancada de motores de las bicicletas eléctricas. Las gráficas representan los valores de velocidad en Km/h y Par en Nm respecto del tiempo.

El estudio se realizaba colocando la rueda con el hub motor de la bicicleta eléctrica BIPA a estudiar en el eje acondicionado de la bancada de motores y el perfil de rodadura del neumático de la bicicleta se ajustaba al eje del dinamómetro, a este se le iban mandando consignas de par de freno de menos a más para ir aplicando ese par en la rueda de la bicicleta y al motor de la bicicleta eléctrica se le iban aplicando consignas de corriente para poder mantener una velocidad constante al par aplicado por el dinamómetro.

Aunque en todas las pruebas se verificó que los motores de las bicicletas eléctricas conseguían generar un par máximo alrededor del calculado  $M = 27 \text{ Nm}$ , también se tuvo en cuenta que el propio diseño de la bancada de motores introducía perdidas que al final influían en las medidas.

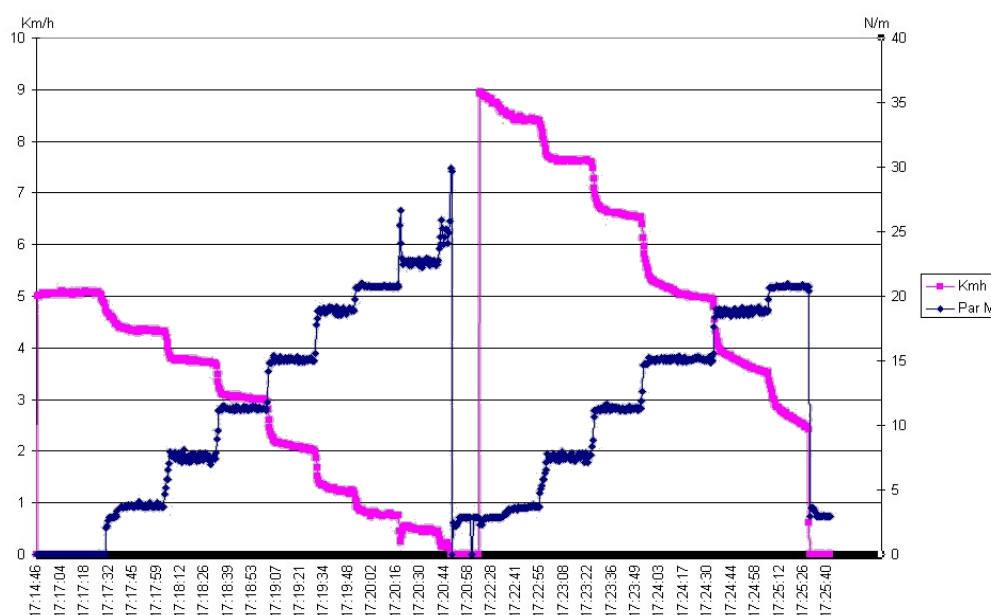


Figura 62. Resultado bancada motores BIPA1 y BIPA3

En la prueba que representa la Figura 62 se alcanzaron por las dos bicicletas eléctricas  $M=25\text{ Nm}$  y  $M=21\text{ Nm}$  respectivamente.

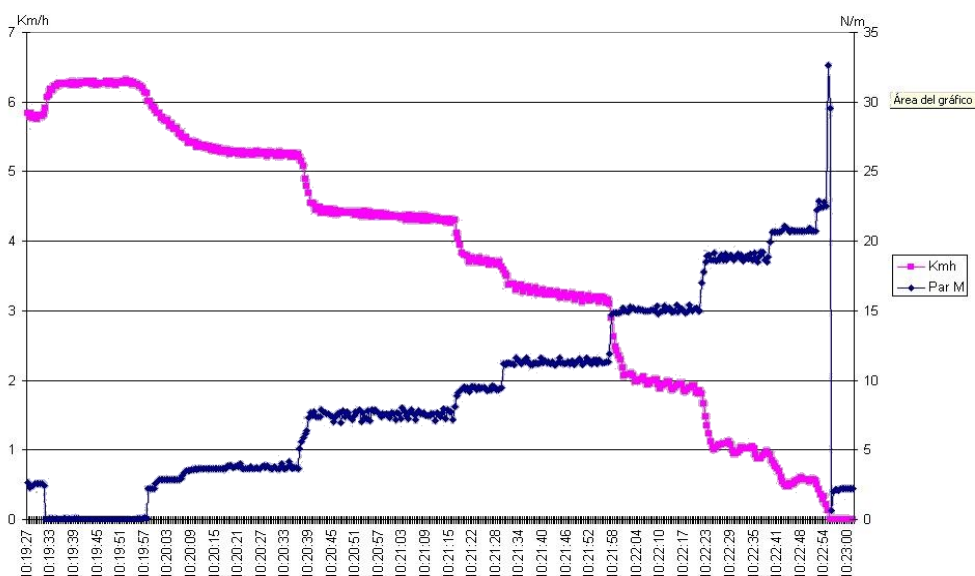


Figura 63. Resultado bancada motor BIPA 2

En la prueba anterior que representa la Figura 63 se alcanzó por la bicicleta eléctrica  $M=23\text{ Nm}$ .

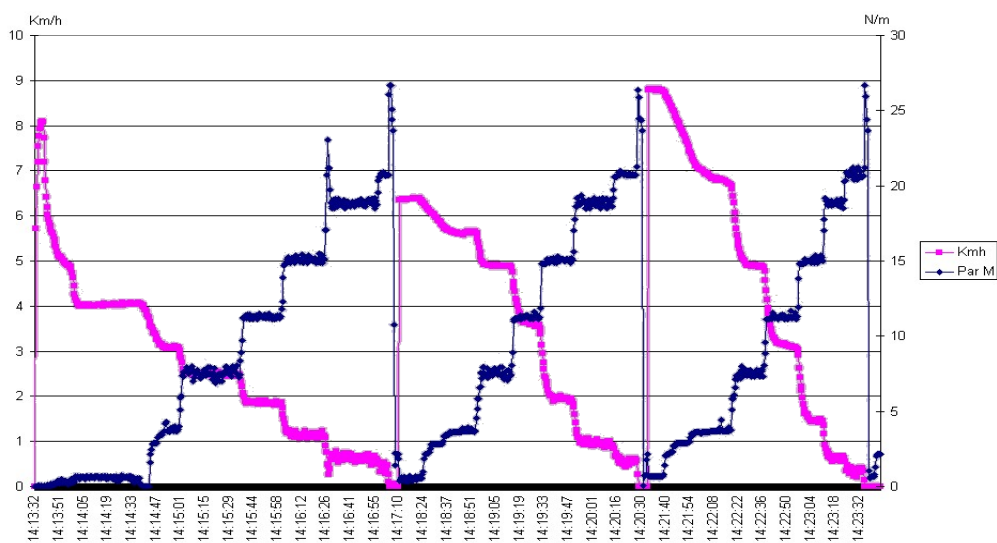


Figura 64. Resultado bancada motores de varias BIPA

En las pruebas de la Figura 64 se alcanzaron por las bicicletas eléctricas  $M=20$  Nm,  $M=21$  Nm y  $M=24$  Nm respectivamente. En todas las figuras podemos ver que todas ellas se aproximan a los valores de par Nm que se consideraban necesarios para el arranque en llano.

#### ***4.1.2. Estudio del almacenamiento de energía***

Para que un sistema que necesita electricidad para funcionar y normalmente no se encuentra cercana a un punto de distribución de energía o se encuentra en todo momento en movimiento como los vehículos eléctricos, es necesario incorporarle un dispositivo o sistema de almacenamiento electroquímico, para poder almacenar la electricidad necesaria desde un punto de distribución de energía eléctrica a utilizar en los desplazamientos a realizar posteriormente. Ya se ha dicho que el principal consumidor de energía de un sistema de movilidad eléctrica es el motor del vehículo eléctrico, aunque también hay otros sistemas auxiliares que necesitan de esta energía para poder funcionar, como el BMS, el controlador PWM, y en este trabajo de tesis la “mochila” (Monitorización en trayecto de las bicicletas eléctricas).

Paralelamente a la compra que se realizó de bicicletas eléctricas para el proyecto, se adquirieron módulos de baterías de las diferentes tecnologías electroquímicas para poder realizarlas ensayos y así conocer más sobre su funcionamiento y parámetros característicos. Los ensayos se realizaron emulando los ciclos de carga, que en este caso seguían los mismos parámetros de carga realizado con sus cargadores, los ciclos que los fabricantes habían incorporado a sus cargadores, ya que las baterías de las bicicletas eléctricas siempre se iban a cargar con esos cargadores. Sin embargo, en una bicicleta eléctrica sí que tiene perfiles dinámicos del ciclo de descarga de la batería, debidos al funcionamiento de la misma y el tipo de consumo del motor eléctrico, por ello y para poder sacar conclusiones comparables se decidió por establecer un par de ciclos de descarga que pudieran simplificar el estudio de los mismos. En las siguientes figuras se

muestran dos gráficos de los ciclados pertenecientes a las baterías de Plomo-ácido Figura 65 y Litio-Ion Figura 66 durante un periodo de 1000 horas.

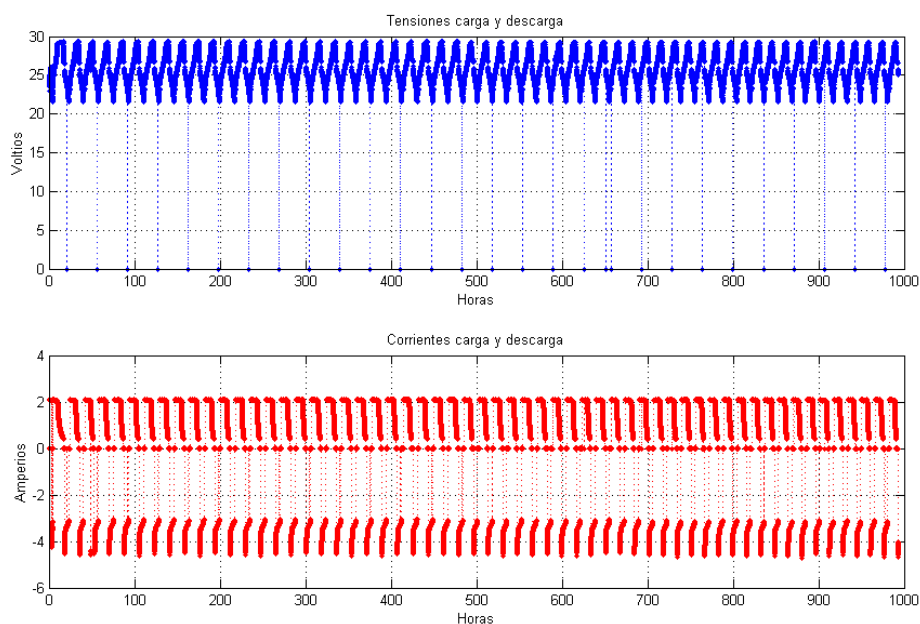


Figura 65. Gráfico de ciclado acelerado de una Batería Pb-acido

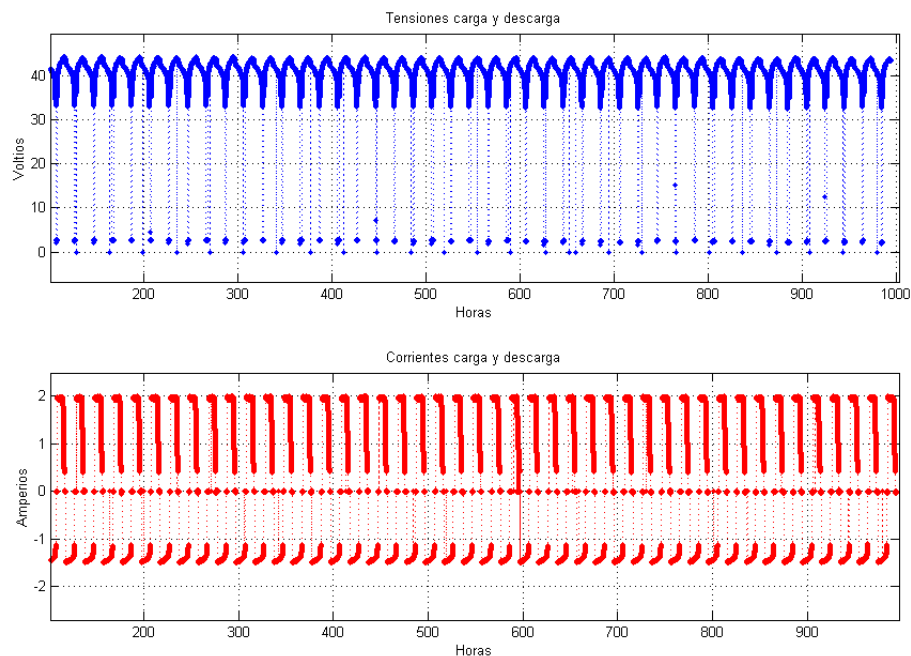


Figura 66. Gráfico de ciclado acelerado de una Batería Litio-Ion

En las gráficas anteriores podemos observar el comportamiento de las baterías durante la realización de los ciclos. Se puede ver claramente como el

sistema BMS de la batería actúa activando el circuito de desconexión de la batería de litio, desactivando la batería cuando alcanza un valor concreto de descarga, efecto que no existe en las baterías de plomo.

También se verifica que el sistema que se diseñó y se desarrolló para las pruebas de las baterías se comportaba correctamente realizando los ciclos como se había definido inicialmente.

En el caso de las baterías se las identifico de una manera sencilla, con la palabra Batería y un número correlativo a cada una, y así poder seguir la trazabilidad durante todo el estudio.

La

Figura 67 y Figura 68 aportan una idea de la evolución que sufre la capacidad Wh de una batería de plomo y Litio-Ion respectivamente tras realizar ciclos de carga-descarga de manera continuada durante un periodo de tiempo.

Tal y como se cabía esperar, se puede ver que a medida que se realiza el ciclado acelerado de las baterías se observa una tendencia lineal a la baja, en la capacidad Wh de las baterías, que nos ayudó a entender y prever con una estimación la vida útil que le queda a la batería conociendo el estado inicial. En este caso, para las baterías de plomo se dispone de una capacidad de 12Ah y en la de litio una capacidad de 10Ah.

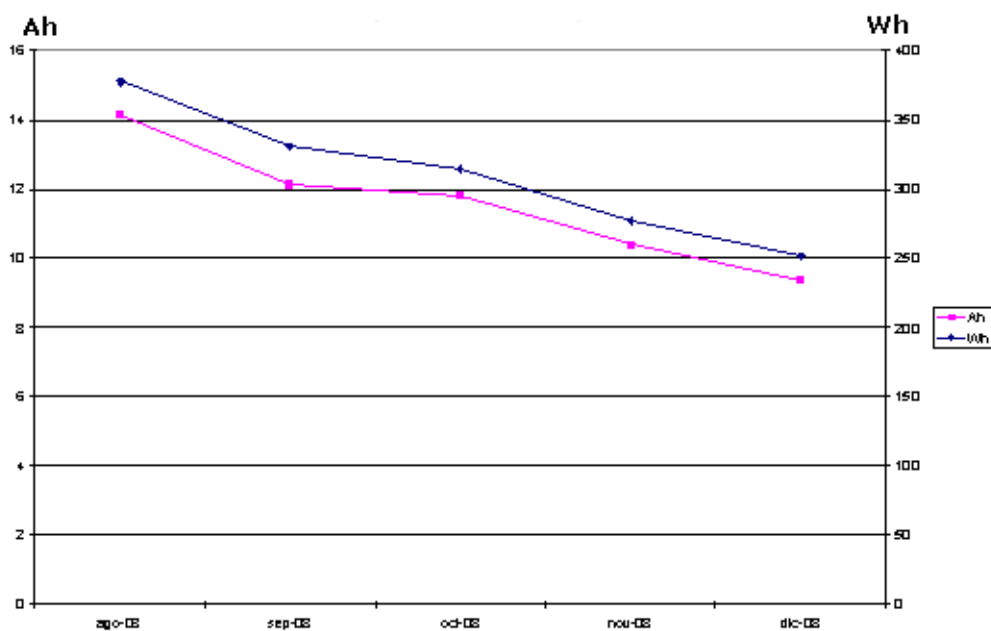


Figura 67. Gráfica evolución capacidad batería de plomo

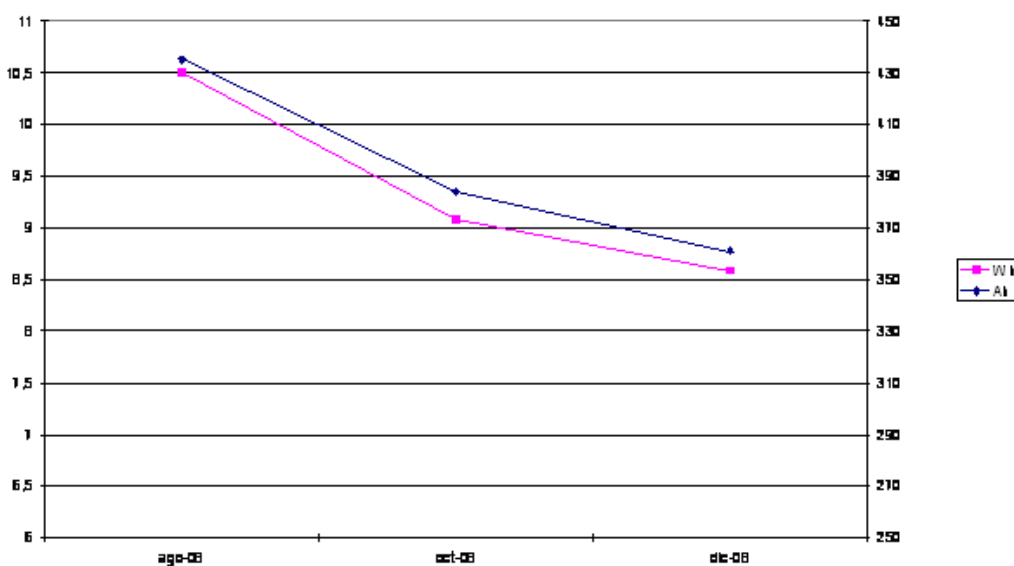


Figura 68. Gráfica del ciclado acelerado de una Batería Litio-Ion

Hay que tener en cuenta que se realizaban ciclos en los que se extraían a las baterías casi el 100% de la capacidad nominal, hasta el máximo que permitía el gestor BMS, por lo que se sabía de antemano que el número de ciclos que se podrían

realizar sería mucho menor del que se relazarían si esa misma batería hubiera estado instalada en una bicicleta eléctrica.

Se siguió con la evolución de los ciclados acelerados de las baterías en el inicio del proyecto y se fueron incorporando más baterías con el mismo objetivo, verificar la capacidad energética y durabilidad de las mismas. Durante el tiempo que estuvo funcionando la bancada, las baterías realizaron los siguientes ciclos:

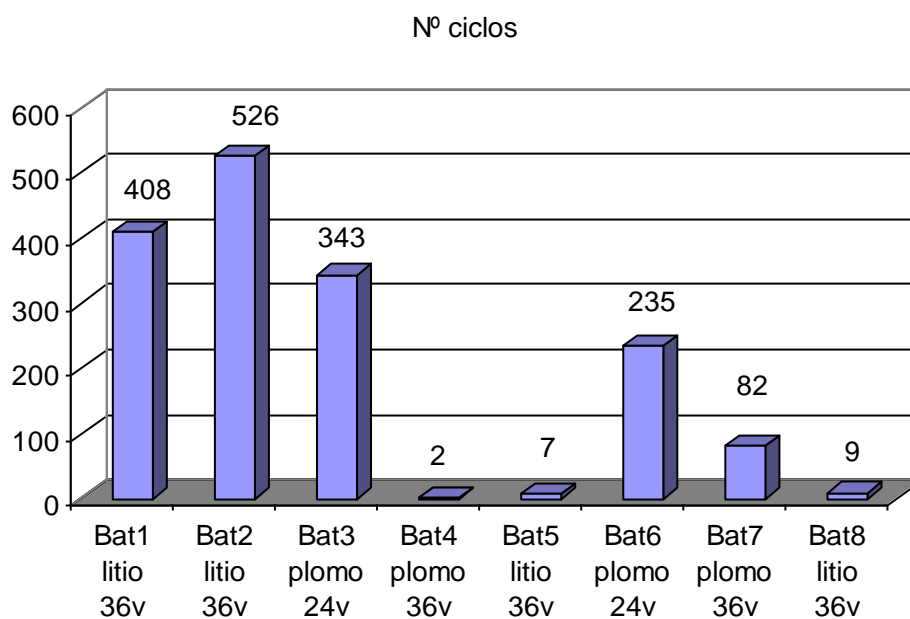


Figura 69. Número de ciclos para cada tipo de batería

Los diferentes tipos de baterías se fueron sometiendo principalmente a dos perfiles de descarga:

- **DA**, se aplica una descarga de corriente media de 1,5 A, emulando la descarga media en la utilización en un trayecto en llano de una bicicleta eléctrica.
- **DB**, se aplica una descarga de corriente media de 5,5 A, emulando la descarga media en la utilización en un trayecto mixto en llano y pendientes de subida de una bicicleta eléctrica.

A raíz de los estudios que relaciona los datos obtenidos de energía y capacidad energética respecto al tiempo, se han podido obtener las siguientes gráficas:

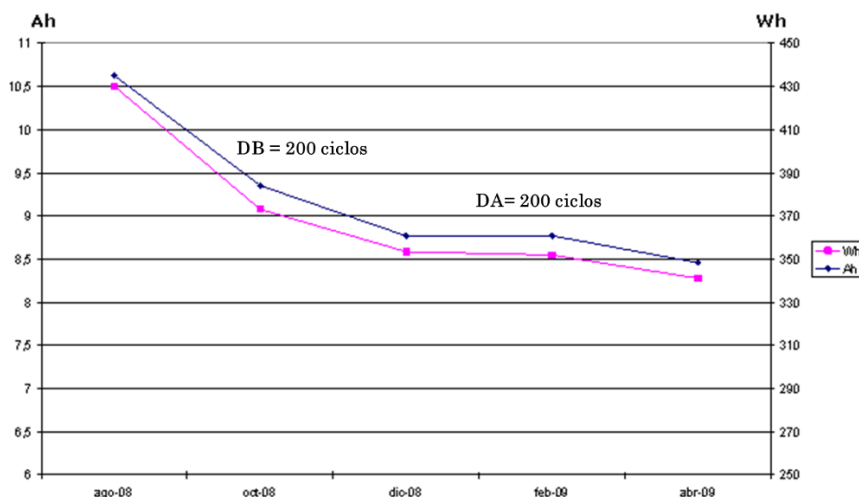


Figura 70. Gráfica de la Batería1 de litio-ion 36 V 10 Ah

La Batería1, se sometió en los 408 ciclos de carga y descarga a diferentes perfiles de descarga, manteniendo el mismo perfil a los ciclos de carga que proporciona el cargador original de la batería. Al inicio el ciclado de la batería se le sometió a un perfil de descarga **DB**, pasados 200 ciclos se le modificó el perfil de descarga cambiando aun perfil **DA**, manteniéndolo en los siguientes 200 ciclos. Como se puede observar la capacidad de la batería Wh se va reduciendo de forma significativa en los primeros 200 ciclos **DB** de comenzar con 430 Wh a pasar a los 352 Wh reduciéndose en un 22% la capacidad inicial de la batería, aunque en esta batería se comprueba que el fabricante catalogó a la batería con 36 V 10 Ah nominales que equivaldría a 360 Wh nominales y en el inicio de los ciclos acelerados del estudio se verifica que la batería tiene un 20% más de capacidad Wh de la esperada. En los siguientes 200 ciclos **DA**, de continuar con los 352 Wh a pasar a los 343 Wh reduciéndose esta vez solo en un 2,6% la capacidad Wh de la de partida de cambio de perfil de descarga.

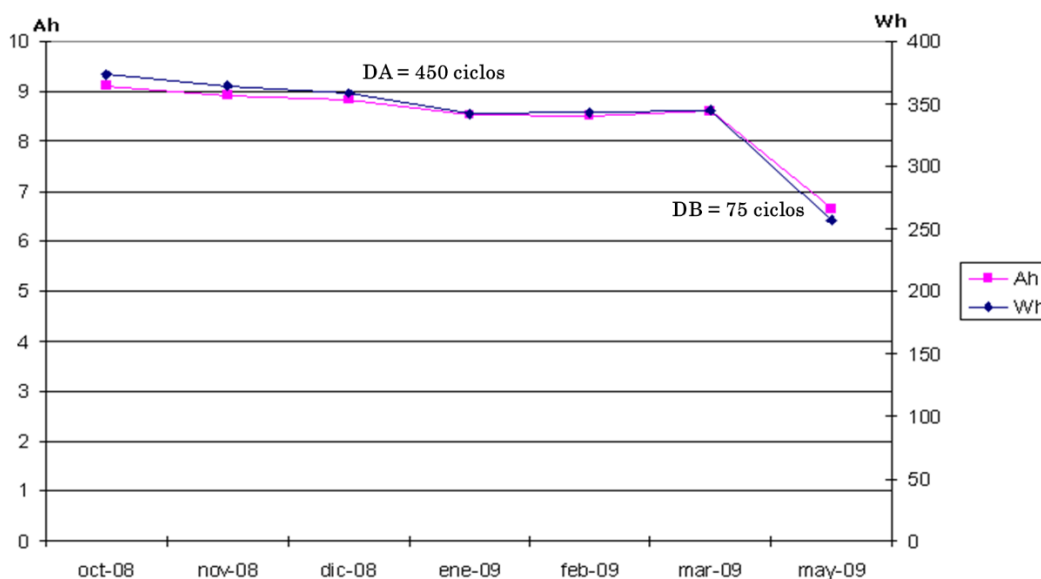


Figura 71. Gráfica de la Batería2 de litio-ion 36V 10Ah

La Batería2, se sometió también a 526 ciclos de carga y descarga a diferentes perfiles de descarga, y al igual que en el caso anterior manteniendo el mismo perfil a los ciclos de carga que proporciona el cargador original de la batería. Al inicio el ciclado de la batería se le sometió a un perfil de descarga **DA**, pasados 450 ciclos se le modificó el perfil de descarga cambiando aun perfil **DB**, manteniéndolo en los siguientes 75 ciclos.

Como se puede observar la capacidad de la batería Wh se mantiene con poca degradación en los primeros 450 ciclos **DA** de comenzar con 360 Wh a pasar a los 340 Wh reduciéndose en un 5,8% la capacidad inicial de la batería, esta batería sí cumple con los 360 Wh nominales especificados del fabricante. En los siguientes 75 ciclos **DB**, de continuar con los 340 Wh a pasar a los 270 Wh reduciéndose aceleradamente en un 25,9% la capacidad Wh de la de partida de cambio de perfil de descarga.

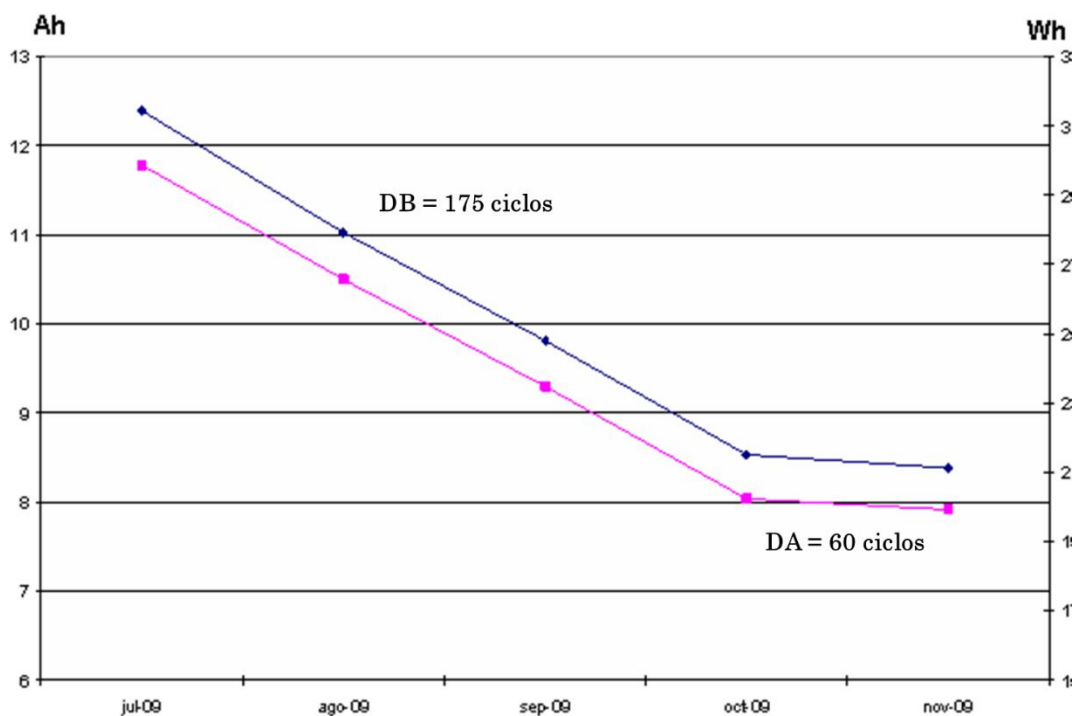


Figura 72. Gráfica de la Batería6 de plomo-ácido 24V 12Ah

La Batería6, se sometió a 235 ciclos de carga y descarga a diferentes perfiles de descarga, como en los casos anteriores se mantuvo el mismo perfil a los ciclos de carga que proporciona el cargador original de la batería. Al inicio el ciclado de la batería se le sometió a un perfil de descarga **DB**, pasados 175 ciclos se le modificó el perfil de descarga cambiando aun perfil **DA**, manteniéndolo en los siguientes 60 ciclos. Como se puede observar la capacidad de la batería Wh se va reduciendo de forma significativa en los primeros 175 ciclos **DB** de comenzar con 297 Wh a pasar a los 194 Wh reduciéndose en un 53% la capacidad inicial de la batería, aunque en esta batería se comprueba que el fabricante catalogó a la batería con 24 V 12 Ah nominales que equivaldría a 288 Wh nominales y en el inicio de los ciclos acelerados del estudio se verifica que la batería tiene solo un 3% más de capacidad Wh de la esperada. En los siguientes 60 ciclos **DA**, de continuar con los 194 Wh a pasar a los 189 Wh reduciéndose esta vez solo en un 2,6% la capacidad Wh de la de partida de cambio de perfil de descarga.

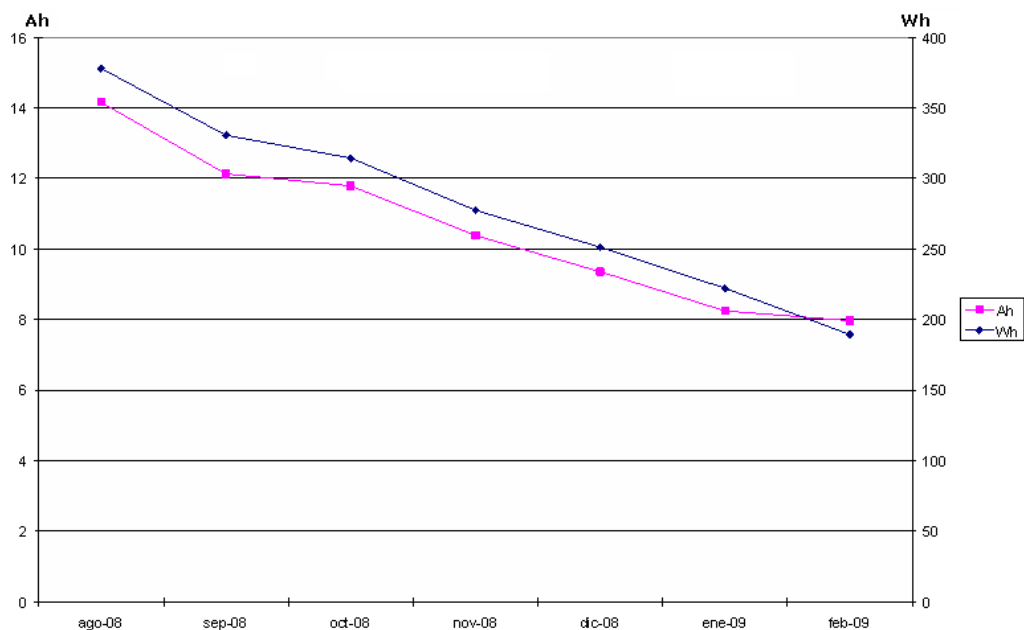


Figura 73. Gráfica de la Batería3 de plomo-ácido 24V 12Ah

La Batería3, se sometió a 343 ciclos de carga manteniendo el mismo perfil de los ciclos de carga que proporciona el cargador original de la batería y en los ciclos de descarga al perfil **DB** de descarga. En consecuencia, se puede mostrar la pérdida natural de energía almacenada.

Como se puede observar la capacidad de la batería Wh de comenzar con 350 Wh a pasar a los 200 Wh reduciéndose en un 75% la capacidad inicial de la batería, aunque en esta batería se comprueba que el fabricante catalogó a la batería con 24 V 12 Ah nominales que equivaldría a 288 Wh nominales y en el inicio de los ciclos acelerados del estudio se verifica que la batería tenía un 21,5% más de capacidad Wh de la esperada.

La continuidad del ciclado de carga y descarga de las baterías permitió constatar que:

- Han sufrido una merma importante de sus características energéticas como cabía esperar, dada la tendencia natural de deterioro de las baterías. Aunque se comprobó que la disminución de energía almacenada es mayor que la estimada.
- Es crucial el estado inicial de fábrica de las baterías. En el estudio se ha comprobado que la capacidad de energía almacenada inicial varía en los mismos modelos del mismo fabricante.
- Uno de los aspectos que varía la durabilidad, son las diferentes tecnologías de baterías, ya que en las de litio, el fabricante instala un circuito que limita las descargas profundas, cosa que no se hace en las de plomo-ácido.
- Respecto a las baterías de plomo ácido, se ha detectado que existe una probabilidad alta de tener problemas a la hora de la carga, debido a que los cargadores que se utilizan no miden parámetros importantes para la carga pudiendo llevar a la batería a un “efecto avalancha”, sin control.

#### ***4.1.3. Estudio de la estación de recarga***

La evolución de este prototipo ha sido constante durante los meses de funcionamiento hasta llegar a un sistema de recarga y toma de datos inteligente y completamente automatizado (Prototipo de estación de recarga de bicicletas eléctrica).

La primera versión fue sin duda la más simple, dotando a la estación de un sistema de recarga manual. Un error en el diseño de la instalación hizo notable la necesidad de instalar sistemas de protección con fusibles a la salida de los cargadores para evitar posibles problemas ya que tan solo el cargador de las bicicletas eléctricas tenía fusible interno pero sobredimensionado.

Una vez que la estación de recarga comenzó a funcionar de forma autónoma, se empezó a registrar los datos de utilización diaria por parte de los usuarios, pero

se detectó problemas en los valores de tensión de los cargadores, dando valores de carga completa cuando en realidad no habían finalizado el estado de carga. Se descubrió que fue por motivos de adaptación de impedancias, por ello se utilizó otra configuración que solucionó el problema.

La automatización del sistema de carga y la optimización del funcionamiento del programa supone una garantía para la buena praxis de los métodos de carga de las baterías. Con ello se podía asegurar el máximo número de ciclos de carga, prolongando así la vida útil de las baterías. Además, monitorización y la adquisición detallada de los datos experimentales permitió conocer el estado de las bicicletas eléctricas, el desgaste o uso que habían tenido e incluso poder hacer predicciones sobre el futuro comportamiento de los módulos energéticos, así como comparaciones entre cargas totales y cargas parciales a diferentes temperaturas de entorno.

En las siguientes graficas se muestran los datos empíricos obtenidos del uso de las bicicletas eléctricas en los diferentes sistemas de movilidad aplicados en el centro de trabajo.

- BIPA1: bicicleta eléctrica Ecobike de pedaleo asistido, tecnología de batería tecnología de Litio-Ion de 36 V 10 Ah, con capacidad máxima de 360 Wh.
- BIPA2: bicicleta eléctrica Monty de pedaleo asistido, tecnología de batería tecnología de Litio-Ion de 36 V 10 Ah, con capacidad máxima de 360 Wh.
- BIPA3: bicicleta eléctrica Ecobike de pedaleo asistido, tecnología de batería tecnología de Plomo-ácido de 24 V 12 Ah, con capacidad máxima de 288 Wh.

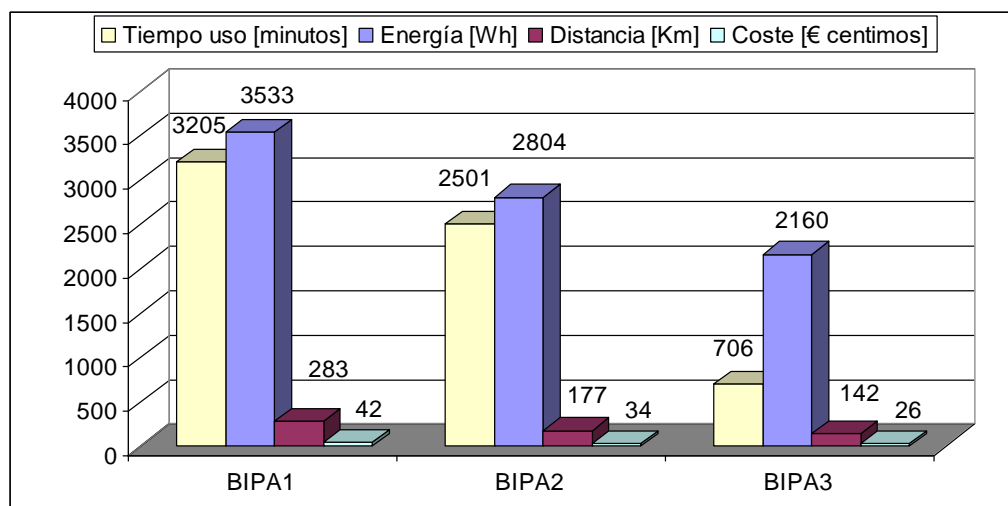


Figura 74. Gráficas de resultados totales de cada BIPA (1, 2 y 3) <sup>19</sup>

En la Figura 74 podemos observar en los diagramas de barras las diferencias en cuanto a consumo y comportamiento de las bicicletas eléctricas. Por ejemplo, se observa mayor consumo medio energético en la BIPA2 15,8 Wh/Km, que en la BIPA1 12,4 Wh/Km y se comprobó que la BIPA3 aun siendo del mismo fabricante con características mecánicas idénticas a la BIPA1, aunque con diferente tecnología de batería, registro unos valores medios de BIPA3 15,2 Wh/Km. Además, tal y como se describió en el anterior capítulo (en la página 84), se representó las diferentes pendientes del centro de trabajo, donde habría que tener en cuenta que una bicicleta eléctrica en la bajada no consume energía por los kilómetros recorridos, como los recorridos eran más o menos los mismo para las tres bicicletas eléctricas debemos tomar los resultados de consumo, como valores medios de consumo Wh/km.

Respecto a las distancias recorridas por cada una: BIPA1 283 km, BIPA2 177 km y BIPA3 142 km se pudo verificar que la BIPA1 fue la preferida por los voluntarios del proyecto, al finalizar el día los usuarios dejaban las bicicletas eléctricas en la estación de recarga y así empezar al día siguiente de estudio de los

<sup>19</sup> Para los cálculos de costes de energía eléctrica  $KWh = 0,109612€$

sistemas de movilidad con las baterías de las bicicletas eléctricas al 100% de su capacidad.

Al inicio del proyecto se realizaron pruebas del sistema de monitorización de la estación de recarga y de logística con los voluntarios que supuso alrededor de dos semanas de proyecto y cerca de las 10 cargas por bicicleta eléctrica, aunque los datos pertenecientes a los tiempos de uso, kilómetros recorridos en estos días y cargas realizadas se desecharon para realizar los estudios y los diagramas de barras representados en la Figura 74.

El número total de cargas realizadas a las baterías de las bicicletas eléctricas en la estación de recarga, hasta ese momento fueron de: BIPA1= 57 cargas, BIPA2= 49 cargas y BIPA3= 37 cargas.

## ***4.2. Evaluación de Movilidad***

De las diferentes encuestas y estudios de campo se obtuvieron datos relevantes para poder definir los parámetros de movilidad internos en el centro de trabajo, los mismos ayudaron a entender las condiciones de contorno tanto físicas como sociologías del centro de trabajo donde se estaba desarrollando el proyecto de investigación.

Los flujos de movilidad de los trabajadores del centro son: entre las 08h y las 09h de la mañana, horarios de llegada, se da un aumento importantísimo de la concentración de vehículos en las entradas del CIEMAT. El mismo fenómeno se repite a la hora de salida, entre las 16h y las 17h de la tarde. En el resto de horas del día los flujos son más dispersos.

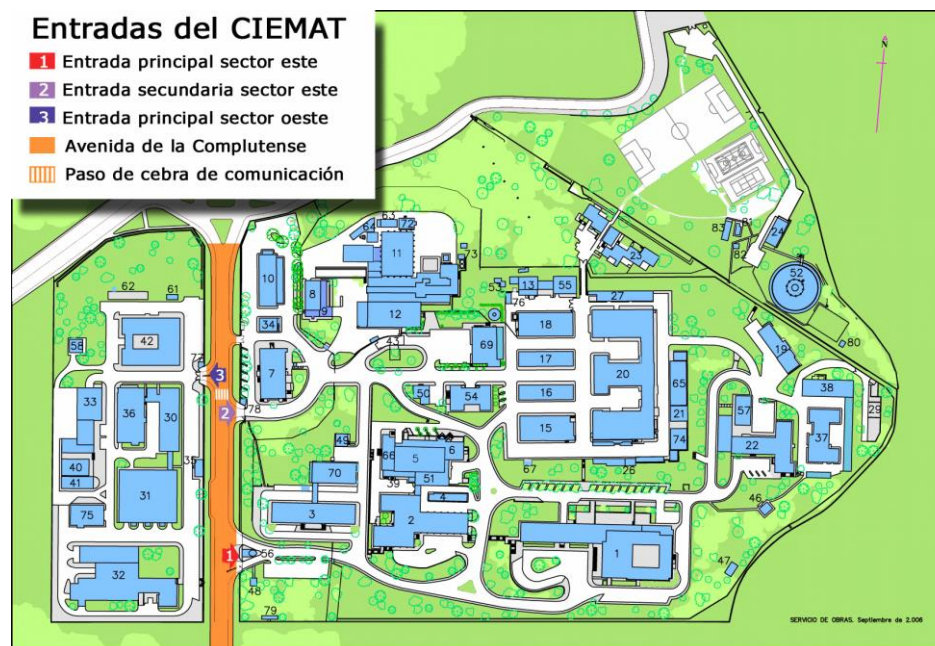


Figura 75. Mapa situación de las entradas y de edificios del CIEMAT

En el edificio 1 es donde se realizan todos los trámites administrativos, se ubica el salón de actos y la cafetería, es el edificio del centro que presenta una mayor atracción de los flujos de desplazamiento en toda la jornada laboral, sobre todo a lo largo de la mañana, supone un goteo constante de entradas y salidas que se concentra especialmente en las horas de las comidas, entre las 12h30 y las 15h00

Para entender los desplazamientos dentro del centro de trabajo efectuados en bicicleta eléctrica se optó por hacer una clasificación inicial de los desniveles, de esta manera se distinguió en tres tipos de trayectos en llano, en bajada y subida. Se realizaron un total de 25 recorridos diferentes, a pie, en bicicleta eléctrica y en coche, de puerta a puerta de los edificios del centro de trabajo, contabilizándose los tiempos en minutos. En el caso de los desplazamientos en coche y en bicicleta eléctrica se contabilizaron, además los tiempos necesarios para coger el vehículo, arrancarlo y aparcarlo.

Los resultados de los tiempos y las velocidades del estudio fueron diferentes según el vehículo utilizado, teniendo en cuenta que la velocidad máxima de circulación permitida dentro del centro de trabajo es de 30 km/h: en bicicleta eléctrica, la velocidad media fue de 10-20 km/h; a pie, de 4-5 km/h; y en coche, la

velocidad media fue de 15-30 km/h. La mayor parte de los desplazamientos internos se realizan a pie, siendo una minoría de ellos los que se efectúan con vehículos motorizados. Los desplazamientos internos en bicicleta son prácticamente inexistentes, ya que son pocas las personas que acuden al centro de trabajo en este medio de transporte (alrededor de 5-10 personas).

Desde el extremo Oeste hasta el extremo Este (de la superficie construida del centro laboral) distan 0,59 km lineales y en ruta, es decir, siguiendo las calles que permiten llegar a esos puntos, la distancia aumenta a 0,70 km. Del Sur al Norte, en línea recta, se contabilizan 0,30 km y 0,50 km en ruta. El estudio de distancias demuestra que ningún edificio está separado más de 0,8 km. Los cálculos que se han realizado de las distancias desde varios edificios de CIEMAT hasta el edificio más frecuentado (el edificio 1 donde se encuentra la Sede y la cafetería), revelan que las distancias varían de 130 m a 350 m. El estudio estadístico muestra que, para varios desplazamientos, se recorre menor distancia a pie que en vehículo.

Para el cálculo de distancias se realizaron ocho trayectos entre varios edificios y el edificio 1, los resultados son de 1,71 km para los trayectos a pie y de 2,6 km para los desplazamientos en vehículo. También se realizaron 25 trayectos entre varios edificios de los cuales 8 requieren menos distancia a pie que en vehículo. En virtud de los datos arrojados por el estudio sobre distancias, puede concluirse que la mayor parte de los recorridos entre edificios de CIEMAT se hacen en menos de 500 metros y que la mayoría de los trayectos totalizan menos kilómetros a pie que en vehículo.

El estudio de desniveles en el CIEMAT indica que las mayores pendientes se encuentran en los tramos Este-Oeste pasando de 649 m a 685 m de altura. Con una distancia lineal aproximada de 500 m entre los extremos, la pendiente media es de 7,2%. En los tramos Norte-Sur, hay un desnivel medio de 2,68%. Prestando atención a los principales viales de movilidad, las pendientes varían entre el 0% y 7,2%. Los trayectos Norte-Sur presentan pendientes medias relativamente bajas,

entorno al 0% y 2,68%, mientras que en los trayectos Este-Oeste los desniveles son algo superiores, entre el 2,63% y 7,2%.

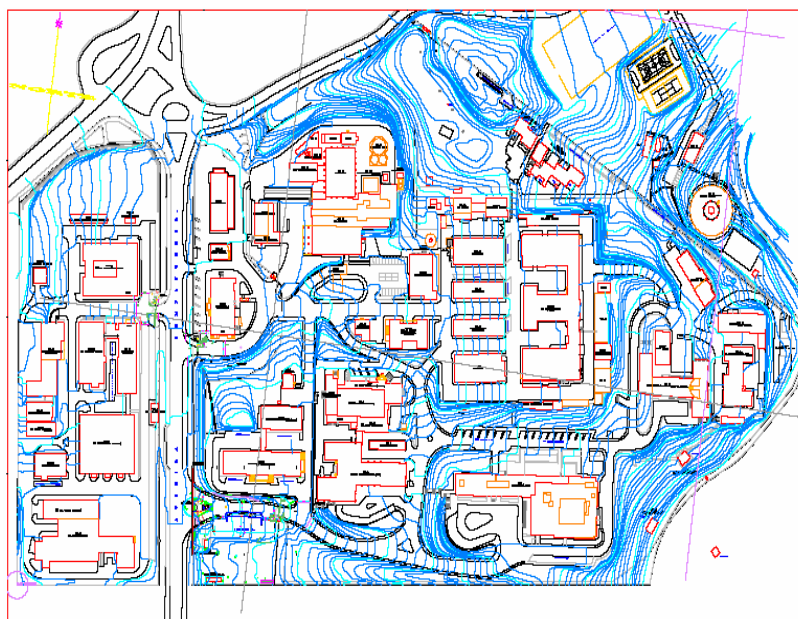


Figura 76. Mapa Curvas de niveles en el CIEMAT

El mapa de curvas de nivel y pendientes que se muestra en la Figura 76, se realizó con la ayuda de un GPS con un margen de error de  $\pm 15$  metros.

Como línea trazadora de las medidas a aplicar y las que posteriormente se aplicaron, el proyecto se apoyó en gran parte del estudio de la retroalimentación de los usuarios de los diferentes prototipos de movilidad en base a diferentes encuestas y entrevistas de diferente tipología:

En una primera encuesta, se realizaron un total de 203 encuestas, 180 a través de Intranet y 23 en papel, que permitieron hacer un análisis preliminar de las necesidades de transporte interno en CIEMAT. En dichas encuestas se reveló que el 73% de las personas estarían dispuestas a participar activamente en el estudio sobre bicicletas eléctricas dentro de CIEMAT.

En la segunda encuesta, pasado un tiempo de la puesta en marcha del proyecto, respondieron 188 personas que permitieron concluir que: el 75,5% de las personas habían visto circular las bicicletas eléctricas por CIEMAT, el 79,5%

creían que establecer un sistema de movilidad con bicicletas eléctricas dentro del CIEMAT sería útil o muy útil, mientras que sólo el 55% lo usaría. Este dato se explica en parte porque sólo el 38% tenía necesidades de desplazamientos diarios y el 54% se desplazaba menos de 2 veces al día. De la comparación entre ambas encuestas se obtiene:

- Las dos encuestas coinciden en indicar que más de la mitad de los empleados de CIEMAT se desplaza menos de dos veces al día. Los resultados de la segunda encuesta reflejan que el 27% de los empleados se desplaza entre 2 y 4 veces al día y el 13% más de 4 veces al día. Una gran mayoría de los empleados de CIEMAT se desplaza a pie dentro de su centro laboral.
- El 74% de los empleados que contestaron a la segunda encuesta opinan que un sistema mixto de bicicletas tradicionales y de pedaleo asistido sería una idea útil y muy útil, aunque un 54% lo usaría de forma regular. Se puede concluir que a pesar de que muchos empleados ven un sistema movilidad con bicicletas eléctricas útil, no lo utilizarían porque no tienen grandes necesidades de desplazamiento.
- Los resultados de la segunda encuesta indican que sólo el 6% de las personas que respondieron a la encuesta consideran que un sistema de movilidad con bicicletas eléctricas en CIEMAT sería inútil. Se puede analizar este dato como consecuencia de un cambio de actitud tras haber visto estas bicicletas circulares por el centro. Más de cuatro meses después, los empleados estaban más familiarizados a las bicicletas eléctricas y veían más su utilidad.

Entrevista informales, estas entrevistas tuvo una importancia fundamental para el seguimiento de la muestra. Así, permitieron obtener realimentación constante sin que los empleados tuvieran que dedicar mucho tiempo y esfuerzo. Las entrevistas informales de la muestra contribuyeron a estudiar los cambios y la evolución del trabajo. Semanalmente se preguntaban sobre el uso de las bicicletas eléctricas, es decir, si se habían utilizado, por qué, si había sido cómodo, práctico,

si habían tenido problemas de uso, técnico con las bicicletas eléctricas o con el sistema, etc.

Entrevistas semi-estructuradas, además de hacer las mismas preguntas generalizadas como en los otros métodos de investigación social, en la segunda parte de las entrevistas se dedicó a los aspectos sociológicos. Una serie de preguntas ayudaron a elaborar conclusiones sobre varios temas: Seguridad en bicicletas eléctricas dentro del CIEMAT, movilidad y comodidad de los desplazamientos, Sistema de bicicletas eléctricas actual y posible futuro de un sistema de movilidad de bicicletas eléctricas entre CIEMAT y Moncloa, finalidad del estudio de movilidad eléctrica y evaluación de la organización, etc. Se realizaron diez encuestas y las entrevistas duraban alrededor de 40 minutos.

Grupos de discusión, se crearon encuentros donde se debatía sobre el estudio entre los participantes, se constató la importancia de tener chalecos reflectantes o casco para un uso más seguro de las bicicletas eléctricas dentro del centro de trabajo.

Los tres métodos de investigación social: las entrevistas informales, semi-estructuradas y los grupos de discusión; fueron esenciales para poder contrastar los datos obtenidos por las encuestas y el trabajo de campo y de observación

### ***Elección muestra***

De los voluntarios elegidos para el desarrollo del programa piloto, los primeros fueron tres hombres, entre 40 y 50 años, trabajadores en los servicios de informática en el edificio 22 del CIEMAT que se desplazan un mínimo de cinco veces al día. Después, se decidió trabajar con tres hombres de 31 a 51 años, trabajadores del departamento prevención de riesgos y que se desplazan habitualmente en el circuito interno del centro laboral. Así mismo, seis personas aceptaron participar en el estudio, dos mujeres y cuatro hombres, entre 30 y 50 años, trabajadores en el departamento de mantenimiento y que se desplazan muy habitualmente. Finalmente, 8 personas solicitaron participar en el estudio. Esta última adhesión la componen 8 hombres, de entre 30 y 48 años, que trabajan de

electricistas en el edificio 20 y que se desplazan más de seis veces al día Figura 77.



Figura 77. Elección de la muestra

Así, de las 20 personas que participaron en el estudio, 18 eran hombres y 2 mujeres. La mayoría se desplazaba más de seis veces al día; el rango de edad va entre 30 y 50 años; además, 11 de ellos (electricistas e informática) solían llevar carga, cuyo peso puede variar entre 1 y 4 kilos. Estas personas se dedican al servicio y al mantenimiento del centro de trabajo del CIEMAT.

### ***Sistema de bicicletas eléctricas compartidas***

El sistema compartido no es práctico en todos los casos. Para los empleados que tienen necesidades de desplazamiento de más de 4 veces al día contar con un sistema de bicicletas compartidas no resulta cómodo. De hecho, la comodidad del uso de la bicicleta eléctrica surge de la facilidad de acceso en tiempo y en distancia. Así, en este caso, por ello se consideró el sistema unipersonal.

### ***Sistema de bicicleta eléctrica unipersonal***

En el caso de los participantes que tienen necesidades puntuales, el uso de la bicicleta eléctrica con la cesta, permitiría a CIEMAT prescindir de un buen número de coches desplazándose dentro centro de trabajo. Un ejemplo sería el de

la Estafeta, en el que uno de sus empleados se dedica al reparto del correo interno con una furgoneta, otros ejemplos serían en el departamento de mantenimiento que necesita desplazar material pesado de mano, y en el departamento de prevención de riesgos que efectúa muchos desplazamientos al día.

### ***Dos o tres bicicletas eléctricas por grupo***

De los 8 empleados del departamento de electricidad, 6 de ellos se desplazan siempre en pareja. Así era imprescindible para ellos tener la posibilidad de utilizar más de una bicicleta eléctrica. Tener 2 o 3 bicicletas eléctricas les permitía moverse por el CIEMAT en equipo y en bicicletas eléctricas. De esta forma, se dejaron las 3 bicicletas eléctricas a un mismo grupo.

Los comentarios obtenidos fueron: Las bicicletas eléctricas suelen tener problemas de carga, muy a menudo tienen que trasladar material voluminoso y pesado que no encaja en la cesta y muy a menudo tenían que permanecer algunos días en el mismo sitio para arreglar una obra dejando las bicicletas eléctricas sin poder utilizarse durante toda la jornada laboral por otros empleados que tenían necesidades de desplazamientos.

### ***Trabajo y seguimiento Muestra***

Después de haber probado el sistema de las fichas de seguimiento durante tres semanas, se observaron ciertas dificultades por parte de los participantes para rellenar diariamente esas fichas. Así, se optó por no sobrecargar demasiado a los participantes y realizar la recogida de información a través de entrevistas informales semanales. De los datos obtenidos por el velocímetro cuenta kilómetros se notó que el uso real de las bicicletas eléctricas por los participantes en kilómetros y tiempo era muy bajo. Así, al ver que los participantes no hacían un uso regular de las bicicletas eléctricas, se reorganizó el trabajo con la muestra y se fueron alternando las bicicletas eléctricas a diferentes grupos de voluntarios.

### ***Seguridad muestra***

La firma de un contrato de seguridad de la muestra sirvió a su vez para concienciar de los posibles riesgos y evitar el mal uso del sistema de la estación de recarga y de las bicicletas eléctricas. Tras el estudio hay que destacar que no surgieron problemas debido al mal uso o a la falta de medidas de seguridad. Se decidió la contratación de un seguro por la posibilidad de incluir más participantes al estudio y ampliar la cobertura a los empleados de empresas externas contratados por el CIEMAT.

Sobre los elementos de seguridad de las personas que utilizan la bicicleta eléctrica: casco, chaleco reflectante, etc. la mayoría de los usuarios eran partidarios de su utilización, pero comentaron que resultaba poco práctico. De los empleados de CIEMAT una gran mayoría afirman que la circulación dentro del centro es segura para el uso de la bicicleta. Sin embargo, la mayor parte de los participantes comentan que los coches que pertenecen a empresas externas al CIEMAT, suelen superar los límites de velocidad dentro del recinto y valoran este hecho como un posible peligro.

### ***4.3. Sistema Movilidad Commuter***

Con el objetivo de establecer una percepción objetiva, se realizó un estudio de movilidad y de la percepción social sobre un posible nuevo sistema a implantar, el caso Commuter<sup>20</sup> (persona que viaja diariamente una distancia considerable entre su lugar de residencia y el de trabajo). Se analizó con detalle tanto los perfiles de los voluntarios como el uso de las bicicletas eléctricas y los recorridos realizados hasta ahora para poder extrapolar el uso de las bicicletas eléctricas en un nuevo y arriesgado sistema movilidad.

Como esta vez los usuarios seleccionados iban a utilizar las bicicletas eléctricas fuera del recinto laboral y, además en muchos de los trazados

---

<sup>20</sup><https://www.wordreference.com>

compartiendo vías con los vehículos a combustión. Se planteó un estudio más detallado del sistema de movilidad, desde el estudio de contaminación atmosférica y meteorología media en la zona de estudio, pasando por velocidades medias en las vías urbanas e interurbanas de Madrid y por ultimo con la realización de un trayecto para comprobar la operativa del mismo.

#### ***4.3.1. Condiciones de contorno***

Los factores que se quieren tratar en este apartado están relacionados con el éxito de la aplicación de un sistema de bicicletas eléctricas como medio de transporte habitual de los trabajadores de CIEMAT entre sus domicilios y el centro de trabajo y viceversa (desplazamientos Commuter), por ello es necesario analizar previamente las condiciones de entorno atmosféricas y de trayectos que influyen notoriamente en los resultados.

**Contaminación atmosférica**, la mayor parte de los desplazamientos en Madrid son debidos a causas laborales, realizándose sobre todo con vehículos motorizados, especialmente con automóviles particulares. De los contaminantes atmosféricos que conviven con nosotros en las grandes ciudades el Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un buen indicador de la contaminación debida a los vehículos de combustión interna, sobre todo los motores Diésel.

De acuerdo con los datos publicados en el año 2006 por el Ayuntamiento de Madrid Figura 78, la calidad del aire de la capital no cumplía con el marco legal vigente, Límites establecidos por la Directiva 1999/30/CE<sup>21</sup>. Aproximadamente dos millones de vehículo invaden las calles de Madrid a diario, causando todo tipo de contaminación.

---

<sup>21</sup> Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire

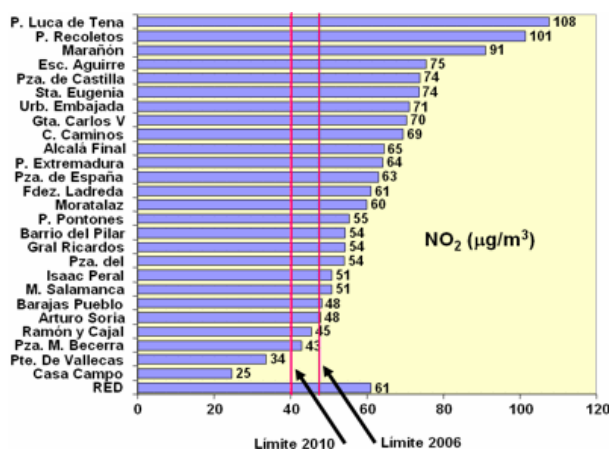


Figura 78. Concentración media anual 2006 de NO<sub>2</sub> en Madrid

A medida que han ido pasando los años, la ciudad de Madrid ha ido cumpliendo, aunque con retraso, los límites establecidos por la normativa del valor límite de concentración media anual de NO<sub>2</sub> de 40ug/m<sup>3</sup>, tal y como se puede ver en la Figura 79 los datos obtenidos por las estaciones de monitorización de calidad del aire del ayuntamiento de Madrid en 2023, no superaron los 40ug/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>.

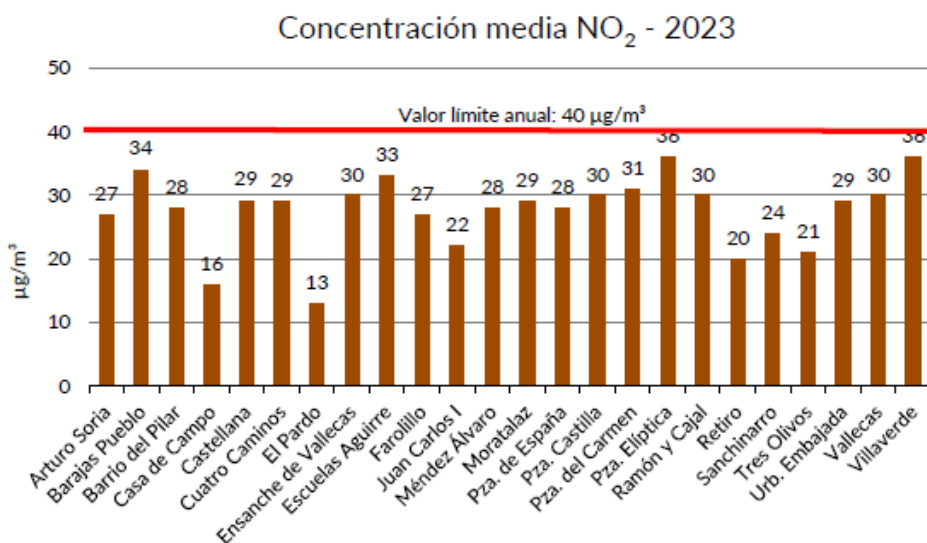


Figura 79. Concentración media anual 2024 de NO<sub>2</sub> en Madrid

La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera estaba aumentando de forma constante debido al uso de carburantes fósiles como fuente de energía. Se estima

que los automóviles generan cerca de un 30% de los gases de efecto invernadero en España.

En la siguiente gráfica, se puede apreciar la estimación realizada sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> por persona, utilizando distintos medios de transporte. Nuevamente, el automóvil privado aparece como principal contaminante.

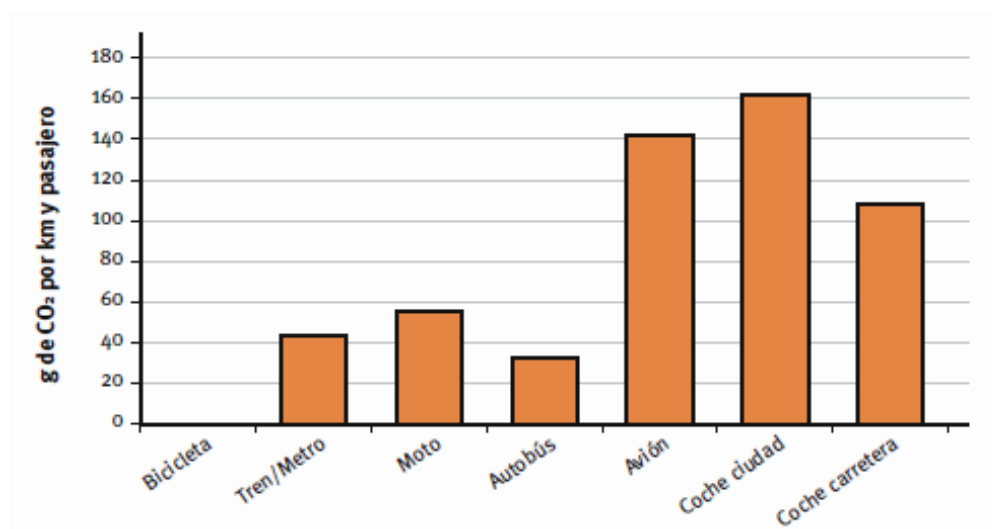


Figura 80. Emisiones aproximadas de CO<sub>2</sub> por medio de transporte<sup>22</sup>

En materia de contaminación, el consumo de un vehículo de motor de combustión interna incrementa cuando se encuentra frío. Sobre todo durante los primeros kilómetros, el incremento de gasto de combustible oscila entre un 60% y un 130% por encima del homologado. Teniendo en cuenta que la mayoría de los desplazamientos son cortos, eso quiere decir que se realizan con el motor todavía en frío, por tanto, la contaminación es mayor.

**Meteorología**, el clima de la Comunidad de Madrid es continental. El número de días con heladas que se producen al año es moderado, y la cantidad de precipitaciones es baja, alrededor de 95 días al año, registrándose básicamente en altitudes correspondientes a la Sierra de Guadarrama.

<sup>22</sup> <https://www.ceroco2.org/>

El número de días al año de lluvia en el centro de Madrid es de 50 días, produciéndose principalmente en otoño y en primavera (de origen tormentoso), siendo el verano bastante seco Tabla 7.

Tabla 7. Información climatológica sobre Madrid

Mes	Temperatura media C		Precipitación total media mm	Núm. medio de días de precipitación
	Mín. diaria	Máx. diaria		
Ene	2,6	9,7	37	9
Feb	3,7	12	35	9
Mar	5,6	15,7	26	7
Abr	7,2	17,5	47	11
May	10,7	21,4	52	12
Jun	15,1	26,9	25	7
Jul	18,4	31,2	15	3
Ago	18,2	30,7	10	3
Sep	15	26	28	5
Oct	10,2	19	49	9
Nov	6	13,4	56	9
Dic	3,8	10,1	56	11

Según la Organización Meteorológica Mundial<sup>23</sup>, las ciudades de Europa con mayor índice de lluvia al año son: Copenhague (251), Londres (226), Ámsterdam

<sup>23</sup> <https://wmo.int/es>

(214), París (171). Sin embargo, todas esas ciudades han desarrollado una cultura de bicicleta muy extendida, con infraestructuras y sistemas adecuados para fomentar y apoyar su uso, por lo que las condiciones climatológicas no deben servir de pretexto para su uso continuado.

**Distancias y trayectos**, la cuarta parte de los recorridos realizados en Madrid tienen una distancia inferior a 5 km. La velocidad media de los mismos en el centro es de 23 km/h Figura 81, reduciéndose a unos 9-11 km/h en hora punta, siendo destacables la cantidad de tiempo perdido y el consumo de combustible en estos casos.

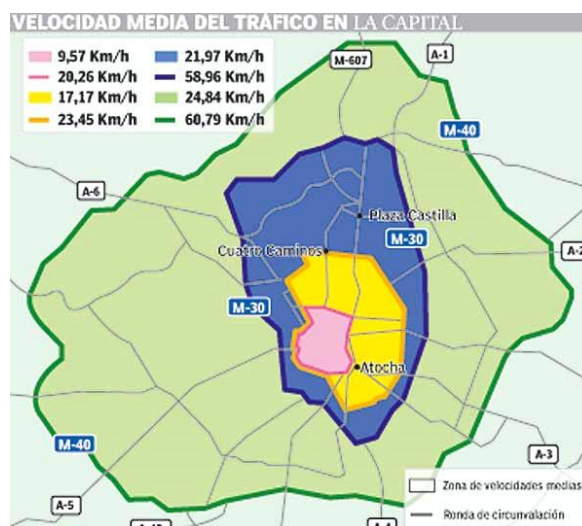


Figura 81. Mapa velocidades medias de vehículos a motor en Madrid<sup>24</sup>

El diseño de la red viaria de Madrid, responde a la necesidad del tráfico y por tanto no está diseñada para la circulación de bicicletas. Esto genera una notable sensación de inseguridad a los ciclistas e incide de manera significativa en la escasa utilización de la bicicleta tradicional, arrojando cifras inferiores de la media en otras ciudades europeas.

**Características de la movilidad en bicicleta en la ciudad de Madrid**, es evidente que el cambio, de otros medios de transporte motorizados a la bicicleta

<sup>24</sup> <http://www.20minutos.es/noticia/142395/0/velocidad/zona/centro/>

tradicional, contribuye en la disminución del consumo de energía, ya que el transporte es el sector que más energía consume en España (un 39% del total). La energía del transporte de personas y mercancías proviene en su mayoría del petróleo, para el que España depende prácticamente al 100% de importaciones de terceros países. Por estos motivos, la implantación de la bicicleta tradicional ofrece las siguientes ventajas:

- Autonomía energética, en las bicicletas tradicionales con la intervención de la tracción humana y en las bicicletas eléctricas sumando el aporte de la potencia eléctrica de sus motores alimentados de baterías.
- Utilizan recursos energéticos escalables, renovables, y descentralizados, los cuales pueden obtenerse en cualquier emplazamiento con diferentes tecnologías.
- No emiten contaminación atmosférica, ni generan residuos, ni producen niveles de ruido incómodos.
- Son ampliamente recuperables y reutilizables.
- Consumen poca cantidad de suelo y fomentan la disminución de la congestión del tráfico y del transporte público.

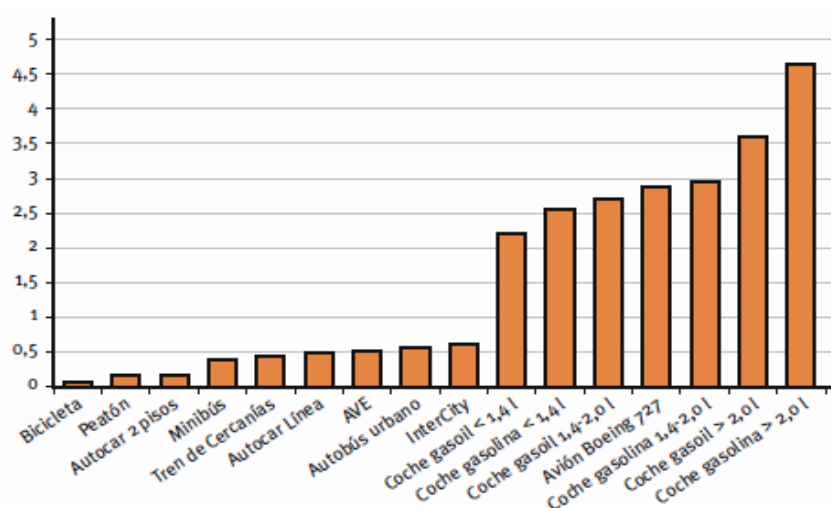


Figura 82. Consumo de energía por kilómetro y pasajero<sup>25</sup>

<sup>25</sup> IDAE, Guía metodológica para la implantación de sistemas de bicicletas públicas en España

Con esta gráfica, se puede obtener una idea general del consumo energético en Mega-julio MJ por cada kilómetro realizado por una persona en distintos tipos de vehículo.

	Coche	Autobús	Bicicleta	Avión	Tren
Consumo de espacio	100%	10%	8%	1%	6%
Consumo de Energía Primaria	100%	30%	0%	405%	34%
Emisiones CO <sub>2</sub>	100%	29%	0%	420%	30%
Emisiones NOx	100%	9%	0%	290%	4%
Emisiones HC's	100%	8%	0%	140%	2%
Emisiones CO	100%	2%	0%	93%	1%
Contaminación Atmosférica total	100%	9%	0%	250%	3%
Riesgo inducido de accidente	100%	9%	2%	12%	3%

Figura 83. Comparativa entre diferentes tipos de transporte<sup>26</sup>

Esta tabla establece una relación entre el consumo de recursos y emisión de contaminantes por parte de un coche respecto a otros medios de transporte, confirmando que la bicicleta tradicional es el sistema que menos consume.

La ciudad de Madrid, ha ido implantando estrategias y actuaciones para el apoyo del uso de la bicicleta en la ciudad, en el último “Revisión y actualización del Plan Director de Movilidad Ciclista”<sup>27</sup>, aunque se han ido incorporando diferente tipos de vías para el uso de la bicicleta, un tipo de vía que ha crecido en los últimos años ha sido el carril bici que convive en la calzada con el resto de vehículos motorizados y que no genera seguridad ni para los ciclistas ni para los conductores, la mayoría de los carriles bici seguros de Madrid se encuentran en lugares de recreo, presentando su punto de máxima utilidad los fines de semana Figura 84.

<sup>26</sup><https://op.europa.eu/es/publication-detail/>

<sup>27</sup><https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Movilidad-y-transportes>



Figura 84. Carriles bici distribuidos por el territorio de Madrid

Una problemática que presentan las vías ciclistas, es que en ocasiones se ven afectadas por desperfectos en el firme, mala señalización u obstrucciones por mobiliario urbano que impiden su correcta circulación.

Madrid no dispone de carril bici en todos los lugares de tránsito masivo (centros de trabajos, parques empresariales, etc.), lo que dificulta las ventajas de realizar desplazamientos cotidianos en bicicleta tradicional, haciendo dudar a los posibles usuarios sobre la efectividad del uso de este medio de transporte.

#### 4.3.2. *Diseño de trayectos Commuter*

Después de un análisis preliminar del marco inicial del desplazamiento Commuter, se detectó varios factores a los que había que poner orden de magnitud para poder comprobar la viabilidad de implantar este nuevo escenario de movilidad en el estudio que se estaba realizando.

Uno de los factores clave que hacen que el uso de la bicicleta tradicional no esté muy extendido en trayectos diarios en la ciudad de Madrid, es en parte debido a la presencia de pendientes e interrupciones de la marcha, reduciéndose en la mayoría de los casos de uso a trayectos cortos, que no requieren mucho esfuerzo.

En la comparativa de los desplazamientos Commuter de media hora de duración en bicicleta eléctrica mejora los tiempos de desplazamiento respecto a la bicicleta tradicional, y en definitiva se puede decir que los tiempos se reducen al igual que sus radios de acción (distancia total recorrida):

- En el caso de bicicletas tradicionales, se pasa de una velocidad de 15 km/h y un radio de 7,5 km en un trayecto de media hora sin desnivel, a una velocidad de 12 km/h y un radio de 6 km con desnivel;
- Para las bicicletas eléctricas de pedaleo asistido, se pasa de una velocidad de 20 km/h y un radio de 10 km a una velocidad de 15 km/h y un radio de 7,5 km.

En la siguiente Figura 85 se representan los distintos radios de acción en la ciudad de Madrid respecto al centro de trabajo CIEMAT.



Figura 85. Mapa de los radios de acción Commuter

Con el objetivo de establecer el radio de alcance para los recorridos Commuter a realizar por los voluntarios, y que además de los factores que se han mostrado, también hay otros que están en parte determinados por el consumo, autonomía y fiabilidad, se decidió realizar un primer recorrido ida y vuelta de larga distancia con diferentes bicicletas eléctricas.

Se realizó el recorrido existente entre CIEMAT y la Universidad Autónoma, situada en Tres Cantos<sup>28</sup>. El trayecto realizado tenía una longitud aproximada de unos 35 km. entre la ida y la vuelta, discurriendo en su totalidad por carril bici o caminos adaptados para este fin. Al recorrido realizado se le denominó como recorrido Commuter0. A continuación, se muestra el recorrido realizado en la Figura 86.

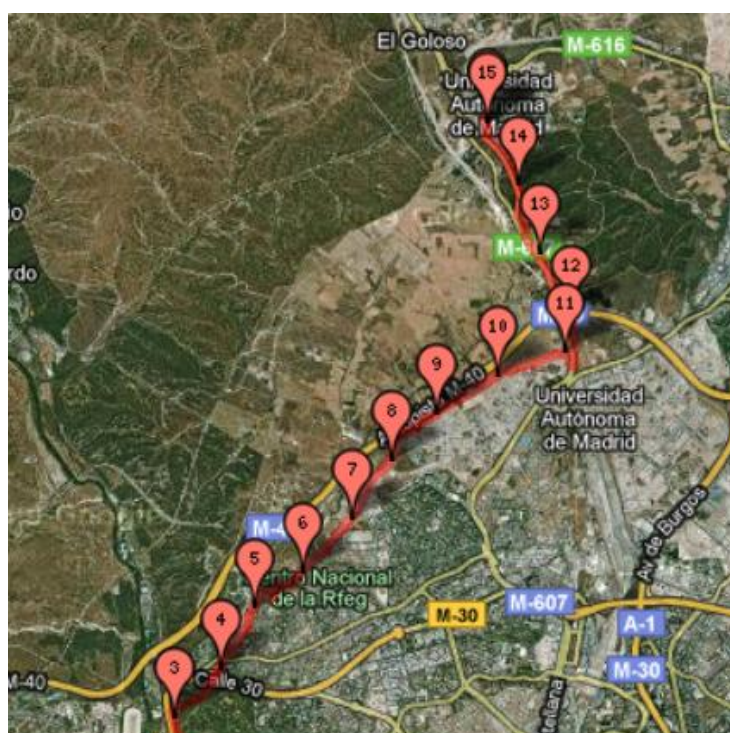


Figura 86. Recorrido Commuter0

<sup>28</sup><https://www.uam.es/>

En algunas zonas del trayecto las pendientes son muy acusadas, especialmente para realizar este trayecto con una bicicleta tradicional. En la Figura 87 se muestra la gráfica de cota de nivel en la que se aprecia desde el punto de referencia 1 al 15 (final del recorrido) un ascenso aproximado de 135 m.

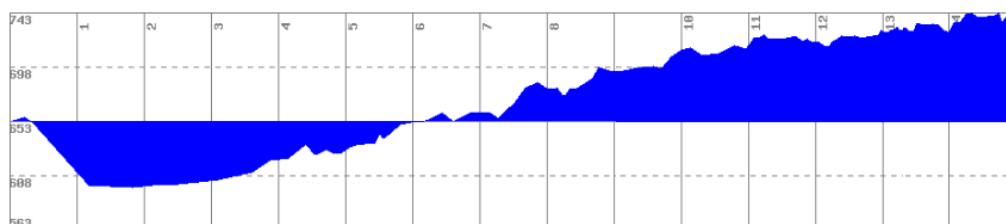


Figura 87. Pendientes en el recorrido Commuter0

Otro factor importante a la hora de caracterizar la autonomía de una bicicleta eléctrica es la potencia necesaria para ayudar al ciclista a superar las pendientes que se encuentra en su recorrido, sin que se plasme en un aumento excesivo en la inversión de tiempo para realizar el trayecto, estando también íntimamente relacionado con el peso del ciclista.

En esta primera prueba se realizaron los desplazamientos con diferentes usuarios de diferentes pesos. Las bicicletas eléctricas que se utilizaron para este trayecto fueron BIPA1, BIPA2 y la BIPA3, con las siguientes características:

- BIPA1: Motor AC de 250 W y batería con un peso de 4 kilos y una tecnología de Litio–Ion de 36 V 10 Ah con una energía máxima teórica acumulable de unos 360 Wh.
- BIPA2: Motor DC de 250 W y batería con un peso de 4 kilos y una tecnología de Litio–Ion de 36 V 10 Ah con una energía máxima teórica acumulable de alrededor de 360 Wh.
- BIPA3: con las siguientes características: Motor AC de 180 W y batería de Plomo–ácido con un peso de 8 kilos y una tecnología de 24 V 12 Ah con una energía máxima teórica acumulable de 288 Wh.

Tabla 8. Pesos a desplazar en el recorrido Commuter0

BIPA	Batería	BIPA	Usuario	Total
1	4,6	20,4	85	110
2	3,8	24,2	75	103
3	9,4	21	65	95,4

Tabla 9. Constantes energéticas en el recorrido Commuter0

BIPA	Usuario Peso Kg	Motor Potencia W	Tecnología Motor	BIPA Peso Kg	Batería Peso Kg	Tecnología Batería	Batería Tensión V	Batería Amperios A
1	85	250	A.C.	20,4	4,6	Litio- Ion	36	10
2	75	250	D.C.	24,2	3,8	Litio- Ion	36	10
3	65	180	A.C.	21	9,4	Plomo- ácido	24	12

Antes de realizar el recorrido ida y vuelta planteado se realizó la carga de energía de las baterías de las bicicletas eléctricas a su máxima capacidad, después del recorrido expuesto se realizó de nuevo la carga de las baterías de las tres

bicicletas eléctricas en la estación de recarga para poder comprobar posteriormente la energía consumida por cada bicicleta eléctrica para realizar el recorrido.

En las siguientes gráficas Figura 88 se presentan: tensión y la corriente de carga de las baterías de las bicicletas eléctricas con respecto al tiempo en horas. Las series de las distintas bicicletas eléctricas está representadas en colores diferentes del siguiente modo: en azul la BIPA1, en rojo la BIPA2 y en amarillo la BIPA3.

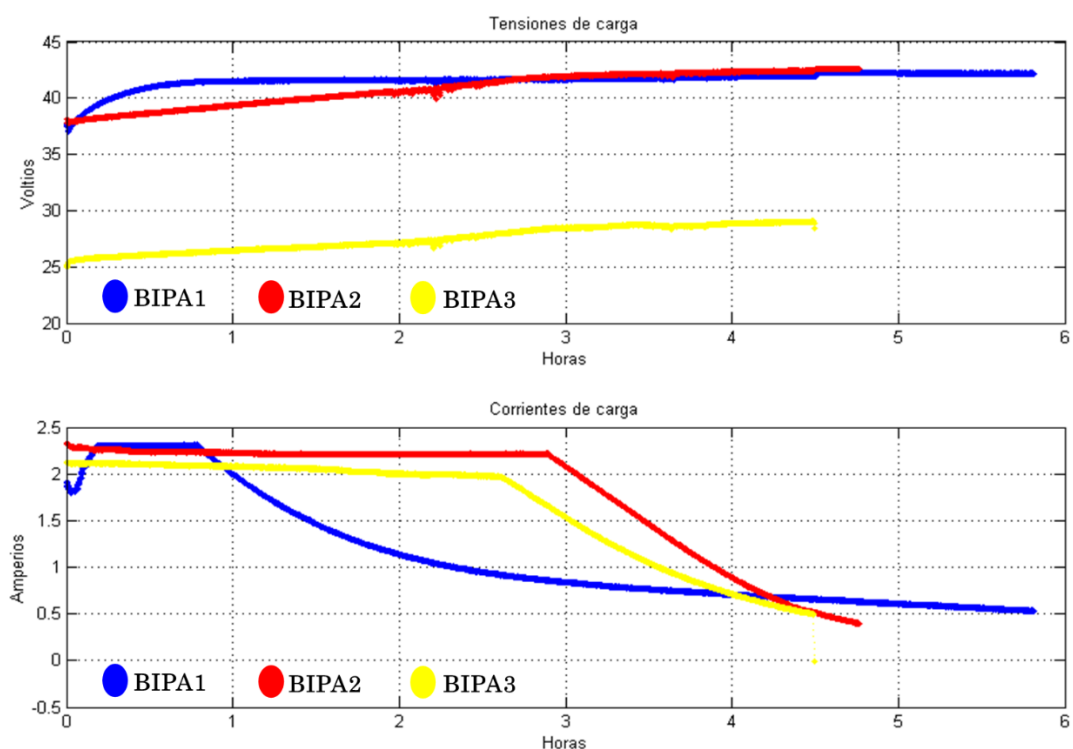


Figura 88. Cargas del recorrido Commuter0 de las BIPA 1, 2 y 3

Como se puede ver en la gráfica las cargas se realizaron en un periodo total de entre 4 horas y 6 horas. A continuación, se pueden apreciar los parámetros de carga de cada una de las bicicletas eléctricas:

Tabla 10. Parámetros de carga del recorrido Commuter0

BIPA	Tiempo Carga min	Energía Wh
1	357	272
2	296	349
3	279	202

### Encuesta a los posibles voluntarios

Se tomó como punto de partida el resultado de las encuestas lanzadas a los trabajadores al inicio del proyecto en la que se reflejaba que la mayoría de los participantes no utilizarían una bicicleta eléctrica para desplazarse desde su casa hasta el CIEMAT. Esto era debido a que no se podían comprometer a realizar todos los días laborables el trayecto en bicicleta eléctrica por las largas distancias que tenían que recorrer, trayectos peligrosos por la convivencia con vehículos motorizados, etc.: situaciones que reflejan que en el momento del programa piloto los accesos para las bicicletas al centro de trabajo desde otros puntos de la ciudad no eran adecuados.

Además, muchos de los posibles participantes comentaron que por las mañanas antes de llegar al trabajo tenían que dejar a sus hijos en colegios y guarderías lo que les impedía, aunque quisieran, poder utilizar una bicicleta eléctrica para desplazarse. Otros resaltaron que no tenían sitio en su casa para poder guardar por las noches la bicicleta eléctrica asignada. Con todos estos parámetros sociales para iniciar el estudio de movilidad del caso Commuter, fue necesario la selección de un grupo reducido de posibles voluntarios.

### **Selección, perfil y entrevistas Commuter**

Esta selección se basó en función de varios aspectos como la distancia a recorrer, la existencia de vías adecuadas para el uso de bicicleta a lo largo de su recorrido habitual y la posibilidad de guardar la bicicleta eléctrica por la noche en un lugar seguro. De este se puede decir que el perfil del usuario era un varón de edad media de 30 años, con buen estado de salud, deportistas habituales y capacitados para el uso las bicicletas eléctricas en una posible situación de anomalía en el sistema energético de las mismas. Estos realizaron recorridos diferentes con distancias y pendientes distintas. Sin tomar en cuenta las diversas pruebas que realizaron, alrededor de una decena de voluntarios que, aun cumpliendo con los requisitos expuestos, querían verificar probando el sistema por ellos mismos la posibilidad de comprometerse a realizarlo diariamente, se llegó finalmente a una participación de 5 usuarios, 2 habituales, 2 esporádicos y otro más que realizaba esporádicamente el sistema combinado (bicicleta eléctrica – metro) permitiendo comparar las diferencias con el caso Commuter.

Mediante las entrevistas y seguimiento a los participantes del caso Commuter se pudo establecer el rumbo y viabilidad de este sistema de movilidad en el estudio que se estaba realizando, encontrando en cada respuesta, las directrices de mejora necesarias para el entorno de ejecución del estudio. Las entrevistas se organizaron del siguiente modo:

Primera parte: análisis de los aspectos cotidianos de las bicicletas eléctricas como la comodidad, el funcionamiento, el comportamiento, la capacidad de transporte, la energía aportada, etc., con los que se podía realizar un estudio con los datos aportados por el usuario en relación al modelo de bicicleta eléctrica usado.

Segunda parte: análisis del entorno de movilidad por cada usuario en su desplazamiento, que permitía determinar el estado de las vías por las que se ha circulado, la señalización encontrada, el tiempo empleado, la peligrosidad del recorrido, la falta o no de medios necesarios para un correcto desplazamiento, etc.

### ***4.3.3. Recorridos caso Commuter***

Todo lo anteriormente expuesto permitió tomar decisiones a la hora de poner en marcha el proyecto piloto del nuevo sistema de movilidad Commuter y en concreto los criterios necesarios para seleccionar los voluntarios, recorridos y las bicicletas eléctricas a utilizar. Para poder tener una tasa alta de éxito en la aplicación de un sistema de movilidad tan arriesgado.

#### **Recorrido Commuter1**

En este recorrido se puede decir que en todo momento se puso al límite las bicicletas eléctricas utilizadas por el voluntario, tanto en la autonomía por la extensión del recorrido como en la fiabilidad, ya que discurre por carriles bici intercalados con firmes de tierra irregulares ubicados en la casa de campo. La distancia media recorrida por este voluntario, de 87kg de peso, era aproximadamente 38,89 km incrementándose o reduciéndose este trayecto en unos 3 km según la ruta elegida por el voluntario. En los primeros trayectos se propuso al voluntario que utilizase para realizar el recorrido diferentes modelos de bicicletas eléctricas con el objetivo de verificar experimentalmente cuál de ellas podían realizar todo el recorrido ida y vuelta con una sola carga de la batería. En la siguiente imagen se puede observar el recorrido sobre el mapa Figura 89.

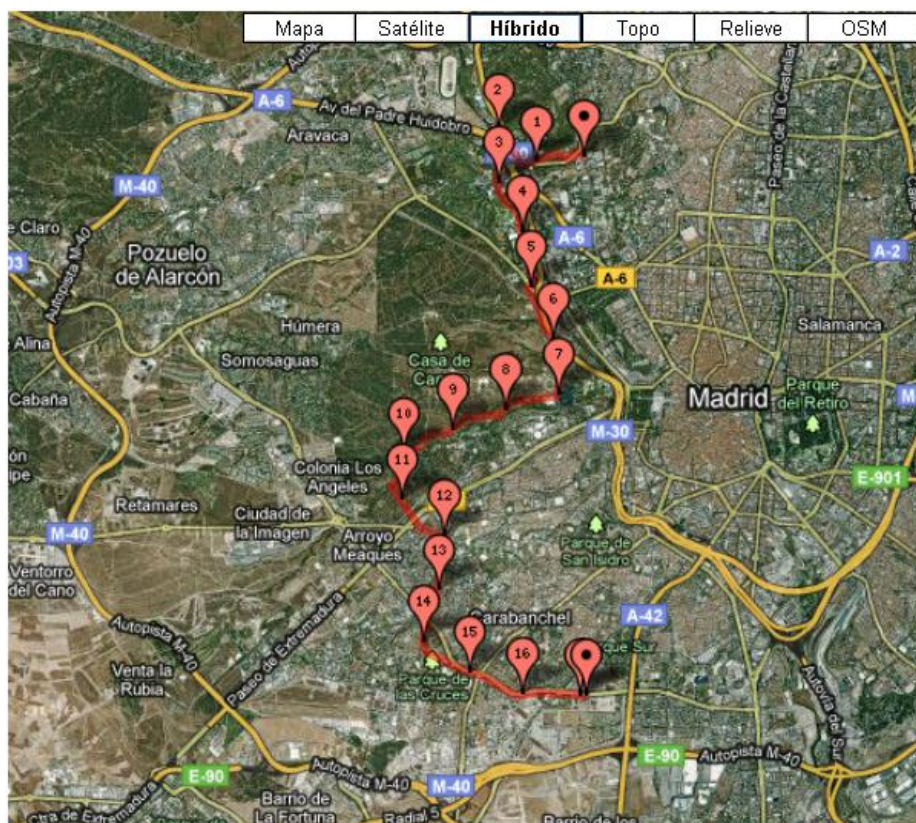


Figura 89. Recorrido Commuter1

Como se puede apreciar en la siguiente gráfica de nivel, del trayecto sobre el recorrido Figura 90, según los puntos indicados sobre el mapa anterior se puede verificar que se trata de un recorrido en el que se encuentran pendientes bastante acusadas.

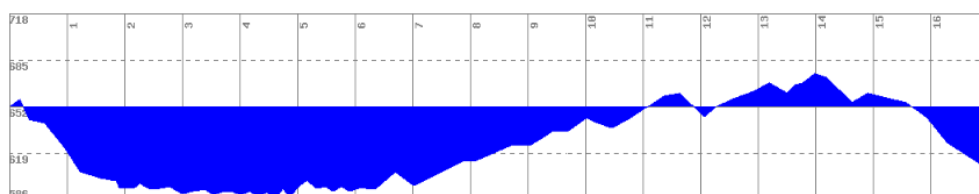


Figura 90. Pendientes en el recorrido Commuter1

La media de energía que consumía este usuario para realizar el trayecto ida y vuelta era de 268 Wh.

## Recorrido Commuter2

El voluntario que realizó este recorrido en bicicleta eléctrica es un usuario habitual de este trayecto en bicicleta tradicional, aunque el recorrido que realiza no es muy extenso si cabe destacar que se realiza en uno de los sentidos con una fuerte pendiente ascendente. El recorrido discurre en casi su totalidad por una vía que antiguamente era utilizada por vehículos a motor como parte del viario público de Madrid, que se transformó en vía compartida peatón-bicicleta. La distancia media recorrida por este usuario, de 73 kg de peso, era aproximadamente de 9,46 km, esta distancia variaba en unos pocos desplazamientos en alrededor de unos 3 km.



Figura 91. Recorrido Commuter2

El desnivel del trayecto se puede observar con la pendiente de la gráfica según los puntos indicados sobre el mapa anterior.

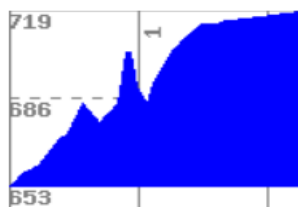


Figura 92. Pendientes en el recorrido Commuter2

La media de energía para realizar el trayecto ida y vuelta era de 72,56 Wh.

### Recorrido Commuter3

Varios voluntarios esporádicos realizaron el recorrido desde la zona de Moncloa hasta CIEMAT. Se trata de un recorrido de entre 2,5 Km y 3 Km según el voluntario que lo realizara con unos cambios de cota menores a los anteriores recorridos Commuter, ya que solo se detecta un cambio de nivel brusco, en el sentido de ida en el que la cota varia alrededor de 20 m. En cuanto al consumo total de energía, se sitúa en torno a los 48 Wh.

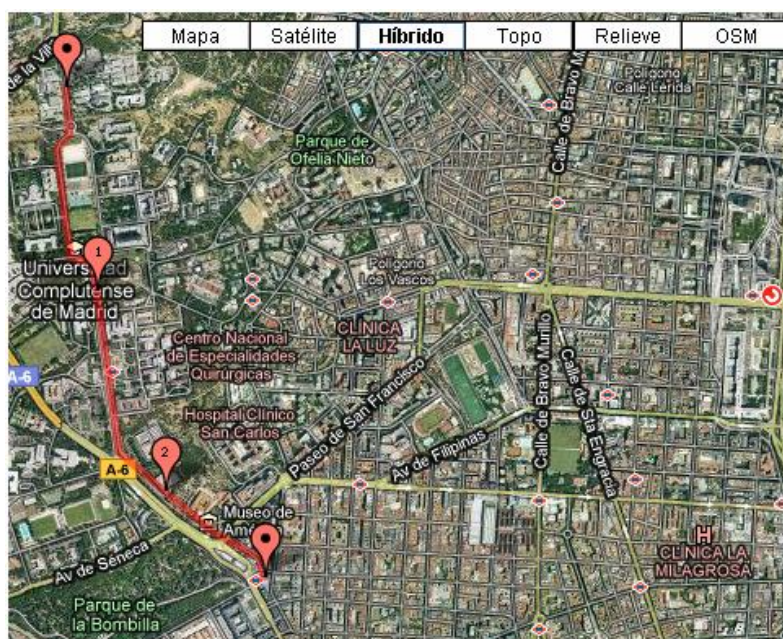


Figura 93. Recorrido Commuter3

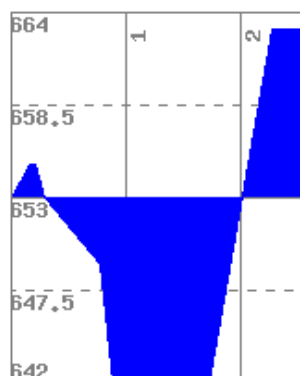


Figura 94. Pendientes en el recorrido Commuter3

En función de los recorridos de los dos participantes habituales, Commuter1 y Commuter2, que realizaban entre ida y vuelta, 40 km uno y 10 km el otro, se les

asignaron las bicicletas eléctricas, dependiendo de su autonomía, optándose finalmente por asignarles una bicicleta eléctrica de 250 W y 36 V con motor de corriente continua y batería de plomo-ácido al segundo y otra bicicleta eléctrica de 250 W y 36 V con motor Brushless (corriente alterna) y batería de Litio-Ion al primero. En el caso del desplazamiento Commuter3 se utilizaron diferentes tipologías de bicicletas eléctricas para el recorrido.

La forma de proceder fue la siguiente, cada una de las bicicletas eléctricas tenía asignado un distintivo diferente a su modelo para facilitar así su uso y control, de siguiente modo:

Bicicleta eléctrica Ecobike 36v litio-Ion → BIPA1.

Bicicleta eléctrica Monty 36v litio-Ion → BIPA2

Bicicleta eléctrica Beixo 24v litio-Ion → BIPA3

Bicicleta eléctrica TCR 36v plomo ácido → BIPA4

Bicicleta eléctrica TCR 36v litio-Ion → BIPA5

## ***5. Parámetros de Movilidad***

El fin de un parámetro es poder representar de la manera más sencilla posible la característica que ayuda a comprender, definir y clasificar un elemento o módulo en una situación real por un concepto, objeto o relaciones de otras características que se pueda utilizar o manipular posteriormente de una manera más sencilla.

Para poder converger en un dato o factor que sirva para analizar o valorar el comportamiento de los diferentes módulos planteados en este trabajo de tesis es necesario tener la cantidad de datos empíricos suficientes para que se puedan caracterizar dicho parámetro.

### ***5.1. Parámetros energéticos en los desplazamientos***

Los ensayos de campo experimentales iniciados en este proyecto requieren de un amplio espacio temporal para la obtención de conclusiones fiables y reales sobre el comportamiento de las bicicletas eléctricas y de sus módulos energéticos. A medida que iba evolucionando el proyecto se fue llevando a cabo pruebas y diseñando y desarrollando prototipos cada vez más complejos y completos que suministraban datos más alineados con los objetivos de este trabajo de tesis.

#### ***5.1.1. Parámetros energéticos caso Commuter***

Después del diseño de implantación de este sistema de movilidad y la puesta me marcha con la prueba de viabilidad de implantación gracias al recorrido inicial, que fue un paso fundamental para asegurar la ejecución del sistema de movilidad Commuter con las mínimas incertidumbres posibles y así establecer los parámetros de tiempos, distancias, autonomías, y lo que pudiera surgir en el trayecto inicial, aplicables posteriormente en los recorridos Commuter a realizar en el programa piloto por voluntarios.

En los siguientes datos de la Tabla 11 y las gráficas representadas en la Figura 95 se puede observar la representación de los variables más importantes en recorrido ida y vuelta, CIEMAT - Universidad Autónoma.

Tabla 11. Parámetros energéticos del recorrido Commuter0

BIPA	Energía Wh	Total Peso Kg	Trayecto Distancia Km	Trayecto Tiempo min	Trayecto Coste cent_€
1	272	110	35	60	2,176
2	349	103	35	60	2,792
3	202	95,4	35	60	1,616

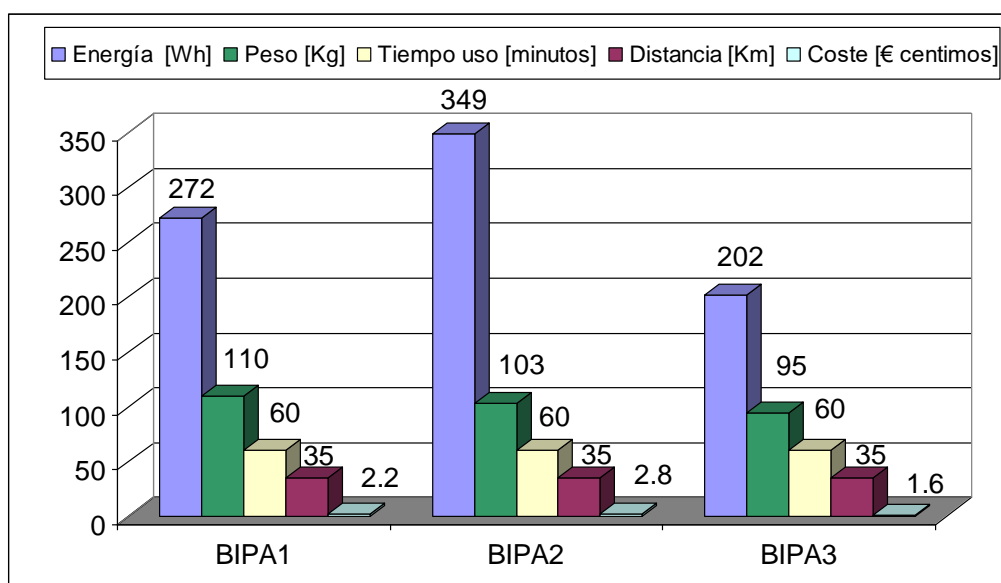


Figura 95. Diagrama de los parámetros del recorrido Commuter0

El primer resultado que se concluye en el recorrido realizado es el máximo trayecto ida y vuelta permisible para realizar en bicicleta eléctrica de pedaleo asistido. Estos recorridos en las pruebas experimentales no superaban los 35 km con el objeto de tener autonomía suficiente para todo el trayecto, apareciendo diferencias según la tecnología del motor y controlador empelados en cada bicicleta eléctrica.

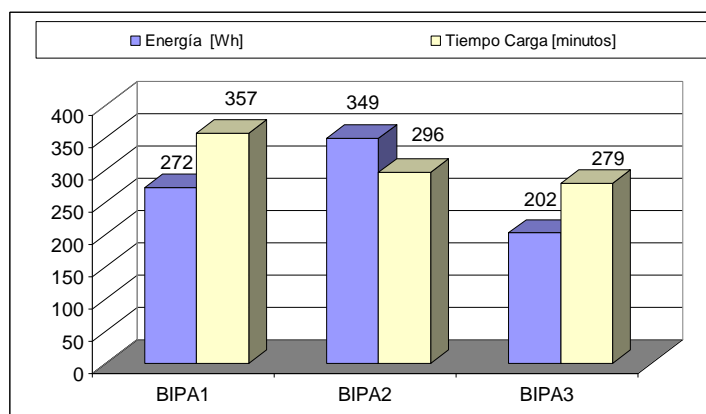


Figura 96. Diagrama de las cargas realizadas Commuter0

Otro resultado concluyente es la diferencia de funcionamiento tanto de las bicicletas eléctricas como de sus cargadores. En la figura anterior se puede ver que la BIPA2 de batería de Litio-Ion 36 V y con motor 250 W DC es la que consumió más energía con 9,97 Wh/Km, debido a que entrega potencia durante más tiempo en el desplazamiento.

El consumo de la BIPA2 se refleja también en el gasto de energía por kg de peso a desplazar: BIPA1 = 2,47 Wh por Kg; BIPA2 = 3,38 Wh por Kg; BIPA3 = 2,12 Wh por Kg

Aunque como se puede ver en los diferentes modelos de bicicletas eléctricas con tecnologías distintas en baterías y potencias de motor, pero con mismos controladores, la BIPA1 de batería de Litio-Ion 36 V y con motor 250 W AC con peso a desplazar de 110 Kg y la BIPA3 de batería de Plomo-ácido 24 V y con motor 180 W AC con peso a desplazar de 95,4 Kg, tienen ambas un consumo parecido por Kg a desplazar, aunque un consumo de energía por Km de BIPA1 = 7,77 Wh/Km y de la BIPA3 = 5,77 Wh/Km, se detecta una diferencia que se ha debido como ya se ha mostrado en los resultados energéticos experimentales de la BIPA3 que en las cuestas el motor ayuda menos al ciclistas y por lo tanto el ciclista tiene que invertir en mayor esfuerzo lo que resulta menos satisfacción en el uso de la bicicleta electica.

La conclusión a la que se ha llegado con este estudio inicial es:

- Los motores DC entregan más potencia para el desplazamiento que los motores AC, pero también consumen más energía para realizarlo.
- La diferencia encontrada entre las tecnologías de baterías Plomo-ácido y Litio-Ion, radica sobre todo en la densidad energética como se puede comprobar en los datos mostrados en la siguiente Tabla 12. Los datos teóricos comerciales rondan en los rangos para la tecnología Plomo-ácido de 35 a 50 Wh/Kg y para la de Litio-Ion de 80 a 130 Wh/Kg.

Tabla 12. Densidades energéticas teóricas recorrido Commuter0

Batería	Peso Kg	Energía Wh	Wh/Kg
BIPA1	4,6	360	78,26
BIPA2	3,8	360	94,73
BIPA3	9,4	288	30,64

El resultado de este estudio inicial ofreció información valiosa para conocer las restricciones y los posibles rangos de aplicación de los trayectos Commuter que podían realizar los trabajadores que se habían ofrecido como voluntarios, recogiendo los límites de peso, distancia y tiempo operativo por cada trayecto que podrían acometer los voluntarios para evitar el máximo de problemas o contratiempos en los módulos energéticos de las bicicletas eléctricas para desarrollar los mismos.

Desde el inicio de la puesta en marcha del sistema de movilidad Commuter con las entrevistas con los trabajadores que se ofrecieron a participar como voluntarios para realizar los trayectos, se decidió realizar primero unos trayectos de prueba de los casos Commuter propuestos por los participantes para ver si las condiciones del recorrido y la logística del participante podría mantener los trayectos mínimo un par de semanas para poder recolectar los suficientes datos objetivos y representativos de ese trayecto Commuter.

Como se ha expuesto en el capítulo anterior, finalmente, de los diferentes trayectos Commuter planteados, y después las primeras pruebas se seleccionaron tres trayectos, en los que los participantes utilizaron diferentes bicicletas eléctricas para poder verificar cuál de ellas se ajustaba más a su fisionomía y a las necesidades del recorrido, de las diferentes bicicletas eléctricas se seleccionaron las siguientes con los datos de días máximos acumulados o trayectos máximos realizados por cada una que se muestran en la siguiente Tabla 13.

Tabla 13. Días acumulados por bicicletas eléctricas

BIPA	Días
1	30
2	10
4	55

De los tres recorridos, se han seleccionado dos trayectos para realizar un estudio cruzado en base a los dos desplazamientos Commuter1 con la BIPA1 y Commuter2 con la BIPA4.

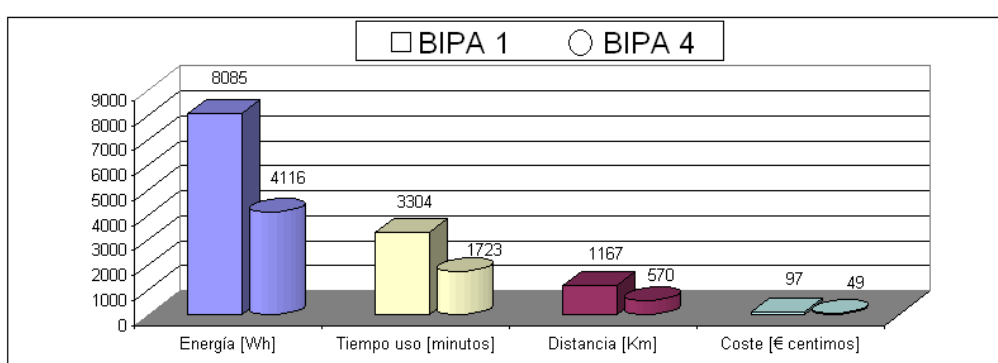


Figura 97. Parámetros totales BIPA1 y BIPA4

A partir de las gráficas de la anterior Figura 97 se puede constatar que, el consumo de las bicicletas eléctricas necesario para realizar un desplazamiento de larga distancia es bajo respecto otro tipo de vehículos motorizados, esto se traduce en una mayor optimización de la energía y menor coste económico por parte de los usuarios que opten por utilizar este tipo de vehículo eléctrico ligero. El parámetro peso no se va a tener en cuenta ya que como se puede ver en los datos representados en la siguiente Tabla 14, aunque hay diferencia en los pesos de los usuarios y en las densidades energéticas de las baterías de las bicicletas eléctricas se compensa por la diferencia de pesos en las bicicletas eléctricas.

Tabla 14. Pesos a desplazar en los recorridos Commuter1 y 2

BIPA	Batería Kg	BIPA Kg	Usuario Kg	Total Kg
1	4,6	20,4	87	106,8
4	12	22	73	107

Cabe destacar que las diferencias existentes entre estos dos modelos estudiados son importantes, presentando distinto tipo de motor y batería. Demostrándose que en el caso de la BIPA1 con motor Brushless y batería de litio-Ion presenta un rendimiento algo mayor que la BIPA4 que dispone de un motor de corriente continua y batería de plomo-ácido además de la relación de los recorridos realizados, Commuter1 más largos y con más pendientes de subida en ambos sentidos del trayecto y Commuter2 más cortos y pendiente de subida solo en un sentido, aun contando con estos factores la relación entre kilómetros y energía demuestra, mayor eficiencia en la BIPA1.

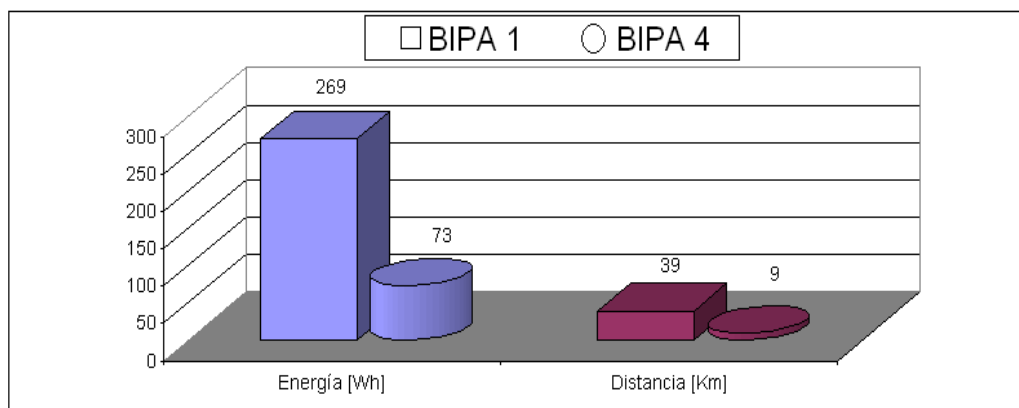


Figura 98. Parámetros medios por recorrido Commuter1 y Commuter2

En la gráfica anterior de la Figura 98 se puede verificar de forma objetiva que la BIPA1 es más eficiente que la BIPA4 respecto al consumo y la autonomía. La BIPA1 en desplazamientos mucho mayores, con una media de 39 Km y con más desniveles de subida en los dos sentidos del recorrido con un consumo total en todos los recorridos medido de 269 Wh, realiza un consumo medio de 6,89 Wh por Km, mientras que la BIPA4 en desplazamientos menores, con una media de 9 Km. y con menos acumulación de desniveles en todo el trayecto reflejándose solo en un sentido, el de subida, con un consumo total en todo el recorrido de 73 Wh, realiza un consumo medio de 8,1 Wh por Km.

Tal y como muestra en la representación de los datos totales de las diferentes bicicletas eléctricas en la Figura 99, se observa que las BIPA1 y BIPA4 fueron utilizadas en mayor medida, con diferencia, que el resto de bicicletas eléctricas.

Con esta gráfica nos hacemos una primera aproximación del uso, consumo y coste en céntimos de €<sup>29</sup> de las cargas eléctricas realizadas a las baterías de las bicicletas eléctricas de pedaleo asistido para los trayectos.

<sup>29</sup> Para los cálculos de costes de energía eléctrica (KWh) = 0,109612€

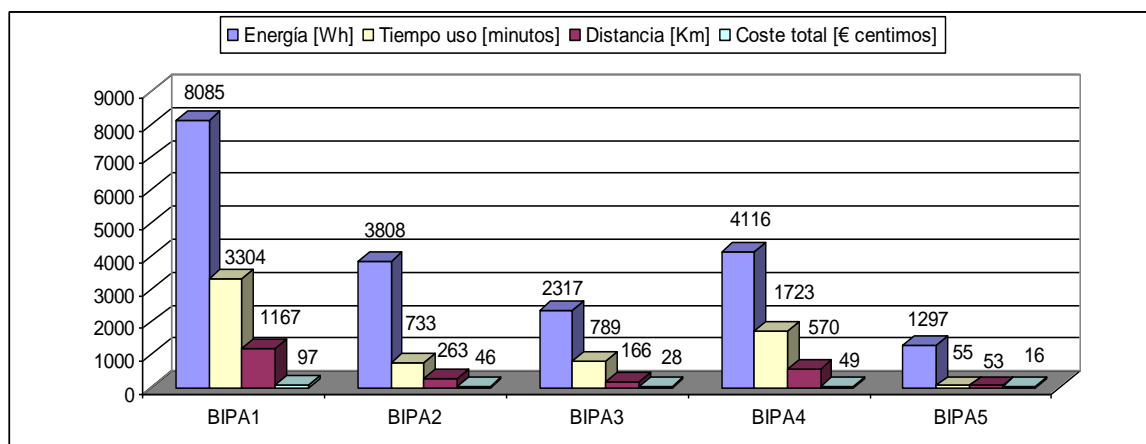


Figura 99. Comparativa consumos y uso

Durante la realización de estas pruebas se pudo constatar varias diferencias entre los datos probados y los que el fabricante aseguraba que cumplían sus modelos. Por ejemplo, la autonomía que dicen tener las bicicletas eléctricas de pedaleo asistido es alrededor de entre 50 y 80 Km, resultó no ser lo que observamos en el desarrollo del programa piloto. En algunos documentos se comenta que influye el peso del conductor y la forma de utilizar la bicicleta eléctrica, pero un usuario que realizaba unos 40 km entre ida y vuelta, verificó que prácticamente ningún modelo era capaz de cubrir esta distancia. Tan solo un modelo con motor brushless y batería de litio-Ion.

Por otro lado, se midió el tiempo que tarda una batería en cargarse completamente con su cargador original y resultó ser de unas 6 ò 7 horas, unas 2 más que la información del fabricante.

### ***5.1.2. Parámetros de la estación de recarga***

La estación de recarga o bancada de intemperie, dio servicio a todos los procesos de módulos energéticos y sistemas de movilidad durante todo el desarrollo del estudio, centrándose en las estrategias de funcionamiento específicas para cubrir las necesidades funcionales de los diferentes procesos y sistemas de movilidad surgidos en el programa piloto.

A medida que avanzaba el proyecto se tuvo que ir incluyendo adaptaciones a la estación de recarga para asegurar el buen funcionamiento y así mantener la continuidad del desarrollo del estudio. Algunas de estas adaptaciones o desarrollos intrínsecos del sistema fueron los siguientes:

- El control del sistema de la estación de recarga constaba principalmente de dos equipos, un PC y hardware específico de National Instruments<sup>30</sup>, que necesitaban de un entorno con unas temperaturas más o menos estables por ello se incorporó una ventilación forzada controlada gracias a la comprobación de una sonda de temperatura, que permitió constatar un mejor funcionamiento y toma de datos ya que no alcanza temperaturas que puedan dañar el ordenador y el equipo de medida.
- A la hora de aparcar las bicicletas eléctricas de pedaleo asistido en estación de recarga, era necesario tener un sistema que delimitara el aparcamiento de cada una y que además evitara la caída de la mismas.

## ***5.2. Parámetros de los Sistemas de Movilidad***

Como se ha ido comentado en el desarrollo del programa piloto, este sistema ha sido el resultado de anteriores estudios de las diferentes fases del proyecto, por lo tanto, el diseño de movilidad parte de resultados objetivos, aunque para su implantación ha sido primordial trabajar con la metodología que estaba establecida desde el inicio del proyecto de forma iterativa, aplicando la mejora continua en todo el desarrollo de la fase, realimentándolo con los diferentes resultados de las diferentes estrategias aplicadas.

Como se ha ido presentado desde el inicio de este trabajo de tesis, el parámetro movilidad-social ha sido clave para el desarrollo del proyecto, debido al feedback recibido por las personas que utilizaban de un modo u otro los diferentes

---

<sup>30</sup> <https://www.ni.com/>

sistemas de movilidad, tanto los internos dentro del centro de trabajo como el sistema de movilidad Commuter.

### ***5.2.1. Parámetros Sistemas de Movilidad Internos***

De los resultados obtenidos en el resto de Sistemas de Movilidad internos del centro de trabajo CIEMAT, se diseñó y se puso en marcha otro Sistema de Movilidad que reunía los beneficios logísticos y operativos del resto de pilotos. Además con el desarrollo de la “mochila” en la página 91, sistema portátil que gestionaba la información de los módulos energéticos, la ubicación y control de las bicicletas eléctricas y la incorporación de la información de estas en el aplicación Web en la página 96, que en conjunto forman el sistema de movilidad bicicletas eléctricas por solicitud, que permite al usuario ver el piloto como un Sistema de Bicicleta Eléctrica Compartida.

Madrid posee unas condiciones climatológicas adecuadas para el uso de bicicleta y por lo tanto no debe ser un impedimento para el uso continuo de la bicicleta eléctrica. El estudio espacial y de infraestructuras permitió obtener conclusiones importantes para el estudio movilidad con bicicleta eléctrica dentro del centro de trabajo de CIEMAT:

- La concentración de los edificios dentro del centro en una superficie de 13 hectáreas supone que las distancias entre ellos no son tan importantes como para necesitar modos de desplazamientos motorizados para todo el personal del CIEMAT, teniendo su importancia en algunos de los departamentos.
- La división de CIEMAT en dos zonas diferenciadas es un dato importante para entender la movilidad de un segmento no mayoritario de los trabajadores de este centro laboral. Salvar la distancia existente entre ambos recintos requiere un tiempo determinado ya que hay que cruzar la Avenida Complutense. La presencia de calles adoquinadas es un dato importante a la hora de implantar un sistema de bicicletas, eso implica que la movilidad ciclista por estas calles requiere que las bicicletas tengan un

buen sistema de amortiguación, sobre todo en el caso de que los usuarios lleven carga.

La suma de los datos cualitativos y cuantitativos ha permitido sacar conclusiones previas reales y objetivas sobre el estudio de movilidad con bicicleta eléctrica dentro del CIEMAT.

### **Estudio de tiempos**

Los resultados obtenidos a partir de este estudio permiten obtener las siguientes conclusiones:

- Los tiempos requeridos para recorrer la distancia total de los 25 recorridos de prueba fueron los siguientes: a pie 1 hora y 11 minutos, en coche 43 minutos y en bicicleta eléctrica 41 minutos. Se puede concluir por tanto que en coche o en bicicleta eléctrica se ahorran unos 30 minutos en comparación con desplazamiento a pie, señalando los tiempos para los desplazamientos en coche y en bicicleta eléctrica no varían significativamente.
- El tiempo requerido para recorrer las distancias parciales fueron las siguientes:
- Recorridos de subida (5 desplazamientos): a pie 12 minutos y 44 segundos (utilizando los atajos entre edificios), en coche 13 minutos 50 segundos y en bicicleta eléctrica 10 minutos 48 segundos. Se constata que se ahorran 3 minutos en bicicleta eléctrica y 1 minuto a pie en comparación con el coche. Estos recorridos no superan en ningún caso los 300 metros por lo que se puede concluir que para distancias iguales o inferiores a dicho recorrido el uso del coche implica mayor tiempo que si el recorrido se hace a pie o en bicicleta eléctrica. El tiempo necesario para arrancar y aparcar el vehículo no se rentabiliza con el tiempo ganado por la velocidad del vehículo.
- Recorridos largos de subida y bajada (2 desplazamientos): a pie 7 minutos y 37 segundos, en coche 5 minutos y 40 segundos y en bicicleta eléctrica 6 minutos y 45 segundos. Se constata que en trayectos largos se ahorra más

tiempo en coche, 1 minuto en comparación con la bicicleta eléctrica y 2 minutos en comparación con el recorrido a pie.

- Recorridos en llano (1 desplazamiento): a pie 2 minutos y 16 segundos, en coche 1 minuto y 43 segundos y en bicicleta eléctrica 55 segundos. Como se puede apreciar, para este tipo de recorridos, la mejor opción es el empleo de bicicleta eléctrica ya que permite ahorrar 2 minutos respecto al mismo recorrido realizado a pie, y 1 minuto respecto al recorrido en coche.

Los resultados que aportan estos cálculos permiten concluir que la comodidad de los desplazamientos y la rapidez con la que se realizan estos, están condicionados por la ruta que se puede recorrer y con las posibilidades de aparcamiento del vehículo. Sin duda ir a pie no requiere preocupaciones de aparcamiento ni puesta en marcha o estacionamiento del vehículo. Sin embargo, un vehículo (coche o bicicleta eléctrica en este caso) permite un desplazamiento más rápido y con menos esfuerzo.

- A modo de conclusión final se puede decir que la bicicleta eléctrica ahorra tiempo respecto:
  - Al coche, en distancias cortas y largas con independencia de los niveles, además el coche es el medio de transporte menos efectivo en trayectos cortos dentro del CIEMAT, en términos de tiempo, espacio ocupado, energía y contaminación.
  - A pie, en bajadas o distancias mayores a 200 metros.

### **Estudio distancias**

Las conclusiones del estudio de distancias están influidas por variables como la percepción de las personas en cuanto a la movilidad, variando en función de factores como los desniveles, la condición física del usuario, la costumbre que tiene de desplazamientos, los modos de desplazamiento y la frecuencia de los desplazamientos. En cuanto a los desniveles, aunque las distancias entre los edificios no son grandes, éstas hacen que se distorsione la percepción de las distancias y parezca que los desplazamientos de subida sean más largos que los que se hacen en llano o bajada. En cuanto a la costumbre y frecuencia de los

desplazamientos, la percepción de las distancias es mayor si la frecuencia de los mismos también lo es.

### **Estudio Pendientes**

Los resultados obtenidos a partir de los mapas y gráficos permiten concluir que CIEMAT tiene un relieve acusado en pendiente. Si la bicicleta supone ser un modo de transporte eficaz y cómodo que permite ahorrar tiempo y energía, el factor de las pendientes influye mucho a la hora de optar o no por un sistema de bicicletas eléctricas. En el caso de que sean bicicletas con pedaleo asistido, el esfuerzo realizado en las subidas se reduce y la velocidad se aumenta en comparación con otro modo de desplazamiento como las bicicletas tradicionales. Por tanto, en el caso de CIEMAT, el uso de las bicicletas eléctricas se justifica por la existencia de desniveles acusados que representa un obstáculo importante en cuanto al uso de bicicletas convencionales.

### **Medios de transporte de acceso al CIEMAT**

Según las dos encuestas realizadas:

- Entre el 50% y el 57% de los empleados llegan en coche.
- Entre el 32% y 37% utilizan el transporte público (incluido el coche compartido y la combinación de vehículo privado y transporte público), el 5% se desplaza a pie y el 4%-6% lo hacen en bicicleta.
- Entre el 38% y 43% del total de personas que acceden en coche a CIEMAT son empleados de entre 31 y 42 años.
- Entre el 88% y 93% del personal que accede en coche a CIEMAT se desplaza internamente a pie, y el 15% lleva carga.

Generalmente, los empleados que llegan en coche muestran un interés bastante alto respecto al sistema bicicleta eléctrica. Los datos de las encuestas muestran los siguientes resultados:

- El 80% de los empleados afirmaron que establecer un sistema de movilidad con bicicleta eléctrica dentro del CIEMAT les parece útil o muy útil.

- El 56% de las personas que llegan en coche usarían un sistema de movilidad con bicicleta eléctrica regularmente y el 83% creen que la gente lo usaría.
- El 56% de los empleados contestaron que un sistema de movilidad con bicicleta eléctrica dentro del CIEMAT aumentaría la eficiencia del trabajo de los empleados.
- El 80% afirma que aumentaría la comodidad de los desplazamientos.
- El 81% de los empleados que acceden en coche, consideran positiva la imagen transmitida por la bicicleta y el 72% estaría dispuesto a participar en un estudio sobre de movilidad con bicicleta eléctrica

#### **Las conclusiones obtenidas de las entrevistas realizadas.**

- La comodidad de las bicicletas eléctricas representa un aspecto fundamental a la hora de establecer un sistema bicicletas eléctricas dentro de un centro laboral. Después de más de tres meses de prueba, los participantes en general no notaron problemas graves de funcionamiento de las bicicletas eléctricas, tanto en el aspecto mecánico como eléctrico. El esfuerzo inicial para arrancar la bicicleta eléctrica en una cuesta es importante, sobre todo porque una bicicleta eléctrica pesa mucho más que una bicicleta tradicional.
- Sobre el sistema de recarga, la mayor parte de los participantes indicaron que la localización de la estación de recarga, al lado de la entrada de la parte oeste del CIEMAT, estaba demasiado lejos de su lugar de trabajo. Para los participantes, resultó incómodo ir hasta este sitio para coger la bicicleta eléctrica todos los días y hubieran preferido una estación más cercana o al menos más céntrica.
- Todos los participantes están de acuerdo en que, en comparación con el modo de desplazamiento que solían utilizar, la bicicleta eléctrica permite ahorrar tiempo, energía física y es más cómodo para los desplazamientos. Además otros precisaron que cuando llevan carga (entre 5 y 15 kilos es mucho mejor llevarla en bicicleta eléctrica que a pie.

- Todos los participantes respondieron que si hubiera un sistema de bicicletas eléctricas dentro del CIEMAT lo utilizarían diariamente. La mayor parte de ellos afirmaron que si hubiera un sistema de bicicletas tradicionales lo usarían igualmente, aunque para el caso de la irregularidad de la orografía del CIEMAT casi todos opinaron que es mejor con pedaleo asistido.
- En su mayoría, los participantes no utilizarían una bicicleta eléctrica para desplazarse desde su casa hasta el CIEMAT. Consideran que viven demasiado lejos, y les puede resultar peligroso debido a las condiciones del tráfico habitual y por tanto les resultaría poco práctico. Muchos de ellos comentaron que por las mañanas antes de llegar al CIEMAT dejan a sus hijos en el colegio y por ello no podrían coger una bicicleta eléctrica. Algunos resaltaron que tampoco disponen de espacio físico en su casa para guardar la bicicleta eléctrica.
- A la cuestión de cómo organizarían un sistema de bicicletas eléctricas dentro del CIEMAT muchos indicaron que se podría poner varias estaciones ubicadas en sitios muy céntricos. También se podría organizar de manera compartida entre los que tienen necesidades de desplazamientos diarios y que los que la piden ocasionalmente. Consideran que sería importante establecer un sistema más personalizado para los empleados que tienen numerosos desplazamientos.
- En cuanto al uso de una posible estación de bicicletas eléctricas desde Moncloa, la mayoría de los participantes respondieron que sería una buena idea.
- Sobre el aspecto de organización del estudio, los participantes comentaron que globalmente el sistema está bien organizado, y que sólo cambiarían la ubicación de la estación de recarga. Algunos de los participantes comentaron que la imagen de la bicicleta en general no da prestigio social. Sin embargo, varias personas confirmaron que la bicicleta eléctrica da mucho más prestigio que una bicicleta tradicional. Algunos participantes notaron que hay un interés y mucha curiosidad por parte de la comunidad del CIEMAT respecto a las bicicletas eléctricas.

A modo de resumen se puede decir:

- Sobre los aspectos técnicos, en general, los participantes no han detectado problemas importantes a nivel mecánico o eléctrico. Varios empleados han indicado la falta de potencia de su bicicleta eléctrica a la hora de subir cuestas. Todos los empleados se han quejado de la lejanía de la estación de recarga.
- Sobre los aspectos sociológicos, han mostrado un gran interés por el sistema y se ha subrayado el ahorro de tiempo y el aumento de la comodidad en los desplazamientos. Para los que suelen llevar carga el uso de una bicicleta eléctrica permitiría facilitar los desplazamientos y mejoraría las condiciones de trabajo de estos empleados.
- La organización de un sistema de bicicletas eléctricas de manera compartida, unipersonal o unipersonal con solicitud, se tiene que decidir según las necesidades de desplazamientos de cada empleado.
- En un centro laboral como el CIEMAT, con muchos empleados que se dedican al mantenimiento del centro, un sistema interno de bicicletas eléctricas dedicado a esos empleados aumentaría la comodidad de sus desplazamientos, les permitiría ahorrar tiempo y podría contribuir en aumentar la productividad de su trabajo.

### ***5.2.2. Parámetros Sistema Movilidad Commuter***

El trabajo realizado para establecer las condiciones de entorno iniciales del contexto de movilidad Commuter, sumando a las experiencias y resultados de otros estudios, con el objetivo del estudio de contaminación atmosférica, distancias, trayectos y características de la movilidad en bicicleta en la ciudad de Madrid ha permitido obtener conclusiones importantes para el estudio movilidad con bicicleta eléctrica para los desplazamientos de casa al trabajo de los trabajadores de CIEMAT:

- La bicicleta tradicional o bicicleta eléctrica resulta un medio dinamizador para el medio de transporte, aportando una importante reducción en las emisiones contaminantes, ruidos y espacio ocupado en el cómputo total de todos los desplazamientos en una ciudad.
- Aun teniendo un viario adecuado, el trayecto más eficiente y más cómodo para realizar a diario por un trabajador, es el que no excede en una de media hora de tiempo en realizarlo.
- Se llega a la conclusión que a día de hoy Madrid no es una ciudad que esté completamente preparada para los desplazamientos de los usuarios de su domicilio al trabajo, aunque en estos últimos años se identifican planes directores de movilidad para cambiar esta tendencia en un futuro.

La aportación de conclusiones a lo largo del estudio y la suma de los datos cruzados recogidos, han permitido sacar por un lado conclusiones previas reales y objetivas sobre el estudio de un sistema de movilidad Commuter en bicicleta eléctrica, para los trabajadores de CIEMAT y por otro lado la aplicación durante la duración del proyecto de un sistema de movilidad interno en el centro de trabajo resultado de los datos empíricos obtenidos en el inicio del proyecto.

### **Estudio de tiempos, distancias y pendientes en el marco Commuter**

Los resultados obtenidos en el apartado de estudios, diseño y desarrollo han permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Invirtiendo una media hora de desplazamiento en bicicleta eléctrica se puede recorrer una distancia de aproximadamente 7,5 Km, a un ritmo suave de 15 Km/h.
- El desplazamiento Commuter en bicicleta tradicional está fuertemente influenciado por el perfil del nivel de cota del recorrido total con sus máximas pendientes. Sin embargo, al realizarlos en bicicleta eléctrica, disminuye notoriamente los tiempos y la tracción humana aplicada en el desplazamiento.

## Resultados de las entrevistas

Las entrevistas realizadas a los participantes, han permitido constatar los siguientes aspectos:

- Las bicicletas eléctricas suelen tener un tamaño y peso superior al de una bicicleta normal lo que imposibilita o dificulta una serie de actuaciones como subirla al domicilio para guardarla por las noches, desplazarse con ella sin ayuda del motor por fallo del sistema energético, etc. que definitivamente marcan la percepción de poco maniobrable a los usuarios.
- Sensación de inestabilidad en las curvas debido a la altura del centro de gravedad y cuadros más alargados de algunas las bicicletas eléctricas.
- Dificultades en los trayectos por los viales habilitados para las bicis debido a continuas invasiones de los peatones, servicios de limpieza y coches aparcados, etc., mal estado del firme, y en las vías compartidas escasa separación con la carretera, poca sensibilidad al ciclista de la mayoría de los conductores de vehículos motorizados, etc.

A modo de resumen podemos decir:

- Sobre los aspectos técnicos, podemos considerar como aspectos negativos que los modelos de bicicleta eléctrica probados, aun siendo eficientes, tiene un alto grado de incertidumbre respecto a la fiabilidad de sus módulos energéticos, debido a la falta de un sistema que nos proporcione un dato fiable de autonomía, fallos en los controladores, conexiones y cables susceptibles de desconexiones y fallos, etc. Y como aspectos positivos, que, funcionando de forma correcta, las bicicletas eléctricas ofrecen a los usuarios la capacidad de recorrer más distancia en menos tiempo y con menos esfuerzo.
- Sobre los aspectos sociológicos, los usuarios ven el sistema eficiente pero no fiable debido a los fallos esporádicos del sistema energético de las bicicletas eléctricas que les obliga en estas situaciones a realizar el trayecto que les queda en modo bicicleta tradicional.

## ***6. Movilidad Última Milla con Energías Renovables***

La estrategia que se lleva a cabo en este estudio se basa en recopilar todos los resultados obtenidos de las anteriores fases del proyecto y convergerlos en el planteamiento y el diseño de una solución de movilidad con bicicletas eléctricas de pedaleo asistido que se integre en el contexto del transporte público, innovando en un sistema acorde a las necesidades de movilidad que en conjunto sea un sistema compacto y escalable y con el requisito que se acople a un sistema de generación renovable que permita abastecer energéticamente de forma descentralizada de la red eléctrica al nuevo sistema de movilidad de bicicletas eléctricas de pedaleo asistido. Se pretende proporcionar un análisis detallado de este caso, sus limitaciones y los modelos de estimación de la generación fotovoltaica y el consumo energético total del sistema de movilidad.

### ***6.1. Parámetros Movilidad-Social***

Este nuevo caso de estudio se realimenta de la experiencia obtenida en los prototipos del proyecto [17] como las encuestas y entrevistas realizadas a los empleados del CIEMAT y de las opiniones de los usuarios a través del foro y de entrevistas personales que han ayudado a establecer los requisitos sociales necesarios. También se estudió los resultados de otros proyectos como el de UNIBICI<sup>31</sup>, embarcado en la movilidad en bicicleta para las diferentes escuelas de en la Ciudad Universitaria, donde convive CIEMAT.

---

<sup>31</sup> <https://transyt.upm.es/proyectos/unibici/>

Para poder obtener una percepción lo más objetiva posible del contexto de movilidad, es necesario localizar las condiciones invariantes, como el estudio de tiempos y distancias que realimentarán al resto de procesos. Además, basándose en los resultados de las diversas encuestas realizadas en el centro de trabajo se podrá obtener una visión general que los empleados tienen acerca de la posibilidad de realizar de forma habitual trayectos entre un nodo de transporte público y un centro de trabajo, situados ambos a una distancia no mayor de 2 km. En base a estos resultados, se establecerá los cambios de estrategia aplicando las tácticas necesarias para garantizar un servicio continuo y eficaz, acorde con las necesidades de los usuarios.

La TRANSyT en el proyecto UNIBICI realizó un total de 118.000 encuestas entre las personas que habitualmente circulan por Ciudad Universitaria, entre ellos participaron un número bastante representativo de los trabajadores de CIEMAT, pudiéndose utilizar los resultados como referencia para los estudios realizados sobre las encuestas realizadas en el proyecto.

Utilizando algunos aspectos base de la encuesta y otros aspectos estudiados por parte del proyecto, se pretende el estudio de la siguiente información:

- Edad, género y prácticas habituales en cuanto al deporte.
- Visión general del uso de la bicicleta, donde se pretende obtener la valoración que hacen los usuarios del uso de las bicicletas convencionales en base a la motivación que presentan y a las barreras que encuentran para su uso.
- Modo de acceso al trabajo, que permitirá saber el medio de transporte predominante que constituirá un factor importante de cara a la implantación de un sistema de movilidad bicicletas eléctricas.
- Valoración de la bicicleta como alternativa al uso de vehículos motorizados, permitiendo saber la opinión real de los usuarios que es muy importante a la hora del éxito en la implantación de un sistema de movilidad.

## Desarrollo de las encuestas

La realización de estas encuestas ha permitido el análisis de una serie de factores que constituyen una pieza fundamental para el estudio del sistema de movilidad que se pretende realizar.

**Modo de acceso al centro de Trabajo:** El modo según el cual, el personal de CIEMAT accede al centro laboral es el siguiente:

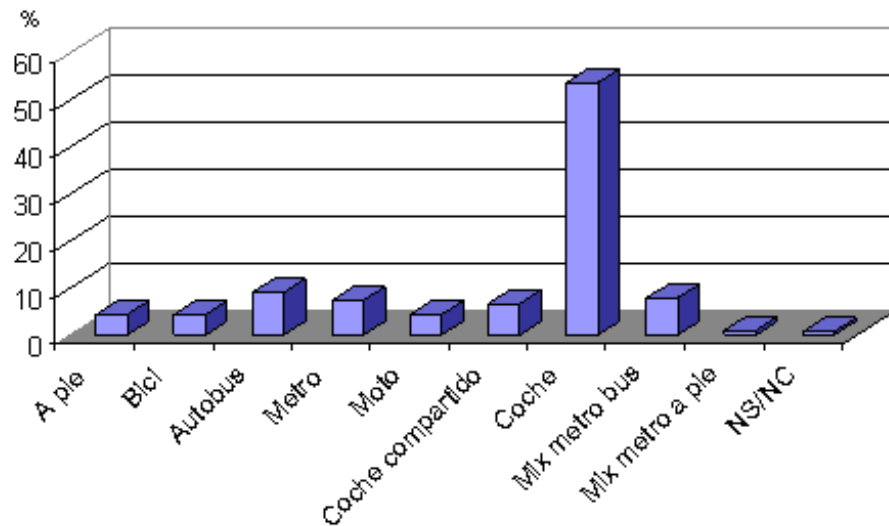


Figura 100. Modo de acceso del personal al centro de trabajo

### Características personales de los entrevistados:

- Edad: el 20.22% tiene edades comprendidas entre los 18 y los 30 años, el 35.11% entre 31 y 42 años y el 44.15% entre 43 y 65 años.
- Sexo: el 6.17% son hombres y el 38.83% son mujeres.
- Práctica de algún deporte: el 43.33 % lo hace esporádicamente, el 41.11% lo hace habitualmente, el 13.89% nunca y el 1.67% NS/NC.
- Sabe montar en bicicleta: el 96.67% de los encuestados sí sabe, mientras que el 1.67% no. El 1.67% NS/NC.
- Dispone de bicicleta eléctrica: el 1.67% sí tiene, mientras que el 98.33% no.

Tabla 15. Modo de acceso del personal al centro de trabajo CIEMAT

MEDIO DE ACCESO	PORCENTAJE %
A pie	4,44
Bici	4,44
Autobús	8,89
Metro	7,22
Moto	4,44
Coche compartido	6,67
Coche	53,33
Mix metro bus	7,78
Mix metro a pie	1,11
NS/NC	0,56

**Valoración de la bicicleta como alternativa a los vehículos monitorizados:**

El 10,6% de los encuestados consideran que la bicicleta podría ser una buena alternativa, mientras que el 83,3% no lo considera así (el 6,11% NS/NC). Aunque los encuestados no creen que pueda ser una alternativa viable, es importante señalar que cerca de un 40% del personal de CIEMAT accede al centro a través de medios alternativos como el metro, el autobús o a pie. Teniendo en cuenta esto, se ha encuestado sobre la posibilidad del uso de bicicleta eléctrica desde el metro de Moncloa hasta el centro laboral: el 74,5% de los encuestados opinan que sí usarían las bicicletas eléctricas desde el metro hasta el centro de trabajo, mientras que sólo el 12,8% considera que no lo haría (el 12,77% NS/NC).

### **Barreras para el uso de bicicletas:**

- Factores importantes: la comodidad de otros medios de transportes.
- Factores algo importantes: la peligrosidad.
- Factores poco importantes: las distancias largas, las instalaciones complementarias, el miedo al robo de la bicicleta, la condición física insuficiente.
- Factores muy poco importantes: la orografía del terreno.
- Factores de motivación para el uso de la bicicleta:
  - Muy importante: no contamina, es un modo de transporte eficiente
  - Importante: es saludable y mantiene la forma física, no hay restricción de horarios y ahorra gastos.
  - Algo importante: es más agradable que otros vehículos

#### ***6.1.1. Operativa de los Sistemas de Movilidad***

Antes de comenzar con el diseño y desarrollo del estudio del nuevo sistema de movilidad integrado con el transporte público, es necesario analizar la operativa de los distintos sistemas de préstamo de bicicletas que conviven en los entornos urbanos para poder establecer los requisitos necesarios para el estudio del nuevo sistema de movilidad de bicicletas eléctricas.

Se analiza el tipo de préstamos de bicicletas existentes en el mercado, estudiando las distintas características que presentan para saber cuál es más favorable para las condiciones de movilidad en el marco planteado. Además, se pretende realizar un diagnóstico de movilidad a través de la valoración de las posibilidades reales que presenta el sistema de movilidad última milla con energías renovables en comparación con otros sistemas de movilidad, mediante parámetros como los flujos de movilidad, distancia del trayecto, etc.

Los sistemas de movilidad de bicicletas se basan en un sistema de préstamo de las bicicletas y han proliferado notoriamente en España, ofreciendo un servicio de movilidad práctico, rápido y pensado para el uso cotidiano. Cabe destacar dos tipos modalidades de préstamo: los sistemas de bicicletas públicas y los parques comunitarios de bicicletas. Ambas modalidades permiten el préstamo de bicicletas en dos formatos diferentes: los sistemas manuales y sistemas automáticos, cuya implantación dependerá de una serie de factores condicionantes.

**Sistemas de atención personal:** implica la identificación manual del usuario y la presencia de un empleado que se encargue de la gestión del préstamo. Este sistema es ideal para las siguientes situaciones

Tabla 16. Características principales del sistema de atención personal

<b>Localización</b>	Ciudades pequeñas y medianas. Este tipo de sistemas son óptimos para tener entre 2 y 12 puntos de préstamo.
<b>Tipología de usuarios</b>	Usuarios residentes y visitantes (en este caso no suele haber registro, aunque sí fianza; lo que siempre hay es una identificación del usuario).
<b>Uso</b>	Cotidiano, turístico y de ocio.
<b>Inversión</b>	Baja, sube sensiblemente cuando se precisa registro informatizado.
<b>Gestión</b>	Precisa coordinación con los centros colaboradores y el personal de los mismos.

**Sistemas automáticos:** No es necesaria la presencia de un empleado, ya que, o bien la bicicleta, o bien el estacionamiento de la bicicleta, dispone de un sistema

automático de tarjeta, código de usuario o teléfono móvil, que permite el ahorro de recursos en la gestión. Además, este sistema automático, le proporciona una mayor libertad al usuario tanto a la hora de coger la bicicleta como de dejarla, ya que podrá hacerlo en cualquier lugar en el caso de que la bicicleta incorpore un cerrojo automático o en los lugares establecido para el aparcamiento de las bicicletas donde se dispone del anclaje de cierre. Este sistema es ideal en las siguientes condiciones:

Tabla 17. Características principales de los sistemas automáticos

<b>Localización</b>	Ciudades grandes o medianas con una demanda elevada
<b>Tipología de usuarios</b>	Principalmente residentes y visitantes.
<b>Uso</b>	Sobre todo cotidiano, aunque puede adaptarse para el uso de ocio o turismo.
<b>Inversión</b>	Alta, debido al coste tecnológico.
<b>Gestión</b>	Resulta más sencilla que los sistemas manuales, ya que hay que invertir menos en coordinación del personal, aunque sigue habiendo una necesidad de coordinación logística.

Además de los sistemas públicos de bicicletas, hay que señalar la presencia de otro tipo de servicio, que no se puede incluir como sistema público salvo que esté financiado con recursos públicos. Se trata de los parques comunitarios de bicicletas, que han sido donadas o cedidas y que se pueden gestionar gracias a la colaboración de voluntarios. Este sistema es ideal para las siguientes condiciones

Tabla 18. Características de los parques comunitarios de bicicletas

<b>Localización</b>	Ciudades pequeñas, barrios, comunidades de vecinos, etc.
<b>Tipología de usuarios</b>	Usuarios residentes, recomendado en asociaciones o comunidades ya constituidas o bien en comunidades reducidas, donde se dan unos lazos de pertenencia que generan responsabilidad compartida. Así, se garantiza que los usuarios van a cuidar las bicicletas.
<b>Uso</b>	Cotidiano y den fin de semana, generalmente urbano.
<b>Inversión</b>	De muy baja a media-alta según el nivel de informatización de la base de datos y la posibilidad de automatizar la provisión de las bicicletas.
<b>Gestión</b>	Precisa una elevada coordinación del personal, ya que hay que organizar los turnos y horarios del voluntariado.

Analizando los distintos sistemas existentes en el mercado, se ha optado por uno que pueda responder a las expectativas planteadas por los usuarios y que cubra las necesidades para su implantación y operativa.

Este sistema se sustenta en una modalidad de préstamo de bicicletas basado en la automatización, de forma que el usuario sea lo más autónomo posible sin depender en exceso de la labor de los operarios encargados de la gestión del sistema.

Gracias a las especificaciones de los posibles usuarios y demás factores influyentes, se ha podido diseñar un sistema de movilidad ideal para las siguientes situaciones:

Tabla 19. Sistema de movilidad Última Milla

<b>Localización</b>	Zonas de afluencia masiva de personas desde o hacia un medio de transporte público.
<b>Tipología de usuarios</b>	Usuarios que se desplazan a su centro de trabajo.
<b>Uso</b>	Cotidiano en jornada laboral, principalmente en territorio urbano.
<b>Inversión</b>	Media debido al sistema de gestión informatización de la base de datos, a la automatización del sistema de préstamo de las bicicletas eléctricas y a la compra del material necesario como bicicletas eléctricas, remolques, sistemas de suministro eléctrico, etc.
<b>Gestión</b>	Resulta más sencilla que los sistemas manuales, ya que hay que invertir menos en coordinación del personal, aunque sigue habiendo una necesidad de coordinación logística.

## ***6.2. Modelo y predicción del consumo energético del sistema***

Como estudio del caso, se analiza la viabilidad de un sistema de movilidad que cumpla con los requisitos expuestos, por ello se plantea el sistema de movilidad con bicicletas eléctricas compartidas entre un nodo de transporte público y un centro de trabajo.

Con la experiencia adquirida de los estudios realizados, se decide estudiar el comportamiento de este sistema entre el CIEMAT, un centro de trabajo, y la estación de metro de la Ciudad Universitaria, un nodo de transporte público.

El Campus de Moncloa está situado en la zona oeste de Madrid, ocupa una superficie de 2 kilómetros cuadrados y está comunicado con el resto de la red de

transporte público de la ciudad mediante una única estación de metro denominada Ciudad Universitaria (Línea 6)<sup>32</sup>, como se muestra en la Figura 101.

La distancia entre el centro de trabajo CIEMAT y la estación de metro de Ciudad Universitaria es de 1,1 km en línea recta y ligeramente inclinada.

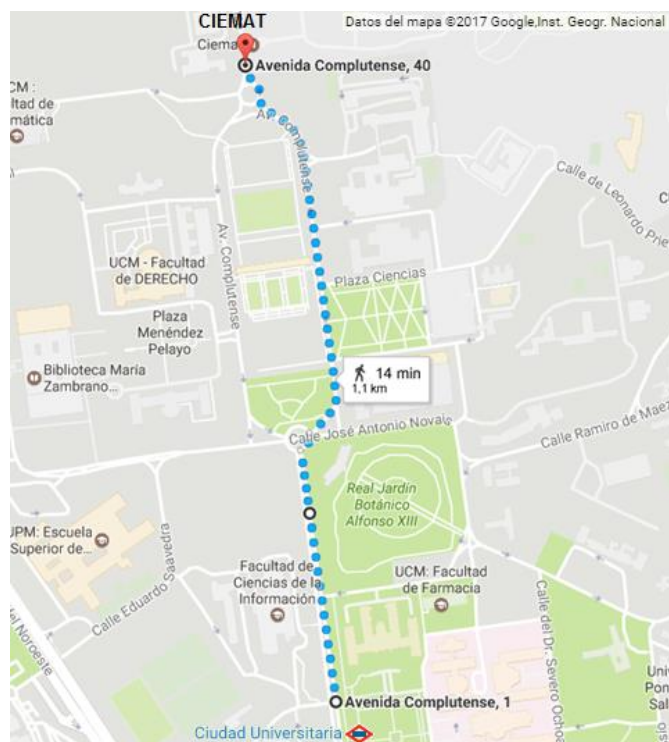


Figura 101. Trayecto nuevo sistema de movilidad

La mayoría de los empleados del CIEMAT tienen una jornada laboral aproximada de 40 horas semanales, entre las 8:00 y las 17:00 horas, de lunes a viernes, con un horario flexible de entrada y salida. De las diferentes encuestas realizadas en el proyecto [17] se señaló que las horas punta de entrada y salida del centro laboral son entre las 7:00 y las 10:00 de la mañana y por la tarde de las 16:00 a las 19:00, y alrededor del 8% de la plantilla (95 personas) estaría interesado en participar en el nuevo sistema de movilidad propuesto, siendo el número de empleados que se va utilizar para el estudio.

<sup>32</sup> <http://www.campusmoncloa.es/>

Analizando el horario de pasos de trenes por la estación de Ciudad Universitaria de la Línea 6 metro, el intervalo entre dos trenes consecutivos por la estación en el horario de mañana de 7:00 a 10:00 es de 4 minutos. Teniendo en cuenta la información sobre la hora de llegada de los empleados del CIEMAT, extraídos de las encuestas, estos llegan al centro laboral según la distribución de densidad de probabilidad mostrada en la Figura 102, que se asemeja a una distribución de Poisson y coincide con el comportamiento de movilidad real observado.

La mayoría de los empleados llegan al trabajo temprano (de 7:08 a 8:20) y luego hay goteo de empelados que llegan más tarde hasta unos minutos antes de las 10:00 de la mañana. Como los empleados que entran a una determinada tienen que cumplir con el horario establecido por día, al final de la jornada laboral saldrán de forma similar que lo han hecho por la mañana, por ello se utiliza una función de densidad de probabilidad similar para los viajes de regreso por la tarde.

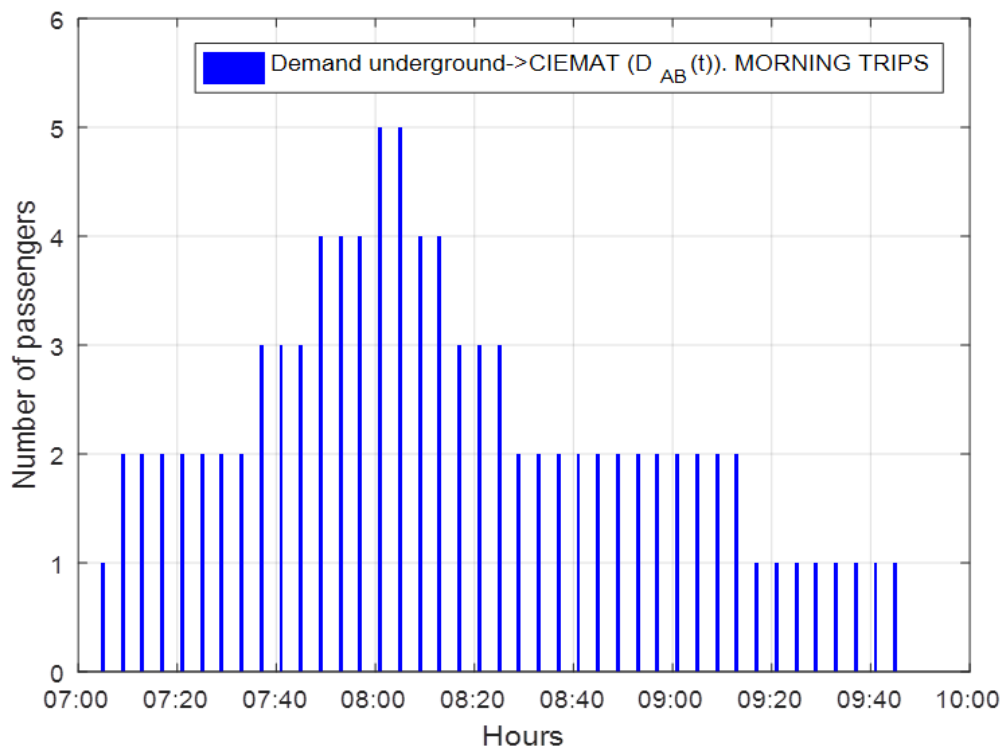


Figura 102. Distribución de llegadas del personal del CIEMAT

Como ya se ha mencionado, la distancia entre la estación de metro y el CIEMAT es de 1,1 km. En los dos puntos del trayecto se ha incorporado dos parkings

de 25 bicicletas eléctricas cada uno, tipo como los de BiciMAD, tal y como el que se muestra en la siguiente figura.



Figura 103. Parking de 25 bicicletas eléctricas BiciMAD

Inicialmente las bicicletas eléctricas estarán aparcadas en el parking de la boca de metro de Ciudad Universitaria. Durante los viajes de mañana, los primeros empleados en llegar cogerán una bicicleta eléctrica en el parking de la boca de metro y realizarán el recorrido de los 1,1 km hasta el parking del centro de trabajo CIEMAT que al principio de la mañana estará vacío de bicicletas eléctricas.

Suponiendo una velocidad media de 15-20 km/hora por bicicleta eléctrica [95], añadiéndole el tiempo medio para desbloquear la bicicleta eléctrica en un estacionamiento, montar en la bici , realizar el trayecto y finalmente volver a bloquear la bicicleta eléctrica en el otro parking el tiempo total invertido es de unos 6 minutos.

En cuanto en el parking de llegada de las bicicletas eléctricas haya bicicletas suficientes para llenar la caja de transporte de la Pickup EV (eléctrica), el operario que lleva la Pickup EV ira desbloqueando y subiendo bicicletas a la Pickup EV hasta llenar la caja de la misma y posteriormente transportará las bicicletas hasta el otro parking, bajándolas y bloqueándolas en los estacionamientos el parking vacío y de ese modo reponiendo bicicletas en donde hace falta.

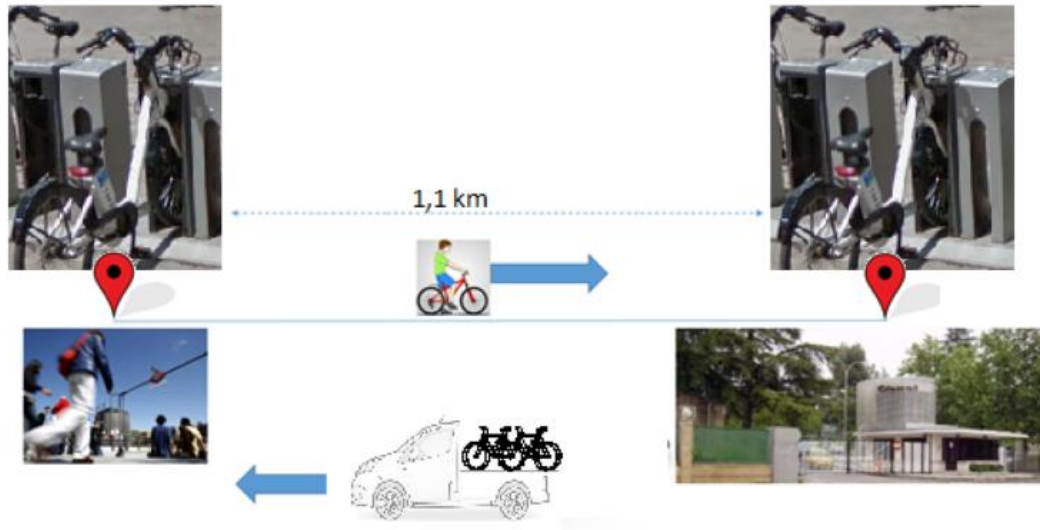


Figura 104. Trayecto de la Pickup EV para reponer bicicletas eléctricas

El tiempo estimado para esta operación de traslado e intercambio es de unos 3,75 minutos Figura 104. Se establece una duración de 4 minutos para la operación de trasladar, incluida la carga y descarga de bicicletas eléctricas, por parte del Pickup EV.

En una hora la Pickup EV puede realizar  $60 \text{ minutos} / 4 \text{ minutos}$  de la operativa = 15 viajes reponiendo las bicicletas eléctricas entre los dos parkings. Este es el factor que limita los desplazamientos posibles de los empleados por hora posibles del sistema de movilidad planteado.

Otro factor a estudiar es la demanda de energía de todo el sistema. El motor eléctrico utilizado en las bicicletas eléctricas es un motor AC síncrono sin escobillas de 250 W integrado en el buje de la rueda trasera. Las principales especificaciones eléctricas de la bicicleta eléctrica se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Especificaciones de bicicletas eléctricas

Tecnología Batería	Voltaje Nominal	Capacidad Nominal	Peso	Motor	Potencia Nominal	Peso Bici
Li-ion polímero	36 V	360 Wh	4,6 kg	Brushless	250 W	20,4 kg

Para estimar el consumo medio de las bicicletas eléctricas se realizaron dos pruebas diferentes. En primer lugar, diferentes usuarios recorrieron durante 3 meses una bicicleta eléctrica por la sede del CIEMAT, midiendo la distancia recorrida, la velocidad media del vehículo, el tiempo de recorrido y la energía consumida. A partir de estos datos se evaluó el consumo de energía por kilómetro. En la Tabla 21 resume esta información.

Tabla 21. Consumos medios datos experimentales [17]

Distancia	Tiempo	Velocidad Media	Energía Consumida	Consumo medio
1.450 km	108,5 h	13,6 km/h	11,62 kWh	8,01 Wh/km

También se realizaron varios trayectos con bicicletas eléctricas de pedaleo asistido diferentes, los datos que se representan en la siguiente Tabla 22 se muestran los resultados energéticos de tres bicicletas eléctricas: BIPA2 con motor DC, BIPA7 y BIPA10 ambas con motor AC. Cada bicicleta eléctrica en un mismo recorrido de 460 m de trayecto realizado en el CIEMAT, y por dos usuarios diferentes: uno de 75 Kg U75 y otro usuario de 122 Kg U122.

Tabla 22. Recorridos se realizados por U75 y U122

	U122		U75	
	Wh	Ah	Wh	Ah
BIPA2	5,77	0,14	4,1	0,12
BIPA7	4,6	0,12	2,2	0,05
BIPA10	4,3	0,14	2,3	0,06

Como se puede observar en la tabla, los consumos varían para el mismo recorrido con diferentes pesos de usuario. Además, se aprecia una pequeña variación en el porcentaje en función de la tecnología utilizada de motor DC o AC.

Con una simple regla de tres obtenemos que, si en 460 m se ha consumido 5 Wh, si tenemos una media de energía acumulada en la batería de 250 Wh, podríamos realizar un recorrido de 23 Km en el caso del U122, y en el caso del U75 con una media de gasto de 3 Wh podría realizar con la misma energía un recorrido de 38 Km.

En las siguientes figuras se muestra los datos recogidos en el recorrido de la BIPA7 en los dos casos:

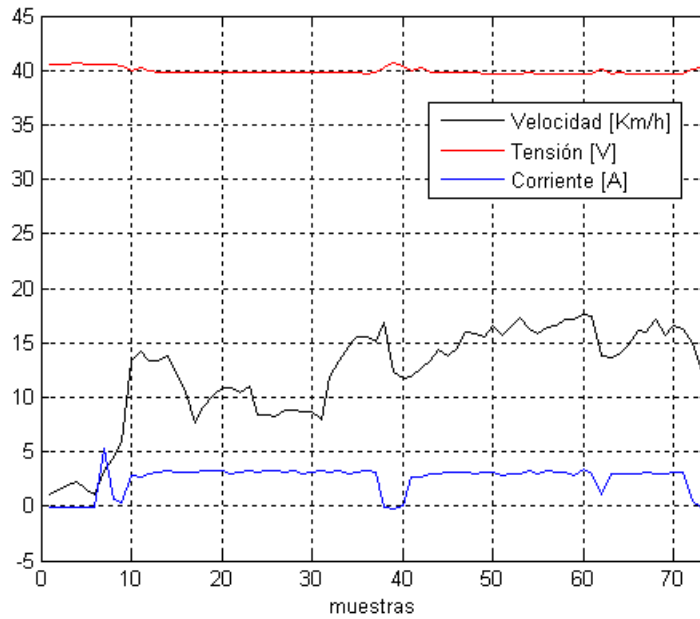


Figura 105. Grafica de parámetros energéticos de U75 en la BIPA7

En la Figura 105, se presentan los datos recogidos por la “mochila”, en la página 91, de la BIPA7 con el usuario de 75Kg, y como se puede apreciar, la tensión del sistema no varía y se mantiene prácticamente estable en los 40 V. Respecto a la corriente se aprecian los consumos de alrededor 2,5 A como máximo.

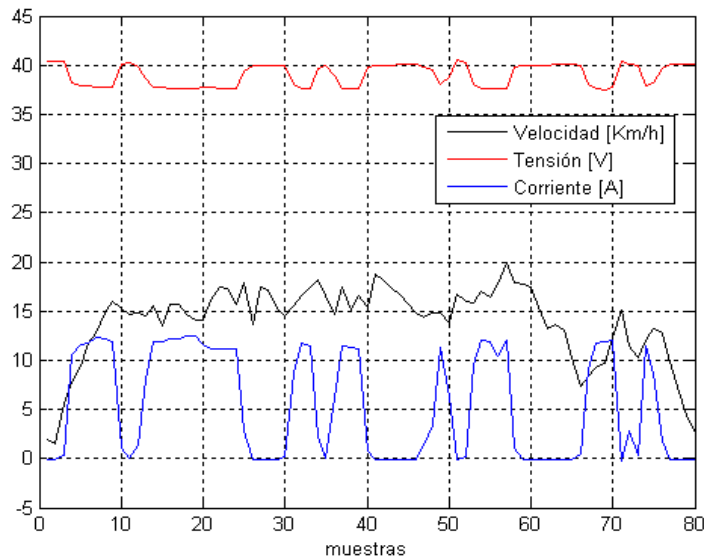


Figura 106. Grafica de parámetros energéticos de U122 en la BIPA 7

En la Figura 106, se presentan los datos recogidos por la “mochila” de la BIPA7 con el usuario de 122 Kg, y como se puede apreciar, la tensión del sistema

varía alrededor de -2,5 V respecto los 40 V en consonancia con el consumo de corriente que lo hace de los 12 A a 0 A. Esto es debido a que se está obligando a trabajar al controlador de la BIPA7 al máximo de la capacidad de entrega de energía de la batería de la bicicleta eléctrica por lo que este tipo de uso podría acelerar la degradación de la batería.

Se realizó una segunda prueba en el recorrido real entre la estación de metro y la sede del CIEMAT. Con los mismos usuarios de la prueba anterior U122 con 122 kg frente a U75 con 75 kg, Recorrieron la ruta al mismo tiempo, montando dos bicicletas eléctricas con las mismas características

En la Tabla 23 muestra el consumo de energía en esta situación. A partir de estos datos se derivaron el consumo de energía por kilómetro y el consumo de energía por kilómetro y kilogramo. Teniendo en cuenta estos resultados, en este trabajo se utilizó un valor de consumo medio de 7,7 Wh/km.

Tabla 23. Consumo eléctrico de dos usuarios en una misma ruta

	Distancia	Tiempo	Velocidad media
	1,1 km	5 min	15 km/h
Usuario	Energía consumida	Energía consumida/ km	Energía consumida / km/kg
U122	12,15 Wh	9,34 Wh/km	0,076 Wh/km/kg
U75	8,9 Wh	6,6 Wh/km	0,088 Wh/km/kg

La Pickup EV, que es el vehículo eléctrico que traslada las bicicletas eléctricas, es la Pickup Nissan<sup>33</sup> e-NV200 con el mismo sistema de propulsión eléctrica que el Nissan Leaf. Este vehículo es 100% eléctrico, propulsado por un motor síncrono de AC de 80 kW de potencia y un Par motor de 280 Nm, con una

---

<sup>33</sup> <https://www.nissan.co.uk>

batería de Litio-Ión de capacidad de 24 kWh. Su autonomía es de 170 km según el ciclo de conducción europeo (NEDC), lo que corresponde a 0,165 kWh/km. Según diferentes pruebas de campo reales [96], el consumo medio real de este vehículo fue de 0,18 kWh/km.

### ***6.3. Estudio de la recarga con energía fotovoltaica***

La integración de sistemas fotovoltaicos en edificios BIPV, como se muestra en la Figura 107, está demostrando ser una solución cada vez más respaldada y este es el segmento de mercado con mayor potencial de crecimiento en la industria fotovoltaica [97], reemplazando una cantidad significativa de la electricidad que de otro modo se generaría quemando combustibles fósiles [94], BIPV ganará cada vez más atención en el mercado de eficiencia energética de edificios en el siglo XXI [16].



Figura 107. Edificio 42, antes y después BIPV ©CIEMAT

## Irradiación solar en el CIEMAT

El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT es una institución pública de investigación ubicada al final del Campus de Moncloa en Madrid (España) y que ocupa 71.000 m<sup>2</sup>. Está integrado en el Campus Universitario que comparte con otros centros educativos y de investigación como la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad Politécnica de Madrid y algunas otras instituciones asociadas del Campus de Moncloa. En la Figura 108 se muestra la potencial global de irradiación y la energía fotovoltaica en España, en módulos fotovoltaicos montados horizontalmente.

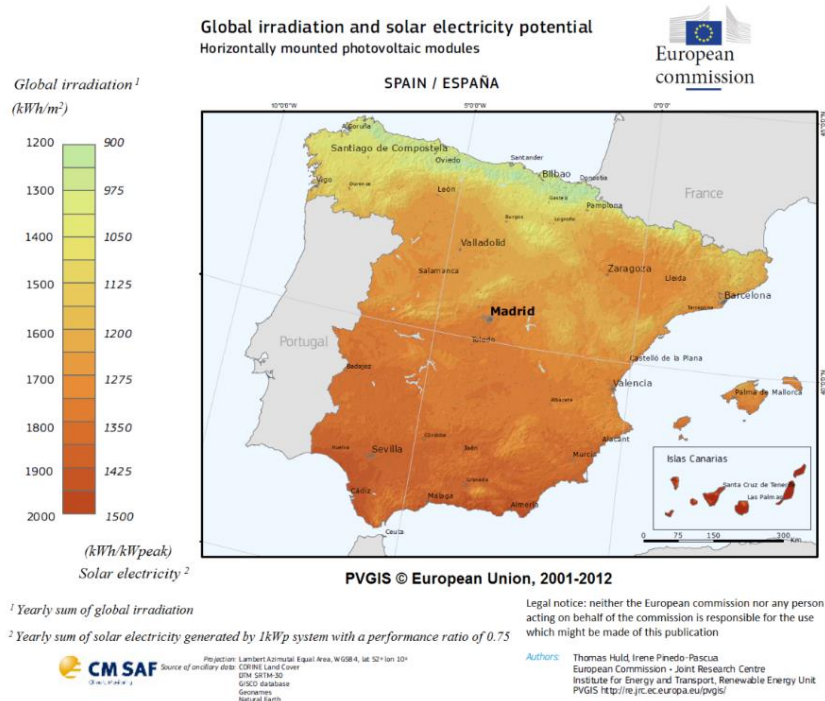


Figura 108. Potencial fotovoltaico en España PVGIS<sup>34</sup>

Para estimar la generación fotovoltaica, se utiliza la herramienta web online PVGIS.

<sup>34</sup> Joint Reseach Center, EU, "Photovoltaic Geographical Information System Interactive Maps"; [Oct. 9, 2016], <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>

El centro de investigación del CIEMAT están distribuidos en más de 70 edificios diferentes. Entre ellos, el edificio 42 del CIEMAT, sede de la División de Energías Renovables, instaló una potencia punta de 27,2 kWp de módulos fotovoltaicos PV en las fachadas BIPV, ocupando una superficie total de 176 m<sup>2</sup> [97]. Los módulos se integran en las zonas superiores de las fachadas Este, Sur y Oeste con ángulos de inclinación de 90°. Hay 42 módulos de silicio cristalino instalados en la fachada Este 13,7 kWp, 28 módulos instalados en la fachada Sur 8,5 kWp y 16 módulos instalados en la fachada Oeste 4,9 kWp. El subsistema de módulos fotovoltaicos ubicados en la fachada Oeste no se considera en este estudio. El esquema de los módulos BIPV instalados en las fachadas Sur y Este se muestra en la Figura 109.

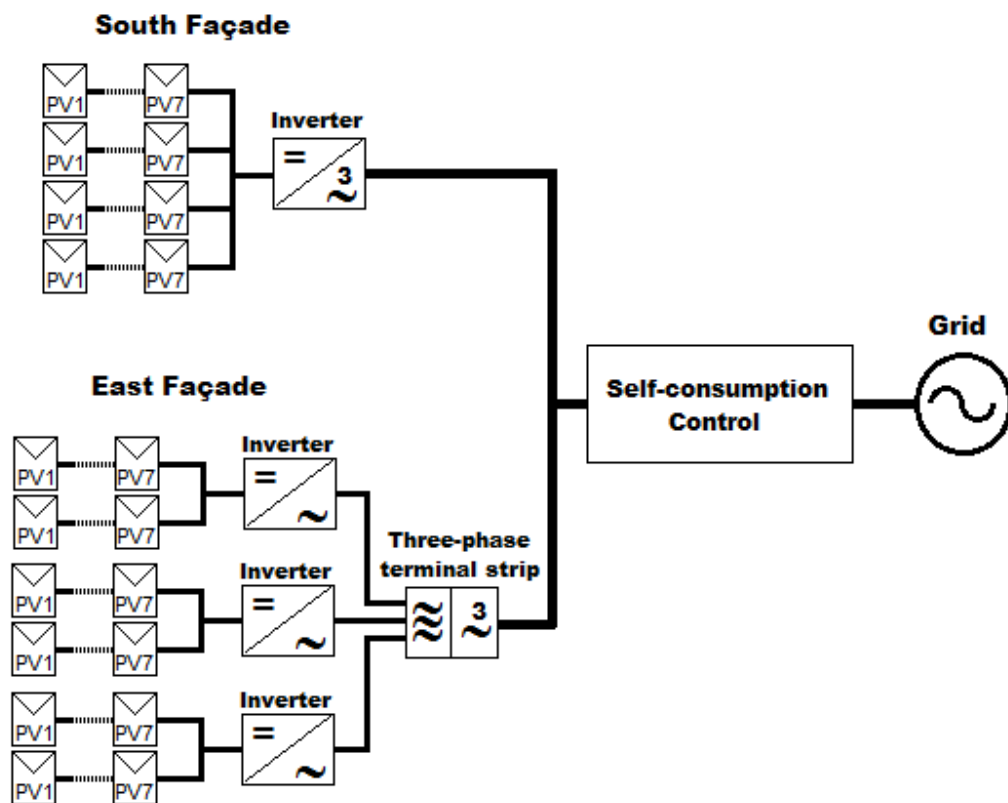


Figura 109. Diagrama módulos BIPV en fachadas Sur y Este

Para estimar la producción de electricidad solar de esta instalación fotovoltaica, de manera similar a [87], primero se va relacionar la energía demandada con la generada con fotovoltaica y como se acoplaría al sistema de movilidad propuesto.

En los datos mostrados en la Tabla 24 se representa la producción eléctrica fotovoltaica promedio diaria (Ed) y la producción eléctrica fotovoltaica promedio mensual (Em), ambas en kWh, obtenidas del software PVGIS para las fachadas Este y Sur. Se observa que la energía anual estimada generada por este sistema fotovoltaico es de 17,88 MWh/año, suponiendo una pérdida estimada por temperatura y baja irradiación del 10,5%, utilizando la temperatura ambiente local, una pérdida estimada por efectos de reflectancia angular del 5,3%, y otras pérdidas (cables, inversores, etc.) del 14%.

Tabla 24. Estimación promedio producción eléctrica PV kWh

Mes	Fachada Este		Fachada Sur	
	Ed	Em	Ed	Em
Enero	24,10	748	13,80	429
Febrero	28,00	785	20,00	560
Marzo	27,90	864	28,30	878
Abril	21,20	635	31,00	929
Mayo	16,40	507	34,70	1080
Junio	14,00	419	37,70	1130
Julio	15,00	466	38,40	1190
Agosto	20,60	639	35,00	1090
Septiembre	26,50	795	29,10	872
Octubre	28,00	867	21,50	667
Noviembre	24,90	748	14,80	445
Diciembre	24,10	749	12,60	392
Media Anual	22,50	685	26,50	805
Total por Año	8.220		9.660	
Total instalación PV por Año		17.880		

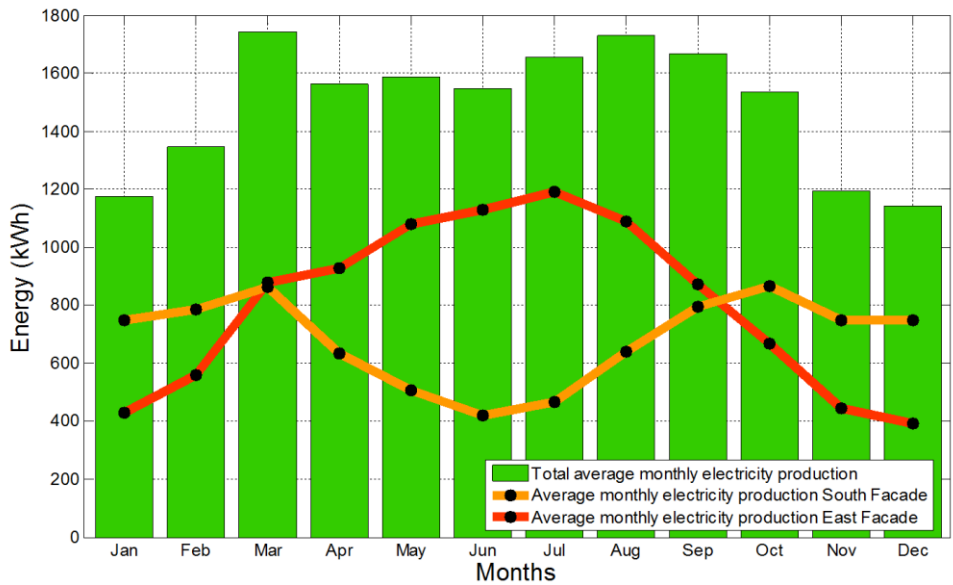


Figura 110. Producción fotovoltaica promedio mensual

En los peores meses para la generación fotovoltaica, debido a la baja irradiancia diaria, son diciembre y enero, como se muestra en la Figura 110. La energía solar estimada generada por los paneles fotovoltaicos ubicados en el edificio 42 del CIEMAT durante un solo día de diciembre se presenta en la Figura 111.

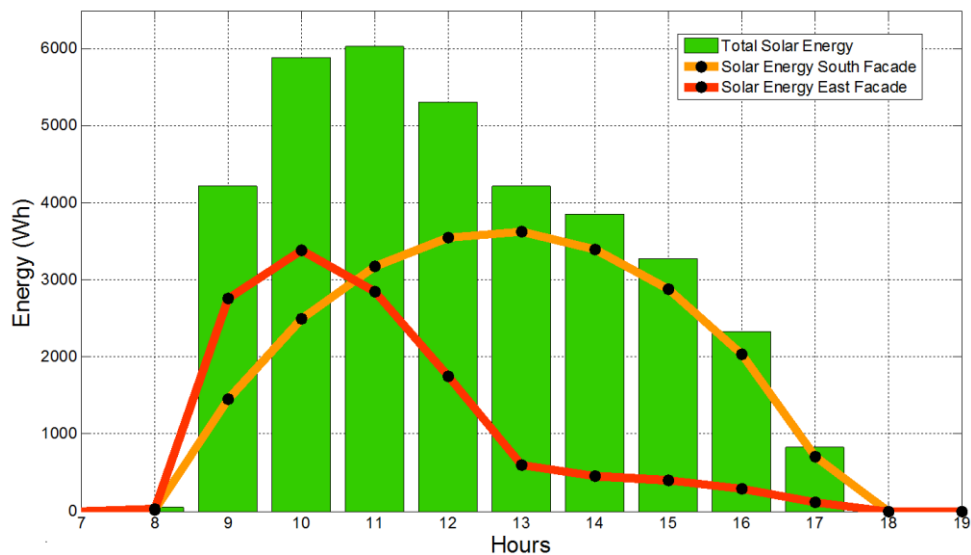


Figura 111. Energía solar estimada generada el día de diciembre

## ***6.4. Optimización y Restricciones***

El objetivo del sistema de movilidad diseñado es satisfacer la demanda de los empleados del CIEMAT entre la estación de metro y el lugar de trabajo en horario de mañana y tarde, minimizando el número de desplazamientos que realiza el vehículo eléctrico pickup EV, definido por la ecuación E. 6.

### **Método de Optimización:**

Programación Lineal Entera Mixta, MILP, para minimizar los desplazamientos de la pickup. Este modelo de optimización para decidir cuántas bicicletas mover, cuántos viajes va a realizar la pickup y cómo distribuir las bicicletas para satisfacer la demanda

Método Heurístico, para el ajuste iterativo de parámetros con el consumo energético, SOC, tiempos de recarga.

**Consideraciones:** Consumo energético, Tiempos de parada y recarga, Generación fotovoltaica integrada en el edificio.

### **Elementos Clave:**

**Bicicletas eléctricas:** 25 bicicletas eléctricas que se distribuyen entre los estacionamientos en A (Metro) y B (CIEMAT) según la demanda de pasajeros. Las bicicletas se recargan entre las 10:00 y las 16:00.

**Vehículo eléctrico pickup:** Reparte bicicletas eléctricas entre A y B según sea necesario. Lleva hasta 5 bicicletas por viaje. Solo hay un vehículo disponible.

**Horarios:** El sistema opera de 7:00 a 19:00. Durante la mañana, la demanda de viajes es de A hacia B Por la tarde, la demanda de B hacia A.

**Parámetros:** Que se muestran en la siguiente tabla y que son los datos fijos, como el tiempo de trayecto, la capacidad de carga y el número de bicicletas o vehículos disponibles, etc.

Tabla 25. Parámetros del modelo de optimización

Símbolo	Descripción	Valor
(t)	Índice de intervalo de tiempo, desde 7:00-19:00	[1,720] min
BCTI	Intervalo de tiempo de carga para bicicletas eléctricas, desde 10:00-16:00	(180,540) min
DAB(t)	Demanda de pasajeros de A(Metro) a B(CIEMAT)	[DAB]
DBA(t)	Demanda de pasajeros de B(CIEMAT) a A(Metro)	[DBA]
AEBCT	Capacidad de carga de Pickup EV (número de bicicletas eléctricas que puede llevar)	5
$\Delta$ TABAEB	Tiempo de trayecto A $\rightarrow$ B en bicicleta eléctrica	6 min
$\Delta$ TBAAEB	Tiempo de trayecto B $\rightarrow$ A en bicicleta eléctrica	5 min
$\Delta$ TABK	Tiempo de trayecto A $\rightarrow$ B del pickup EV	4 min
$\Delta$ TBAK	Tiempo de trayecto B $\rightarrow$ A del pickup EV	4 min
NBTOT	Número total de bicicletas eléctricas disponibles	25
NBA0	Nº de bicicletas eléctricas a las 7:00 en el parking A	25
NBB0	Nº de bicicletas eléctricas a las 7:00 en el parking B	0
NKTOT	Nº de pick-up EV disponibles en el sistema	1
NKA0	Nº de pick-up EV a las 7:00 en el parking A	0
NKB0	Nº de pick-up EV a las 7:00 en el parking B	1
PA	Plazas de aparcamiento bicicleta eléctrica en A	25
PB	Plazas de aparcamiento bicicleta eléctrica en B	25

**Variabes:** Que se muestran en la siguiente tabla y son los valores que el modelo calcula, como, cuántas bicicletas están en cada lugar o cuántos viajes realiza el pickup. Modelando cómo cambia el número de bicicletas eléctricas entre los estacionamientos y controlan el comportamiento del pickup eléctrico en cada momento, etc.

Tabla 26. Variables enteras del modelo de optimización

Símbolo	Descripción	Valor
nbA(t)	Nº de bicicletas eléctricas en A	[0...25]
nbB(t)	Nº de bicicletas eléctricas en B	[0...25]
CbAB(t)	Nº de bicicletas eléctricas sobre el pickup EV de A->B	[0...5]
CbBA(t)	Nº de bicicletas eléctricas sobre el pickup EV de B->A	[0...5]
nkA(t)	Nº de pickup EV remolque en A	[0,1]
nkB(t)	Nº de pickup EV remolque en B	[0,1]
dkAB(t)	Nº de pickup EV remolque en el trayecto A->B	[0,1]
dkBA(t)	Nº de pickup EV remolque en el trayecto B->A	[0,1]
dbAB(t)	Nº de bicicletas eléctricas en el trayecto A->B	[0...25]
dbBA(t)	Nº de bicicletas eléctricas en el trayecto B->A	[0...25]

El problema de optimización se define como un problema de programación lineal entera mixta dado por las ecuaciones E. 6 a la E. 14. La Tabla 25 presenta los parámetros del modelo de optimización con sus rangos de valores asociados. La

**Variabes:** Que se muestran en la siguiente tabla y son los valores que el modelo calcula, como, cuántas bicicletas están en cada lugar o cuántos viajes realiza el pickup. Modelando cómo cambia el número de bicicletas eléctricas entre los

estacionamientos y controlan el comportamiento del pickup eléctrico en cada momento, etc.

Tabla 26 muestra las variables enteras utilizadas en el modelo de optimización con sus límites asociados. Para aclarar la notación, el parking ubicado en la boca de metro se etiquetará como A, mientras que el parking ubicado en el CIEMAT se etiquetará como B.

$$\min \Sigma_t (dk_{AB}(t) + dk_{BA}(t))$$

**E. 6**

Sujeto a:

$$\begin{aligned} nb_A(t) &= NBA0, & \text{if } t \leq 0 \\ nb_A(t) &= 0, & \text{if } t > 0 \text{ and } t \in BCTI \\ nb_A(t) &= nb_A(t-1) \cdot D_{AB}(t) + D_{BA}(t - \Delta T_{BA}^{AEB}) \cdot Cb_{AB}(t) + Cb_{BA}(t - \Delta T_{BA}), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI \end{aligned}$$

**E. 7**

$$\begin{aligned} nb_B(t) &= NB_{B0}, & \text{if } t \leq 0 \\ nb_B(t) &= NB_{TOT}, & \text{if } t > 0 \text{ and } t \in BCTI \\ nb_B(t) &= nb_B(t-1) \cdot D_{BA}(t) + D_{AB}(t - \Delta T_{AB}^{AEB}) \cdot Cb_{BA}(t) + Cb_{AB}(t - \Delta T_{AB}^K), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI \end{aligned}$$

**E. 8**

$$\begin{aligned} nk_A(t) &= NK_{A0}, & \text{if } t \leq 0 \\ nk_A(t) &= 0, & \text{if } t > 0 \text{ and } t \in BCTI \\ nk_A(t) &= nk_A(t-1) \cdot dk_{AB}(t) + dk_{BA}(t - \Delta T_{BA}^K), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI \end{aligned}$$

**E. 9**

$$\begin{aligned}nk_B(t) &= NK_{B0}, & \text{if } t \leq 0 \\nk_B(t) &= NK_{TOT}, & \text{if } t > 0 \text{ and } t \in BCTI \\nk_B(t) &= nk_B(t-1) - dk_{BA}(t) + dk_{AB}(t - \Delta T_{AB}^K), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI\end{aligned}$$

**E. 10**

$$\begin{aligned}Cb_{AB}(t) &= 0, & \text{if } t \leq 0 \text{ or } t \in BCTI \\Cb_{AB}(t) &\leq A_{EBCT} \cdot dk_{AB}(t), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI\end{aligned}$$

**E. 11**

$$\begin{aligned}Cb_{BA}(t) &= 0, & \text{if } t \leq 0 \text{ or } t \in BCTI \\Cb_{BA}(t) &\leq A_{EBCT} \cdot dk_{BA}(t), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI\end{aligned}$$

**E. 12**

$$\begin{aligned}db_{AB}(t) &= 0, & \text{if } t \leq 0 \text{ or } t \in BCTI \\db_{AB}(t) &= db_{AB}(t-1) + D_{AB}(t-1) - D_{AB}(t - \Delta T_{AB}^{AEB}), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI\end{aligned}$$

**E. 13**

$$\begin{aligned}db_{BA}(t) &= 0, & \text{if } t \leq 0 \text{ or } t \in BCTI \\db_{BA}(t) &= db_{BA}(t-1) + D_{BA}(t-1) - D_{BA}(t - \Delta T_{BA}^{AEB}), & \text{if } t > 0 \text{ and } t \notin BCTI\end{aligned}$$

**E. 14**

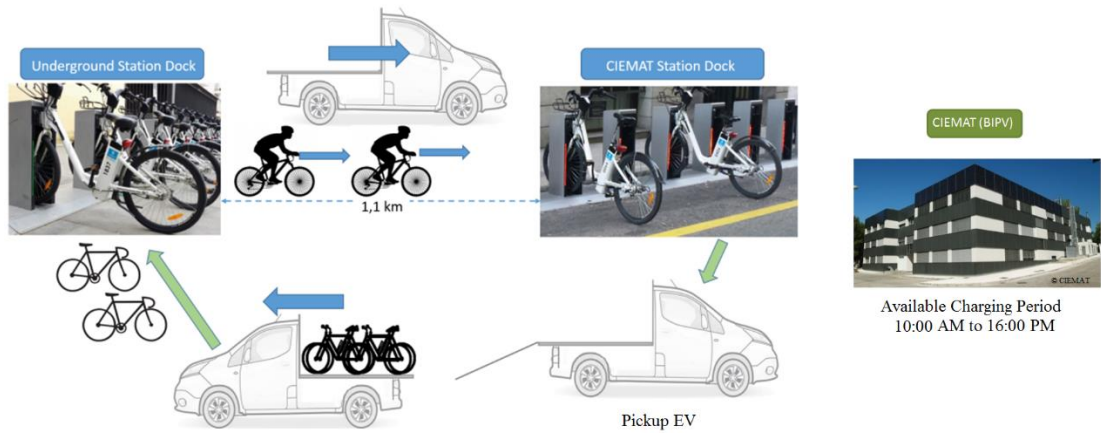


Figura 112. Sistema de movilidad de bicicletas eléctricas propuesto

La ecuación E. 6 define la función objetivo que el algoritmo de optimización debe minimizar. Esta ecuación evalúa el número de viajes realizados por la pickup EV entre ambos nodos (de A hasta B) a lo largo del día en cada franja horaria (dado por  $dk_{AB}(t) + dk_{BA}(t)$ ). Ya que estos viajes se realizan para mantener el equilibrio de la flota de bicicletas eléctricas estacionadas en cada parking. La energía necesaria para que se puedan desplazar las bicicletas eléctricas depende únicamente de la demanda y no hay forma de reducirla. El resto de las necesidades energéticas proceden de los viajes de recogida necesarios para satisfacer la demanda con un determinado número de bicicletas eléctricas, que pueden minimizarse.

Las ecuaciones E. 7 y E. 8 definen el equilibrio general del número de bicicletas eléctricas en cada estación de acoplamiento en cada franja horaria. Durante el intervalo de tiempo de carga (10:00 a 16:00), las bicicletas eléctricas se cargan en B. En funcionamiento normal, en E. 7, el número de bicicletas eléctricas en A en el intervalo de tiempo  $t$ , indicado por  $nb_A(t)$ , es igual al número de bicicletas eléctricas estacionadas en esta estación en la franja horaria anterior,  $nb_A(t-1)$ , menos el número de bicicletas eléctricas utilizadas por la demanda para viajar de A hacia B, denotado por  $D_{AB}(t)$ , sumando el número de bicicletas eléctricas que salen de B anteriormente, en  $t=t-\Delta T_{BA}^{AEB}$ , denotado por  $D_{BA}(t - \Delta T_{BA}^{AEB})$ , menos el número de bicicletas eléctricas transportadas por la pickup EV desde A hasta B, denotado

por  $Cb_{AB}(t)$ , y sumando el número de bicicletas eléctricas transportadas por la pickup EV desde B hacia A, que salen en  $t=t-\Delta T_{BA}^K$ .

Durante la mañana, la demanda de los empleados para desplazarse con sus bicicletas eléctricas desde el CIEMAT hasta la estación de metro  $D_{BA}(t)$  será cero y también el número de bicicletas eléctricas transportadas por el remolque pick-up desde la estación de metro hasta el CIEMAT,  $Cb_{AB}(t)$ , será cero. Durante los viajes de la tarde este comportamiento se invierte, por lo tanto,  $D_{AB}(t)$  y  $Cb_{BA}(t)$  serán cero. El mismo procedimiento se ha aplicado en E. 8.

Las ecuaciones E. 9 y E. 10 modelan el comportamiento del vehículo eléctrico de recogida en cada parking en cada intervalo de tiempo.

Las restricciones E. 11 y E. 12 limitan la cantidad máxima de bicicletas eléctricas que se pueden transportar en cada viaje con pickup EV de A a B y viceversa. Las ecuaciones E. 13 y E. 14 presentan las ecuaciones de continuidad para cada movimiento de bicicleta eléctrica.

## ***6.5. Resultados y Discusión***

Para realizar los estudios de optimización definidos anteriormente se utilizó el programa IBM ILOG CPLEX Optimization Studio v. 12.5.1.0.

Para poder llegar a un resultado óptimo se empezó a establecer los parámetros que iban a ser constantes como el vehículo eléctrico que solo se iba a utilizar uno. Luego se evaluaba el número óptimo de bicicletas eléctricas en el sistema de movilidad, ejecutando el modelo de optimización y comprobando su convergencia. Si no se obtenía una solución que convergiera, se iba aumentando en uno el número de bicicletas eléctricas del sistema hasta alcanzar la convergencia.

Con este procedimiento, el número mínimo de bicicletas eléctricas de la flota que podían cumplir con los requisitos de movilidad del sistema se fijó en 25, como se muestra en la Tabla 25.

Una vez que se estableció el número de vehículos eléctricos del sistema de movilidad, tanto de la pickup como el de vehículos eléctricos ligeros las bicicletas eléctricas, se ejecutó el algoritmo de optimización para determinar la cantidad mínima de viajes de la pickup necesarios para mantener los parkings con las bicicletas necesarias para cumplir con los requisitos de la demanda de uso de los empleados. El valor de viajes del pickup fijado por el algoritmo de optimización fue de 28 durante cada periodo de demanda (28 en los viajes de la mañana y 28 por la tarde).

El modelo de optimización también determina el momento óptimo para transportar las bicicletas eléctricas desde un parking a otro, parking del centro de trabajo CIEMAT y el parking de la boca de metro, evitando la escasez de bicicletas eléctricas en el parking donde se necesitan y el número exacto de bicicletas transportadas en cada viaje, este número se representa con una variable entera que toma valores de (1 a 5). Otro requisito que se añade al algoritmo de optimización es que al final del turno de mañana, todas las bicicletas y al pickup EV se ubican en el parking del centro de trabajo para poder recargarlas al medio día antes de que comiencen los viajes de la tarde.

Al igual que controlar la carga y descarga de baterías de plomo-ácido es fundamental para extender la vida útil de los sistemas de Microgrids [69], en este estudio se ha tenido en cuenta la gestión óptima del estado de carga (SOC) para las baterías de polímero de litio de las bicicletas eléctricas y las baterías del vehículo pickup EV, con el objetivo de alargar la vida útil del sistema.

Del análisis de movilidad anterior se observa que durante el periodo de la mañana (de 7:00 a 10:00) el número total de viajes en bicicleta eléctrica es de 95, que es el número de empleados que se desplazan del parking de la boca de metro hasta el parking del centro de trabajo. La energía requerida por cada bicicleta durante este periodo es de 8,459 Wh y la energía demandada por la flota de bicicletas eléctricas durante el periodo de la mañana será de 803,605 Wh. La energía total demandada por la flota de bicicletas eléctricas durante todo el día será de 1.607,21 Wh.

El número total de viajes realizado por la pickup EV de recogida de vehículos eléctricos durante el período de la mañana es de 28, con un consumo de 5,544 kWh. Por lo tanto, la energía total demandada por la pickup EV durante todo el día será de 11,088 kWh y la cantidad total de energía requerida por el sistema propuesto de bicicletas eléctricas compartidas (bicicletas eléctricas más el Pickup EV) será de 12,7 kWh/día. En la Tabla 27 resume todos los requisitos de movilidad energética del sistema propuesto de bicicletas eléctricas compartidas.

Tabla 27. Energía demandada por el sistema propuesto

Descripción	Valor	Unidades
Consumo medio de la Pickup EV	0,18	kWh/km
Número de viajes por día de la Pickup EV	56	Trayectos
Consumo diario total de la Pickup EV	11,088	kWh
Consumo medio de una bicicleta eléctrica	0,0077	kWh/km
Número de viajes de bicicletas eléctricas por día	190	Trayectos
Consumo diario de la flota de bicicletas eléctricas	1,607	kWh
Consumo total diario del sistema compartido de bicicletas eléctricas	12,7	kWh

El Parking de bicicletas eléctricas ubicado en el centro de trabajo CIEMAT, hace la función de estación de recarga que está conectada a la instalación fotovoltaica del Edificio 42 del CIEMAT, y que se conecta a los paneles fotovoltaicos a través de tres inversores MPPT monofásicos de 10 kW. Esta estación de carga está compuesta por un punto de carga AC Nivel 2, que funciona a 3,7 kW, 230 V/240 V-16 A, para cargar a la pickup EV y 25 enchufes Schuko tipo F (también conocidos como CEE 7/4) protegidos por 5 disyuntor unipolar 6 A 230 V/240 V, 50 Hz para cargar las bicicletas eléctricas.

El sistema completo de vehículos eléctricos se recargará en el horario del mediodía (de 10:00 a 16:00 horas), cuando todos los empleados del CIEMAT estén trabajando y no haya demanda de desplazamientos. Al comienzo del día, todas las bicicletas eléctricas se encuentran estacionadas en el parking ubicado en la boca del metro y la Pickup EV vacía de bicicletas eléctricas al lado del parking ubicado en el centro de trabajo CIEMAT. Se supone que la suma de la capacidad inicial de las baterías de las bicicletas eléctricas es de 1 kWh (11,11% de la capacidad total de las baterías de las bicicletas eléctricas) y la capacidad inicial de la batería de la Pickup EV es de 8 kWh (33,33% de la capacidad de la batería de la Pickup EV). El recurso solar no está disponible a primera hora de la mañana; por ello es necesario tener energía en las baterías de la pickup y de las bicicletas eléctricas para poder realizar los primeros viajes de la mañana. Con estas suposiciones demostramos que, incluso en el peor día del año, la energía restante al final del día es aún mayor.

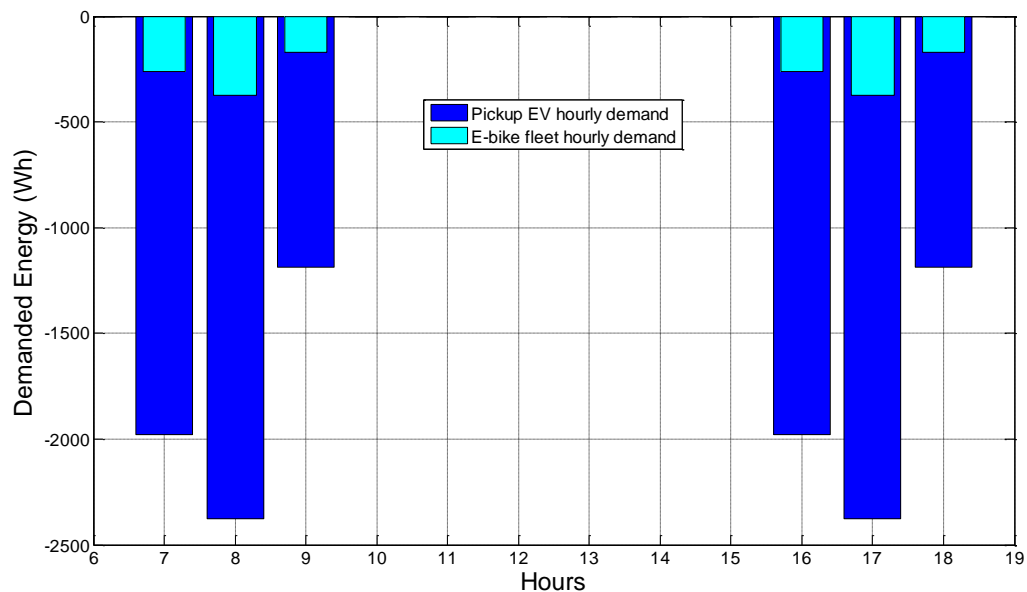


Figura 113. Consumo de energía por hora del sistema propuesto

En cuanto los empleados empiezan a llegar por la mañana, desbloquean una bicicleta eléctrica del parking ubicado al lado de la boca de metro y realizan el trayecto y la estacionan en el parking ubicado al lado del centro de trabajo CIEMAT.

Cuando el operario de la pickup EV pueda llenar la caja con las bicicletas necesarias, este las llevara hasta el parking ubicado al lado de la boca de metro. Durante estos viajes todos los vehículos eléctricos implicados en este sistema de movilidad (pickup EV y bicicletas eléctricas) consumirán energía. En la Figura 113 muestra el consumo de energía por hora del sistema de bicicletas eléctricas compartidas para un día de muestra.

Los peores meses para la generación fotovoltaica, debido a la baja irradiancia diaria, son diciembre y enero PVGIS. La energía solar estimada generada por los paneles fotovoltaicos ubicados en el edificio 42 del CIEMAT durante un solo día de diciembre se presenta en la Figura 114, en esta figura, las barras azules negativas representan el consumo total de energía por hora del sistema compartido y la generación solar estimada positiva se muestra en barras rojas y amarillas. El sistema de bicicletas eléctricas compartidas se recargará durante el período restante entre las 10:00 y las 16:00 (resaltado con barras amarillas).

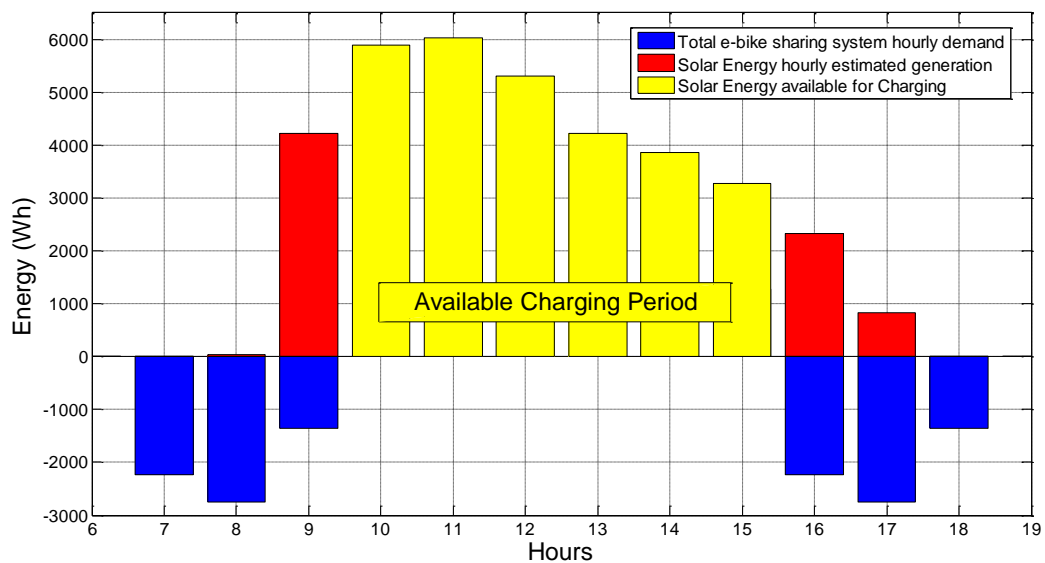


Figura 114. Demanda energía del sistema vs energía solar disponible

Demanda total de energía del sistema de bicicletas eléctricas compartidas frente a la energía solar disponible para cargar

En la Figura 115 se representa el proceso de carga a lo largo del día. La pickup EV se carga mediante una estación de carga de nivel 1 de 230 V - 16 A, que

demanda 3,7 kWh durante cada hora. El resto de la generación de energía disponible se utiliza para cargar la flota de bicicletas eléctricas. Se observa que la pickup EV se carga durante las primeras 5 horas (de 10:00 a 14:00) y cuando la generación solar cae por debajo de los 3,7 kW, la capacidad de generación restante solo se utiliza para cargar la flota de bicicletas eléctricas. Aunque a partir de las 16:00 horas todavía hay capacidad de generación solar disponible, el sistema interrumpe el proceso de carga porque los empleados empiezan a regresar a casa utilizando nuevamente este sistema de movilidad.

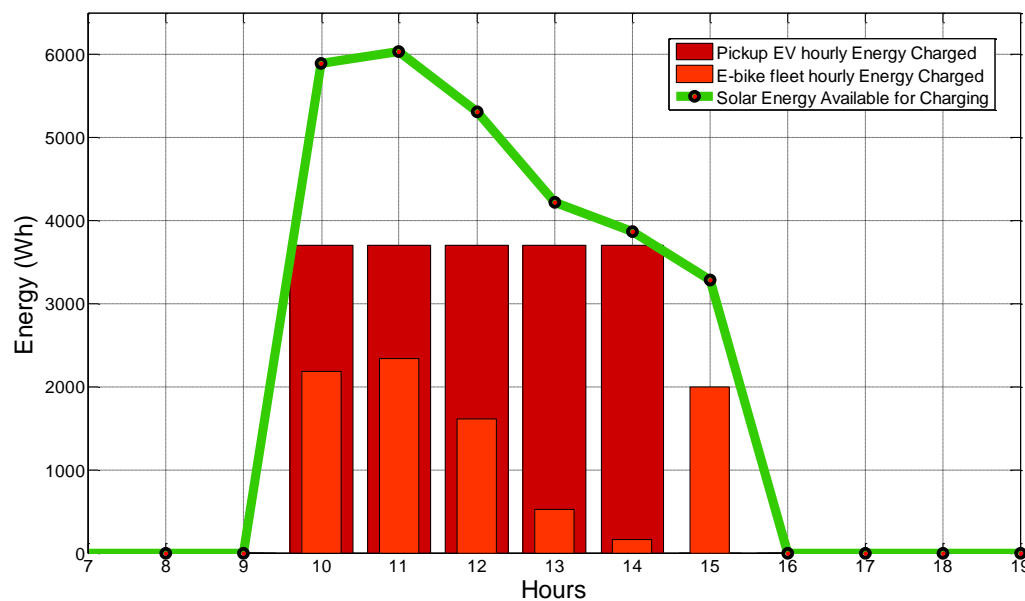


Figura 115. Proceso de carga del sistema

Para tener una idea de la evolución del estado de carga de la batería de los vehículos eléctricos se utiliza la métrica del estado de carga SOC [69]. Dado que en este caso se decide idealizar las eficiencias de los elementos de potencia eléctrica del sistema, se utiliza una definición simplificada de la función SOC.

$$SOC = \frac{Ah_{int} - Ah_{consum}}{Ah_{rate}} \quad E. 15$$

$Ah_{int}$ ; es el estado de carga inicial de la batería.

$Ah_{consum}$ ; es el consumo de la batería.

$Ah_{rate}$ ; es la capacidad total nominal de la batería.

En la Figura 116 se muestra el estado de carga de la batería de la pickup EV a lo largo del día. Al inicio del día, el SOC inicial es del 33,3%, correspondiente a 8 kWh. Tan pronto como los empleados empiezan a llegar al parking de la boca de metro por la mañana, la pickup EV debe transportar las bicicletas eléctricas entre ambos parkings, consumiendo energía en el proceso. Este consumo se observa de 7:00 a 10:00. Una vez que todos los empleados están trabajando, la pickup EV se recarga durante 5 horas en el parking del centro de trabajo que esta conectado al edificio 42 del CIEMAT. El SOC se incrementa linealmente hasta alcanzar el 87,32%, 21 kWh, a las 15:00 horas. Por la tarde, los empleados regresan a sus casas, utilizando este sistema de bicicletas eléctricas compartidas para llegar nuevamente a la estación de metro. Una vez más, la pickup EV gastará energía durante este periodo (hasta las 19:00 horas), alcanzando un SOC final del 64,22%, 15,4 kWh. Esta energía será el SOC inicial para el día siguiente, suponiendo que la tasa de autodescarga de la batería sea insignificante.

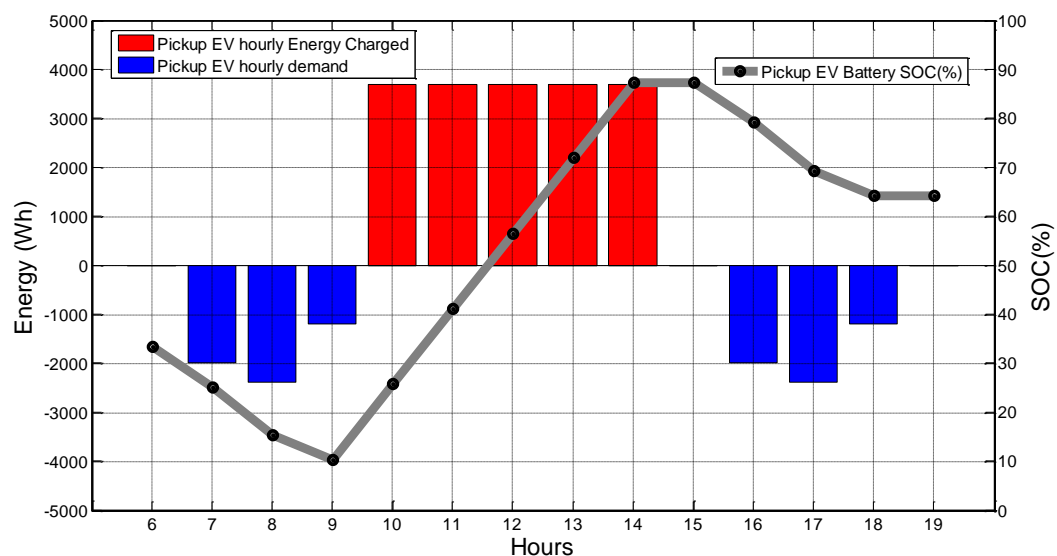


Figura 116. Carga y descarga del pickup EV y evolución SOC

En la Figura 117 se muestra el estado de carga de la batería (SOC) de la flota de bicicletas eléctricas a lo largo del día. Al inicio del día, el SOC inicial es del 11,11%, correspondiente a 1 kWh. Este consumo se observa de 7:00 a 10:00. Una vez que todos los empleados están trabajando, la flota de bicicletas eléctricas se carga durante 5 horas en el parking ubicado en el centro de trabajo y conectado al sistema fotovoltaico del edificio 42 del CIEMAT. El SOC se incrementa linealmente hasta

llegar al 100%, 9 kWh a las 15:00 horas. Por la tarde, los empleados regresan a sus casas, utilizando este sistema de bicicletas eléctricas compartidas para llegar nuevamente a la estación de metro. Una vez más, la flota de bicicletas eléctricas gastará energía durante este periodo (hasta las 19:00 horas), alcanzando un SOC final del 91,07%, 8,2 kWh. Esta energía será el SOC inicial para el día siguiente, suponiendo que la tasa de autodescarga de la batería sea insignificante.

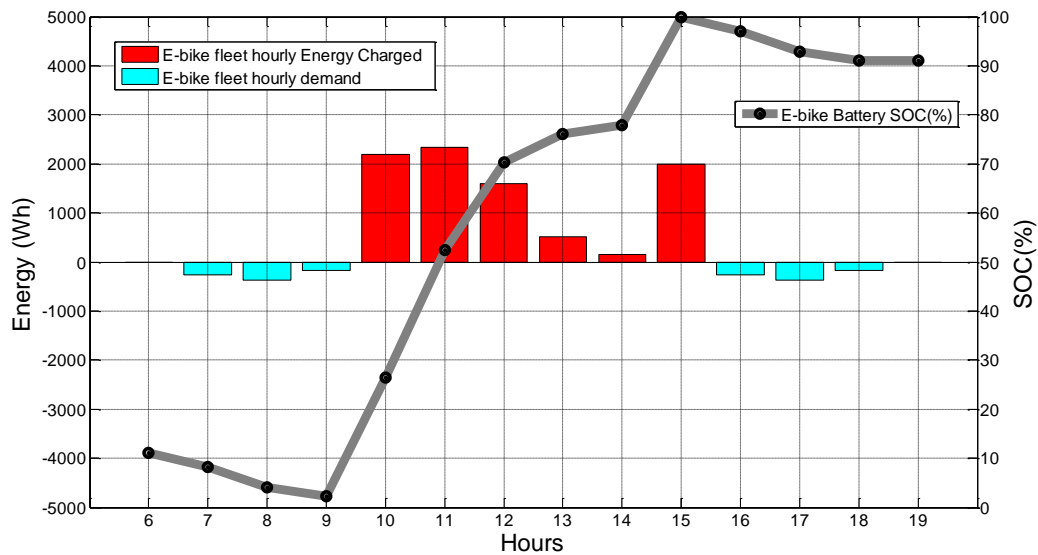


Figura 117. Carga y descarga de bicicletas eléctricas y evolución SOC

## ***7. Conclusiones y Trabajo Futuro***

El trabajo desarrollado en esta tesis se caracteriza por su enfoque multidisciplinar, estructurado en dos grandes áreas: las ciencias sociales y las tecnologías. Ambas disciplinas se encuentran estrechamente interrelacionadas y han permitido abordar los objetivos propuestos, generando además conclusiones inesperadas derivadas del esfuerzo intensivo en ambas áreas. Este enfoque se inicia con la dirección, durante varios años, del proyecto técnico y experimental sobre movilidad con bicicletas eléctricas GESMOL, titulado “Impacto de la Gestión Energética sobre el Desarrollo de los LEVS como Modo de Transporte Alternativo en las Soluciones de Movilidad Urbana y Metropolitana” [17]. Posteriormente, se da continuidad con la participación en el proyecto VE2, “Sistema Inteligente de Gestión Energética del Edificio utilizando Vehículos Eléctricos”, desarrollado en colaboración entre la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el CIEMAT.

### ***7.1. Resumen de los trabajos realizados***

Algunos hitos conseguidos en el desarrollo de esta tesis, se pueden resumir en los siguientes trabajos realizados:

Se identificaron las principales necesidades de movilidad de los empleados del centro de trabajo, lo que permitió diseñar soluciones adaptadas a sus requerimientos específicos. Las encuestas y entrevistas realizadas aportaron información valiosa sobre la percepción de los empleados respecto al proyecto piloto, así como su interés por participar en las iniciativas propuestas. A través de un análisis estadístico, se determinó el perfil de los posibles usuarios, destacando las ventajas percibidas, los tiempos de desplazamiento, el consumo energético y los costes asociados, lo que permitió optimizar el diseño del sistema. Se llevaron a cabo pilotos de diferentes sistemas de movilidad en el centro de trabajo, cuya implementación fue supervisada de manera rigurosa para garantizar su correcta ejecución y evaluar su impacto en la movilidad laboral.

Se adquirió un conocimiento detallado de los procesos de carga y descarga de las baterías de las bicicletas eléctricas, lo que permitió identificar los parámetros clave para su manejo eficiente. Se diseñó y desarrolló un sistema capaz de reproducir de manera controlada dichos procesos, garantizando la precisión y confiabilidad en las pruebas realizadas. Se diseñó y construyó un sistema para realizar pruebas mecánicas y eléctricas a los motores de las bicicletas eléctricas, evaluando su rendimiento y eficiencia bajo diversas condiciones de operación. Se llevó a cabo la instalación de un aparcamiento para bicicletas eléctricas, que además funciona como estación de recarga, proporcionando una solución práctica y sostenible para la puesta en marcha de los pilotos de movilidad en el centro de trabajo.

Se diseñó y desarrolló un circuito para monitorizar magnitudes energéticas de las bicicletas eléctricas, permitiendo un control preciso del desempeño energético. Se incorporó un sistema que enviaba automáticamente los datos registrados, incluyendo magnitudes energéticas y posición GPS, mediante comunicación GPRS. También se creó una base de datos para registrar los diferentes parámetros de procesos energéticos, y una aplicación web que organizaba automáticamente y en línea la logística del uso del sistema de movilidad piloto implantado en el centro de trabajo, “BIPA por solicitud”.

Se estudió la viabilidad de un nuevo sistema de movilidad, denominado Commuter, diseñado para cubrir las necesidades de desplazamientos de los empleados desde su domicilio hasta el centro de trabajo y viceversa. Se evaluaron los aspectos sociales y energéticos para su implementación, incluyendo la idoneidad de las vías compartidas con otros medios de transporte, así como las distancias de desplazamiento aceptables basadas en la autonomía proporcionada por las distintas tecnologías de bicicletas eléctricas y sus baterías. En el caso de Commuter, se concluyó que este tipo de vehículo eléctrico ligero, la bicicleta eléctrica, puede ser una solución eficiente para parte de los desplazamientos de los empleados, contribuyendo a la reducción de la contaminación atmosférica, la congestión del tráfico y la emisión de ruido en áreas urbanas. Además, fomenta un estilo de vida más saludable al permitir a los ciclistas reducir su consumo energético durante los desplazamientos.

Se seleccionaron las características más adecuadas de los pilotos estudiados para diseñar un nuevo sistema de movilidad que se adaptara de manera óptima a las necesidades de los empleados de un centro de trabajo. Este nuevo sistema busca ofrecer soluciones eficientes y funcionales, mejorando la experiencia de movilidad de los empleados en sus desplazamientos diarios. Además, se verificó que este sistema puede obtener la energía necesaria para su funcionamiento a partir de un sistema de energía renovable, promoviendo un enfoque más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

A partir del diseño y desarrollo de un sistema innovador de aparcamiento móvil para bicicletas eléctricas, que incluye capacidades de recarga mediante diversas fuentes de energía, se ha alcanzado la construcción de un prototipo funcional. Este prototipo ha pasado satisfactoriamente las primeras pruebas de funcionamiento, demostrando su viabilidad técnica y la potencial integración de energías renovables para su operación eficiente.

Como conclusión final se ha demostrado la viabilidad de un nuevo sistema de movilidad destinado a satisfacer las necesidades de transporte de los empleados desde nodos de transporte público hasta centros de trabajo. Además, se ha comprobado que este sistema puede obtener la energía necesaria para su funcionamiento a partir de fuentes de energía renovable, contribuyendo así a una movilidad más sostenible y amigable con el medio ambiente.

## ***7.2. Principales conclusiones***

A continuación, se presentan de manera resumida las principales conclusiones del desarrollo de este trabajo de tesis:

Se resalta que el tiempo invertido en los trayectos es un aspecto crucial en la evaluación de opciones de movilidad. En el proyecto [17] se demostró que las bicicletas eléctricas representan una alternativa viable para los desplazamientos diarios hacia centros de trabajo, ampliando los beneficios del transporte público masivo al llegar a puntos estratégicos adicionales en la movilidad urbana. Con la

capacidad de recorrer distancias de hasta 7 km en solo 15 minutos, este tipo de vehículo eléctrico, cuando se integra en un sistema de movilidad, se adapta perfectamente a los trayectos complementarios del transporte público, mejorando así la accesibilidad y facilitando el cambio modal en los desplazamientos hacia los centros de trabajo. En comparación con el vehículo privado, este sistema de movilidad reduce significativamente el espacio ocupado por persona y ofrece una solución más flexible para la descongestión del tráfico en los centros urbanos. Al integrar soluciones como bicicletas eléctricas o sistemas de transporte sostenibles, se mejora la eficiencia del uso del espacio urbano y se contribuye a la reducción de la congestión vehicular, fomentando un entorno más sostenible y accesible para todos los usuarios.

El estudio revela que la integración de energía fotovoltaica en edificios BIVP presenta un gran potencial para abastecer la demanda energética de sistemas de movilidad de vehículos eléctricos en el transporte de empleados en última milla en entornos urbanos. Este enfoque permite un funcionamiento independiente de la red de distribución eléctrica local, optimizando el almacenamiento en las baterías de los vehículos eléctricos y evitando la saturación de las subestaciones de distribución eléctrica, que enfrentan una creciente demanda energética debido a la electrificación progresiva de diversos sectores en los centros urbanos.

Aunque la energía fotovoltaica presenta un comportamiento específico influenciado por el horario solar, su integración con vehículos eléctricos ha demostrado ser exitosa para coincidir la generación con la demanda de energía. Gracias al uso de baterías en los vehículos eléctricos, se ha logrado un sistema eficiente que no requiere almacenamiento adicional de energía. Este enfoque se ha optimizado mediante un estudio empírico de ambas tecnologías y la utilización de infraestructuras existentes, como sistemas fotovoltaicos integrados en edificios y proyectos previos en movilidad eléctrica, permitiendo la creación de un sistema de bicicletas eléctricas compartidas alimentado completamente por energía solar, sin emisiones ni consumo de electricidad de la red.

Mediante pruebas en modelos reales de bicicletas eléctricas, se logró determinar la demanda eléctrica total diaria del sistema de bicicletas compartidas. Estas pruebas permitieron evaluar el consumo energético en distintas condiciones, proporcionando parámetros genéricos que facilitaron la implementación del modelo de optimización. Este enfoque contribuye a una mayor eficiencia energética y sostenibilidad en la operación del sistema, integrando soluciones innovadoras para el transporte limpio y eficiente.

Basado en las encuestas y estadísticas recopiladas, se determinaron las necesidades de desplazamiento diario de los empleados hacia el centro de trabajo. Se concluyó que la mejor opción era la integración con el transporte público, a través del sistema propuesto, diseñado con un modelo de optimización para dimensionar el sistema de bicicletas eléctricas compartidas. Este modelo permitió determinar el número óptimo de bicicletas eléctricas y el mínimo de desplazamientos requeridos por los vehículos eléctricos para distribuir las bicicletas en ambos parkings del sistema de movilidad, garantizando el equilibrio adecuado y cumpliendo con los requisitos de movilidad en los flujos de desplazamientos tanto en horarios matutinos como vespertinos.

La conclusión principal del estudio es que ha quedado demostrado que es completamente factible diseñar un sistema de uso compartido de bicicletas eléctricas cero emisiones y autosuficiente energéticamente. Este sistema optimiza los desplazamientos de última milla, dinamizando aún más las líneas convencionales del transporte público y mejorando el servicio al llegar a más zonas urbanas en grandes ciudades. Esto contribuirá a la reducción de los desplazamientos en vehículos de combustión interna hacia centros de trabajo, ofreciendo una opción modal más económica, con menor consumo energético, menos espacio ocupado y más saludable para los usuarios. Por lo tanto, este tipo de sistema propuesto tiene el potencial de convertirse en una solución real y formar parte del portafolio de sistemas de movilidad urbana actuales. Además, está completamente alineado con los objetivos y tendencias planteados en el informe del grupo de trabajo internacional sobre cambio climático [1].

### 7.3. Trabajo Futuro

Una línea natural de trabajo a seguir sería continuar con el último diseño y desarrollo realizado en el proyecto [17], ya que, como se mencionó anteriormente, este proyecto avanzó de acuerdo a los resultados obtenidos en los distintos sistemas de movilidad aplicados en el estudio. Durante los últimos meses del proyecto, surgió la idea de un nuevo sistema de movilidad que, al heredar los aprendizajes del sistema “BIPA por Solicitud”, lograba tasas de reutilización de bicicletas superiores a otros sistemas, permitiendo aumentar las ratios de uso de las bicicletas eléctricas por día y en definitiva llegar a un mayor número de trabajadores. Este nuevo sistema se denominó “Sistema de Movilidad BIPA”, y a continuación se describen los diseños y desarrollos que se llevaron a cabo antes de concluir el proyecto.

#### Módulo gestión de usuarios “Sistema de Movilidad BIPA”

Este módulo comenzó con el resultado de la estructura funcional conseguida con el proceso de “BIPA por solicitud”, al que se le añadió funcionalidades adicionales. Se heredó todas las funcionalidades del sistema de bicicletas eléctricas por solicitud y se añadieron otras específicas para optimizar el sistema, como incluir un teclado unido a un módulo MTX que se utilizaba para identificar a los usuarios con el número de usuario y la contraseña (recogidos en el alta del foro de la web del sistema “BIPA por solicitud”), para poder utilizar una bicicleta eléctrica disponible en la estación de recarga de las bicicletas eléctricas. De esta forma se consiguió mejorar la efectividad del sistema y la comodidad de los usuarios.

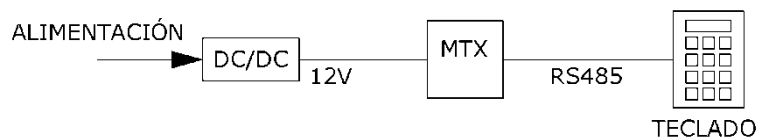


Figura 118. Diagrama de bloques del sistema identificación de usuario

## Módulo Aparcamiento Móvil “Sistema de Movilidad BIPA”

Como una evolución a la estación de recarga de las bicicletas eléctricas se precedió al diseño y construcción de una estación móvil de aparcamiento y recarga de las bicicletas eléctricas, incorporando un nuevo sistema informático de gestión de las bicicletas eléctricas y la búsqueda de la elección de la tecnología energética más adecuada para el suministro eléctrico. Todo ello se consiguió heredando los desarrollos y resultados obtenidos en todos los procesos realizados en las anteriores fases. Finalmente, después de la consecución de diferentes diseños y pruebas de diferentes prototipos se concluyó en el diseño del prototipo remolque-aparcamiento tal y como se puede ver en las Figura 119 además se trabajó en la realización de los sistemas auxiliares necesarios para la operativa del mismo.

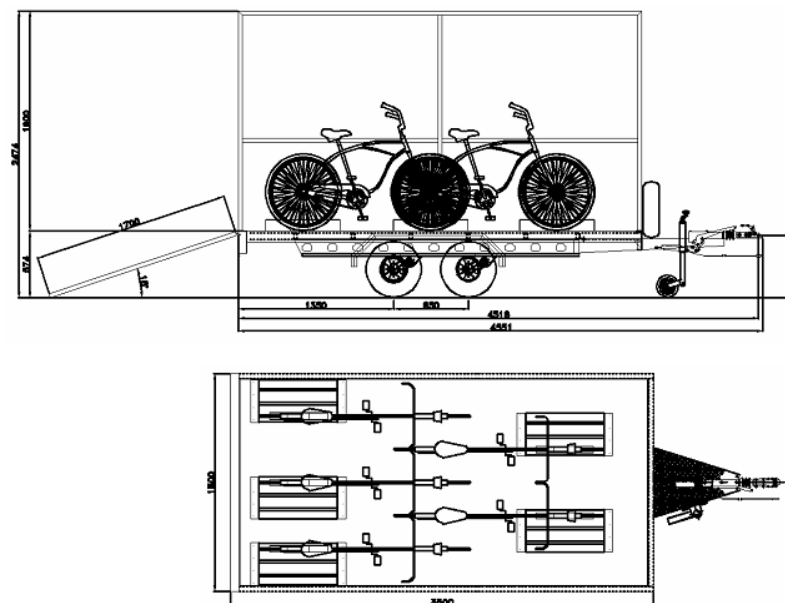


Figura 119. Diseño general del remolque

Los sistemas auxiliares diseñados para el remolque-aparcamiento fueron los siguientes:

Diseño de un soporte que serviría de aparcamiento a las bicicletas eléctricas, evitando así que estas se caigan, y sirviendo a su vez de sistema de cerrojo de seguridad. El mecanismo de seguridad, constaba de una varilla de acero que queda trabada entre dos radios y la llanta de una bicicleta eléctrica en la pieza de

aparcamiento, lo que impide el uso no autorizado Figura 120. Este sistema se acopla a la pieza de aparcamiento quedando como un bloque compacto.

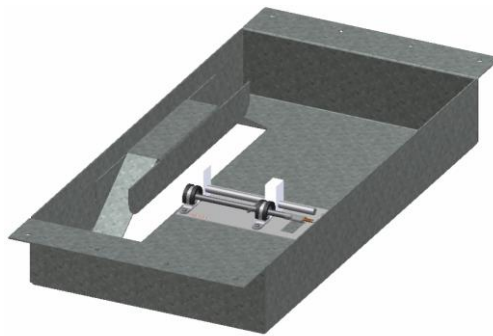


Figura 120. Diseño de la pieza de cerrojo

Desarrollo y plan de pruebas para el ajuste óptimo de uso del cerrojo para las bicicletas eléctricas estacionadas en el remolque tal y como se puede ver en la siguiente figura.



Figura 121. Vistas del sistema de cerrojo

Diseño del programa capaz de controlar las tarjetas de los relés que accionan los cerrojos del remolque Figura 122. El programa reconocía el número de cerrojos existentes y tenía conexión con la base de datos para saber que bicicleta eléctrica se encontraba en cada lugar. De esta forma, si el usuario introducía su código y contraseña y seleccionaba un número de BIPA, el sistema abría el primer cerrojo en el que estaba la BIPA aparcada siempre que coincidiera con el número introducido y se encontrara en funcionamiento.

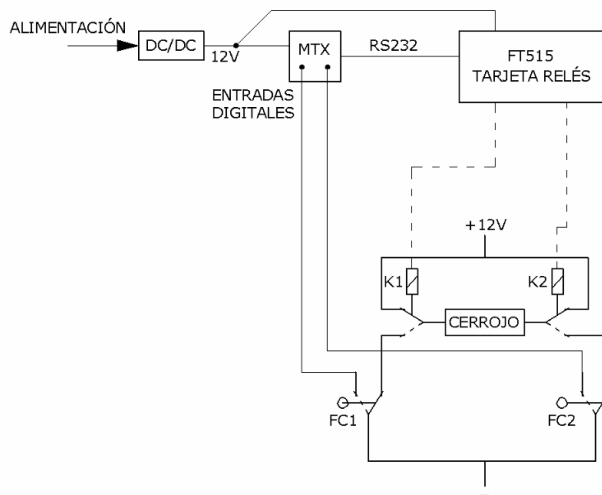


Figura 122. Esquema eléctrico cerrojos

### Estación de recarga “Sistema de Movilidad BIPA”

Se ejecutaron trabajos de adaptación en base a la realización de una nueva estación de recarga o bancada de Intemperie con nuevos elementos que se ubicaron en el remolque-aparcamiento. Para ello se realizaron los siguientes trabajos:

Estudio con los resultados obtenidos de las anteriores fases de la energía necesaria para cargar 6 baterías de litio de 37 V y 10,5 A de las bicicletas eléctricas con los cargadores del fabricante, que en el proceso de carga lo realizaban a diferentes perfiles de corriente, llegando a un máximo de 2 A y 41 V, cálculo teórico de la energía necesaria:

Energía necesaria por cada batería:

$$41,2 \text{ V} \times 2,2 \text{ A} = 90,64 \text{ W} \Rightarrow 37 \text{ V} \times 10,5 \text{ Ah} = 388 \text{ Wh}$$

Energía necesaria para las 6 baterías:

$$6 \times 90,64 \text{ W} = 543,84 \text{ W} \Rightarrow 6 \times 388 \text{ Wh} = 2328 \text{ Wh}$$

Para albergar todos los equipos necesarios se mecanizó un cuadro de intemperie en el que se alojaban los cargadores y demás equipos, dotando de las medidas de seguridad necesarias en los cargadores, así como un sistema de conexión

manual entre el cuadro y la bicicleta eléctrica. Se instalaron los circuitos y sistemas auxiliares diseñados para realizar las medidas en las recargas de las baterías que alimentarán a todo el sistema del remolque, la instalación que conmutaba entre las distintas fuentes de energía y el módulo GPRS que gestiona todo el sistema.



Figura 123. Cuadro recarga del remolque

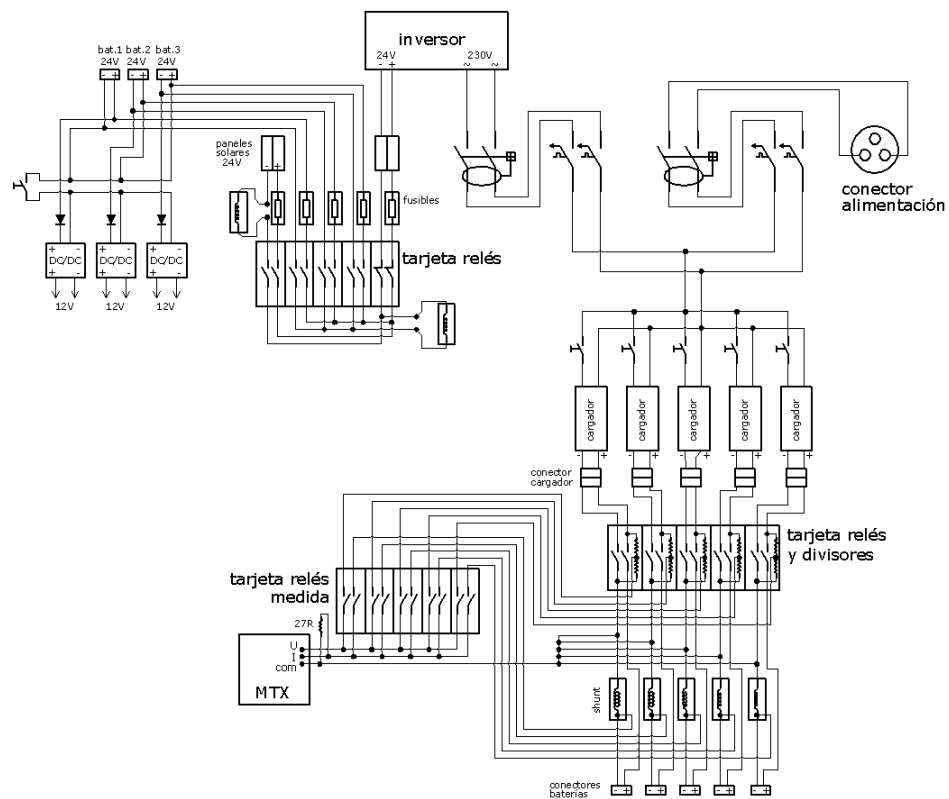


Figura 124. Esquema eléctrico cuadro recarga del remolque

Se empezó a trabajar en el diseño del sistema de recarga con energías renovables, eligiéndose la tecnología de paneles fotovoltaicos como el sistema más viable para recarga de las baterías.

A partir de varias simulaciones con la aplicación Web (PVGIS) para el dimensionado de la instalación fotovoltaica se concluyó que, con cinco paneles de 200 W y 24 V de tensión de salida, sería suficiente para mantener el sistema en funcionamiento de forma continua, pudiéndose así alimentar el sistema y recargar 3 baterías de bicicletas eléctricas de 37 V y 10,5 Ah en la situación más desfavorable. Considerando un factor de simultaneidad de 0,85, se dedujo que era posible prescindir de uno de los paneles, optándose pues por esta última opción para reducir volumen, coste y complejidad. La necesidad de instalar mayor potencia nominal que la calculada era debido a diversos factores como la reducción del rendimiento por cuestiones atmosféricas como nubes o contaminación y al ángulo de inclinación del panel, que provoca que la radiación solar incida con menor eficacia.

Posibilidad de carga nocturna del sistema. En el diseño de la instalación, se tuvo en cuenta la inclusión de una toma para la red eléctrica en el cuadro de la bancada que se podía utilizar en caso de que fallara la instalación de recarga con energía renovable o como complemento a esta. Otra posibilidad que se contempló en el diseño fue la utilización de la recarga nocturna. El consumo energético por la noche desciende notablemente y se podía utilizar esta solución de forma que no afectaría en exceso al sistema eléctrico. Durante las horas nocturnas, numerosas centrales generadoras se mantienen en funcionamiento a regímenes bajos, pero generando electricidad que, en gran parte, no es aprovechada. Esta es la energía que podría alimentar sistemas como el planteado y con ello conseguir un mejor uso de los recursos energéticos.

En base al módulo utilizado para la gestión energética en el proyecto, se definió una aplicación que realizaba las medidas oportunas de la bancada de recarga del remolque. Este se encargaba de conmutar las salidas de las tarjetas de relés para realizar las medidas de tensión y corriente de los puestos de recarga disponibles, según las ordenes introducidas, para seleccionar una fuente de energía que puede

ser solar, baterías internas, red eléctrica, etc. De la misma forma controlaba el proceso de carga de las baterías internas.

A lo largo de la última etapa del proyecto se estuvo utilizando como estación de recarga el sistema aparcamiento-remolque para comprobar el correcto funcionamiento de todos los equipos auxiliares.

Esta etapa del proyecto supuso un mayor esfuerzo de trabajo, debido a la adaptación de todos los módulos y sistemas que lo componen, a la aparición de fallos y averías en las pruebas experimentales que se fueron solventando y redefiniendo, al carácter de mejora continua, determinado por las encuestas informales de los usuarios, etc. Todo ello nos llevó a la ejecución del sistema de movilidad de bicicletas eléctricas con capacidad para abastecer energéticamente a las bicicletas eléctricas, y gestionar la movilidad de forma óptima en ciertos escenarios.

A los usuarios habituales del sistema de bicicletas eléctricas por solicitud en CIEMAT, se les pidió que utilizaran este sistema Figura 125 y

Figura 126 en los desplazamientos internos del centro de trabajo,



Figura 125. Vista general del sistema Movilidad BIPA



Figura 126. Imagen aérea del sistema Movilidad BIPA

A partir de este punto, no se continuo con el proyecto, aunque con lo comentado con los capítulos anteriores, se podía continuar con este trabajo para optimizar más si cabe el sistema de movilidad eléctrica de última milla debido que en este caso se podría optimizar una variable más que seria los aparcamientos móviles.

# Referencias

---

- [1] *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; «*Climate Change 2023: Synthesis Report*,» © Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, 2023.
- [2] *Contribution of Working Groups of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; «*Global net anthropogenic GHG emissions 1990–2019*,» IPCC Sixth Assessment Report, 2019.
- [3] *Climate Action, News, Secretary-General*, «*In historic ceremony, Ban commends China, US for formally joining Paris Agreement*,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2016/09/in-historic-ceremony-ban-commends-china-us-for-formally-joining-paris-agreement/>.
- [4] *the European Parliament and of the Council of 23 April 2009*, «*Directive 2009/29/EC*,» 2009. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:en:PDF>.
- [5] A. Wenick, «*The US and China have now officially ratified the Paris climate agreement*,» *The World*, 2016. [En línea]. Available: <http://www.pri.org/stories/2016-09-25/us-and-china-have-now-officially-ratified-paris-climate-agreement>.
- [6] *World Meteorological Organization (WMO)*, «*WMO Global Annual to Decadal Climate Update 2024-2028*,» World Meteorological Organization, Geneva, 2024.
- [7] C. W. Team, R. Pachauri y L. Meyer, «*Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,» IPCC, p. 151, 2014.
- [8] Eurostat, «*Transport energy consumption and emissions*,» 2016.
- [9] S. p. 2012, Ed.«*Transport in figures*,» *Statistical pocketbook 2023*, 2023.
- [10] OECD, «*Reducing transport GHG emissions. Opportunities and Costs. Preliminary Findings*,» *International Transport Forum*, 2016.
- [11] UN\_HABITAT, «*the World's Cities Report 2016*,» *United Nations Settlements Programme*, Kenya, 2016.

- [12] World Health Organization, «Air quality database:» World Health Organization (WHO), 2016.
- [13] World Health Organization, «Ambient (outdoor) air pollution database 2016,» (WHO), 2016.
- [14] R. Kunzig, «Germany Could Be a Model for How We'll Get Power in the Future,» National Geographic Magazine, 2015.
- [15] Q. K. Hassan, K. Rahman, A. S. Haque y A. Al, «Solar Energy Modelling over a Residential Community in the City of Calgary, Alberta, Canada,» International Journal of Photoenergy, p. 8, 2011.
- [16] Y.-J. Chiu y T.-M. Ying, «A Novel Method for Technology Forecasting and Developing R&D Strategy of Building Integrated Photovoltaic Technology Industry,» Mathematical Problems in Engineering, n° ID273530, p. 24, 2012.
- [17] M. Fuentes, «Impact of Energetic Management on the Development of LEVS as a Mode Alternative Transport Solutions Mobility to Urban/Metropolitan,» Technical Report CIEMAT, n° D.L.: M -14226-1995; ISSN: 1135 - 9420; NIPO: 471-11-015-8, p. 126, 2011.
- [18] K. Martens, «The bicycle as a feeding mode: experiences from three European countries,» Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 9, pp. 281-294, 2004.
- [19] S. Shaheen, S. Guzman y H. Zhang, «Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: past, present, and future,» Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, pp. 159-167, 2010.
- [20] P. DeMaio, «Bike-sharing: History, impacts, models of provision, and future,» Journal of Public Transportation, vol. 12, p. 3, 2009.
- [21] H. L. H. C. Yue Li, «Photovoltaic-battery powered bike share stations are not necessarily energy self-sufficient,» Applied Energy, 2023.
- [22] L. S. ., C. J. Dirk Schindler, «Importance of renewable resource variability for electricity mix transformation: A case study from Germany based on electricity market data,» Journal of Cleaner Production, 2022.
- [23] H. Sayarshad y S. T. a. F. Zhao, «A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization,» Appl. Math. Model, vol. 36, pp. 4944-4951, 2012.
- [24] P. Lebeau, C. D. Cauwer, J. VanMierlo, CathyMacharis, W. Verbeke y T. Coosemans, «Conventional, Hybrid, or Electric Vehicles: Which Technology for

*an Urban Distribution Centre?» The Scientific World Journal, n° ID302867, p. 11, 2015.*

- [25] *S. Ji, C. R. Cherry, L. D. Han y D. A. Jordan, «Electric bike sharing: simulation of user demand and system availability,» J. Clean. Prod., vol. 85, pp. 250-257, 2014.*
- [26] *E. Blasius, E. Federau, P. Janik y Z. Leonowicz, «Heuristic Storage System Sizing for Optimal Operation of Electric Vehicles Powered by Photovoltaic Charging Station,» International Journal of Photoenergy, n° ID7134904, 2016.*
- [27] *U. Habitat, «World Cities Report 2022,» United Nations Human Settlements Programme, P.O. Box 30030, Nairobi, Kenya, 2022.*
- [28] *D. O. J. A. V. C.-G. Luis A. Guzman, «Buying a car and the street: Transport justice and urban space distribution,» Transportation Research Part D, 2021.*
- [29] *R. Alvaro-Hermana, J. Fraile-Ardanuy y M. Fuentes, «Feasibility study of an electric shuttle fleet fed by solar power,» Procedia Computer Science, vol. 83, pp. Pages 799-806, 2016.*
- [30] *S. M. B. A. D. R. M. F. C. S. Jesús Fraile-Ardanuy, «Analysis of the impact of charging of Plug-in Hybrid and Electric Vehicles in Spain,» International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), 2012.*
- [31] *C. Gamallo, R. Álvaro, J. J. Fraile Ardanuy, J. González y M. Fuentes Gomariz, «Evaluation of the utilization of electric vehicles for building energy management in hotels,» International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE 2013), 2013.*
- [32] *J. González, R. Álvaro, C. Gamallo, M. Fuentes Gomariz, J. J. Fraile Ardanuy, L. Knapen y D. Janssens, «Determining Electric Vehicle Charging Point Locations Considering Drivers' Daily Activities,» Procedia Computer Science, vol. 32, pp. pp. 647-654, 2014.*
- [33] *M. Fuentes, J. Fraile-Ardanuy, J. L. Risco-Martín y J. M. Moya, «Feasibility study of a building-integrated PV manager to power a last-mile electric vehicle sharing system,» International Journal of Photoenergy, vol. 2017, p. 12, 2017.*
- [34] *«The Bike-sharing World Map,» Metrobike; <http://bike-sharing.blogspot.com.es/>, 2016.*
- [35] *F. O'Sullivan, «In Paris, Thefts and vandalism could force bike-share to shrink, The Atlantic Cityylab,» 2016.*
- [36] *L. Laursen, «Copenhagen Pioneers Smart Electric-Bike Sharing,» IEEE Spectrum News: Alternative Transportation;*

<http://spectrum.ieee.org/transportation/alternative-transportation/copenhagen-pioneers-smart-electricbike-sharing>, 2016.

- [37] L. Laursen, «Madrid begins Electric Bike Sharing,» *IEEE Spectrum News: Alternative Transportation*; <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/transportation/alternative-transportation/madrid-begins-electric-bike-sharing>, 2016.
- [38] J. C. García-Palomares y M. L. Javier Gutiérrez, «Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach,» *ELSEVIER*, p. 12, 2012.
- [39] Y.-W. Wang, «An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations,» *ELSEVIER: Transportation Research*, pp. 231-237, 2007.
- [40] R. Y. C. C. M. Y y F. R., «The Role of Government in an Emerging Disruptive Innovation: The Case of E-Bike in China,» *IEEE*, p. 5, 2012.
- [41] S. B y B. P., «Urban mobility: A comparative analysis of megacities of India,» *ELSEVIER: Transport Policy*, p. 13, 2012.
- [42] T. Goldman y R. Gorham, «Sustainable urban transport: Four innovative directions,» *ELSEVIER: Technology in Society*, pp. 261-273, 2005.
- [43] Oliver O'Brien, «Bicycle sharing systems - Global Trends in Size,» *UCL CENTRE FOR ADVANCED SPATIAL ANALYSIS: WORKING PAPERS SERIES*, n° ISSN 1467-1298, 2014.
- [44] I. K. N. Ian Vince McLoughlin, L. H. Koh, Q. H. Nguyen, B. Seshadri, W. Zeng y C. Yao, «Campus Mobility for the Future: The Electric Bicycle,» *Scientific Research: Journal of Transportation Technologies*, p. 12, 2011.
- [45] M. A. Brown, «ELECTRIC BICYCLE TRANSPORTATION SYSTEM,» *37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*, n° 20112, 2002.
- [46] M. Bertoluzzo y G. Buja, «Propulsion Systems for Light Electric Vehicles,» *IEEE*, pp. 3650-3655, 2010.
- [47] M. Bertoluzzo, G. Buja y Fellow, «Development of Electric Propulsion Systems for Light Electric Vehicles,» *IEEE*, vol. 7, n° 3, pp. 428-435, 2011.
- [48] K. T. Ulrich, «Estimating the technology frontier for personal electric vehicles,» *ELSEVIER: Transportation Research*, pp. 448-462, 2006.
- [49] W. C. Morchin, «Battery-Powered Electric Bicycles,» *IEEE: Case Electric Bicycle Company*, p. 6, 1994.

- [50] M. A y C. T. Y, «Performance Evaluation of Electric Bicycles,» *IEEE:IAS*, pp. 2865-2872, 2005.
- [51] S. A. Ajay Babu y R. S. Kumar, «Priliminary Design Considerations towards building of a Hybrid Electric Bicycle,» *IEEE: PES Innovative Smart Grid Technologies*, p. 7, 2011.
- [52] M. S. Whittingham, «History, Evolution, and Future Status of Energy Storage,» *IEEE*, p. 17, 2012.
- [53] O. Aina, «Energy Storage Systems Technologies, Evolution and Applications,» *Energy and Power Engineering*, p. 16, 2024.
- [54] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo y J. M. Carrasco, «Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications,» *IEEE: TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 57, n° 12, pp. 3881-3895, 2010.
- [55] G. Merei, C. Berger y D. U. Sauer, «Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm,» *ELSEVIER: Solar Energy*, pp. 460-473, 2013.
- [56] A. Purvins, P. Ioulia T y L. Debarberis, «Application of battery-based storage systems in household-demand smoothening in electricity-distribution grids,» *ELSEVIER: Energy Conversion and Management*, pp. 272-284, 2012.
- [57] B. M, Y. A. M, H. D y M. R, «Design and sizing of a stand-alone recharging point for battery electrical vehicles using photovoltaic energy,» *IEEE*, p. 6, 2011.
- [58] CIRCUITOR, «Recarga de vehículo eléctrico con energía solar fotovoltaica,» n° 64, 2012.
- [59] C. C. Castello, T. J. LaClair y a. L. C. Maxey, «Control Strategies for Electric Vehicle (EV) Charging Using Renewables and Local Storage,» *IEEE*, p. 7, 2014.
- [60] V. Virulkar, M. Aware y M. Kolhe, «Integrated battery controller for distributed energy system,» *ELSEVIER: Energy*, pp. 2392-2398, 2011.
- [61] J. Kaldellis y D. Zafirakis, «Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency,» *ELSEVIER: Energy*, n° 70, 2007.
- [62] N.-K. C. Nair y N. Garimella, «Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration,» *ELSEVIER: Energy and Buildings*, pp. 2124-2130, 2010.

- [63] S. Sharma y D. W. Galipeau, «*Optimization of Residential Grid-Tied PV Systems without Net-Metering Using Load Management,*» *IEEE: ICSET 2012, Nepal, 2012.*
- [64] C. Heymans, W. SeanB, Y. StevenB y F. Michael, «*Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling,*» *ELSEVIER: Energy Policy, p. 9, 2014.*
- [65] G. Mulder, F. D. Ridder y D. Six, «*Electricity storage for grid-connected household dwellings with PV panels,*» *ELSEVIER: Solar Energy, pp. 1284-1293, 2010.*
- [66] C. K. Ekman, «*On the synergy between large electric vehicle fleet and high wind penetration - An analysis of the Danish case,*» *ELSEVIER: Renewable Energy, pp. 546-553, 2010.*
- [67] T.-T. Nguyen, G. H. L. Hyung Won Kim y W. Choi, «*Design and implementation of the low cost and fast solar charger with the rooftop PV array of the vehicle,*» *ELSEVIER: Solar Energy, pp. 83-95, 2013.*
- [68] G. K. Venayagamoorthy, «*Potentials and Promises of Computational Intelligence for Smart Grids,*» *IEEE, p. 6, 2009.*
- [69] Yu y Byung-Gyu, «*Design and Experimental Results of Battery Charging System for Microgrid System,*» *International Journal of Photoenergy, n° ID7134904, 2016.*
- [70] F. Locment, M. Sechilariu y C. Forgez, «*Electric Vehicle Charging System with PV Grid-Connected Configuration,*» *AVENUES Team Research, p. 6.*
- [71] R. Villafáfila-Robles, P. Lloret-Gallego, D. Heredero-Peris y A. Sumper, «*Electric Vehicles in Power Systems with Distributed Generation: Vehicle to Microgrid (V2M) Project,*» *IEEE, p. 6, 2011.*
- [72] P. Kádár y A. Varga, «*PhotoVoltaic EV Charge Station,*» *IEEE: 11th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, p. 4, 2013.*
- [73] S. m. I. Grigore Danciu, «*Full Implementation and Assessment of the "Electrocampus" Transportation System Based on Light Electric Vehicles,*» *IEEE: THE 8th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING, p. 4, 2013.*
- [74] M. K. Aishvarya Agrawal, D. K. Prajapati, M. Singh y P. Kumar, «*Smart Public Transit System Using an Energy Storage System and Its Coordination With a*

*Distribution Grid,» IEEE: TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, p. 11, 2013.*

- [75] X. Li, O. C. L. Luiz A y W. Sheldon S, «On the Suitability of Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Charging Infrastructures Based on Wind and Solar Energy,» *IEEE, 2009.*
- [76] A. Y. Saber y G. K. Venayagamoorthy, «Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid with Renewables and Plug-in Vehicles,» *IEEE: SYSTEMS JOURNAL, vol. 6, n° 1, pp. 103-109, 2012.*
- [77] F. Guo, E. Inoa, W. Choi y J. Wang, «Study on Global Optimization and Control Strategy Development for a PHEV Charging Facility,» *IEEE, p. 23, 2012.*
- [78] S. E. M y M. S. M, «Studying the feasibility of charging plug-in hybrid electric vehicles using photovoltaic electricity in residential distribution systems,» *ELSEVIER: Electric Power Systems Research, p. 11, 2014.*
- [79] G. M y Y. P, «Study on the incorporation of photovoltaic systems as an auxiliary power source for hybrid and electric vehicles,» *IEEE: Solar Energy, pp. 441-451, 2011.*
- [80] J. Munkhamma, P. Grahn y J. Wide ´n, «Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic powergeneration in households with electric vehicle home charging,» *ELSEVIER: Solar Energy, pp. 208-2016, 2013.*
- [81] M. H. K. Tushar, C. Assi, M. Maier y M. F. Uddin, «Smart Microgrids: Optimal Joint Scheduling for Electric Vehicles and Home Appliances,» *IEEE: TRANSACTIONS ON SMART GRID,, vol. 5, n° 1, pp. 239-250, 2014.*
- [82] T. Masuta y A. Yokoyama, «Supplementary Load Frequency Control by Use of a Number of Both Electric Vehicles and Heat Pump Water Heaters,» *IEEE: TRANSACTIONS ON SMART GRID, p. 10, 2012.*
- [83] J. V. Roy, N. Leemput, F. Geth, R. Salenbien, J. Büscher y J. Driesen, «Apartment Building Electricity System Impact of Operational Electric Vehicle Charging Strategies,» *IEEE:TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, vol. 5, pp. 264-272, 2014.*
- [84] J. V. Roy, Niels Leemput, F. Geth, J. Büscher, R. Salenbien y J. Driesen, «Electric Vehicle Charging in an Office Building Microgrid With Distributed Energy Resources,» *IEEE: TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, p. 8, 2014.*

- [85] F. O. Hocaoglu, O. N. Gerek y M. Kurban, «The effect of model generated solar radiation data usage in hybrid (wind–PV) sizing studies,» *ELSEVIER: Energy Conversion and Management*, pp. 2956-2963, 2009.
- [86] Yuan-Kang Wu, C.-R. Chen y H. A. Rahman, «A Novel Hybrid Model for Short-Term Forecasting in PV Power Generation,» *International Journal of Photoenergy*, n° ID569249, p. 9, 2014.
- [87] Jurasz y Jerzy Mikulik, «Investigating Theoretical PV Energy Generation Patterns with Their Relation to the Power Load Curve in Poland,» *International Journal of Photoenergy*, n° ID3789840, p. 7, 2016.
- [88] M. S. Kevin Mets, T. Verschueren, T. Roelens, F. D. Turck y C. Develder, «Distributed Multi-Agent Algorithm for Residential Energy Management in Smart Grids,» *IEEE*, p. 9, 2012.
- [89] N. Eghtedarpour y E. Farjah, «Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids,» *ELSEVIER: Renewable Energy*, pp. 96-110, 2012.
- [90] J. P. Barton y D. G. Infield, «Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy,» *IEEE: TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 19, n° 2, pp. 441-448, 2004.
- [91] A. A. Bayod-Rujula, M. E. Haro-Larrode y A. Martinez-Gracia, «Sizing criteria of hybrid photovoltaic–wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid,» *ELSEVIER: Solar Energy*, pp. 582-591, 2013.
- [92] Y. Zong, L. Mihet-Popa, D. Kullmann, A. Thavlov, O. Gehrke y H. W. Bindner, «Model Predictive Controller for Active Demand Side Management with PV Self-consumption in an Intelligent Building,» *IEEE: 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, p. 8, 2012.
- [93] L.-M. Ritte, S. Mischinger, K. Strunz y J. Eckstein, «Modeling Photovoltaic Optimized Charging of Electric Vehicles,» *IEEE: 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, p. 8, 2012.
- [94] Y.-C. Huang, C.-C. Chan, S.-C. Kuan, S.-J. Wang y a. S.-K. Lee, «Analysis and Monitoring Results of a Building Integrated Photovoltaic Façade Using PV Ceramic Tiles in Taiwan,» *International Journal of Photoenergy*, n° ID615860, p. 12, 2014.
- [95] <http://cycling-london.blogspot.com.es>, «Cycle mph average speed in London,» *Cycling London*, 4 Octubre 2016.

- [96] M. Thwaite, «Review: 2014 Nissan e-NV200 Electric Van,» n<sup>o</sup>  
<https://transportevolved.com/2015/04/18/2014-nissan-e-nv200-review/>, 2016.
- [97] N. M. Chivelet, J. C. G. García, M. A. Abella y F. C. Romero., «Integration of solar photovoltaic energy into the rehabilitation of CIEMAT building 42,»  
*Vértices*; [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es), vol. Volume April, n<sup>o</sup> n<sup>o</sup>25, pp. 5 pag (28-32), 2016.