

# Optimización energética del transporte urbano mediante frenado regenerativo

Autor: Carlos de Santos de la Iglesia

---

Tesis doctoral UDC / 2025

Director: Dr. Diego Vergara Rodríguez

Tutor: Dr. José Antonio Orosa García

Programa de doctorado en Energía y Propulsión Marina



UNIVERSIDADE DA CORUÑA





Dr. Diego Vergara Rodríguez, Profesor del área de Ingeniería Mecánica de la Universidad Católica de Ávila.

Dr. José Antonio Orosa García, Profesor del área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de A Coruña.

AUTORIZAN:

La presentación para su depósito de la tesis realizada por D. Carlos de Santos de la Iglesia con título "Optimización energética del transporte urbano mediante frenado regenerativo".

Y para que así conste, el director y tutor de la tesis firman esta autorización en A Coruña, a fecha de firma electrónica.

Fdo: Dr. Diego Vergara Rodríguez

Director de la Tesis Doctoral

Fdo: Dr. José Antonio Orosa García

Tutor de la Tesis Doctoral





*A Cristina por seguir estando siempre  
y a Pablo por seguir cambiando nuestro mundo.*





## **Agradecimientos:**

Quiero agradecer al Dr. Diego Vergara, Director de esta Tesis, por capitanear y dirigir este barco y conseguir siempre que todo llegue a buen puerto. Por sus sabios consejos y por transmitir la confianza necesaria en cada momento.

Al Dr. Pablo Fernández, por su inestimable ayuda, conocimientos y apoyo. Por la implicación y por la calidez humana que llevo disfrutando desde que le conozco.

Al Dr. José Antonio Orosa, Tutor de esta Tesis, por su profesionalidad y su buen hacer.

A mi mujer Cristina y a mi hijo Pablo, por soportar estoicamente la escasez de tiempo compartido durante este periodo.



## 1.- RESÚMENES

### Resumo:

A redución de emisións e a eficiencia enerxética son obxectivos fundamentais para a sostibilidade do sector do transporte urbano. Unha das actuacións para acadar estes obxectivos é substituír os vehículos que integran as flotas de transporte urbano por outros máis eficientes, dotados de sistemas de freado rexenerativo que permitan recuperar parte da enerxía utilizada nos desprazamentos. Porén, ás veces non é viable a substitución total de toda unha flota de transporte urbano e só se pode realizar unha substitución parcial da mesma.

Esta Tese de Doutoramento propón realizar un estudo sobre o consumo enerxético que se produce ao longo de diferentes rutas a partir dunha serie de parámetros orográficos, cinemáticos e dinámicos, para posteriormente propoñer un modelo matemático de fácil aplicación para poder comparar diferentes rutas da transporte urbano e localizar os maiores nichos de mellora.

Para validar o modelo, os resultados estimados compáranse segundo a segundo cos resultados calculados. As achegas do modelo proposto céntranse en varios aspectos: (i) optimizar os recursos económicos; (ii) asignar os equipos máis eficientes onde se poida optimizar o consumo de enerxía; e (iii) simplificar a tarefa de optimización das rutas de transporte de pasaxeiros.

Grazas ao modelo proposto, é posible clasificar os distintos itinerarios estudados en función da cantidade de enerxía que se pode recuperar, de tal xeito que se poden utilizar equipos provistos de freada rexenerativa onde hai máis enerxía recuperable.

## Resumen:

La reducción de emisiones y la eficiencia energética son objetivos clave para la sostenibilidad del sector del transporte urbano. Una de las acciones para alcanzar estos objetivos es sustituir los vehículos que componen las flotas de transporte urbano por otros más eficientes, equipados con sistemas de frenado regenerativo que permitan recuperar parte de la energía utilizada en los desplazamientos. Sin embargo, en ocasiones la sustitución total de toda una flota de transporte urbano no es viable y sólo se puede llevar a cabo una sustitución parcial de la misma.

En esta Tesis Doctoral se propone realizar un estudio sobre el consumo energético que se produce a lo largo de diferentes rutas en base a una serie de parámetros orográficos, cinemáticos y dinámicos, para posteriormente proponer un modelo matemático de fácil aplicación que permita comparar diferentes rutas de transporte urbano y localizar los mayores nichos de mejora.

Para validar el modelo, los resultados estimados se comparan segundo a segundo con los resultados calculados. Los aportes del modelo propuesto se centran en varios aspectos: (i) optimización de los recursos económicos; (ii) asignar los equipos más eficientes donde se pueda optimizar el consumo de energía; y (iii) simplificar la tarea de optimizar las rutas de transporte de pasajeros.

Gracias al modelo propuesto, es posible clasificar los diferentes itinerarios estudiados en función de la cantidad de energía que se puede recuperar, de modo que los vehículos equipados con frenado regenerativo se puedan utilizar donde haya más energía que se pueda recuperar.

## **Abstract:**

Emission reduction and energy efficiency are key objectives for the sustainability of the urban transport sector. One of the actions to achieve these objectives is to replace the vehicles that make up urban transport fleets with more efficient ones, equipped with regenerative braking systems that allow the recovery of part of the energy used in travel. However, sometimes the total replacement of an entire urban transport fleet is not feasible and only a partial replacement can be carried out.

This Doctoral Thesis proposes to carry out a study on the energy consumption along different routes based on a series of orographic, kinematic and dynamic parameters, and then propose a mathematical model of easy application to compare different urban transport routes and locate the greatest niches for improvement.

To validate the model, the estimated results are compared second by second with the calculated results. The contributions of the proposed model focus on several aspects: (i) optimization of economic resources; (ii) allocation of the most efficient equipment where energy consumption can be optimized; and (iii) simplification of the task of optimizing passenger transport routes.

Thanks to the proposed model, it is possible to classify the different routes studied according to the amount of energy that can be recovered, so that vehicles equipped with regenerative braking can be used where there is more energy that can be recovered.

## 2.- ÍNDICE

### 2.1.- Índice de contenidos

<b>1.- RESÚMENES .....</b>	<b>9</b>
<b>2.- ÍNDICE.....</b>	<b>12</b>
2.1.- ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	12
2.2.- ÍNDICE DE FIGURAS .....	14
2.3.- ÍNDICE DE TABLAS .....	15
2.4.- ÍNDICE DE FÓRMULAS .....	16
<b>3.- MOTIVACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS. ....</b>	<b>17</b>
3.1.- INTRODUCCIÓN .....	17
3.2.- MOTIVACIÓN.....	20
3.3.- HIPÓTESIS.....	20
3.4.- OBJETIVOS .....	21
3.4.1.- OBJETIVOS INMEDIATOS.....	21
3.4.2.- OBJETIVOS A LARGO PLAZO.....	21
3.5.- ESTRUCTURA .....	22
<b>4.- ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>23</b>
4.1.- CONDUCCIÓN .....	23
4.1.1.- INFLUENCIA DE LA CONDUCCIÓN EN EL CONSUMO ENERGÉTICO .....	23
4.1.2.- CICLOS DE CONDUCCIÓN .....	25
4.1.2.1.- CICLOS URBANOS .....	25
4.1.2.2.- CICLOS SUBURBANOS .....	25
4.1.2.3.- CICLOS DE CARRETERA .....	26
4.1.3.- PRINCIPALES CICLOS DE CONDUCCIÓN.....	26
4.1.3.1.- ECE-15 Y EUDC .....	26
4.1.3.2.- NEW EUROPEAN DRIVING CYCLE (NECD) .....	26
4.1.3.3.- WORLDWIDE HARMONIZED LIGHT VEHICLES TEST PROCEDURES (WLTP) .....	28
4.1.3.4.- FTP-72 (FEDERAL TEST PROCEDURE) .....	30
4.1.3.5.- FTP-75 (FEDERAL TEST PROCEDURE) .....	30
4.1.3.6.- CICLOS JAPONESES .....	31
4.1.3.7.- CLTC.....	32
4.1.3.8.- WHTC.....	32
4.1.3.9.- OTROS CICLOS DE CONDUCCIÓN .....	32
4.2.- DINÁMICA DEL VEHÍCULO .....	33
4.2.1.- RESISTENCIA A LA RODADURA .....	35
4.2.1.1.- ADHESIÓN .....	35
4.2.1.2.- HISTÉRESIS.....	35
4.2.1.3.- MECANISMOS FÍSICOS DE LA RESISTENCIA A LA RODADURA .....	38
4.2.2.- RESISTENCIA AL ASCENSO .....	40
4.2.3.- RESISTENCIA AERODINÁMICA .....	41
4.2.3.1.- FUERZAS DE PRESIÓN .....	42
4.2.3.2.- FUERZAS DE ROZAMIENTO.....	43
4.2.4.- RESISTENCIA DEBIDA A LA INERCIA.....	46
4.2.5.- FUERZAS RESISTENTES. ESTUDIO CONJUNTO. ....	46
4.3.- VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	46
4.3.1.- FLOTAS DE VEHÍCULOS .....	47
4.3.1.1.- COMPOSICIÓN DE FLOTAS DE LAS PRINCIPALES CIUDADES ESPAÑOLAS .....	47



4.3.1.2.- RENOVACIÓN DE LAS FLOTAS DE TRANSPORTE URBANO.....	49
4.3.1.3.- PATRONES .....	49
4.4.- FRENADO REGENERATIVO.....	49
4.4.1.- INTRODUCCIÓN AL FRENADO REGENERATIVO .....	50
4.4.2.- FRENADO REGENERATIVO MECÁNICO .....	51
4.4.3.- FRENADO REGENERATIVO ELÉCTRICO .....	52
4.4.3.1.- BATERÍAS.....	53
4.4.3.2.- CAPACITORES .....	54
<b>5.- METODOLOGÍA .....</b>	<b>56</b>
5.1.- ADQUISICIÓN DE DATOS.....	58
5.1.1.- POSICIONES GPS.....	58
5.1.2.- UBICACIÓN DE LAS PARADAS .....	60
5.2.- PROCESADO DE DATOS .....	61
5.2.1.- CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS .....	61
5.2.2.- CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS .....	63
5.3.- ANÁLISIS ENERGÉTICO .....	65
5.4.- HERRAMIENTA DE CÁLCULO .....	67
5.4.1.- DATOS DE ENTRADA DEL VEHÍCULO Y EL AMBIENTE.....	68
5.4.2.- DATOS DE ENTRADA DEL RECORRIDO .....	69
5.4.3.- DATOS RESUMEN DEL RECORRIDO .....	70
5.4.4.- CÁLCULO DE FUERZAS Y POTENCIAS .....	71
5.4.5.- CÁLCULO DE ENERGÍAS .....	71
<b>6.- RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
6.1.- ALTITUD .....	74
6.2.- VELOCIDADES .....	76
6.3.- ACELERACIONES .....	78
6.4.- POTENCIAS.....	80
<b>7.- DISCUSIÓN .....</b>	<b>84</b>
<b>8.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>9.- LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>91</b>
9.1.- CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	91
9.2.- OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS .....	91
9.3.- APLICACIÓN EN OTRAS FLOTAS MUNICIPALES .....	92
<b>10.- TRANSFERENCIA DE RESULTADOS .....</b>	<b>93</b>
10.1.- ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN.....	93
10.2.- CONGRESO.....	93
10.3.- PREMIO .....	93
<b>11.- BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>94</b>
<b>12.- ANEXOS .....</b>	<b>103</b>
12.1.- ANEXO 1. VARIABLES. ....	103
12.2.- ANEXO 2. ABREVIATURAS Y SIGLAS. ....	105
12.3.- ANEXO 3. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN. ....	106
12.4.- ANEXO 4. CONGRESO. ....	126
12.5.- ANEXO 5. PREMIO.....	127

## 2.2.- Índice de figuras

Figura 1: Gráfico v-t del ciclo NEDC. Fuente: [69].	27
Figura 2: Gráfico v-t del ciclo WLTP Clase 3. Fuente: [73].	29
Figura 3: Gráfico v-t del ciclo FTP-75. Fuente: [76].	30
Figura 4: Gráfico v-t del ciclo Japan 10-15. Fuente: [77].	31
Figura 5: Sistema de ejes móviles. Fuente: [83].	34
Figura 6: Diagrama de sólido libre del vehículo. Fuente: Elaboración propia a partir de [84].	34
Figura 7: Representación gráfica de las fuerzas de adhesión e histéresis. Fuente: [87].	36
Figura 8: Gráfico de fuerza-deformación en neumático. Fuente: [86].	37
Figura 9: Curvas tensión-deformación en carga y descarga. Fuente: [86].	37
Figura 10: Distribución de fuerzas en neumático parado y en movimiento. Fuente: [84].	38
Figura 11: Diagrama de Sólido Libre de vehículo. Fuente: propia a partir de [84].	40
Figura 12: Fuerzas aerodinámicas sobre un vehículo. Fuente: [91].	42
Figura 13: Fuerzas aerodinámicas de presión sobre un vehículo. Fuente: [91].	43
Figura 14: Gráfica de la componente horizontal de la velocidad como función de la distancia vertical. Fuente: [92].	44
Figura 15: Fuerzas aerodinámicas de fricción sobre un vehículo. Fuente: [91].	44
Figura 16: Coeficientes de arrastre representativos de diferentes vehículos. Fuente: Elaboración propia a partir de [92].	45
Figura 17: Gráfica comparativa de tecnologías de propulsión de las principales flotas. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 18: Representación esquemática de KERS mecánico. Fuente: propia a partir de [113].	51
Figura 19: Energía y potencia específica de distintos tipos de baterías. Fuente: [119].	54
Figura 20: Metodología del estudio. Fuente: Elaboración propia	57
Figura 21: Línea 1 de transporte urbano de Ávila. Fuente: [123].	58
Figura 22: Línea 1 de transporte urbano de Ávila. Fuente: Elaboración propia a partir de [123].	58
Figura 23: Aplicación GPS Visualizer, mediante la cual se extraen las ternas de datos del itinerario a estudiar. Fuente: [124].	59
Figura 24: Imagen de las ternas de puntos obtenidos en formato texto plano. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 25: Imagen de las ternas de puntos obtenidos en formato hoja de cálculo. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 26: Imagen de la herramienta de cálculo utilizada. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 27: Plano de las líneas de transporte urbano en la ciudad de Ávila. Fuente: [123].	73
Figura 28: Perfil de las distintas líneas. Altitud (m) vs distancia (km). Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 29: Velocidades (km/h) vs tiempo (s) en cada una de las líneas. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 30: Aceleraciones ( $m/s^2$ ) vs tiempo (s) en cada una de las líneas. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 31: Distribución de potencia (kW) vs tiempo (s) en las distintas rutas de la ciudad de Ávila. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 32: Potencias vs altitud en línea 1. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 33: Potencia vs aceleraciones en línea 1. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 34: Potencia vs aceleraciones en detalle de línea 1. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 35: Distribución de Energía Acumulada en la línea 1 de transporte urbano de la ciudad de Ávila. Fuente: Elaboración propia.	86
Figura 36: Distribución de la energía acumulada en las distintas líneas de la ciudad de Ávila. Fuente: Elaboración propia.	88



## 2.3.- Índice de tablas

Tabla 1: Coeficientes de resistencia a la rodadura de distintos firmes. Fuente: [84] .....	40
Tabla 2: Composición de las flotas de transporte urbano. Fuente: Elaboración propia. ....	48
Tabla 3: Características técnicas del autobús tipo utilizado para el estudio. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 4: Orografía de las distintas líneas de transporte de Ávila. Fuente: Elaboración propia.....	74
Tabla 5: Velocidades de las distintas líneas de transporte de Ávila. Fuente: Elaboración propia. ....	76
Tabla 6: Tiempo de aceleración en las distintas líneas. Fuente: Elaboración propia.....	78
Tabla 7: Máxima Potencia Recuperable y Potencia Recuperable media (kW) en las distintas líneas de transporte. Fuente: Elaboración propia .....	83
Tabla 8: Energía aportada y recuperable (MJ) en las distintas líneas de transporte de Ávila. Fuente: Elaboración propia.....	84
Tabla 9: Número de paradas, elevación acumulada, E <sub>sup</sub> y E <sub>rec</sub> (por km de recorrido) en las distintas línea. Fuente: Elaboración propia .....	85
Tabla 10: Resultados obtenidos E <sub>estsup</sub> y E <sub>estrec</sub> con el modelo de regresión. Fuente: Elaboración propia.	86



## 2.4.- Índice de fórmulas

Ecuación 1 .....	33
Ecuación 2 .....	36
Ecuación 3 .....	37
Ecuación 4 .....	39
Ecuación 5 .....	39
Ecuación 6 .....	40
Ecuación 7 .....	40
Ecuación 8 .....	42
Ecuación 9 .....	45
Ecuación 10 .....	61
Ecuación 11 .....	63
Ecuación 12 .....	64
Ecuación 13 .....	65
Ecuación 14 .....	65
Ecuación 15 .....	65
Ecuación 16 .....	65
Ecuación 17 .....	65
Ecuación 18 .....	66
Ecuación 19 .....	66
Ecuación 20 .....	66
Ecuación 21 .....	69
Ecuación 22 .....	69
Ecuación 23 .....	69
Ecuación 24 .....	72
Ecuación 25 .....	84
Ecuación 26 .....	84
Ecuación 27 .....	84
Ecuación 28 .....	85
Ecuación 29 .....	85

## 3.- Motivación, hipótesis y objetivos.

### 3.1.- Introducción

“Salvaguardar el medio ambiente [...] es un principio rector de todo nuestro trabajo en el apoyo del desarrollo sostenible; es un componente esencial en la erradicación de la pobreza y uno de los cimientos de la paz”. Kofi Annan. (1938 - 2018).

De esta manera se refería el ex-secretario General de la ONU y Premio Nobel de la Paz de 2001 al tratamiento de cuidado y respeto que se le debía dar al medio ambiente, no sólo como un fin en sí mismo, sino como uno de los fundamentos que ha de seguir la humanidad sobre el que construir su propio futuro.

Un sistema económico que basa su razón de ser en un crecimiento constante, en una explotación desmedida de los recursos naturales y en la búsqueda del máximo beneficio como única meta, inmerso en un entorno que cuenta con recursos naturales finitos es, por lógica, insostenible en el tiempo. Por este motivo, se ha llegado a la conclusión que hay que cambiar el paradigma del sistema económico, productivo y tecnológico, y que esto no impida el desarrollo y el crecimiento, ni que comprometa su propia viabilidad ni, por supuesto, el futuro de la sociedad.

Ya en 1895, el científico sueco y premio Nobel de química, Svante August Arrhenius, fue el primero en tomar en consideración qué cambios en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera podían estar relacionados con el avance o retroceso de los glaciares [1].

Hace ya más de 30 años, en 1988, se creó, por parte de la *World Meteorological Organization (WMO)* y el *United Nations Environment Programme (UNEP)*, el *IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*. Se trata de una comisión dentro del Programa de la *ONU* para el medio ambiente, encargada (i) de la búsqueda de evidencias científicas que pongan de manifiesto la influencia de las actividades humanas en el clima del planeta, (ii) de evaluar dicha influencia, y (iii) de realizar estudios sobre las consecuencias que puede tener dicha influencia en el clima en el futuro.

En 1990 se publicó el primer informe del *IPCC* [2], confirmando que las sospechas eran fundadas y reales, quedando el cambio climático respaldado por evidencias científicas. En 1992 se celebró la Cumbre de la Tierra en Rio de Janeiro, donde se fundó la *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, entrando en vigor en 1994. En dicha convención se establecieron las bases para las negociaciones internacionales sobre el cambio climático y se fundó la llamada *Conference of the Parties (COP)*, donde los países firmantes se reúnen anualmente para evaluar los resultados obtenidos y negociar los compromisos a futuro.

En el año 1997, en la COP3, se establece el llamado Protocolo de Kyoto, el primer tratado promovido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático donde se establecen medidas jurídicamente vinculantes para la reducción de gases de efecto invernadero. De forma similar, en 2015, llegó el llamado Acuerdo de París, surgido en la *COP21*, considerado un hito en la historia de la acción climática mundial y donde se señalaba la gran importancia que tenía mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2°C [3].

En el año 2020 la Comisión Europea aprobó la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente, junto con un plan de acción que comprende 82 iniciativas, englobadas en 10 áreas emblemáticas de actuación, diferenciadas en 3 dimensiones: sostenibilidad, inteligencia y resiliencia [4, 5]. Estas iniciativas, a desarrollar en los próximos años, establecen las bases para que el sistema de transporte europeo pueda alcanzar su transformación hacia un sistema de transporte más sostenible, inclusivo, inteligente, ecológico y digital.

Por otro lado, el Marco de actuación en materia de Clima y Energía hasta el año 2030, que deberá aplicarse en la Unión Europea (UE) a partir del año 2021, incluye los siguientes objetivos de política energética europea para el año 2030: (i) reducir obligatoriamente las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE por lo menos en un 55%, con respecto a los valores de 1990; (ii) aumentar la cuota de energías renovables dentro del consumo total de energía de la UE hasta alcanzar en el año 2030 un mínimo del 32%; y (iii) mejorar la eficiencia energética en al menos un 32% [6, 7].

Habida cuenta de que el sector del transporte es responsable de gran parte de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de la UE, el objetivo principal de esta estrategia es ser más resiliente ante futuras crisis, cumpliendo con el *Green Deal* [8]. En consonancia con el acuerdo de París [9], el *Green Deal*, mecanismo de la UE para la transformación del sistema energético [10] y el desarrollo de una economía verde y sostenible en un escenario pos *COVID-19* [11], tiene como objetivo principal la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al menos en un 55 % desde 2025 al año 2030 y de un 90% las emisiones de Gases de Efecto Invernadero antes del año 2050, alcanzando así la neutralidad climática [8, 12].

Dentro de las 82 iniciativas desarrolladas en la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la UE, se encuentra la iniciativa emblemática 2, cuyo objetivo es impulsar la adopción de vehículos de emisión cero [4, 5] y la descarbonización del sector del transporte [13]. Dentro de esta iniciativa emblemática, se desarrolla el transporte por carretera, en el cual se están desplegando soluciones de emisión cero [14, 15].

Actualmente ya surgen voces contrarias al optimismo desenfadado en cuanto a la electrificación de la industria automotriz en su camino hacia la electrificación [16–18]. Si bien estos trabajos ponen el foco en una posible desaceleración en el camino a la electrificación resaltando los retos y dificultades a las que se enfrenta la industria automotriz y que inicialmente se han tomado de una forma más somera de lo que parece ponerse de manifiesto a tenor de los indicios que están apareciendo recientemente, estos estudios no indican un cambio en la tendencia hacia la electrificación ni abogan por un abandono de dicha senda. Existen diversos factores que dificultan la electrificación del vehículo eléctrico, tales como la falta de mano de obra cualificada, los altos costes y dificultades técnicas en cuanto al desarrollo de las baterías, y la incertidumbre sobre el retorno de las cuantiosas inversiones realizadas en la electrificación. Además, parece que la disposición que tiene el consumidor es mucho menos propensa de lo que se suponía inicialmente, debido, entre otras causas, a que las emisiones de los vehículos eléctricos no son tan bajas en comparación a los vehículos de combustión, sobre todo si se tiene en cuenta las emisiones de todo el ciclo de vida del vehículo eléctrico, el llamado enfoque *from cradle to yard*, donde, en algunos casos, la huella de carbono generada por kilómetro recorrido por un vehículo eléctrico es prácticamente igual que uno de combustión [19]. A pesar de ello, es innegable que con el vehículo eléctrico se resuelve en gran medida el problema de la concentración de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los núcleos más grandes de población. Los distintos estudios sostienen que estos hechos podrían dificultar y/o ralentizar la adopción masiva de este tipo de tecnologías por parte de la sociedad y sugieren que la industria automotriz debe superar estos retos para asegurar la transición hacia lo eléctrico.

A pesar de los retos y dificultades expuestos anteriormente, y en una clara disposición para superarlos, a día de hoy los fabricantes siguen invirtiendo numerosos recursos técnicos y económicos en el desarrollo de vehículos eléctricos con batería [20]. Aunque a un ritmo más lento de lo esperado, la aceptación comercial de la tecnología híbrida está creciendo, especialmente en el caso de los automóviles, furgonetas y autobuses utilizados en zonas urbanas [21–23], mientras que la de los camiones y autocares de larga distancia empieza a despuntar [24, 25].

En el caso de España, las emisiones del transporte en el año 2014 fueron de 77.2 MtCO<sub>2</sub>-eq, habiéndose incrementado casi en un 50% desde 1990 como consecuencia del aumento en la demanda de movilidad de pasajeros y mercancías [24, 26, 27]. No obstante, desde 2007 se ha registrado una disminución de las emisiones como consecuencia de la crisis económica y de las medidas de mitigación que se han puesto en marcha en este sector [27]. El sector transporte representa el 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en España. Recientemente, en el año 2020, el gobierno nacional aprobó la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo [27, 28].

Por último, en el caso de Castilla y León (España), en el año 2009 su gobierno regional aprobó la Estrategia Regional contra el Cambio Climático [29], en la cual se desarrollan las políticas regionales de mitigación de las emisiones de gases causantes del efecto invernadero durante este período. Castilla y León, con una extensión superior a los 90.000 km<sup>2</sup> [30], es la región de España con mayor extensión, incluso superior a varios estados miembros de la UE, entre ellos Bélgica y Portugal.

Por otro lado, Castilla y León es una de las regiones del mundo con más *World Heritage Sites* (WHS) declarados por la UNESCO, con 8 emplazamientos: Burgos (Catedral y yacimiento de Atapuerca), Segovia y su acueducto, casco antiguo de Ávila y sus iglesias extra-muros, casco antiguo de Salamanca y las Médulas (León), [31]. En el caso de las ciudades patrimonio de la humanidad de la región –Ávila, Salamanca y Segovia–, en ellas se reúnen monumentos y obras arquitectónicas de un valor excepcional, así como grupos de construcciones, aisladas o reunidas, cuya arquitectura, unidad e integración en el paisaje les da un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia.

El cambio climático supone un desafío para la humanidad. Son múltiples los estudios y las iniciativas existentes tanto para tratar de frenar el cambio climático como para tratar de adaptarse a él [32–36]. Una de las tantas afecciones del clima cada vez más extremo en el que vivimos es la destrucción del patrimonio arquitectónico tan extenso y valioso que existe en nuestro país. Los cambios en el clima, cada vez más extremos, pueden dañar los cimientos de las estructuras arquitectónicas y provocar deslizamientos de tierra [37]. Además, han sido detectados otros riesgos para el patrimonio cultural arquitectónico, tales como mohos, o plagas de insectos [38]. Otros estudios advierten que existen amenazas para el patrimonio arquitectónico no ya por los cambios de temperatura, sino, directamente asociados a la polución atmosférica, en los que se ha demostrado que la presencia de contaminantes asociados a la circulación de vehículos a motor en las proximidades de los edificios estudiados, son capaces de acelerar significativamente el proceso de corrosión de edificios de origen medieval [39].

Estas ciudades WHS deben velar por la protección y conservación de la belleza e historia de sus núcleos urbanos. Para lograrlo, deben mantener bajos niveles de contaminación atmosférica, acústica, lumínica, etc. [40, 41].

Además, huelga decir, ya que no es el alcance de esta investigación, que la contaminación atmosférica, no sólo afecta al patrimonio cultural sino a la propia salud de la población. La literatura existente es ciertamente extensa y contrastada, recogiendo y documentándose la gran cantidad de afecciones que produce la contaminación [42–45].

Una de las medidas que más contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la automoción es el frenado regenerativo [46–48]. Gracias a este sistema, es posible transformar parte de la energía utilizada para frenar el vehículo y almacenarla para su uso posterior. De esta manera, es posible reducir en gran medida el consumo del vehículo, así como aumentar la autonomía.

### 3.2.- Motivación

A la vista de esta situación desarrollada en los últimos párrafos del apartado anterior, la principal motivación de la presente investigación es la búsqueda de la optimización energética de la flota de transporte urbano [49] de una de las ciudades WHS: Ávila. Los sistemas de frenado regenerativo aportan una carga adicional a las baterías híbridas, mientras el vehículo se encuentra en movimiento [50–54]. Es decir, estos sistemas aprovechan gran parte de la energía cinética del vehículo y la transforman en energía eléctrica, que posteriormente podrá ser utilizada como fuente de energía del motor eléctrico. La búsqueda de la optimización energética consistirá en buscar un método que permita priorizar la instalación de frenado regenerativo en una línea antes que en otra, basándose en criterios energéticos.

La eficiencia energética, así como la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la contaminación ambiental, han de ser los criterios a tener en cuenta a la hora de apostar por la tecnología regenerativa. La viabilidad de esta tecnología permitiría conservar la riqueza monumental del casco antiguo de Ávila, gracias a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de su transporte urbano. Del mismo modo, validada la viabilidad de dicha tecnología, esta podría ser replicada por otros sistemas de transporte urbano, favoreciendo la consecución del ansiado objetivo de neutralidad climática en el año 2050.

### 3.3.- Hipótesis

En un entorno que se ve acuciado por la emergencia climática es de vital importancia emprender acciones que ayuden a frenar y/o mitigar el cambio climático y sus consecuencias. Una de las medidas más efectivas y apoyadas por las agencias es la reducción de emisiones de GEI. En el ámbito de la automoción, esto se consigue sustituyendo los vehículos por otros menos contaminantes.

La primera hipótesis de este trabajo es tomar como acertado el hecho de que gran parte de las flotas de vehículos existentes no son renovadas íntegramente de una sola vez, sino que se van realizando renovaciones parciales de los vehículos que la componen. Esto hace que las características de los vehículos no sean iguales y por lo tanto no serán iguales los consumos que tendrán al realizar el mismo recorrido.

Si se toma como objeto de estudio una determinada flota con un número de vehículos  $n$ , que realiza un número determinado de trayectos  $m$ , no parece descabellado suponer que el consumo global de combustible puede variar dependiendo de la asignación de determinados vehículos a ciertas rutas.

Si el vehículo menos eficiente de la flota es asignado para hacer el recorrido más “exigente” gastará mucho más que si se asigna al vehículo más eficiente. Tomando la misma lógica, parece sensato pensar que no existirán diferencias tan significativas si se envían los dos tipos de vehículos a realizar un recorrido menos demandante.

Se toma, por tanto, la hipótesis de que existen recorridos que, por sus características intrínsecas, pueden suponer un gasto de combustible mayor y que, consecuentemente, la asignación de unos vehículos más eficientes a los recorridos más exigentes puede redundar en un ahorro del consumo de combustible y por ende, de dinero o de las emisiones de GEI a la atmósfera.

Este trabajo parte de la convicción de que se puede optimizar el consumo de combustible asignando los vehículos más eficientes a las rutas más exigentes, de forma que el potencial de los nuevos vehículos sea lo más aprovechado en la medida de lo posible.

### **3.4.- Objetivos**

Partiendo de las hipótesis expuestas en el apartado anterior, la línea de investigación presentada se trata del desarrollo de una herramienta capaz de calcular (i) la potencia necesaria para el desplazamiento de un vehículo en cada instante, (ii) la energía consumida a lo largo de un intervalo determinado del recorrido y (iii) la energía total consumida a lo largo del recorrido o la energía disipada o susceptible de ser recuperada mediante la aplicación de un frenado regenerativo en el vehículo. Esta herramienta, permite tener perspectiva de qué fuerzas resistentes al avance del vehículo tienen más peso en el trayecto realizado.

Las variables de entrada de la herramienta son las distintas características del automóvil, la trayectoria que sigue éste y las velocidades y aceleraciones instantáneas. La herramienta devuelve, entre otras, el perfil del recorrido, la potencia instantánea (bien la aportada por el motor o bien la potencia de frenado), la energía empleada en el desplazamiento del vehículo hasta un instante dado y la energía susceptible de haber sido recuperada hasta ese instante.

#### **3.4.1.- Objetivos inmediatos**

Dentro del término “objetivos inmediatos”, se engloban los objetivos que quedan dentro del alcance de este trabajo y los cuales creen haberse conseguido, como se procura demostrar a lo largo de la presente Tesis Doctoral.

Tales objetivos son los siguientes:

- Estudio energético de cada una de las líneas de transporte público de la ciudad de Ávila y comparación entre ellas.
- Clasificación de las distintas líneas en cuanto a su eficiencia energética. El conocimiento de este dato permitiría poder elegir qué líneas son las mejores para destinar unos hipotéticos nuevos autobuses con sistema de hibridación que comprara el Ayuntamiento de Ávila.
- Cuantificación de la energía susceptible de haber sido recuperada en los distintos trayectos de transporte urbano de la ciudad de Ávila, que se produciría al cambiar los autobuses convencionales por autobuses con frenado regenerativo.

#### **3.4.2.- Objetivos a largo plazo**

El alcance de este trabajo es el transporte urbano de la ciudad de Ávila pero el mismo estudio de campo sería perfectamente extrapolable a otras ciudades y a otros ámbitos en los que interviniera el transporte rodado. De esta manera, hay objetivos que, si bien quedan fuera del alcance de este trabajo, bien se podrían considerar como asequibles en futuros trabajos como continuación de éste.

Tales objetivos son los siguientes:

- Comparativa entre la eficiencia del transporte público urbano entre distintas ciudades.
- Optimización de flotas y trayectos (aplicable a autobuses pero también a recogidas de residuos sólidos urbanos).

### 3.5.- Estructura

El presente trabajo de investigación está formado por siete capítulos a través de los cuales se estructura el contenido de éste. El trabajo se ha estructurado así con el objetivo de ser mostrado de una manera clara, concisa y estandarizada, adecuada a los requerimientos que un trabajo de estas características ha de tener. Para ello se ha establecido una estructura como la que se enumera y desglosa a continuación:

La primera parte del presente trabajo está constituida por los dos primeros apartados, que se constituyen como una introducción al resto del trabajo. Esta parte está compuesta de un primer apartado, en el que se exponen, a modo de resumen las principales ideas de la presente Tesis. Posteriormente, en un segundo apartado, se encuentran los distintos índices que han sido considerados.

Un tercer apartado denominado “Motivación, hipótesis y objetivos” en el cual se desarrolla un contexto que trata de ser un punto de partida sólido que permita desarrollar las ideas que se pretenden plasmar en el conjunto del trabajo. Se realiza un recorrido sobre la contaminación atmosférica, el cambio climático y las influencias y afecciones que tiene éste sobre el medio ambiente, centrándose en el patrimonio arquitectónico de los emplazamientos patrimonio de la humanidad de Castilla y León y más concretamente en la ciudad de Ávila, que es donde se ha realizado el estudio. En este capítulo se recogen también las razones que motivan el emprendimiento de esta tarea, las hipótesis de partida y los objetivos, inmediatos y a largo plazo, que se pretenden alcanzar con la realización de este estudio.

En un cuarto apartado denominado “Estado del arte” se recopilan los conocimientos y avances en el campo del vehículo eléctrico, la conducción, la dinámica vehicular y el frenado regenerativo. Es sobre estos cuatro pilares fundamentales donde se pretende construir y desarrollar las ideas originarias de este trabajo. Se sientan las bases de los conceptos y técnicas que serán utilizados como herramientas para la consecución de los objetivos fijados.

En el quinto apartado, de nombre “Metodología”, se detallan cuáles han sido las directrices seguidas en el estudio realizado, partiendo de una recogida de datos sobre el terreno. Después se describe el tratamiento y procesado de los datos recogidos con el fin de poder convertirlos en información de utilidad. Posteriormente se describe cómo la información ya procesada y segmentada se utiliza para realizar los cálculos necesarios para confirmar o descartar las hipótesis de partida.

Es en el sexto apartado, denominado “Resultados”, donde se muestran, organizan, y presentan los resultados de los cálculos realizados en este trabajo. En este apartado se pretende exponer de una manera lo más ordenada posible los resultados obtenidos por la herramienta de cálculo desarrollada.

El séptimo apartado se ha denominado “Discusión” y a lo largo de él se pretende demostrar tanto la validez de los resultados obtenidos por la herramienta de cálculo desarrollada en este trabajo, como la de las hipótesis de partida. El trabajo plasmado en este apartado compara los resultados obtenidos por la herramienta de cálculo propuesta con los resultados obtenidos por otras vías, a fin de compararlos y certificar la validez a tenor de los resultados similares obtenidos.

En el octavo apartado, llamado “Conclusiones”, se presentan, a modo de epílogo, las deducciones lógicas que se han realizado a partir del trabajo realizado en la discusión del capítulo anterior.

El noveno apartado se reserva para la exposición de las líneas futuras de investigación que pueden ser emprendidas como continuación del trabajo realizado para esta Tesis.

El décimo apartado está destinado a la transferencia de resultados. El undécimo, se reserva para la bibliografía en la que se ha apoyado la presente Tesis. El duodécimo y último apartado se reserva para los anexos.

## 4.- Estado del arte

A la hora de describir el conocimiento actual existente relacionado con esta investigación se ha optado por dividirlo en tres grandes áreas: la conducción del vehículo automóvil, la dinámica que aplica a ésta y el vehículo eléctrico.

Puesto que en este trabajo se aspira a medir y a evaluar los distintos itinerarios que puede recorrer un determinado vehículo, se exponen a continuación los conceptos relacionados con la conducción del vehículo sobre los que se ha apoyado este trabajo, los métodos que tradicionalmente se han utilizado para medir el desempeño de los vehículos o las normativas y regulaciones más importantes que se han empleado en la tarea de mensurar el consumo y las emisiones de un vehículo a motor.

Profundizando un poco más en el conocimiento y en el marco teórico, se repasan los modelos conceptuales que describen la dinámica vehicular, puesto que este trabajo hace uso de no pocas expresiones y ecuaciones utilizadas frecuentemente en este campo a fin de poder calcular las distintas variables que son necesarias para el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente se exponen los conceptos fundamentales relacionados con el vehículo eléctrico, principalmente, el concepto de frenado regenerativo, su funcionamiento y las posibilidades de recuperación de energía que habilita este dispositivo.

### 4.1.- Conducción

La conducción de los vehículos automóviles y el consumo de combustible que tienen estos son dos aspectos que están íntimamente relacionados y que requieren un manejo profundo de las distintas características de conducción que se dan en cada momento. La forma de conducir de cada persona es única, por lo que puede existir una tremenda variabilidad en los consumos que presenta un mismo vehículo que realiza un mismo recorrido si este es conducido por dos personas diferentes.

Para tratar de homogeneizar y estandarizar los valores de consumos que se ofrecen de los distintos vehículos, las organizaciones encargadas de la gestión del transporte han ideado los llamados ciclos de conducción, que proporcionan una información precisa sobre el consumo de combustible de un vehículo al tratarse de ensayos que controlan, miden y mantienen constantes múltiples factores de la conducción para poder garantizar la repetitividad de las condiciones de ensayo.

Si bien son importantes en este trabajo los ciclos de conducción, más importante aún es la metodología con la cual están confeccionados los ciclos de conducción, puesto que el trabajo que se va a realizar en esta investigación se protocoliza siguiendo el procedimiento generalizado en los distintos ciclos de conducción.

#### 4.1.1.- Influencia de la conducción en el consumo energético

El tipo de conducción que desarrolla un conductor es uno de los factores que más pueden influir en el consumo de combustible de un vehículo en hacer un recorrido determinado. Las aceleraciones y frenadas fuertes son uno de los factores que más pueden contribuir a un consumo elevado de combustible. Otro de los factores que más influye en un consumo excesivo es la velocidad. A mayor velocidad, mayor consumo de combustible. El uso de equipos auxiliares del vehículo como, por ejemplo, el aire acondicionado también supone un incremento en el consumo final del vehículo, puesto que la energía para comprimir el fluido calorportador que efectúa el ciclo de Carnot para refrigerar del vehículo procede, en última instancia, del motor del propio vehículo. El uso de dispositivos electrónicos como asientos calefactables, elevallas o equipos de entretenimiento audiovisual también consumen una energía eléctrica que hay que imputar al consumo del vehículo.

En un artículo previo [55] se plantearon seis parámetros independientes que conforman el patrón de conducción (velocidad de las ruedas, velocidad del motor, uso de los frenos, ángulo del acelerador y flujo de aire en la admisión) sobre los cuales se demostró mediante análisis factorial y de regresión que tienen efectos considerables sobre las emisiones y el consumo de combustible, mientras que en otro trabajo [56] se consideraron como factores influyentes: RPM medias, RPM máximas, aceleración media, desviación estándar de la aceleración, velocidad media/velocidad máxima), características del tráfico (duración del viaje, número de paradas y tiempo de parada), pendiente de la carretera (pendiente media) y consumo de combustible.

Es un hecho contrastado e incluso intuitivo que, cuanto más uniforme sea la conducción y menos bruscas sean las aceleraciones y las frenadas, el consumo de combustible será menor y, consecuentemente, las emisiones también serán menores que si se mantiene una conducción con grandes y frecuentes variaciones de la velocidad.

Si los conductores adoptan un estilo de conducción eficiente, evitando velocidades elevadas, aceleraciones y frenadas bruscas, e intentan mantener una velocidad constante, se podría reducir el consumo en una proporción nada desdeñable. Un mismo vehículo que recorre un mismo itinerario con las mismas condiciones externas, sin más que cambiar de conductor o, cuanto menos, de estilo de conducción, puede presentar consumos manifiestamente alejados entre sí [57–59]. De hecho, se han llegado a documentar ahorros de un 10% en el consumo de combustible y de las emisiones aplicándose técnicas de eco-conducción [60].

La eco-conducción es una técnica de conducción que aúna la idea de la eficiencia energética con la del cuidado del medio ambiente. Consiste en aplicar una serie de técnicas con el fin de reducir las emisiones de GEI y el consumo de combustible. Las aceleraciones suaves, el mantener una velocidad constante, cambiar de marcha sin dejar subir en exceso las RPMs del vehículo o planificar los viajes con antelación para evitar atascos son algunas de las técnicas que se aplican en la eco-conducción.

Las ventajas de la eco-conducción no solo están ligadas al campo del ahorro energético y la protección medioambiental, sino que la adopción de técnicas de eco-conducción puede mejorar la seguridad vial, al ser capaces de anticipar posibles peligros en la carretera, o incluso se han llegado a reportar beneficios en los conductores que practican la eco-conducción reduciendo los niveles de estrés de éstos, frente a los conductores que desarrollan un normal ejercicio de la conducción [56].

Existe gran cantidad de literatura sobre la conducción eficiente y el ahorro de combustible a lo largo de la historia de la automoción [61–63]. Pero, si se conoce que el tipo de conducción influye sobremedida en el consumo de combustible del vehículo ¿Cómo se podrían comparar, entonces, las bondades de un vehículo eficiente con respecto a otro que no lo es tanto? ¿Cómo poder cuantificar esa diferencia? ¿Cómo sería posible comparar, estudiar y sacar conclusiones sobre cuanto más eficiente es un vehículo respecto de otro? Naturalmente, se tendrían que igualar y estandarizar las condiciones del estudio y realizar éste en un entorno conocido y controlado, como en cualquier experimento científico y, el tipo de conducción que se realiza sobre el vehículo, no es una excepción.

Vista la problemática, la consecuencia lógica es estandarizar la forma en la que se conduce un vehículo para poder comparar sus cualidades en igualdad de circunstancias. Para ello, se crean los llamados “ciclos de conducción”, unos protocolos de conducción que definen las velocidades que va a tener un vehículo en cada instante de tiempo que dure un ensayo determinado.

#### **4.1.2.- Ciclos de conducción**

Un ciclo de conducción es un patrón de actividades que se realizan sobre el vehículo en movimiento. Se compone de series temporales de velocidades que mantiene el vehículo a lo largo de un determinado intervalo de tiempo. Los ciclos de conducción están desarrollados para representar determinadas conductas o patrones de conducción considerados representativos de la conducción que un usuario tipo suele realizar y son de vital importancia para realizar estudios, unificando las variables de entrada, a fin de poder establecer conclusiones válidas [64].

Los ciclos de conducción son frecuentemente utilizados para estimar las emisiones de los vehículos, calcular el consumo de energía y evaluar el impacto del tráfico.

Los ciclos de conducción pueden ser de distinta naturaleza dependiendo de las condiciones que se pretendan estudiar. Por ejemplo, un ciclo de conducción puede incluir largas distancias a altas velocidades para realizar un estudio sobre transporte entre dos puntos muy alejados entre sí y, sin embargo, otro ciclo de conducción puede estar compuesto de distancias cortas a bajas velocidades y multitud de paradas que puede representar los trayectos cortos a velocidades moderadas que se realizan en el ámbito urbano.

Se podrían clasificar los ciclos de conducción en tres categorías, atendiendo a su naturaleza:

##### **4.1.2.1.- Ciclos urbanos**

Se trata de ciclos que ocurren en entornos urbanos y que implican paradas y arrancadas frecuentes y bruscas. Estos ciclos suelen ser duros para un vehículo y sus componentes.

Los ciclos urbanos se caracterizan por tener un alto consumo de combustible en relación a la distancia recorrida.

##### **4.1.2.2.- Ciclos suburbanos**

Son ciclos que ocurren en las proximidades de entornos urbanos y que implican trayectos más largos que los ciclos urbanos, menos frecuencia en las paradas y mayores velocidades pero aun conservando las características de los ciclos urbanos.

La circulación en polígonos industriales, rondas o carreteras de circunvalación, encajarían dentro de esta tipificación puesto que los desplazamientos se realizan con mayor fluidez que en el propio casco urbano pero, sin embargo, aún siguen existiendo condiciones que exigen la adecuación de la velocidad a las condiciones cambiantes del tráfico (mantener distancia de seguridad, o atascos) o a las propias condiciones de la vía (cruces, semáforos, incorporaciones).

Estos ciclos son menos exigentes para un vehículo que los ciclos urbanos, pero aún conllevan una carga importante de arrancadas y paradas que pueden elevar en gran medida tanto los desgastes de componentes como embragues y frenos, como los consumos de carburante en relación a una distancia de referencia.

#### 4.1.2.3.- Ciclos de carretera

Son ciclos que tienen lugar en carreteras y autopistas y que implican trayectos largos a altas velocidades, con pocas paradas y con relativa falta de necesidad de adecuación de la velocidad a las condiciones del tráfico o de la propia vía.

Este tipo de ciclos pueden ser más exigente para el motor del vehículo y no tanto para embragues y frenos, que sufren más en otro tipo de ciclos.

#### 4.1.3.- Principales ciclos de conducción

Cuando se está realizando un estudio, es necesario tener en cuenta qué tipo de comportamiento de conducción se quiere estudiar para adecuar la representación de los ciclos de conducción a las sollicitaciones reales que va a tener el vehículo en su uso común.

Existe multitud de literatura sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de combustible u optimización energética que hacen uso del conocimiento de los patrones de conducción como herramienta para contribuir a la consecución de los distintos objetivos fijados [65–67].

Además, a lo largo de la historia se han normalizado y regularizado diferentes ciclos de conducción en el ámbito de la industria automotriz. Estos ciclos han sido utilizados como herramienta para estudiar, comparar y mejorar, en un primer momento los consumos y, posteriormente, las emisiones de gases.

A continuación, se muestran los principales ciclos de conducción que más relevancia tienen o han tenido a lo largo de los años.

##### 4.1.3.1.- ECE-15 y EUDC

En el año 1970, se presenta un ensayo de laboratorio consistente en un ciclo de conducción urbana que simulaba las condiciones de conducción en el centro de grandes ciudades como París o Roma. Este ciclo de conducción tenía una duración de 195 segundos en los que se recorrían (en dinamómetro) 1013 metros. Era utilizado para obtener la homologación *ECE R15* [68].

En 1990, la antigua Comunidad Económica Europea, por medio de su Directiva para la certificación de emisiones de los vehículos ligeros 90/C81/01, introduce el test *EUDC (Extra Urban Driving Cycle)*, donde se reproducen condiciones de conducción más agresivas y con velocidades mayores [69]. Tiene una duración de 400 segundos y en ese tiempo se recorren 6995 metros.

##### 4.1.3.2.- New European Driving Cycle (NECD)

El *New European Driving Cycle (NECD)* o también llamado ciclo Europa es un ciclo de conducción desarrollado por la Unión Europea. El ciclo de conducción queda representado en la Figura 1, y se trata de una combinación de cuatro ciclos de conducción *ECE-15*, que representa una conducción urbana, y un ciclo de conducción extra urbano, *Extra Urban Driving Cycle – EUDC*.

El ciclo *ECE-15* que representa la parte urbana, se compone en gran medida de aceleraciones, frenadas, velocidades mantenidas y estados de reposo en los cuales el motor permanece al ralentí. De esta manera, el ciclo pretende emular las características que se suelen dar en un entorno urbano, practicando una conducción con frecuentes arrancadas y paradas.

La velocidad máxima que se alcanza en este ciclo es de 50 km/h y su duración es de poco más de tres minutos. En el cómputo total de la realización de los cuatro ciclos *ECE-15* se recorren aproximadamente 4 kilómetros.

La parte extraurbana de la prueba se realiza inmediatamente después de haber concluido la realización del ciclo urbano y se compone, principalmente, de periodos en los cuales se desarrolla una velocidad mantenida (50 km/h, 70 km/h, 100 km/h y 120 km/h). La velocidad máxima que se alcanza es de 120 km/h y se recorre una distancia de unos 7 km en apenas 6 minutos de tiempo de realización de esta parte de la prueba.

Esta prueba es realizada en laboratorios independientes, obteniéndose de esta manera los datos concernientes a emisiones y consumos de los distintos modelos de los vehículos testados. Las pruebas se realizan en el interior de estancias dotadas de rodillos donde se coloca el vehículo. La temperatura está controlada entre 20 y 24 grados centígrados y la prueba ha de realizarse después de haber estado el vehículo, por lo menos, 6 horas y media sin funcionar, para simular las condiciones de conducción habituales.

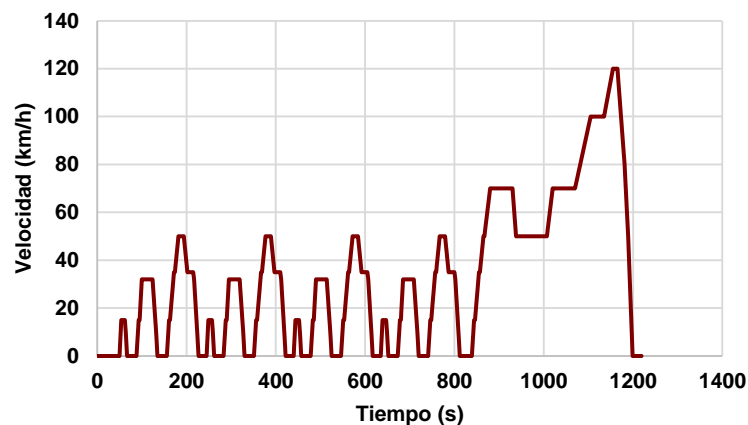


Figura 1: Gráfico v-t del ciclo NEDC. Fuente: [69].

Con el paso de los años ha quedado demostrado que el ciclo *NEDC* no aportaba fiabilidad en sus ensayos, permitiendo que algunos fabricantes homologaran consumos muy alejados de la realidad.

Este protocolo tenía, además, muchas lagunas. La utilización de este ciclo de conducción, propiciaba la explotación de estas “zonas grises” por parte de los fabricantes. Bien conocidos y documentados son los casos de falseamiento de consumos como, por ejemplo, el de *FCA US*, la división de *Stellantis* en Estados Unidos, que fue condenada a pagar casi 300 millones de dólares por manipular las emisiones que los motores diésel fabricados entre 2014 y 2016 arrojaban cuando eran sometidos a pruebas oficiales [70] o, por supuesto, el más famoso y reciente, conocido como el escándalo del *dieseldate*, destapado por un investigador de la Universidad de Virginia en 2015 [71], y por el que se conoció que millones de vehículos habían sido equipados con un dispositivo que les permitía falsear las pruebas de conducción, homologando consumos dentro de la legalidad que no se correspondían con los consumos reales. En su uso convencional, los automóviles afectados arrojaban hasta 40 veces más emisiones de lo permitido. A la fecha de redacción de este párrafo, ha salido la noticia de la resolución del Tribunal de Justicia de la Unión Europea, en la que se reconoce a los clientes afectados por el *dieseldate* el derecho a ser indemnizados [72].

Tras la aparición de éstos y otros fraudes, las autoridades europeas emprendieron el camino hacia la implementación de un nuevo ciclo de conducción para la homologación de consumos que se ajustara en mayor medida a las condiciones reales de conducción en las que participan los vehículos y que no se prestara con tanta facilidad a la manipulación de los datos por parte de los fabricantes. Nació entonces el *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP)*.

#### 4.1.3.3.- Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP)

El Procedimiento Armonizado Mundial de Ensayo de Vehículos Ligeros (*WLTP*, por sus siglas en inglés) es el nuevo estándar para medir la eficiencia del combustible y las emisiones de los automóviles.

Los estados miembro de la Unión Europea, más Japón, Estados Unidos de América, China, Rusia e India, sentaron las bases para el desarrollo de un nuevo procedimiento de homologación, mediante la firma del tratado de la *UNECE*, de 1998 [73].

Se introdujo por primera vez en 2017 para, como se exponía en el párrafo anterior, poder ofrecer resultados más precisos y realistas que su predecesor, el *New European Driving Cycle (NEDC)*.

Con el fin de hacer del *WLTP*, una prueba más completa y difícil de “evadir” que el *NEDC*, en este nuevo ciclo se tienen en consideración las condiciones de conducción real, tales como velocidades más elevadas, además de aceleraciones y frenadas más bruscas. También se incluyen ensayos más estrictos de las emisiones, no solo de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sino de partículas (inquemados) y de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Además el ciclo de conducción *WLTP*, está adaptado a las nuevas tecnologías automovilísticas, ofreciendo una regulación para los vehículos eléctricos e híbridos.

La prueba, que queda representada gráficamente en la Figura 2, consta básicamente de cuatro partes, sin que exista distinción específica entre ciudad y carretera:

- **Ciclo de baja velocidad:** aunque no sea explícitamente, es la parte del ciclo que más se puede asemejar a la conducción por ciudad, donde frecuentemente se producen paradas y arranques. Tiene una duración de 589 segundos en los que se realizan algo más de 3 kilómetros, con una velocidad máxima de 56,5 km/h. Las aceleraciones quedan acotadas entre -1,5 y 1,5  $\text{m/s}^2$ . Se realiza a una velocidad media de 20 km/h.
- **Ciclo de media velocidad:** puede asemejarse a la conducción en carretera, con velocidades sostenidas y con una velocidad media de 80 km/h. La duración es de 433 segundos, que se emplean en recorrer 4,7 kilómetros, a una velocidad máxima de 76,6 km/h. Las aceleraciones están acotadas entre -1,5 y 1,6  $\text{m/s}^2$ .
- **Ciclo de alta velocidad:** pudiera asemejarse a la conducción que se da por autopista. En esta parte del ciclo se recorre una distancia ligeramente superior a los siete kilómetros, para lo que se emplean un total de 455 segundos. La velocidad máxima de esta parte se establece en 97,4 km/h, quedando las aceleraciones comprendidas, al igual que en el caso anterior, entre -1,5 y 1,6  $\text{m/s}^2$ .
- **Ciclo de extra-alta velocidad:** simula la conducción a velocidades aún mayores que la anterior parte del ciclo, con velocidades de hasta 131 km/h (81 mph). Es la parte del ciclo que dura menos y, al mismo tiempo, es en la que más distancia se recorre. Un total de 8,2 kilómetros recorridos en 323 segundos, que arrojan una media de 91 km/h

A la hora de configurar el ciclo de conducción han de tenerse en cuenta una serie de características técnicas de los vehículos, pues la configuración se hará en base a ellas. Así, los vehículos quedan clasificados de la siguiente manera:

- **Clase 1:** Se trata de vehículos con una relación potencia-peso inferior a 22kW/Tm. Los vehículos que cumplan esta premisa realizarán el ciclo *WLTP* Clase-1, compuesto por la parte Baja y la parte Media velocidad.
- **Clase 2:** En esta categoría se engloban los vehículos con una relación potencia-peso comprendida entre 22kW/Tm y 34kW/Tm. Los vehículos que cumplan esta premisa realizarán el ciclo *WLTP* Clase-2, compuesto por la parte “Baja”, la parte “Media” y la parte “Alta” velocidad.
- **Clase 3:** Se trata de vehículos con una relación potencia-peso superior a 34 kW/Tm. Los vehículos que cumplan esta premisa realizarán el ciclo *WLTP* Clase-3, compuesto por la parte “Baja”, la parte “Media”, la parte “Alta” y la parte “Extra Alta” velocidad.

En el caso de que la velocidad máxima que, por construcción, tuviera un vehículo fuera inferior a la que se exige en una parte concreta del ciclo, se sustituye esa parte por la parte inmediatamente inferior del ciclo. A modo de ejemplo, para un vehículo mayor de 34 kW/Tm, el ciclo que le correspondería hacer sería: *Baja – Media – Alta – Extra Alta*. Ahora bien, si la velocidad máxima, por construcción del vehículo fuera de 125 km/h, el ciclo que debería realizar, sería el siguiente: *Baja – Media – Alta – Alta*.

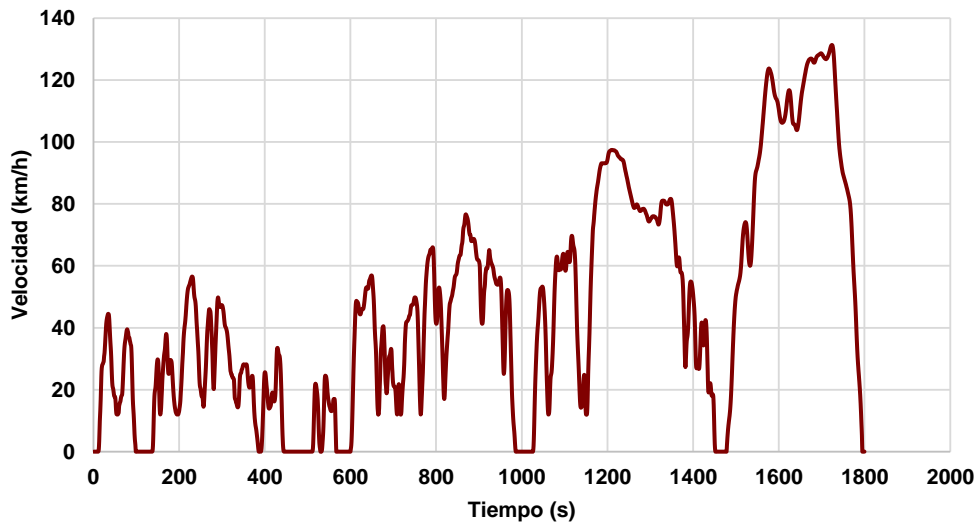


Figura 2: Gráfico v-t del ciclo *WLTP* Clase 3. Fuente: [73].

El *WLTP* supone una gran mejora a la hora de comparar consumos y emisiones en los diferentes vehículos en relación al ciclo *NEDC*, puesto que está más preparado en cuanto a la posibilidad de tener en cuenta distintos parámetros de la conducción, tales como la masa del vehículo, las fuerzas resistentes, el uso del aire acondicionado o distintos parámetros de los neumáticos. Además, las series temporales de velocidad que se dan en el ciclo de conducción del *WLTP* son más realistas, aplicando como velocidades más altas y aceleraciones y deceleraciones más frecuentes y bruscas que son más representativas de la conducción real. El hecho de definir unas condiciones de ensayo mucho más próximas a las condiciones de conducción que tienen lugar en la vida real repercute en unos niveles más elevados de exactitud en los ensayos, incluso para los vehículos eléctricos o híbridos [74].

Una de las principales ventajas del hecho de que el *WLTP* arroje más precisión y resultados más cercanos a la vida real es que los consumidores tienen información más fiable para valorar una eventual compra, o no, de un modelo de vehículo determinado. Además, ofrece más igualdad de condiciones a los fabricantes, ya que la nueva prueba se aplica a todos los coches vendidos en el mundo.

#### 4.1.3.4.- FTP-72 (Federal Test Procedure)

El ciclo de conducción FTP-72 o también conocido como *Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS)* es establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América.

El ciclo *FTP-72* define una conducción diaria que tiene lugar, principalmente en condiciones urbanas. El ciclo simula un recorrido urbano de 7,5 millas, con una velocidad media de 19,6 mi/h y una velocidad máxima de 56,7 mi/h. Se divide en dos partes: la fase urbana y la fase en carretera.

La fase urbana representa la conducción que se da en las ciudades, con múltiples y frecuentes aceleraciones y frenadas. En la fase urbana de este ciclo, el vehículo se desplaza durante los primeros 505 segundos a una velocidad promedio de 11 mi/h. El comienzo de la fase urbana se ha de hacer con el motor en frío.

La fase en carretera representa la conducción en carretera abierta, donde las velocidades se mantienen en el tiempo de una forma más constante. Esta fase tiene una duración de 864 segundos [75].

#### 4.1.3.5.- FTP-75 (Federal Test Procedure)

El ciclo de conducción *FTP-75* es el ciclo de conducción más utilizado para medir la eficiencia y las emisiones de los vehículos en los Estados Unidos. Se utiliza para establecer los estándares de emisiones de los vehículos, y tiene una gran relevancia dentro de la industria automotriz americana.

El ciclo *FTP-75* se compone de la totalidad del ciclo *FTP-72* al que se añaden los 505 primeros segundos de nuevo, con la diferencia de que, esta segunda vez, la parte urbana se realiza con el motor caliente. El ciclo completo dura alrededor de 31 minutos (1874 segundos) y consta de aproximadamente 11 millas de conducción que se recorren a una velocidad media de 21,2 mi/h [76]. En la Figura 3, se muestra gráficamente la serie temporal de la velocidad a la que se realiza este ciclo de conducción.

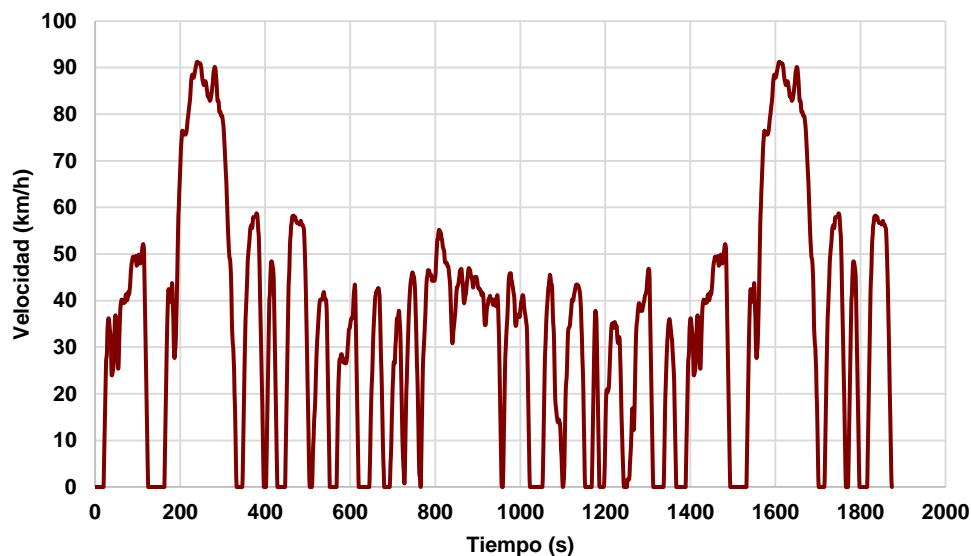


Figura 3: Gráfico v-t del ciclo FTP-75. Fuente: [76].

#### 4.1.3.6.- Ciclos Japanese

Tradicionalmente, la normativa japonesa referente a emisiones GEI ha sido muy rígida, haciendo que los fabricantes de la industria automotriz hayan tenido que destinar gran cantidad de recursos para conseguir desarrollar tecnologías de control de emisiones lo suficientemente eficaces como para poder cumplir los estrictos límites que impone la normativa. Esta circunstancia, ha hecho que los niveles de  $\text{NO}_x$  y otros GEI hayan ido disminuyendo sistemáticamente en Japón, incluso en las grandes zonas urbanas [77].

El primer ciclo de conducción japonés que tuvo una repercusión notable fue el llamado ciclo 10-15. Este ciclo se representa en la Figura 4 y está compuesto de una primera parte con bajas velocidades y paradas frecuentes que trata de simular un escenario urbano, y una segunda parte, en la que se dan velocidades más elevadas y duraderas, en la que se pretende replicar una conducción por carretera. La parte urbana, llamada ciclo 10, se compone de aceleraciones y frenadas, separadas por periodos en los que se mantiene una velocidad constante a 20 km/h y 40 km/h. Esta parte dura en torno a dos minutos y se alcanza una velocidad máxima de 40 km/h. La parte extraurbana, o ciclo 15, consiste en someter a los vehículos a aceleraciones y frenadas más espaciadas en el tiempo, y a velocidades sostenidas que oscilan entre 40 km/h y 70 km/h. El tiempo que toma realizar este ciclo está en torno a los 4 minutos. El proceso se inicia con el vehículo en caliente, y la toma de datos comienza con la realización de un ciclo 10, repetido en tres ocasiones, seguido de un sólo ciclo 15 [77].

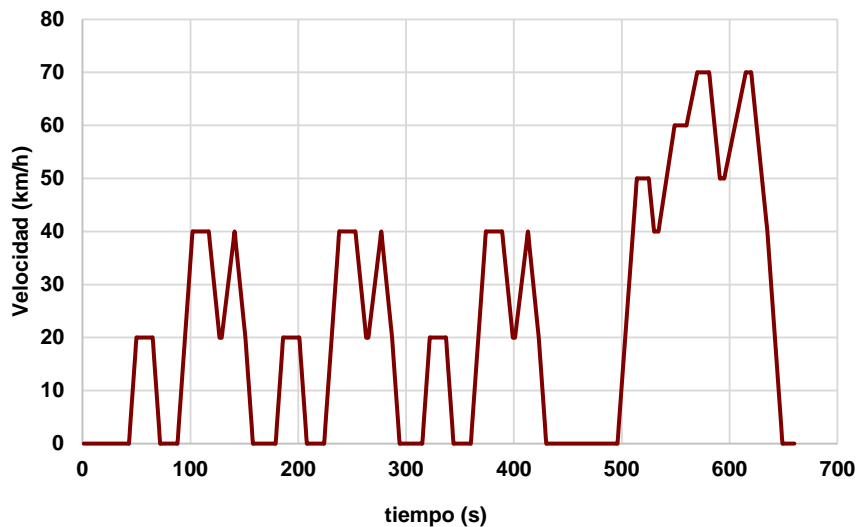


Figura 4: Gráfico v-t del ciclo Japan 10-15. Fuente: [77].

A partir del año 2015, se cambia el ciclo de conducción con el que se homologan los consumos. Se pasa del *Japan 10-15* al llamado *JC-08*, con el objetivo de replicar las condiciones que se dan en el ejercicio de la conducción real tales como el ralenti o las paradas, y poder simular con mayor fidelidad patrones típicos de conducción urbana y/o de autopista. Este ciclo *JC-08* es notablemente más largo y riguroso que el modo 10-15 [78].

Japón ha sido partícipe en los debates internacionales sobre la armonización mundial de los ciclos de conducción contribuyendo activamente al desarrollo del Ciclo de Ensayo de Vehículos Ligeros Armonizado a Nivel Mundial y, como resultado de esta participación, en el año 2018 adoptó el *WLTC* de la *ONU* para medir las emisiones de los nuevos turismos y vehículos comerciales ligeros. Así, desde este año, se exige, siempre que sea necesario, que se muestren las tasas de consumo de combustible medidas en todas las fases de conducción del *WLTP*, así como su tasa media certificada [77].

#### 4.1.3.7.- CLTC

El *China Light-Duty Test Cycle (CLTC)* se trata de un ciclo dividido en tres partes. En una primera fase (lenta) se le hace rodar al vehículo durante algo más de diez minutos a velocidades bajas (nunca mayores de 45 km/h) y paradas frecuentes. En una segunda fase (media) se hace rodar al vehículo a velocidades de hasta 65 km/h durante algo más de 10 minutos y, en una tercera fase (rápida) se le somete al vehículo a velocidades de hasta los 114 km/h durante algo más de 7 minutos. El ciclo al completo tiene una duración de 30 minutos exactos, en los que se recorren algo más de 14 kilómetros, obteniéndose una velocidad media de 30 km/h y una aceleración media de  $0,45 \text{ m/s}^2$  [79].

#### 4.1.3.8.- WHTC

El *World Harmonized Transient Cycle (WHTC)* es un ciclo de conducción realizado por el *Working Party on Pollution and Energy (GRPE)*, organismo dependiente del *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations* de las Naciones Unidas. Con la preparación de este ciclo de conducción se busca crear un procedimiento mundial de certificación de vehículos pesados. Está pensado para recoger y armonizar las características de conducción alrededor de todo el mundo [80].

En el ciclo de conducción se contemplan requisitos de ensayo con arranque en frío y en caliente y están adaptados a la normativa de motores Euro VI [81].

#### 4.1.3.9.- Otros ciclos de conducción

En los apartados anteriores se han referido someramente los ciclos de conducción que más repercusión han tenido. Sin embargo, a lo largo y ancho del mundo, han surgido infinidad de ciclos de conducción. Cada uno de ellos buscando reproducir de la mejor manera posible la realidad de las distintas conducciones que se establecen a lo largo del mundo. Aunque en general, lo que se busca es homologar y homogeneizar, han surgido múltiples ciclos de conducción destinados a representar de la manera más fidedigna las condiciones de conducción locales.

Los ciclos de conducción pueden ser meramente informativos o, en otros casos, llegar a tener carácter legislativo. Los siguientes ciclos de conducción tienen carácter legislativo y como tal se han establecido en EE.UU, la Unión Europea y Japón: *FTP75*, Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (*NEDC*) y *JC08* respectivamente, han sido utilizados como estándares impuestos por los distintos gobiernos para homologar consumos y emisiones de GEI de los distintos modelos de vehículos.

No obstante, existen infinidad de ciclos de conducción que carecen de la condición de ley y que, sin embargo, han proliferado en diferentes países y ciudades como Vadodara, Bangalore, el Ciclo de Conducción Urbana de Malasia (*MUDC*), Hong Kong, Pune, Edimburgo, Atenas, Singapur y 11 ciudades chinas. Aunque estos ciclos de conducción no cuenten con la entidad suficiente como para ser utilizados en la homologación y certificación de consumos, no están carentes de utilidad, sino que tienen una amplia aplicación en distintas investigaciones para la conservación de la energía y la evaluación de la contaminación.

Todos los ciclos de conducción no legislativos nombrados han sido empleados en investigaciones que van desde la estimación del rendimiento energético hasta el propio diseño de los vehículos [82].

## 4.2.- Dinámica del vehículo

Para la consecución de los objetivos fijados en este trabajo, en el cual se van a estudiar las distintas transferencias energéticas que se van a producir entre el vehículo y su entorno es de vital importancia comenzar definiendo las condiciones de contorno, el diagrama de sólido libre del estudio y a qué fuerzas va a estar sometido el vehículo.

Cuando un vehículo cualquiera se desplaza rodando sin deslizar en el seno de un fluido como el aire, se producen unas determinadas resistencias al avance del vehículo. Si se quiere mantener una velocidad constante, es necesario que se produzca el aporte de una determinada cantidad de energía. Esta energía que es necesario aportar de manera continua estará destinada a vencer las distintas resistencias que se presentan cuando un vehículo se desplaza.

Según la segunda ley de Newton, la aceleración del vehículo vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_T - \sum F_R}{m} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

$v$ : velocidad

$t$ : tiempo

$\sum F_T$ : fuerza de tracción total del vehículo

$\sum F_R$ : suma de las resistencias al avance

$m$ : masa del vehículo

Para poder estudiar el comportamiento del vehículo analizado, se hace necesario conocer y definir cómo va a interactuar el vehículo con su entorno, para poder medir, clasificar y ponderar los efectos que, sobre el vehículo, ejercen las distintas fuerzas que se le van a aplicar en el ejercicio de la conducción. Para poder determinar estos efectos, hay que conocer las magnitudes de las fuerzas que actúan sobre el vehículo y, para ello, es fundamental establecer un sistema de referencia sobre el cual queden perfectamente definidas, velocidades y aceleraciones, pero también fuerzas y momentos.

Básicamente existen dos tipos de sistemas de referencia: (i) fijo —sistema estacionario o inercial—, sobre el cual se cumplen las leyes de Newton sin necesidad de fuerzas ficticias; y (ii) un sistema de referencia móvil o no inercial, en el cual es necesario la adición de fuerzas ficticias —como la fuerza centrífuga o la aceleración de Coriolis— para que se cumplan las leyes del movimiento de Newton dentro de él.

En este texto se va a trabajar sobre un sistema de referencia móvil, ligado al vehículo. Dado que no se van a trabajar en profundidad las propiedades inerciales que implica la elección de un sistema de referencia móvil, es conveniente optar por un sistema de referencia que facilita la identificación de las fuerzas, desde el punto de vista de la persona que va subida en el vehículo. De ahora en adelante, por tanto, en este trabajo se utilizará el sistema de referencia definido por la norma *ISO 8855* [83] y representado gráficamente en la Figura 5:

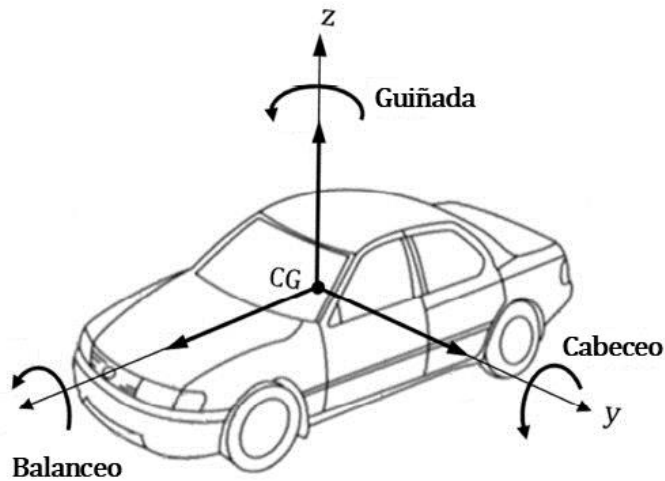


Figura 5: Sistema de ejes móviles. Fuente: [83].

Debido a la naturaleza y alcance del presente trabajo, el estudio dinámico que se va a realizar se centrará en la definición de la dinámica longitudinal del vehículo. El objeto del estudio es medir y valorar las acciones que vayan a afectar al movimiento rectilíneo del vehículo, quedando fuera del estudio acciones que queden fuera del plano de simetría longitudinal del vehículo. El movimiento de un vehículo dentro de su plano de simetría longitudinal queda completamente determinado por la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él en este plano.

En cuanto al sumatorio de resistencias al avance ( $\Sigma F_R$ ), es un término que engloba las resistencias que debe vencer el vehículo en su avance y que tienen su origen en fenómenos de distinta naturaleza. Se van a distinguir tres tipos de resistencias al avance, a saber: resistencia a la rodadura ( $F_{rod}$ ), resistencia aerodinámica ( $F_{aero}$ ) y resistencia al ascenso ( $F_{grad}$ ). Esta terna de fuerzas será estudiada en apartados posteriores en los que se irá desgranando la naturaleza del fenómeno en cuestión y cuantificando los efectos de ésta.

En la Figura 6 se muestran las fuerzas que actúan sobre el vehículo en el supuesto caso en el que éste se encuentra ascendiendo una pendiente. El esfuerzo de tracción,  $F_t$ , en la zona de contacto entre los neumáticos de las ruedas motrices y la superficie de la carretera impulsa el vehículo hacia delante.

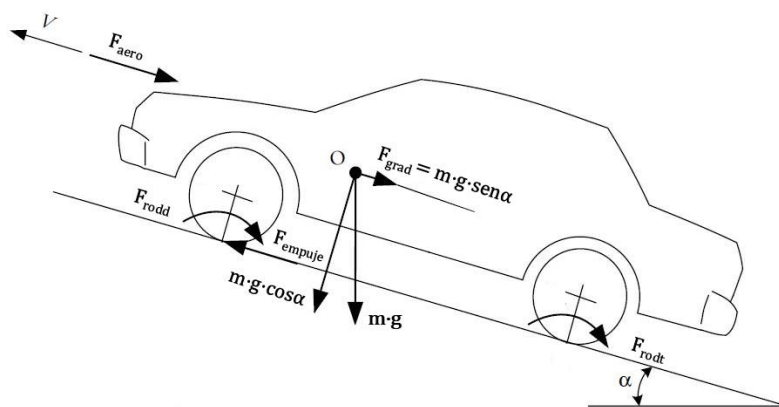


Figura 6: Diagrama de sólido libre del vehículo. Fuente: Elaboración propia a partir de [84].

donde:

$F_{\text{aero}}$ : Resistencia aerodinámica

$g$ : gravedad

$\alpha$ : Ángulo de pendiente

$F_{\text{rod}}$ : Resistencia de rodadura (en la imagen descompuesta en  $F_{\text{rodd}}$ : resistencia a la rodadura delantera +  $F_{\text{rodt}}$ : resistencia a la rodadura trasera).

$F_{\text{grad}}$ : Resistencia al ascenso.

#### 4.2.1.- Resistencia a la rodadura

Una de las resistencias que tiene que vencer el vehículo en su avance es la resistencia a la rodadura. Esta fuerza resistente tiene lugar cuando el neumático del vehículo rueda sin deslizar a lo largo de la superficie sobre la que circula. Aunque, si bien es cierto que la intuición invita a pensar que la resistencia de un cuerpo que rueda sin deslizar por una superficie debería ser cero al no existir rozamiento, lo cierto es que esta fuerza poco o nada tiene que ver con el rozamiento, entendiendo éste como la fuerza que aparece por fricción al deslizar un cuerpo sobre otro.

Cuando un neumático está rodando, aparece una resistencia a la rodadura causada por, principalmente, dos fenómenos: el fenómeno de la adhesión y en mayor medida, el fenómeno de la histéresis [85].

Estos dos fenómenos, que se explican a continuación y se representan gráficamente en la Figura 7, son los responsables de que en el eje de la rueda aparezca un momento que va a estar en oposición al giro de la rueda.

##### 4.2.1.1.- Adhesión

La resistencia a la rodadura equivalente a la adhesión consiste básicamente a que el caucho se adhiere a la superficie de la carretera. Este fenómeno se produce como resultado de la unión molecular entre el caucho del neumático y las superficies de rodadura sobre las cuales circula el vehículo. A nivel microscópico, la suma de las superficies de contacto entre el neumático y la carretera es mucho menor que la huella del neumático observada. Al ser menor la superficie de contacto, las presiones a las que están sometidas las superficies son mucho mayores, produciéndose el fenómeno de “soldadura en frío”. La resistencia a la rodadura causada por la adhesión es la fuerza que hay que realizar para romper los enlaces moleculares y separar las superficies en contacto cuando el vehículo se desplaza [86].

La resistencia por adhesión aumenta levemente con la temperatura y en mayor medida con la presión y disminuye considerablemente cuando la carretera está cubierta de agua o polvo, pues la presencia de estos elementos impide el contacto directo del neumático con la carretera impidiendo, por tanto, la creación de dichas uniones moleculares.

##### 4.2.1.2.- Histéresis

La resistencia a la rodadura de los neumáticos en superficies duras es debida fundamentalmente al fenómeno de la histéresis, el cual aplica en los materiales con los que está formado el neumático [85].

Los neumáticos están compuestos fundamentalmente de caucho, que es un material con propiedades viscoelásticas. En materiales completamente elásticos (un muelle ideal) cuando se aplica una fuerza, el material se comprime, y a lo largo del camino de compresión, está ejerciendo una fuerza de reacción que es proporcional a la elongación del muelle. En términos de la ley de Hooke, quedaría de la siguiente manera:

$$F = k \cdot x$$

(Ec. 2)

donde:

$F$ : Fuerza (N)

$x$ : elongación (m)

$k$ : constante de elasticidad del muelle (N/m)

En primer lugar un muelle está gobernado por un campo de fuerzas conservativo. Esto quiere decir que cuando una fuerza externa comprime un muelle, está generando un potencial de energía elástica. Energía que el muelle devolverá en la fase de descompresión. Al igual que en un columpio hay una transferencia de energía potencial gravitatoria a energía cinética, en la compresión y expansión de un muelle ocurre lo mismo, debido a que la fuerza del muelle solo depende de la posición. Esto indica que el muelle empezará a descomprimirse en el mismo instante que cese la fuerza externa.

Sin embargo el caucho, y por extensión el neumático, no actúa de la misma manera sino que, debido al fenómeno de la histéresis, el material del neumático, no recupera su forma instantáneamente cuando la fuerza cesa. Esto hace que la fuerza que el caucho ejerce cuando cesa la deformación es menor que la fuerza necesaria para producir ésta, resultando, de esta manera, en un campo de fuerzas no conservativo donde se disipa energía (la energía de deformación es mayor que la energía de recuperación).

La rodadura del neumático sobre una irregularidad en la carretera provoca una deformación en la superficie del propio neumático. Cuando, por el mero hecho de rodar, esta irregularidad ya ha superado el punto de contacto, el material del neumático tiende a recuperar su forma inicial y a restablecer su contacto con la carretera pero, debido a la histéresis, no de forma inmediata. Este desfase entre causa (cesión de la fuerza que causa la deformación) y efecto (recuperación de la forma inicial) hace que el neumático apoyado sobre el asfalto de la carretera «abra» las irregularidades de manera asimétrica, produciéndose más contacto por delante de la rugosidad que por la parte posterior de ésta, siempre considerando el sentido de la marcha. Esto genera una distribución de presiones orientada en sentido contrario al de la rodadura, lo que contribuye a la resistencia a la rodadura total.

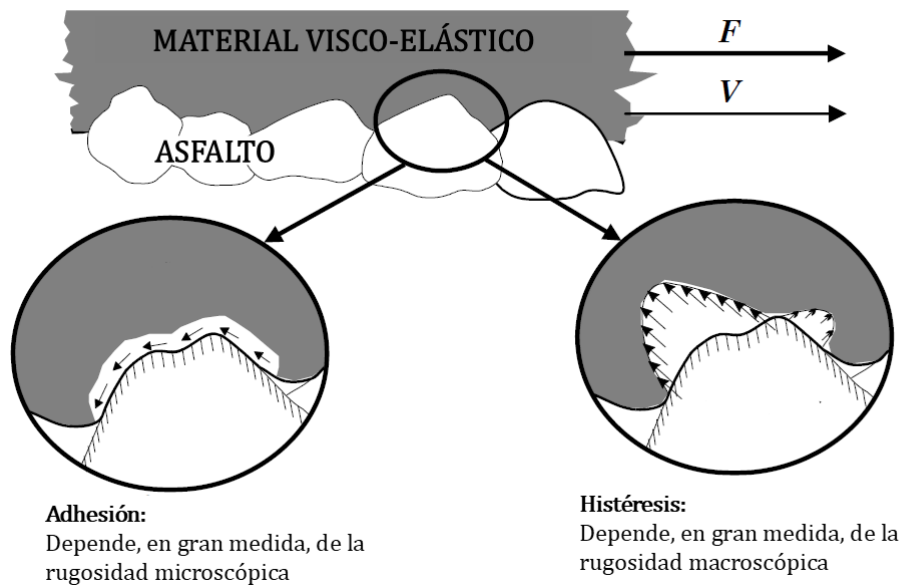


Figura 7: Representación gráfica de las fuerzas de adhesión e histéresis. Fuente: [87].

Tal y como se observa en la Figura 8, las curvas de rigidez de un neumático modelizan la deformación que se produce en éste ante las diferentes cargas que puede sufrir.

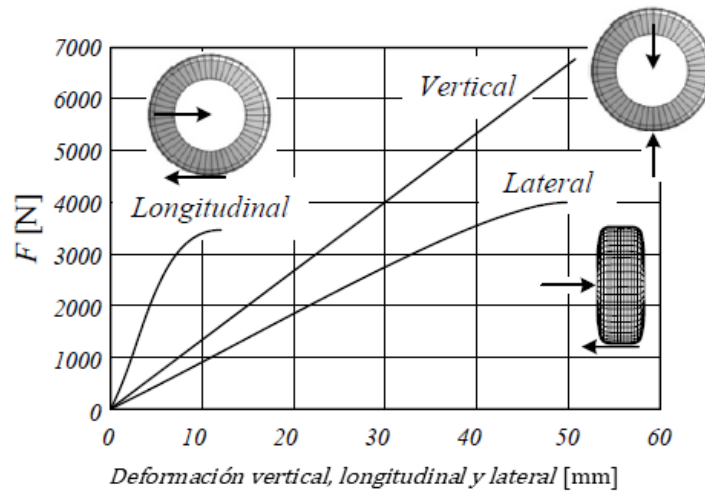


Figura 8: Gráfico de fuerza-deformación en neumático. Fuente: [86].

Dado el alcance de este trabajo, en el que únicamente se están analizando los efectos de la dinámica longitudinal del vehículo, solo se va a considerar la rigidez del neumático en la dirección  $z$ .

$$F_z = k_z \cdot \Delta z \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

$F_z$ : Fuerza en la dirección  $z$  (N)

$\Delta z$ : elongación en la dirección  $z$  (m)

$k_z$ : rigidez del neumático en la dirección  $z$  (N/m)

La cantidad de energía disipada dependerá de las características mecánicas del neumático pero, en cualquier caso, las curvas de rigidez de carga y descarga mostrada por el neumático, no son exactamente iguales, sino como se muestran en la Figura 9:

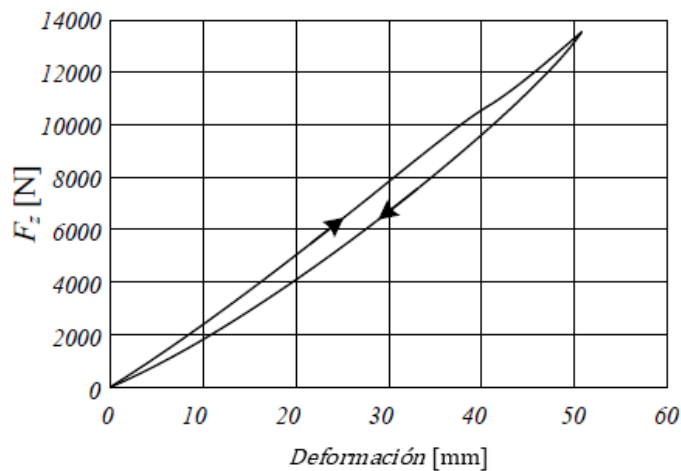


Figura 9: Curvas tensión-deformación en carga y descarga. Fuente: [86].

Como se puede observar en la Figura 9, las curvas de tensión-deformación no son iguales en la fase de carga (trayectoria superior) que en la fase de descarga (trayectoria inferior), sino que se requiere una energía de deformación mayor para comprimir el neumático, que la energía aportada por el neumático en su fase de recuperación. A medida que un neumático rueda, experimenta este ciclo de carga-descarga y disipa una determinada cantidad de energía tanto mayor como la diferencia entre las energías de deformación y recuperación. El área encerrada entre las dos curvas corresponde a la cantidad de energía disipada durante cada ciclo de carga y descarga. Conforme un neumático va girando sometido al peso del vehículo, experimenta ciclos repetitivos de deformación y recuperación, disipando la energía perdida en forma de calor.

#### 4.2.1.3.- Mecanismos físicos de la resistencia a la rodadura

Los mecanismos físicos responsables de la resistencia a la rodadura son, básicamente, la adhesión y la histéresis. La histéresis de los materiales que componen el neumático y las flexiones sucesivas a las que están sometidos al rodar suponen una contribución de entre el 90% y el 95% de la resistencia a la rodadura total. Las fuerzas de adhesión entre el neumático y la carretera pueden suponer entre un 2% y un 10% [88]. Aunque hay autores que consideran una aportación a la resistencia por rodadura los efectos aerodinámicos del neumático, no se va a tener en cuenta este efecto aquí, puesto que, se tendrá en cuenta en el concepto de resistencia aerodinámica.

En la Figura 10, está representada la distribución de fuerzas que tiene lugar en un neumático detenido. En la imagen de la izquierda, se representa un neumático en estado de reposo. Se puede observar cómo, debido al comportamiento elástico del caucho del que está compuesto el neumático, la fuerza es proporcional a la deformación del neumático. Además, se puede observar una distribución de fuerzas simétrica con respecto al eje vertical 'z' que hace que la resultante de esta distribución de fuerzas  $F_z$ , sea vertical, hacia arriba y coincidente con el eje de la rueda. En esta situación se tiene un sistema equilibrado, en el cual la resultante de fuerzas y momentos es igual a cero.

Como se ha explicado anteriormente, si el caucho fuera un material de características puramente elásticas, éste se recuperaría de las deformaciones producidas por la fuerza exterior en el mismo instante en el que dicha fuerza desapareciera. Si así fuera, cuando el vehículo se pusiera en marcha en marcha, el neumático comenzaría a desplazarse rodando sin deslizar y manteniendo el equilibrio de fuerzas de la imagen de la izquierda. En este hipotético caso, la resistencia por rodadura sería igual a cero.

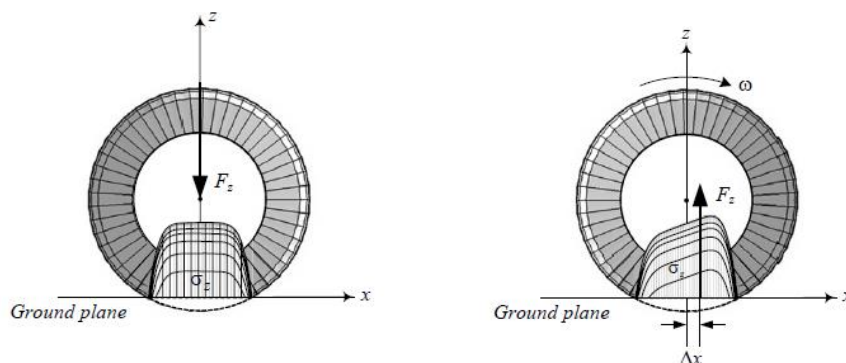


Figura 10: Distribución de fuerzas en neumático parado y en movimiento. Fuente: [84].

Sin embargo como se ha visto en el apartado “Histéresis” de forma microscópica, se puede apreciar aquí de forma macroscópica. El neumático real, en su rodadura, se comporta como en la imagen de la derecha. El fenómeno de la histéresis produce un desfase entre el cese de la fuerza y la recuperación de la deformación que hace que la energía que se emplea en la deformación no sea recuperada, al no volver el caucho instantáneamente a su forma cuando cesa la fuerza, como por ejemplo si ocurre en un choque totalmente elástico.

Este efecto hace que la distribución de presiones se desplace, a lo largo de su banda de rodadura, hacia delante (hacia el sentido de la marcha del vehículo), haciendo aparecer una fuerza resultante vertical y hacia arriba, pero que no coincide con el eje de la rueda, haciendo que aparezca un momento, que se opone al movimiento de avance de la rueda. Para mantener una velocidad constante, este momento resistente, ha de ser compensado con un momento en sentido contrario ejercido, en última instancia, por el motor del vehículo.

En lo concerniente a los cálculos que se van a realizar en este trabajo, se considera que el momento mencionado puede ser reemplazado por una fuerza horizontal, de sentido opuesto al movimiento y aplicada en el centro de la rueda [89]. Esta fuerza, se denomina Resistencia a la rodadura ( $F_{rod}$ ) y se expresa de la siguiente forma:

$$F_{rod} = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos\alpha \quad (Ec. 4)$$

donde:

$f_r$ : coeficiente de resistencia a la rodadura.

Son multitud de parámetros los que influyen en el coeficiente de resistencia a la rodadura pues éste es función del material del neumático, su estructura, la presión, la temperatura, el dibujo del neumático, la rugosidad de la carretera, etc. La cantidad de variables y la complejidad con la que están relacionadas entre ellas hacen virtualmente imposible calcular el coeficiente en base a todas ellas, por lo que se recurre a métodos empíricos para estimar un valor de  $f_r$  [84].

A lo largo de los años, se han desarrollado muchas expresiones para calcular el valor de  $f_r$  con el objetivo de llegar a una buena aproximación del valor del coeficiente de resistencia a la rodadura. A continuación, se expresa una de las más importantes [90]:

$$f_r = C \frac{W}{D} \sqrt{\frac{h_t}{w}} \quad (Ec. 5)$$

donde:

$C$ : Constante característica del material del neumático.

$W$ : Peso en la rueda

$D$ : Diámetro exterior

$h_t$ : altura de la sección del neumático

$w$ : anchura de la sección del neumático

En los últimos años se han propuesto multitud de valores para el coeficiente de resistencia a la rodadura, tal y como se recoge en la Tabla 1:

Tabla 1: Coeficientes de resistencia a la rodadura de distintos firmes. Fuente: [84].

Rolling Resistance Coefficients	
Conditions	Rolling Resistance Coefficient
Car tires on a concrete or asphalt road	0.013
Car tires on a rolled gravel road	0.02
Tar macadam road	0.025
Unpaved road	0.05
Field	0.1–0.35
Truck tire on a concrete or asphalt road	0.006–0.01
Wheel on iron rail	0.001–0.002

Sin embargo, ni la ecuación ni la tabla tienen en cuenta las variaciones del valor del coeficiente  $f_r$  con la velocidad, como así se refleja en observaciones empíricas. Para el cálculo del rendimiento del vehículo, es suficiente considerar el coeficiente de resistencia a la rodadura como una función lineal de la velocidad.

Para la mayoría de los rangos de inflado de neumáticos de vehículos, se puede utilizar la siguiente expresión [84]:

$$f_r = 0,01 \left( 1 + \frac{v}{160} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

donde  $v$  es la velocidad expresada en km/h.

#### 4.2.2.- Resistencia al ascenso

Cuando un vehículo se está moviendo sobre un plano inclinado, además de la resistencia a la rodadura explicada en el párrafo anterior, el vehículo tiene que vencer la resistencia al ascenso o resistencia gradiente, que no es más que la proyección de su peso propio en la componente longitudinal del vehículo.

Esta componente del peso se encuentra representada en la Figura 11 y, tal y como se puede observar, esta resistencia aumenta con el ángulo de la pendiente del terreno.

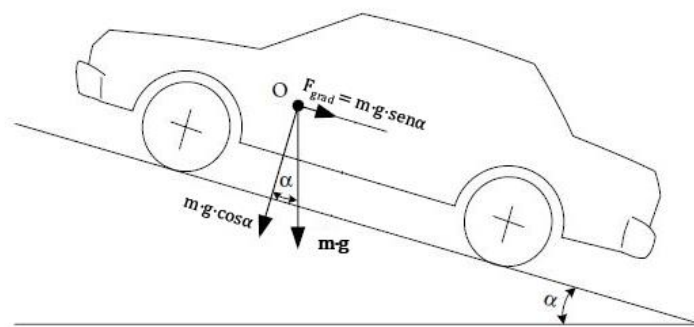


Figura 11: Diagrama de Sólido Libre de vehículo. Fuente: propia a partir de [84].

La expresión de la resistencia al ascenso es de la forma:

$$F_{\text{grad}} = m \cdot g \cdot \text{sen } \alpha \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

$F_{\text{grad}}$ : resistencia al ascenso

$m$ : masa del vehículo

$g$ : aceleración terrestre,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$\alpha$ : ángulo de pendiente

Se da la particularidad de que esta resistencia a vencer puede ser negativa para ángulos de pendiente  $\alpha$  negativa. Cuando el vehículo se mueve cuesta abajo, dicha fuerza gradiente contribuye a la aceleración del vehículo.

### 4.2.3.- Resistencia aerodinámica

Las implicaciones de la aerodinámica en el mundo de la automoción son verdaderamente amplias y abarcan desde aspectos como la eficiencia en el desplazamiento y, por ende, en la eficiencia energética, hasta otros aspectos relacionados con la velocidad, la estabilidad, el confort de conducción, etc. En este trabajo se va a hacer hincapié en la parte susceptible de afectar al estudio energético que se está realizando.

Cuando un cuerpo se mueve en el seno de un fluido (como puede ser el aire), experimenta una resistencia al avance causada en última instancia por el hecho de que cuando el cuerpo avanza tiene que desplazar una parte del fluido para poder ocupar el espacio que antes ocupaba el propio fluido. En mecánica de fluidos, cualquier movimiento, genera una pérdida de energía, por lo tanto, aparece aquí otro campo de fuerzas no conservativo. Hablando en términos de mecánica de fluidos, cualquier desplazamiento que se produzca dentro de un fluido, va a consumir una energía que, en cualquier caso, no va a ser susceptible de ser recuperada como si podría recuperarse la energía potencial gravitatoria o la energía cinética.

La resistencia al avance suele ser llamada como fuerza de arrastre, resistencia aerodinámica o *drag* en inglés, idioma ampliamente utilizado en automoción y del que se utilizan multitud de vocablos. En este trabajo se denominará resistencia aerodinámica y es representada como  $F_{\text{aero}}$ . La resistencia aerodinámica es la suma de todas las fuerzas aerodinámicas en la dirección de avance del vehículo y, por supuesto, en sentido contrario a éste.

Al igual que ocurre con la resistencia a la rodadura, la resistencia aerodinámica debe compensarse con la fuerza del motor a fin de mantener una velocidad constante. Por este motivo es de gran interés para los fabricantes de automóviles disminuir al máximo esta resistencia en pos de conseguir una mejor eficiencia energética.

La resistencia aerodinámica es una fuerza generada por el contacto e interacción de la superficie de un cuerpo con el fluido que lo rodea. Cuando hay una interacción entre dos sólidos, las fuerzas se transmiten a través del punto o superficie de contacto entre ambos sólidos pero, en el caso de una interacción solido-fluido, la superficie de contacto es la totalidad de la superficie del cuerpo o sólido inmersa en el fluido. Cuando un vehículo empieza a moverse, se produce una distorsión en el entorno cercano de la superficie del vehículo y las moléculas de aire empiezan a moverse en relación a la superficie del vehículo. Si el fluido en el que está inmerso el cuerpo que se desplaza fuera perfecto, o ideal, no existiría resistencia aerodinámica pero, en fluidos reales, es el movimiento del fluido en este entorno cercano, llamado capa límite, donde ocurren los fenómenos que van a dar lugar a varias fuerzas que el fluido ejerce sobre el vehículo y que pueden ser descompuestas en dos grupos:

- Fuerzas de presión: debidas a una distribución no simétrica de presiones entre la parte delantera y trasera del vehículo. Es conocida como *resistencia de forma*.
- Fuerzas de rozamiento: proceden de la acción tangencial que ejerce el fluido sobre la superficie del vehículo. Conocida como *resistencia de rozamiento*.

Se puede entender, entonces que sobre cada punto de la superficie del vehículo coexisten dos componentes actuando simultáneamente, que generan una fuerza de presión y una fuerza de rozamiento, respectivamente. En la Figura 12 se puede observar la dupla de fuerzas aerodinámicas aplicada en un punto en concreto de la superficie del vehículo. Es importante señalar que la dupla de fuerzas representadas en la figura, en ningún momento hace referencia a la resultante total de las fuerzas ni su punto de aplicación está situado donde muestra la figura.

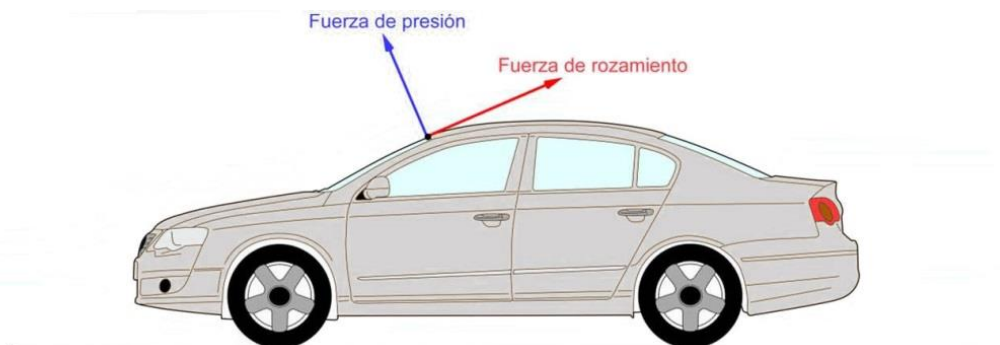


Figura 12: Fuerzas aerodinámicas sobre un vehículo. Fuente: [91].

Idealmente, la resistencia debido al rozamiento es la componente del rozamiento en la dirección del flujo, y ésta, en consecuencia, dependerá de la orientación de la superficie con respecto al flujo. La resistencia aerodinámica debida al rozamiento será nula para una superficie plana, de espesor cero y normal al flujo, mientras que será máxima cuando la superficie esté alineada de forma paralela con el flujo [92].

#### 4.2.3.1.- Fuerzas de presión

Según el *principio de Bernoulli*, cuando se trata de un fluido en movimiento, la suma de la presión, la velocidad y la altura en un punto cualquiera permanece constante, esto permite establecer una relación entre una distribución de velocidades y una distribución de presiones.

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

$p$ : presión

$\gamma$ : peso específico

$v$ : velocidad del fluido

$g$ : gravedad

$z$ : altura

Debido a la diferencia de velocidades del fluido que existe en cada punto de la superficie, existirán diferentes presiones. En la Figura 13, se puede observar una distribución de presiones típica de un vehículo. De la suma de todas las fuerzas de presión originadas entre el cuerpo y el fluido, se obtiene una resultante que se coloca en un punto imaginario del vehículo donde la aplicación de dicha resultante tendría el mismo efecto que la aplicación de todos los diferenciales de fuerza aplicados en su punto correspondiente. Ese punto singular se le conoce como *Centro de Presiones* y, salvando las distancias, es equiparable al concepto de *Centro de Gravedad*.

En la Figura 13, aparece representada la fuerza neta de presión, que se descompone en dos componentes, una horizontal, que se corresponde con la fuerza de arrastre por presión ( $F_{xp}$ ) y una fuerza vertical, que se corresponde con la fuerza de sustentación por presión ( $F_{zp}$ ).

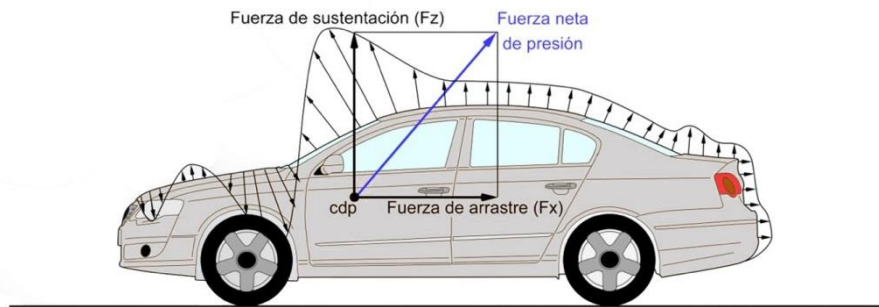


Figura 13: Fuerzas aerodinámicas de presión sobre un vehículo. Fuente: [91].

De una forma un tanto intuitiva, se podría decir que el vehículo, en su movimiento de avance, empuja el aire que hay delante de él. No obstante, el aire que se encuentra delante del vehículo no puede desplazarse de forma instantánea, lo que origina que la presión en esa zona del fluido, se incremente dando lugar, de esta manera, a una zona de alta presión de aire. De manera similar pero opuesta, en la parte trasera, con el avance del vehículo, se crea una zona de vacío que el aire de las proximidades no puede ocupar instantáneamente. Este hecho, ocasiona una zona de bajas presiones de aire. La situación que se genera en el avance del vehículo es una zona de altas presiones situada en la parte delantera del vehículo que “empuja” a éste hacia atrás y una zona de bajas presiones en la parte trasera del vehículo que “succiona” o “tira” de éste hacia atrás también.

#### 4.2.3.2.- Fuerzas de rozamiento

Cuando un vehículo se desplaza en el seno de un fluido, el desplazamiento del vehículo no afecta de la misma manera a las moléculas del fluido. Tomando una región del fluido muy próxima a la superficie del vehículo, se observaría que las moléculas que están en contacto con la superficie del vehículo se mueven a la velocidad de éste, mientras que las que están a una distancia lo suficientemente alejada de la superficie, permanecerían inmóviles.

Suponiendo un sistema de referencia inercial, en el cual el observador se encuentra subido en el vehículo o el caso del vehículo que se encuentra en un túnel de viento, se observaría que el aire que está en contacto con la superficie del vehículo permanece inmóvil, mientras que el aire a una determinada distancia se mueve en régimen laminar a una determinada velocidad (Figura 14).

La región comprendida entre la capa donde las moléculas no se mueven y donde las moléculas tienen velocidad  $v$ , es la denominada capa límite. Dentro de la capa límite, el aire se mueve de forma laminar, esto es, el flujo de aire es ordenado y todas las moléculas se mueven sin salirse de su lámina. Cada lámina de aire, se mueve a una velocidad determinada y diferente a la de las capas limítrofes. Utilizando la analogía de la baraja, se podría decir que

las capas se desplazan unas sobre otras de igual manera que las cartas de un mazo se desplazarían unas sobre otras si al mazo se le aplicaran fuerzas tangenciales opuestas.

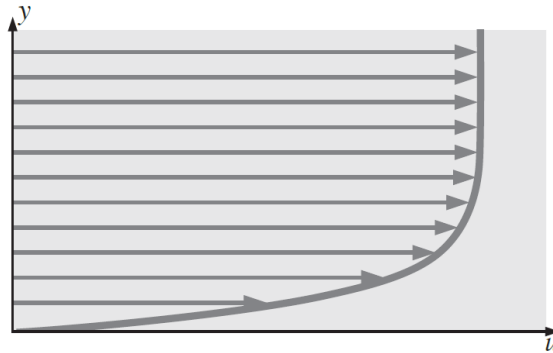


Figura 14: Gráfica de la componente horizontal de la velocidad como función de la distancia vertical. Fuente: [92].

Las diferentes velocidades de las capas hacen que se desplacen unas sobre otras, produciendo una fricción entre ellas, que da lugar al segundo componente de la resistencia aerodinámica, las fuerzas de rozamiento. Dicho efecto se representa en la Figura 15.

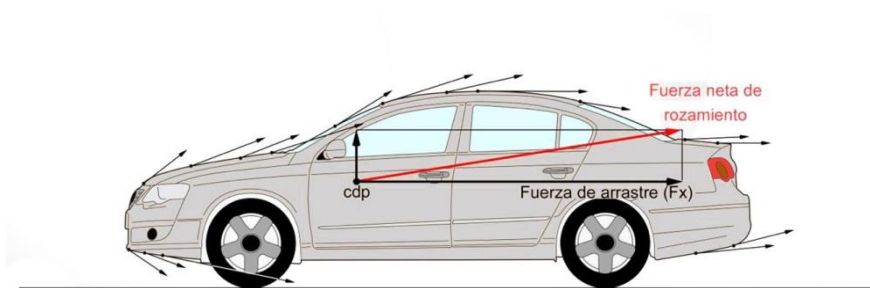


Figura 15: Fuerzas aerodinámicas de fricción sobre un vehículo. Fuente: [91].

Al igual que ocurre con la componente de las fuerzas debida a la presión, de la suma de todas las infinitesimales fuerzas de rozamiento, aparece una fuerza resultante neta que se descompone también en dos componentes, una horizontal, que se corresponde con la fuerza de arrastre por rozamiento ( $F_{xr}$ ) y una fuerza vertical, que se corresponde con la fuerza de sustentación por rozamiento ( $F_{zr}$ ).

De la suma de las dos componentes de las fuerzas (de presiones y de rozamiento) se obtiene una fuerza aerodinámica que se puede descomponer en dos:

- Fuerza de sustentación ( $F_z$ ): Esta fuerza puede tener un valor positivo, denominándose entonces *sustentación* o *lift*, efecto buscado en el caso de los aviones o puede tener un valor negativo en cuyo caso lo que se obtendría sería el llamado efecto *downforce*, que se busca en los vehículos de competición. El *downforce* es un concepto opuesto a la sustentación de los aviones y lo que se busca es “empujar” el vehículo hacia abajo. Al maximizar esta fuerza se busca aumentar la normal ( $N$ ) del vehículo, aumentando la adherencia del neumático a la superficie y, consecuentemente consiguiendo una mayor velocidad de paso por curva sin que el neumático deslice. Esta fuerza aunque también se aplica en el plano de simetría longitudinal del vehículo, no va a ser tenida en cuenta en este trabajo puesto que, aparte de no generar un ningún trabajo (esta fuerza es perpendicular al avance del vehículo), en el caso de automóviles o camiones convencionales está lejos de tener una relevancia significativa.

- Resistencia aerodinámica ( $F_{aero}$ ): Esta fuerza será la que se tenga en cuenta para el análisis energético que se realizará más adelante.

Aunque estas dos fuerzas están íntimamente ligadas, debido al origen común de éstas, en este texto se van a obviar los efectos debidos a las fuerzas de sustentación, por quedar fuera del alcance de este trabajo. Tomando en consideración, por tanto, únicamente la resistencia aerodinámica, se obtiene que ésta es de la forma:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot c_x \cdot (v - v_w)^2 \quad (Ec. 9)$$

donde:

$\rho$ : densidad

$A_f$ : área frontal

$c_x$ : coeficiente aerodinámico

$v$ : velocidad del automóvil

$v_w$ : velocidad del fluido

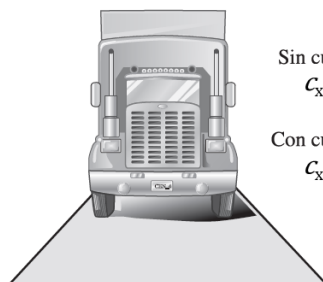
A mayor **densidad** del fluido a través del cual el automóvil se desplaza, mayor es la resistencia al avance que el vehículo encuentra.

La superficie o **área frontal** del vehículo es aquella que se obtiene de la proyección ortogonal del vehículo sobre un plano perpendicular al suelo y al plano longitudinal del vehículo. El área frontal del vehículo convencional suele oscilar en torno al 80-85% del área del rectángulo que forma el ancho del vehículo multiplicado por su altura. En camiones y autobuses, este porcentaje aumenta considerablemente hasta alcanzar valores próximos al 100%. El área frontal es un factor determinante en la resistencia aerodinámica. Una reducción en la superficie frontal redundará en una disminución de la resistencia de la misma proporción, en tanto que ésta aumenta linealmente con el valor de la superficie frontal.

La **velocidad del automóvil**  $v$  y la velocidad del fluido  $v_w$ , en muchos textos aparecen simplemente como velocidad, entendiéndose ésta como la velocidad relativa entre el fluido (en este caso, el aire) y el vehículo.

El **coeficiente aerodinámico** es un número adimensional que ha de ser calculado por métodos empíricos, bien sea a través de los resultados obtenidos en ensayos en túneles de viento como se ha hecho tradicionalmente, o bien como resultado de simulaciones en cualquier tipo de software especializado en Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD*, por sus siglas en inglés). A continuación se muestran en la Figura 16, algunos de los coeficientes de arrastre que se dan en las distintas variantes de carrocería que abundan en la automoción:

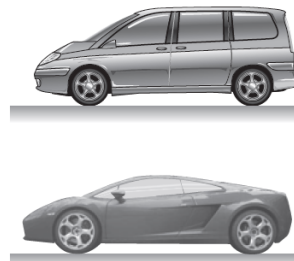
Semirremolque,  $A$  = área frontal



Sin cubierta:  
 $c_x = 0.96$

Con cubierta:  
 $c_x = 0.76$

Camioneta,  $A$  = área frontal



Minivan:  
 $c_x = 0.4$

Automóvil  
de pasajeros:  
 $c_x = 0.3$

Figura 16: Coeficientes de arrastre representativos de diferentes vehículos. Fuente: Elaboración propia a partir de [92].

#### **4.2.4.- Resistencia debida a la inercia**

Por último, existe un cuarto término a considerar, al que se ha considerado llamar resistencia debido a la inercia. Aunque no es una resistencia propiamente dicha, se la engloba junto con las otras tres, dado que se trata igualmente de una fuerza.

Cuando un vehículo circula a una velocidad constante hay que ejercer una fuerza igual a la suma de todas las resistencias anteriormente expuestas (resistencia a la rodadura, resistencia al ascenso y resistencia aerodinámica). Cuando se requiere que el vehículo no sólo mantenga la velocidad constante, sino que se le solicita que acelere, hay que ejercer sobre él una fuerza determinada para incrementar su velocidad.

#### **4.2.5.- Fuerzas resistentes. Estudio conjunto.**

Las dos primeras resistencias tratadas (resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica) son fuerzas no conservativas. El trabajo realizado por cualquiera de estas dos fuerzas no depende exclusivamente de los puntos inicial y final o, dicho de otra manera, el trabajo realizado a lo largo de una trayectoria cerrada, es no nulo. Este hecho tiene una consecuencia lógica y es que no se va a poder recuperar la energía aportada por el motor del vehículo en ninguna situación.

Por el contrario, en lo referente a la resistencia de ascenso (o gradiente), al tratarse de un campo de fuerzas gravitatorio, se está en presencia de un campo conservativo. Esto es, toda la energía aportada por el motor en una fase de ascenso, va a ser susceptible de ser recuperada en una fase de descenso. Por definición, la suma del trabajo de las fuerzas gravitatorias sobre el vehículo será igual a cero siempre que el vehículo realice una trayectoria cerrada (comience y termine a la misma altitud).

Lo mismo ocurre con la “resistencia” asociada a la inercia. Toda la energía aportada para aumentar la velocidad, se transforma en energía cinética del vehículo que, a su vez, es susceptible de ser recuperada cuando se reduzca la velocidad de éste.

Por lo tanto, en el estudio energético, hay que tener claro que la única energía susceptible de ser recuperada es la correspondiente a los campos conservativos. Nada de energía empleada en campos disipativos podrá ser recuperada. Es decir, sólo se podrá recuperar la energía empleada en ascender y la energía empleada en aumentar la velocidad del vehículo.

### **4.3.- Vehículo eléctrico**

Aunque el vehículo eléctrico es un concepto que, en estos tiempos está de rabiosa actualidad, no es ni mucho menos un invento reciente. De hecho, los primeros vehículos eléctricos de los que se tiene conocimiento, datan del primer tercio del siglo XIX, en concreto se tiene documentado el primer vehículo eléctrico en el año 1830 [93].

Desde hace unos años, parece que se están dando las circunstancias perfectas para la formación del caldo de cultivo que permita la eclosión del vehículo eléctrico y se produzca el desarrollo que se está viviendo en estos tiempos. Por un lado la cada vez más madura tecnología de almacenamiento eléctrico, unido a las necesidades de implementación de políticas de reducción de emisiones de GEI principalmente en el interior de los núcleos urbanos más desarrollados, unido a la apuesta de la industria automotriz de, esta vez sí, apostar por lo eléctrico están haciendo que cada vez sea más usual ver por nuestras calles el uso de vehículos eléctricos o híbridos en sus distintas modalidades.

Aunque en el momento de la redacción de este trabajo parece que se empiezan a intuir muestras de una desaceleración en la adopción de este tipo de tecnologías en el sector del transporte [94–96], éstas no parecen indicar que vaya a haber un cambio en la tendencia de los vehículos eléctricos sino, más bien, parecen ser la muestra de que se han encontrado algunos inconvenientes que se presentan como desafíos a superar en la carrera hacia la electrificación.

Aunque, en opinión del autor, existen otras tecnologías como las relacionadas con el hidrógeno que, aunque se encuentran en un estado menos avanzado de desarrollo, son más atractivas de cara a un abandono de los combustibles fósiles en el ámbito de la automoción, no parece que éstas tecnologías vayan a estar disponibles en el corto plazo, sino que se esperan como una alternativa a los combustibles fósiles en el medio-largo plazo. Por lo tanto, si bien es posible que lo eléctrico no sea la mejor tecnología para aplicarla en el campo de la automoción, sí que parece que es la única tecnología lo suficientemente desarrollada a día de hoy como para postularse como una opción para el definitivo abandono de los motores de combustión tradicionales en la automoción.

Se recogen pues, a continuación, las principales bases del vehículo eléctrico hasta conocidas hasta el momento.

### **4.3.1.- Flotas de vehículos**

#### **4.3.1.1.- Composición de flotas de las principales ciudades españolas**

A continuación se muestra el resultado de un estudio de la composición de las flotas de transporte urbano de viajeros de 6 de las ciudades más grandes de España en cuanto a población [97].

Básicamente, se reporta el número de autobuses y el tipo de propulsión de éstos. Se ha prestado especial atención a los tipos de propulsión susceptibles de recuperar energía mediante frenado regenerativo, por lo que, aunque se reporta el número de vehículos de cada tipo, a efectos de este trabajo, se van a tener en cuenta los vehículos eléctricos y los híbridos como un único grupo debido a su capacidad para usar el frenado regenerativo. De las flotas municipales consultadas, los resultados obtenidos son los siguientes:

- La empresa municipal de Transportes de Madrid recoge, en su informe ejecutivo del año 2023 [98], que cuenta con 265 autobuses eléctricos (12,6%), frente a una flota total de 2102 autobuses. Resulta significativo que, en esta ciudad, sólo se reporta el uso de dos tipos de autobuses: eléctricos y GNC. En cualquier caso, el porcentaje de autobuses susceptibles de recuperar energía es del 12,6%.
- En el caso de Barcelona, la empresa metropolitana de transportes, cuenta, a fecha de 31/12/2023, con 134 autobuses eléctricos y 448 híbridos que forman parte de una flota total de 1274 autobuses, lo que representa que hay un 45,68% de autobuses con capacidad de regeneración [99]. Además de los enumerados cuenta con 320 autobuses de gasoil, 364 de GNC, 448 vehículos híbridos, 134 eléctricos y 8 autobuses impulsados por hidrógeno.
- Valencia, por ejemplo, en su carta de servicios del cuarto trimestre de 2023 [100], reporta 497 autobuses en total, de los cuales, 254 son híbridos y 22 son eléctricos. Eso arroja un porcentaje de un 55,53 % de autobuses con capacidad de regeneración.
- En la ciudad de Sevilla, a 31 de diciembre de 2023, hay un 71,9% de autobuses de GNC, un 3,4% de autobuses híbridos y un 2,5% de autobuses eléctricos, sobre una flota total de 408 autobuses, según consta en las últimas Cuentas Anuales e Informes de Auditoría hechos públicos [101].

- El caso de Málaga arroja que, de un total de 300 autobuses en el parque automovilístico de la Empresa Municipal de Transportes, 231 unidades (correspondientes con el 77%) son propulsadas por motores diésel, 49 vehículos son híbridos (el 16,33%) y 20 unidades corresponden a vehículos impulsados completamente con energía eléctrica (6,67%) [102].
- En el caso de Palma de Mallorca, la Empresa Municipal de Transporte, informa, en su memoria de cuentas de 2022 (última memoria hecha pública a fecha de octubre de 2024) que su flota está compuesta por un total de 262 autobuses, de los cuales un 50,7% (133 unidades) corresponden a gasoil y un 49,3% (129 unidades) corresponden a GNC [103]. Es particularmente llamativo que, aunque en el resto de las ciudades estudiadas presentan datos de 2023 y Palma de Mallorca presenta datos de 2022, no exista en su flota ningún autobús puramente eléctrico, ni siquiera hay ninguno que presente hibridación.

A continuación, se muestran en la Tabla 2, los datos sobre la composición de la flota de 6 de las principales ciudades españolas.

Tabla 2: Composición de las flotas de transporte urbano. Fuente: Elaboración propia.

Ciudad	Nº Buses	Gasoil	GNC	Híbridos	Electric	Hidrógeno	Hib + Elect	%
Madrid	2102	--	1837	--	265	--	265	12,60
Barcelona	1274	320	364	448	134	8	582	45,68
Valencia	497	201	20	254	22	--	254	55,53
Sevilla	408	--	293	14	10	--	24	5,88
Málaga	300	231	--	49	20	--	69	23
Palma de Mallorca	262	133	129	--	--	--	0	0

La información contenida en la Tabla 2 se representa, de forma gráfica, en la Figura 17 donde, a la vista de los resultados e independientemente de la composición de las distintas flotas de autobuses de transporte municipal, resulta evidente que ninguna flota de las estudiadas está compuesta por autobuses de un solo tipo de propulsión. Todas las flotas estudiadas cuentan con autobuses que utilizan distintos tipos de tecnologías para su desplazamiento.

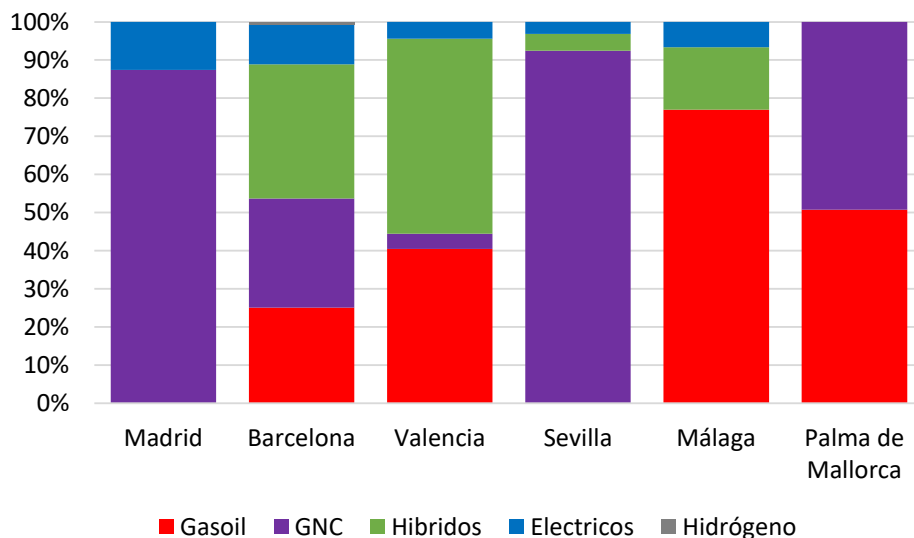


Figura 17: Gráfica comparativa de tecnologías de propulsión de las principales flotas. Fuente: Elaboración propia.

#### **4.3.1.2.- Renovación de las flotas de transporte urbano.**

Realizando una búsqueda de las noticias relacionadas con la renovación de flotas de transporte municipal se pueden observar los mismos indicadores:

Por ejemplo, un estudio previo [104] habla de cómo la flota de autobuses de Granada se renueva y que “casi un 30% de los autobuses contará con una tecnología más eficiente”, mientras que otro estudio [105] afirma que “Alicante renueva más de la mitad de la flota de autobuses urbanos de la ciudad”. La misma proporción de renovación realiza la ciudad de Jerez, afirmándose que ese porcentaje de la flota será renovado “de una tacada” [106].

En Santa Cruz de Tenerife, a fecha de febrero de 2024 se publicó una noticia [107] en la que se recoge que el Ayuntamiento de esta ciudad destinará más de 30 millones de euros en la renovación de la actual flota de autobuses y que esta renovación se llevará a cabo en el intervalo de 5 años, hasta 2029. En un plazo similar se hará la renovación de la flota de autobuses urbanos de Cádiz, donde tomará cuatro años renovar la flota de autobuses de la ciudad [108].

En Zaragoza, se incorporarán autobuses eléctricos a la circulación, dejando la flota de la ciudad compuesta en un 31,8% de eléctricos [109].

#### **4.3.1.3.- Patrones**

A la vista de los dos apartados anteriores no parece descabellado pensar que la práctica totalidad de flotas de transporte urbano están formadas por autobuses de varios tipos de tecnología.

En la búsqueda realizada para este trabajo, tan sólo se ha encontrado una referencia [110] que, en contraposición a todas las anteriormente recogidas, reporta una renovación “de la totalidad” de la flota.

El hecho de que las flotas de autobuses no estén formadas por autobuses de un solo tipo de tecnología y que dichos autobuses, sean capaces de realizar el recorrido asignado con distinta eficiencia, dependiendo de la tecnología utilizada, hace pensar que no es irrelevante en términos energéticos, la asignación de según qué tipos de autobuses a las distintas rutas a realizar.

### **4.4.- Frenado regenerativo**

Tradicionalmente, en el diseño y fabricación de un vehículo, cuando se ha necesitado disminuir la velocidad de éste, se ha recurrido a sistemas de frenado convencionales. El método de funcionamiento de los frenos convencionales, o también llamados reostáticos, es aplicar una presión entre dos superficies con alto coeficiente de rozamiento. De esta manera, y por medio de la fricción en el conjunto de frenado, se reduce la velocidad de las ruedas. En el proceso de frenado la energía cinética que tiene el vehículo es transformada en energía térmica (y disipada en forma de calor). Esta energía térmica producida como resultado del proceso de frenado, no sólo es muy difícilmente aprovechable sino que, además, es un efecto nocivo y, como tal, debe ser evitado buscando formas eficientes de dispersar el calor generado en las frenadas con el fin de no elevar las temperaturas en exceso, hecho que a su vez, acabaría por causar la ineficiencia y hasta la ineficacia de los sistemas de frenado.

La disipación de energía que se produce en una frenada no es tema baladí. Un vehículo de 1.600 kilos de peso, que circula a 120 km/h, tiene una energía cinética de 0,25 kWh. Si, en el acto de detener completamente este vehículo, se tiene como resultado final una energía cinética igual a cero significa, lógicamente, que se ha desaprovechado esa cantidad de energía.

Para poner en perspectiva esta magnitud, basta comparar la energía disipada en el caso anterior frente al consumo medio de un hogar español, que es de 7 kWh por día [111]. Esto significa que, con veinticinco frenadas como la del anterior ejemplo, se disipa tanta energía como la que se consume, de media, en un hogar español.

En la práctica totalidad de los automóviles, la potencia de frenado que requiere un vehículo se encuentra en un rango muy por encima de la potencia que el motor es capaz de ofrecer para acelerar. No importa cuánto se ascienda en la búsqueda de modelos potentes. A mayor potencia “convencional” del vehículo, la potencia de frenado siempre es mucho mayor. Por lo tanto, si se utiliza el motor eléctrico del vehículo como generador, siempre va a existir una carencia en la potencia de frenado.

Debido a lo anterior, el freno regenerativo no exime a los vehículos de la necesidad de portar frenos convencionales, puesto que el freno regenerativo no cumpliría los requisitos de seguridad que se le exigen a los frenos en todas las circunstancias. Cuando, por ejemplo, la batería se encontrara llena, no habría lugar en el que almacenar la energía absorbida del freno. Tampoco funciona bien el frenado regenerativo a bajas velocidades, puesto que las inducciones que se crean en el generador a velocidades reducidas no son suficientes para detener el vehículo.

Aunque no se pueda eliminar completamente el sistema de frenos convencionales de un vehículo, bien es verdad que el uso al que se verían sometidos éstos sería mucho menor si estuvieran apoyados por un sistema de freno regenerativo. El caballo de batalla de este sistema está en conseguir una recuperación de energía óptima sin comprometer en ningún momento la seguridad de los pasajeros, implementando para ello sistemas de control que estimen la potencia de frenado demandada por el conductor para poder adecuar la proporción en la que actúan los distintos sistemas de frenado.

#### **4.4.1.- Introducción al frenado regenerativo**

Históricamente, cuando se ha construido un vehículo se ha necesitado dotarlo de capacidad de frenado. Desde un simple taco de madera que rozaba con la llanta de la rueda de los carruajes, la evolución de los sistemas de frenado se ha centrado en aumentar la potencia de éste. Esta evolución, ha sido paralela a la evolución de los neumáticos, puesto que conforme mejora la tecnología de los neumáticos, estos son capaces de aportar mayor adherencia y, con el fin de aprovechar estas capacidades cada vez mayores, seguía buscándose superar la potencia de frenado.

Desde los frenos de tambor accionados mecánicamente, se pasó a la asistencia hidráulica de éstos, después a frenos de disco y, en la actualidad, podría decirse en cierta manera que hasta se ha tocado techo en la búsqueda de la potencia de frenado, puesto que los sistemas actuales de frenado en competición son capaces de producir una potencia de frenado que se aproxima a los límites de la aceleración que puede soportar el cuerpo humano [112].

Habiendo cumplido el objetivo de alcanzar la mayor potencia de frenado posible, los esfuerzos parecen haber virado y ya no se concentran en conseguir una mejor disipación de la energía, sino en aprovechar esta de la mejor manera, situándose pues, el objetivo, en la búsqueda de la eficiencia energética intrínseca al acto de reducir la velocidad de un vehículo.

El frenado regenerativo es un sistema de frenado cuyo funcionamiento no se basa en el mecanismo de la fricción, sino que la reducción de la velocidad del vehículo, se consigue mediante un sistema capaz de aprovechar la energía cinética, transformando ésta en un tipo de energía (no térmica) que pueda ser fácilmente manejada y se pueda almacenar.

El frenado regenerativo, es conocido por su acrónimo en inglés como *KERS* (*Kinetic Energy Recovery System*) y, aunque existen más tipos, los principales sistemas para aprovechar y almacenar la energía son dos: mecánico y eléctrico.

#### 4.4.2.- Frenado regenerativo mecánico

El frenado regenerativo mecánico consiste en aprovechar la energía cinética del vehículo sin que haya una conversión del tipo de energía. Es la energía cinética como tal la que se almacena.

La idea que se ilustra en la Figura 18 consiste en un dispositivo mecánico ideado de tal manera que cuando el vehículo quiere reducir su velocidad, se utiliza la energía cinética de éste para acelerar un volante de inercia, que almacena la energía en forma de un movimiento circular. Cuando se necesita que el vehículo acelere, el sistema conecta el volante de inercia con la transmisión que hace que el vehículo acelere, reduciéndose proporcionalmente la velocidad del volante de inercia. La energía máxima capaz de acumular depende de la velocidad angular máxima a la que pueda girar y de la masa de la propia rueda de inercia. Es un sistema puramente mecánico.

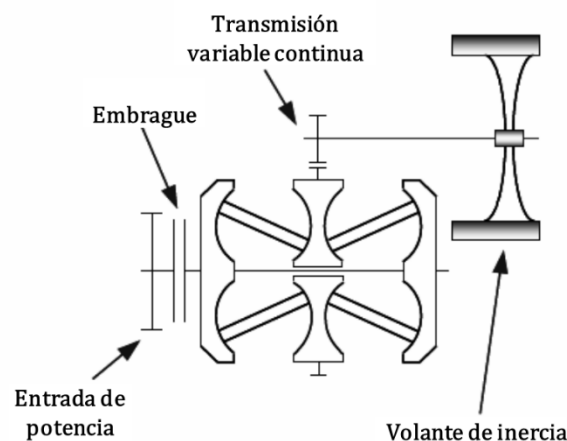


Figura 18: Representación esquemática de KERS mecánico. Fuente: propia a partir de [113].

Las principales ventajas de éste sistema es que al almacenar la energía cinética directamente, no se producen ineficiencias por conversión en el tipo de energía almacenada. Otra ventaja importante es que la densidad energética (kJ/kg) y la densidad de potencia (kW/kg) de este sistema de almacenamiento energético es muy superior al de otro tipo de sistemas de almacenamiento energético empleados en automoción [113, 114].

Por el contrario, las principales desventajas que presenta el sistema mecánico son fundamentalmente dos. Las limitaciones de espacio en los vehículos pequeños no permiten albergar los voluminosos mecanismos de frenado regenerativo mecánicos, relegados en su mayoría a la implantación en vehículos de grandes dimensiones como los autobuses [113]. Por otro lado, la conexión mecánica de la rueda de inercia hace necesaria la incorporación de un sistema de transmisión variable (*Continuously-variable transmissions, CVT*) lo que complica en gran medida su montaje y no es una solución que haya llegado a popularizarse. Aunque existen múltiples sistemas, generalmente en los sistemas *CVTs* la transmisión continua del par se realiza mediante una correa presionada firmemente entre dos superficies cónicas. La relación de transmisión viene definida por el radio de acción de la correa. El radio de acción de la correa está en función de la posición de la correa, que se modifica aproximando o separando entre sí las superficies cónicas.

Las transmisiones *CVT* han sido tradicionalmente populares en transmisiones de baja potencia, como las motocicletas pequeñas (tipo Vespa) con poco kilometraje, pero se desgastan y requieren mantenimiento. Otro experimento con los sistemas de transmisión variable, lo realizó Audi, que en 1.999 introdujo la transmisión "*multitronic*" en alguno de sus modelos. Estos sistemas estaban sometidos a un exhaustivo mantenimiento y no estaban exentos de múltiples problemas de fiabilidad, por lo que, a pesar de unas muy ventajosas prestaciones, este sistema nunca llegó a popularizarse [114].

Un ejemplo comercializado de esta tecnología es el *flywheel system* de *Flybrid Automotive* (actualmente *PUNCH Flybrid*), montado en el Jaguar XF híbrido desde 2011, en el que la transmisión a las ruedas motrices se realiza mediante una caja de cambios *CVT Torotrak/Xtrac*. El sistema pesa 65 kg y puede almacenar hasta 432 kJ a 60.000 rpm. La potencia máxima que puede suministrar es de 60 kW. El ahorro de combustible que reportan se sitúa en torno al 20% [115].

La principal ventaja de estos sistemas es la falta de conversión de la energía, puesto que la energía cinética se almacena directamente sin tener que convertirla en energía eléctrica. En determinados ensayos este sistema ha mostrado una eficiencia de un 70%, el doble que un sistema de almacenamiento energético que tenga que transformar la energía cinética en energía eléctrica, además, su larga vida útil superior a los 15 años y su menor necesidad de mantenimiento en comparación a otros sistemas de almacenamiento de energía, los hacen muy atractivos para su uso en los vehículos [116].

En contrapartida este sistema es muy vulnerable a la autodescarga, debido a los rozamientos inherentes a su principio de funcionamiento y pueden llegar a perder hasta un 20% de la energía almacenada por hora. A pesar de ello, este diseño se ha mostrado bastante eficaz pero los costes de la producción de éste sistema son elevados, por lo que no parece fácilmente implementable y actualmente parece que la industria se está orientando hacia la posibilidad de utilizar otros sistemas en la fabricación en serie [113]. Por otra parte, la fuerza giroscópica que ejerce un sistema de estas características embarcado en un vehículo hace que, dinámicamente puedan originarse problemas de seguridad, que dificultan su uso en el sector del transporte [116].

#### **4.4.3.- Frenado regenerativo eléctrico**

Dada la arquitectura del sistema de frenado "tradicional" sería extremadamente ineficiente, por no decir imposible, que un freno de disco o de tambor pudiera tomar la energía cinética del vehículo y transformarla en energía eléctrica. Sin embargo, esta es precisamente la idea que tiene lugar en vehículos dotados con sistemas de frenado regenerativo eléctrico. Una parte de la energía cinética del vehículo puede tomarse y transformarse en energía eléctrica capaz de ser almacenada de una manera relativamente fácil. Resumiendo conceptualmente la idea, un motor eléctrico actuando "al revés" es capaz de funcionar como un generador, transformando la energía mecánica en energía eléctrica y almacenando ésta.

En los tiempos actuales se produce un fenómeno en el que confluyen la incesante búsqueda de la eficiencia en el mundo automotriz, y la electrificación del automóvil. Con la irrupción generalizada de la energía eléctrica en los automóviles, a éstos se les ha dotado de un componente de propulsión (el motor eléctrico) y de un sistema de almacenamiento energético (las baterías), que a diferencia del conjunto tradicional motor térmico-frenos reostáticos, son capaces de manejar flujos de energía bidireccionales [117].

El frenado regenerativo eléctrico, se basa en la idea de dejar que el motor eléctrico sea conducido por la energía cinética del vehículo. De esta manera, se crean unas fuerzas inducidas en el interior del motor que generan una corriente eléctrica. Dicha corriente eléctrica es susceptible de ser almacenada generalmente en baterías o capacitores para su posterior reutilización.

#### **4.4.3.1.- Baterías**

Son dispositivos capaces de transformar la energía eléctrica en un potencial químico capaz de ser almacenado durante periodos largos de tiempo y que puede ser revertido en energía eléctrica para ser devuelto al circuito en el momento que sea demandado.

Las baterías están compuestas por unidades independientes llamadas “celdas”. Los elementos que forman una celda son básicamente un ánodo, un cátodo y un electrolito, que permiten que tenga lugar una determinada reacción química que, dependiendo de que ocurra en un sentido o en otro, servirá para almacenar energía o para proporcionarla.

El fundamento de funcionamiento de una celda es una reacción redox. En las reacciones de este tipo, en las inmediaciones de uno de los electrodos se produce una reacción de oxidación mediante la cual se ceden electrones que son absorbidos en el otro electrodo y que permiten que tenga lugar una reacción de reducción. El electrolito es necesario para realizar el intercambio de iones que equilibra la reacción [118].

La tensión que se genera en una celda, depende básicamente de la química utilizada y del material de los electrodos que se utilizan. Dependiendo del par galvánico que se genere por la combinación de materiales se tendrá un potencial determinado. Dicho potencial depende del estado de carga de la batería, pero generalmente suele rondar los 2 voltios por cada celda. La combinación de celdas colocadas en serie, determina el potencial de las baterías en la gran mayoría de aplicaciones de éstas. Así, una unión de 6 celdas, proporciona una batería de 12V y sucesivamente se obtienen las tensiones (múltiplos de 2 V) utilizados frecuentemente en automoción: 6, 12, 24 y 48 V, generalmente para el suministro eléctrico de los sistemas auxiliares del vehículo, y hasta 400 V para el suministro de potencia en los automóviles eléctricos puros, aunque la tendencia es ascendente y se encamina a utilizar tensiones de 800 voltios en vehículos eléctricos.

En lo referente a la capacidad de la batería no se trata de una característica fijada por la construcción o de los materiales, sino que puede ser variable en función del tamaño de ésta.

En cuanto a la potencia de la batería sí que existen limitaciones físicas que acotan superiormente la potencia que puede tener la batería para el propósito de absorber toda la potencia enviada por el sistema de frenado regenerativo. Factores como la velocidad de las reacciones químicas, o el movimiento de los iones dentro de las celdas, limitan la potencia de éstas. Conforme más se le va solicitando a una batería, más se acerca ésta al punto en el cual la reacción química decae y no es capaz de proporcionar la intensidad requerida. Además se produce el fenómeno del calentamiento que puede, finalmente, acabar con el desfallecimiento total de la celda.

En la Figura 19 se puede observar como los distintos conceptos o tipos de baterías tienen unas características de energía y potencia específicas, que ejemplifican lo expuesto anteriormente. Allí se puede apreciar como las baterías de Litio-polímero (en azul celeste) tienen una muy alta energía específica pero muy baja potencia específica. Este tipo de batería sería ideal para almacenar gran cantidad de energía que no sea demandada muy rápidamente.

De igual manera, sería necesaria una baja intensidad de carga. Para su aplicación en un sistema de frenado regenerativo, no serían válidas, puesto que, en un momento dado, sería necesario absorber y/o proporcionar gran cantidad de energía en un espacio de tiempo muy corto (muchacha potencia). Para la aplicación objeto de este trabajo, sería mejor contar con unas baterías tipo ion litio de gran potencia (parte superior de la región coloreado en rojo).

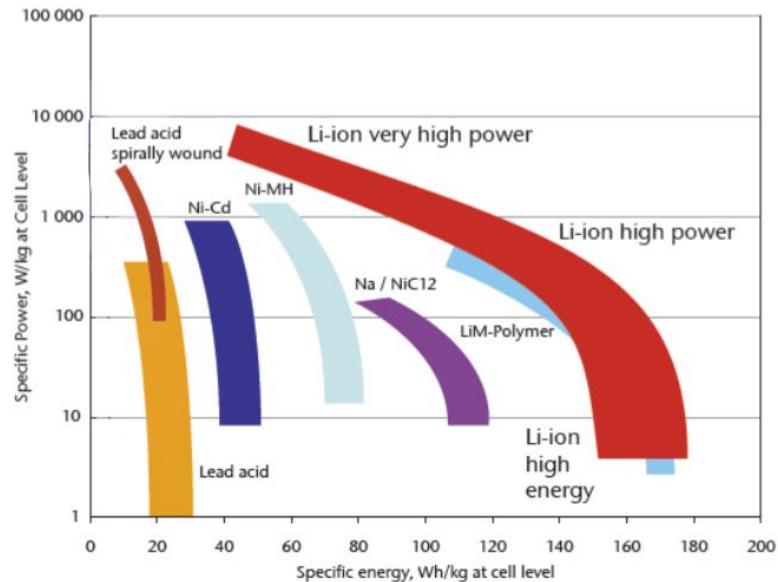


Figura 19: Energía y potencia específica de distintos tipos de baterías. Fuente: [119].

#### 4.4.3.2.- Capacitores

El condensador también es denominado por su anglicismo como *capacitor*. En este texto se utilizará este término debido a que, si bien no está aún recogido por el diccionario de la RAE, cada vez es más común su presencia en textos técnicos y académicos.

El condensador es uno de los elementos más frecuentemente presente en un circuito eléctrico. Se trata de un elemento concebido, al igual que las baterías, para el almacenamiento energético, pero con un fundamento diferente al de éstas. Mientras las baterías almacenan la energía eléctrica, previamente convertida dicha energía a un potencial químico de los elementos que las constituyen, el almacenamiento de energía eléctrica del condensador se basa en el campo eléctrico de las cargas presentes en el circuito.

El condensador está constituido por dos láminas conductoras separadas por un material aislante, también llamado dieléctrico. Cuando éste se encuentra conectado a una tensión determinada, las cargas eléctricas comienzan a depositarse en las láminas. Mientras que en una lámina se depositan cargas positivas, en la otra comienzan a hacer lo propio las cargas negativas. La carga eléctrica almacenada en un capacitor es denominada  $q$  y es tanto mayor como mayor es la tensión aplicada entre sus láminas.

Una estructura similar tiene los llamados supercondensadores o ultracondensadores (*supercaps* o *ultracaps*). Estos conceptos se emplean para referirse a una evolución de los condensadores en los que el elemento diferenciador es que en este caso las placas, en lugar de estar separadas por un material sólido aislante, se encuentran inmersas en un electrolito, consistente en una fina capa de solución de ácido sulfúrico.

Cuando la diferencia de potencial existente entre las dos placas está situada en torno a la tensión de descomposición del agua, se crea en las proximidades de las placas una doble capa eléctrica, por medio de la cual se permite una movilidad de los iones del electrolito. Esto significa que, en lugar de tener un aislante “inerte” como en el caso de los capacitores comunes, se tiene una doble capa que permite que se almacene carga eléctrica donde antes no se podía, manteniendo la capacidad dieléctrica, puesto que la capa de electrolito actúa como un aislante por debajo de la tensión de descomposición del agua [120].

La densidad de potencia específica de los *ultracaps*, está en torno a 1.000 - 2.000 kW/kg, con una eficiencia del 95%. La densidad de energía específica de estos componentes se mueve en un rango de entre 5 y 15 Wh/kg. La vida útil de los *ultracaps* puede alcanzar los 40 años, la mayor longevidad de todos los sistemas de almacenamiento energético [116].

## 5.- Metodología

El objetivo del presente trabajo de investigación es analizar y estudiar el consumo energético del transporte público urbano de la ciudad de Ávila, Para ello, se va tomar como punto de partida, la realización de un estudio de las condiciones geográficas y orográficas de la ciudad de Ávila.

En el planteamiento urbanístico actual de las ciudades prima la búsqueda de la mayor integración y accesibilidad que sea posible en todos sus elementos. Existen numerosos estudios que buscan la mayor accesibilidad en los desplazamientos de las personas que pueblan las ciudades [121, 122]. Sin embargo, el caso de la ciudad de Ávila está en la antítesis de este principio de accesibilidad. Ello es debido a que en otros tiempos lo más importante a la hora de diseñar las ciudades, no era la accesibilidad, sino justamente lo contrario, para evitar ataques externos.

Obviando la importancia histórica que ya de por si le otorga el origen de la ciudad, datado allá por el año 2500 a.C, Ávila posee una muralla procedente de la época de la reconquista, que le confiere un carácter de ciudad fortaleza medieval. Es conveniente resaltar que dicha ciudad, como otras tantas ciudades fortaleza, fue ideada con la idea fundamental de que fuera lo más inaccesible posible, por la famosa y ya comentada muralla que la rodea junto con unas condiciones agrestes que hacen que acceder a la región fortificada de la ciudad, e incluso moverse a través de ella, sea realmente complicado. El hecho de que la ciudad sea francamente poco accesible, en el pasado, pudo haber sido de vital importancia, pero en el presente hace que el transporte urbano tenga que discurrir por unas calles estrechas y de importantes pendientes, generando grandes desniveles acumulados que, presumiblemente y en última instancia, dificultan la circulación y penalizan los consumos de los medios de transporte.

Dadas las características anteriores es presumible asumir que el transporte urbano tendrá una gran ineficiencia comparado con el de una ciudad accesible y llana. Por este motivo, es fundamental como primera medida analizar la orografía de la ciudad y su relación con los recorridos del transporte urbano para, una vez conocida la orografía de la ciudad, realizar un estudio de las seis líneas de transporte urbano de viajeros establecidas en la ciudad. Se tendrá en cuenta, tanto el recorrido que se realiza, la distancia recorrida, así como el desnivel que afrontan en cada uno de los itinerarios planificados por la empresa concesionaria del servicio de transporte público.

El fin último de este estudio es el de conocer y comparar energéticamente, los distintos itinerarios existentes en la ciudad de Ávila, para poder compararlos y clasificarlos. Esto permitiría, finalmente, tener un amplio conocimiento de los requerimientos energéticos del transporte público urbano de la ciudad de Ávila que permita la obtención de conclusiones y pueda habilitar a tomar las decisiones que correspondan en la búsqueda de eficiencia y ahorro energético en el campo estudiado. Para seguir las directrices indicadas anteriormente, se desarrolla un método numérico estructurado en distintas fases (Figura 20):

- Fase I: adquisición de datos de las diferentes rutas de transporte urbano de la ciudad de Ávila;
- Fase II: procesado de datos realizando cálculos cinemáticos y dinámicos;
- Fase III: análisis energético determinando la energía suplida y la energía susceptible de ser recuperada.

El método numérico, se implementará a través de una hoja de cálculo, que se utilizará como base para la creación de una herramienta que, partiendo de cuaternas de datos (posición x, posición y, altura, tiempo) calculará las distintas variables que se presentan en las próximas páginas.

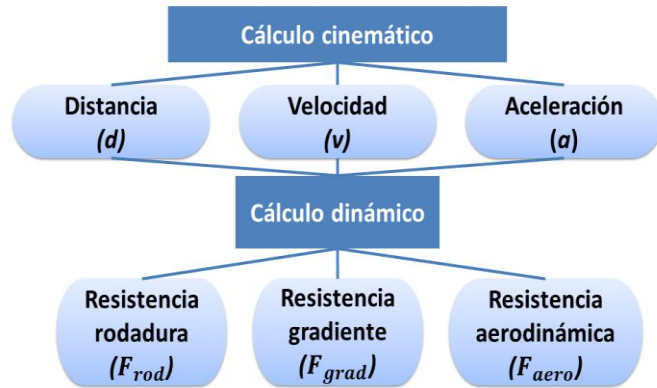
## Fase I: Adquisición datos líneas de Transporte Urbano

Posiciones GPS

Tiempos

Nº de paradas

## Fase II: Procesado de datos



## Fase III: Análisis energético.

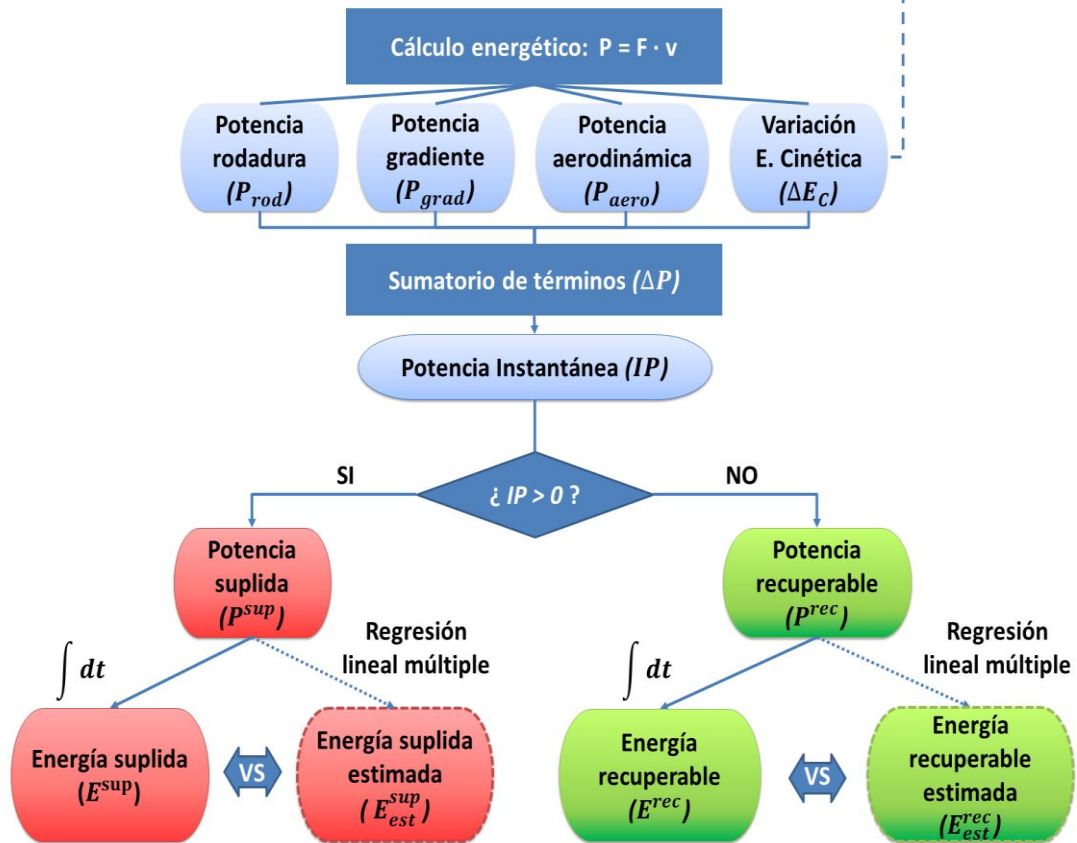


Figura 20: Metodología del estudio. Fuente: Elaboración propia

## 5.1.- Adquisición de datos

Para desarrollar la Fase I (Figura 20) se recolecta información de los trayectos de las 6 líneas de transporte urbano de pasajeros de la ciudad de Ávila [123]. La información recogida se basa en: (i) el número de paradas y (ii) la situación de las distintas paradas que se realizan a lo largo de cada una de las líneas de transporte urbano de la ciudad de Ávila.

### 5.1.1.- Posiciones GPS

El trabajo comienza tomando como base un trayecto determinado. En el caso presentado, y a modo de ejemplo, se tomará la línea 1 del servicio de transporte urbano de Ávila (Figura 21):

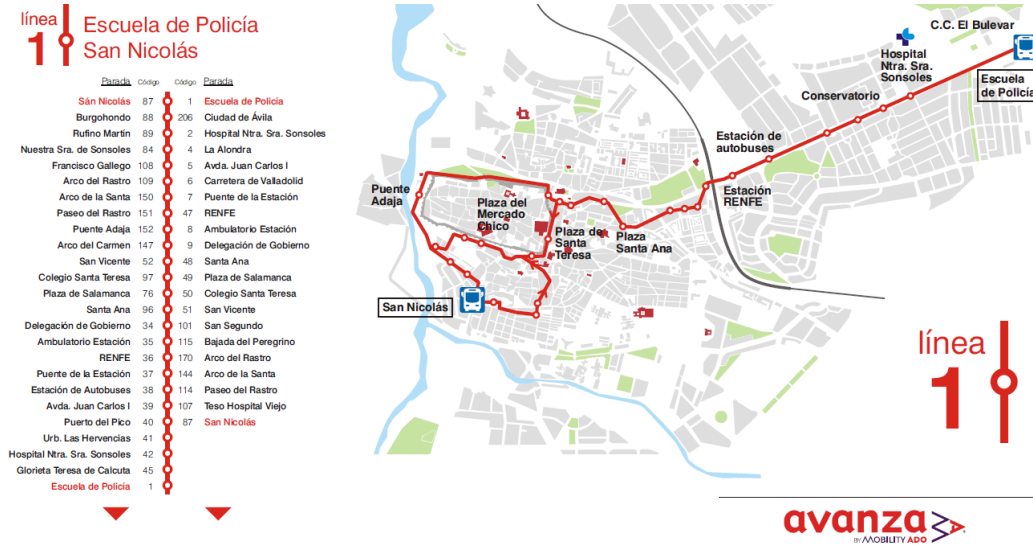


Figura 21: Línea 1 de transporte urbano de Ávila. Fuente: [123].

Una vez obtenida la información del suministrador del servicio de transporte [123], se cartografió la ruta mediante trazado manual utilizando el software online Google MyMaps® (Figura 22):

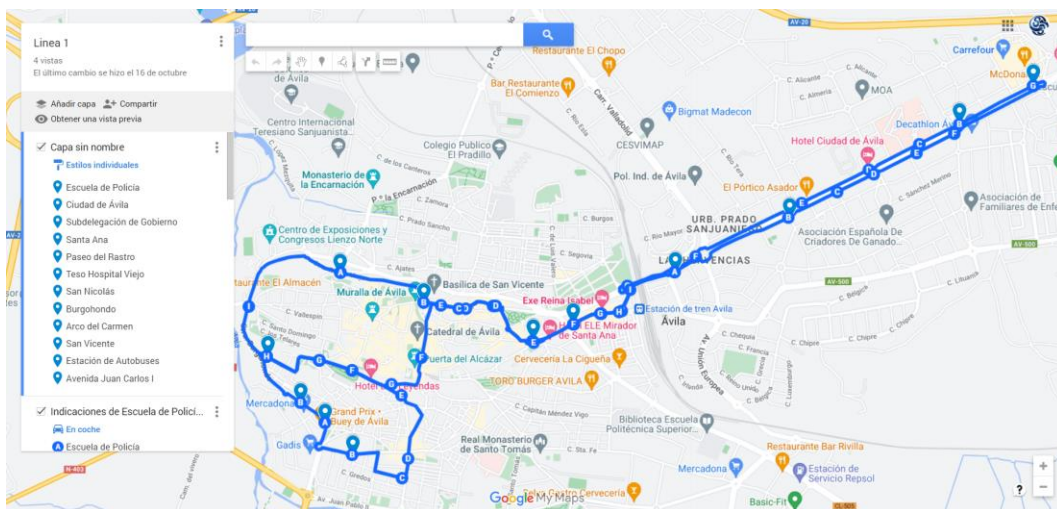


Figura 22: Línea 1 de transporte urbano de Ávila. Fuente: Elaboración propia a partir de [123].

Desde esta aplicación, se exporta el recorrido como un fichero con formato *.kmz*. Se carga el fichero *.kmz* generado a la aplicación *GPSVisualizer* (Figura 23):

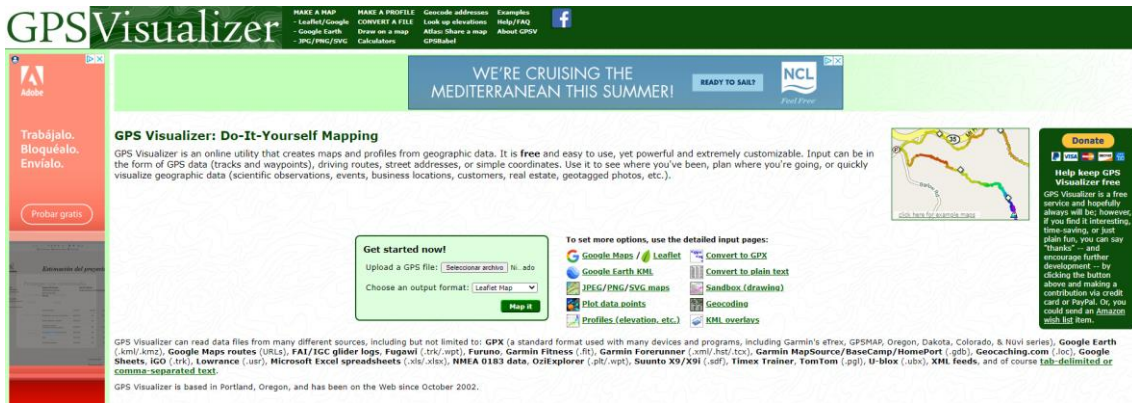


Figura 23: Aplicación *GPS Visualizer*, mediante la cual se extraen las ternas de datos del itinerario a estudiar. Fuente: [124].

Esta aplicación permite, en general, cambiar el formato de un *track* entre las distintas opciones de exportación. Para esta aplicación en particular, la opción de salida elegida será la de “texto plano”, en la cual se obtendrá un extenso listado de ternas (latitud-longitud-altura), según se puede ver en la Figura 24. A partir de estos datos se realizarán los correspondientes cálculos.

type	latitude	longitude	altitude (m)	color	opacity	width	scale	sym	name	desc
W	40,667795	-4,6590387	1175,9		1			images/icon-1.png		Escuela de Policía
W	40,6659464	-4,6635758	1174		1			images/icon-1.png		Ciudad de Ávila
W	40,6556846	-4,6874526	1124,4		1			images/icon-1.png		Subdelegación de Gobierno
W	40,6558271	-4,6899765	1128		1			images/icon-1.png		Santa Ana
W	40,6550454	-4,7063741	1077,8		1			images/icon-1.png		Paseo del Rastro
W	40,6528457	-4,7043161	1072,8		1			images/icon-1.png		Teso Hospital Viejo
W	40,6518495	-4,7028461	1070,4		1			images/icon-1.png		San Nicolás
W	40,6504064	-4,7011067	1069		1			images/icon-1.png		Burghondo
W	40,6589941	-4,7018829	1102,1		1			images/icon-1.png		Arco del Carmen
W	40,6562047	-4,6874526	1124,4		1			images/icon-1.png		San Vicente
W	40,6589805	-4,6811577	1128,8		1			images/icon-1.png		Estación de Autobuses
W	40,6614909	-4,6740989	1146,9		1			images/icon-1.png		Avenida Juan Carlos I
W	40,6677235	-4,6589914	1176		0,7			images/icon-2.png		Escuela de Policía
W	40,6659116	-4,6635576	1174		0,7			images/icon-3.png		Ciudad de Ávila
W	40,6649873	-4,6660189	1171,9		0,7			images/icon-4.png		Hospital Nuestra Señora de Sonsoles, 05004 Ávila, España
W	40,663762	-4,6691603	1161		0,7			images/icon-5.png		La Alondra, 05004 Ávila, España
W	40,6622044	-4,6732957	1149		0,7			images/icon-6.png		Avenida Juan Carlos I, 05004 Ávila, España
W	40,6597032	-4,6798653	1129,5		0,7			images/icon-7.png		Carretera de Valladolid, 05004 Ávila, España
W	40,658356	-4,6840081	1125		0,7			images/icon-8.png		Puente de la Estación, 05005 Ávila, España
W	40,6571572	-4,6844455	1130,2		0,7			images/icon-9.png		Renfe, 05001 Ávila, España
W	40,6570489	-4,6857205	1128,6		0,7			images/icon-10.png		Centro de salud Ávila Estación, 05001 Ávila, España
W	40,6565433	-4,6874471	1124,5		0,7			images/icon-2.png		Subdelegación de Gobierno
W	40,6557779	-4,6899703	1128,2		0,7			images/icon-3.png		Santa Ana
W	40,6574124	-4,6924121	1124,1		0,7			images/icon-4.png		Plaza de Salamanca, 05001 Ávila, España
W	40,6572812	-4,6940935	1126,2		0,7			images/icon-5.png		Colegio Santa Teresa, 05001 Ávila, España
W	40,6574413	-4,6956078	1123,3		0,7			images/icon-6.png		San Vicente, 05001 Ávila, España
W	40,6550016	-4,6968057	1126		0,7			images/icon-7.png		San Segundo, 05001 Ávila, España
W	40,6537141	-4,6980915	1110		0,7			images/icon-8.png		Bajada del Peregrino, 05002 Ávila, España
W	40,6543819	-4,7011081	1118,8		0,7			images/icon-9.png		Arco del Rastro, 05002 Ávila, España
W	40,65486	-4,7031235	1110		0,7			images/icon-10.png		Arco de la Santa, 05002 Ávila, España
W	40,6550266	-4,7064087	1077,1		0,7			images/icon-1.png		Paseo del Rastro
W	40,6528724	-4,7042924	1073,2		0,7			images/icon-3.png		Teso Hospital Viejo
W	40,6519309	-4,7027877	1070,9		0,7			images/icon-2.png		San Nicolás, 05002 Ávila, España
W	40,6504442	-4,7011086	1069		0,7			images/icon-3.png		Burghondo
W	40,6493222	-4,6980254	1071,6		0,7			images/icon-4.png		Rufino Martín, 05002 Ávila, España
W	40,6502263	-4,6976368	1075,2		0,7			images/icon-5.png		Nuestra Señora de Sonsoles, 05002 Ávila, España
W	40,6531854	-4,6980744	1093,9		0,7			images/icon-6.png		Francisco Gallego, 05002 Ávila, España
W	40,6530332	-4,7011128	1110,8		0,7			images/icon-7.png		Arco del Rastro, 05002 Ávila, España
W	40,65486	-4,7031235	1110		0,7			images/icon-8.png		Arco de la Santa, 05002 Ávila, España
W	40,6550266	-4,7064087	1077,1		0,7			images/icon-9.png		Paseo del Rastro
W	40,6573506	-4,7075318	1071,9		0,7			images/icon-10.png		Puente Adaja, 05002 Ávila, España
W	40,6589587	-4,7018636	1101,6		0,7			images/icon-2.png		Arco del Carmen
W	40,6575719	-4,6966947	1124,6		0,7			images/icon-3.png		San Vicente
W	40,6572811	-4,6945019	1126,1		0,7			images/icon-4.png		Colegio Santa Teresa (ida), 05001 Ávila, España
W	40,6573062	-4,6922487	1123,9		0,7			images/icon-5.png		Plaza de Salamanca, 05001 Ávila, España
W	40,6556866	-4,6898876	1128,3		0,7			images/icon-6.png		Santa Ana, 05001 Ávila, España
W	40,6565433	-4,6874471	1124,5		0,7			images/icon-7.png		Subdelegación de Gobierno, 05001 Ávila, España
W	40,657047	-4,6857634	1128,3		0,7			images/icon-8.png		Ambulatorio Estación, 05001 Ávila, España
W	40,6570954	-4,6846145	1130,8		0,7			images/icon-9.png		Renfe, 05001 Ávila, España
W	40,6581313	-4,6839213	1125,6		0,7			images/icon-10.png		Puente de la Estación, 05001 Ávila, España
W	40,6590825	-4,6811736	1128,8		0,7			images/icon-2.png		Estación de Autobuses
W	40,6613533	-4,6741266	1146,6		0,7			images/icon-3.png		Avenida Juan Carlos I
W	40,6627257	-4,6711175	1155		0,7			images/icon-4.png		Puerto del Pico, 05004 Ávila, España
W	40,6635695	-4,6688286	1161,7		0,7			images/icon-5.png		Urbanización Las Hervencias, 05004 Ávila, España
W	40,6645716	-4,6662058	1168,9		0,7			images/icon-6.png		Hospital Nuestra Señora de Sonsoles, 05004 Ávila, España
W	40,6654794	-4,6638521	1172,9		0,7			images/icon-7.png		Glorieta de Teresa de Calcuta, 05004, Ávila, España
W	40,6677235	-4,6589914	1176		0,7			images/icon-8.png		Escuela de Policía

Figura 24: Imagen de las ternas de puntos obtenidos en formato texto plano. Fuente: Elaboración propia.

La resolución de los puntos GPS obtenidos es variable en función de las características del itinerario. Cuando la trayectoria del vehículo es recta, se necesitan menos puntos GPS para definirla, sin embargo, cuando la trayectoria es curva, son necesarios más puntos GPS para que la línea poligonal dibujada por las coordenadas GPS se asemeje a la trayectoria real del vehículo. En el caso de este estudio la máxima distancia entre dos puntos en una parte

rectilínea del trayecto es superior a 255 m y, en las partes más reviradas del itinerario, la separación entre dos puntos *GPS* consecutivos es inferior a 1 m de distancia. A lo largo de todo el trayecto, la distancia media de separación entre dos puntos *GPS* consecutivos se sitúa en torno a 10 m.

A la hora de definir los itinerarios, se va a considerar que todas las líneas estudiadas, bien sean circulares o no, empiezan y acaban en el mismo punto. No se considera un itinerario “de ida” y otro “de vuelta”, sino que se toma la totalidad de cada uno de los recorridos como un único itinerario, haciendo que todas las líneas sean tomadas como circulares.

### 5.1.2.- Ubicación de las paradas

Cuando se utiliza la herramienta *GPSVisualizer*, se obtiene un amplio array de ternas de puntos *GPS* que definen el itinerario que recorrerá el autobús. Los puntos obtenidos son de dos tipos: *W(Waypoint)* y *T(Track)*. Los puntos tipo *waypoint* corresponden en las paradas, mientras que los puntos del tipo *track* corresponden al itinerario como tal. La herramienta utilizada exportada por separado los dos tipos de puntos. Esto hace que, por un lado, se tengan las coordenadas de las paradas y por otro lado se tenga un conjunto de puntos que conforman el itinerario. En principio, no se puede identificar qué puntos del itinerario corresponden con las paradas. Para resolver este inconveniente, se crea una tabla cruzada (Figura 25) dónde se calcula la distancia de cada punto *track*, con las coordenadas de la parada, puesto que estas son conocidas. El método por el cual se calcula dicha distancia, se encuentra explicado en el siguiente punto.

Figura 25: Imagen de las ternas de puntos obtenidos en formato hoja de cálculo. Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculadas todas las distancias, se pide a la hoja de cálculo que encuentre el mínimo valor de la serie de datos (marcado en verde en la Figura 25). El punto tipo *track* que está más cerca de las coordenadas conocidas de la parada, se le etiqueta como la parada correspondiente. Las distancias entre los puntos tipo *track* que se consideran paradas, suelen distar del orden de unas decenas de centímetros y rara vez superan el medio metro de distancia, por lo que se les considera como una aproximación lo suficientemente precisa para el estudio energético objeto de este texto.

## 5.2.- Procesado de datos

### 5.2.1.- Características cinemáticas

Una vez importada la información, el primer paso es calcular la distancia que hay entre dos puntos consecutivos de la ruta (Figura 25), para ello, se tiene en cuenta la expresión de Haversine para calcular la distancia ortodrómica entre dos puntos de la corteza terrestre [125]:

$$S = 2 \cdot r \cdot \sin^{-1} \sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)} \quad (\text{Ec. 10})$$

donde:

$S$ : distancia ortodrómica entre dos puntos de la corteza terrestre

$r$ : radio de la Tierra. Para el objeto de este estudio se ha tomado  $r = 6371$  km.

$\varphi$ : latitud

$\lambda$ : longitud del automóvil

Llegado este momento, ya se tiene información de cuál es la distancia que separa dos puntos consecutivos de la ruta y cuál es la distancia acumulada entre distintos puntos y, por acumulación, se puede conocer la distancia total recorrida en cada itinerario. Así, tal y como se puede ver en la Figura 25, en este punto ya se dispone de la siguiente información:

- **Contador.** Se trata de un número correlativo para cada terna.
- **Tipo.**  $W$  (Waypoint) y  $T$  (Track). Los que se utilizan para la herramienta que se va a crear son los tipo  $T$ .
- **Latitud, Longitud, Altitud.** Las ternas de datos con los que se trabaja.
- **Distancia Haversine.** El resultado de aplicar una particularización de trigonometría esférica por la cual se calcula la distancia ortodrómica, la menor distancia entre dos puntos situados en una superficie esférica (Ec. 10). En el caso de la herramienta, calcula la distancia entre un punto  $n$  y su inmediato anterior  $n-1$ .
- **Distancia acumulada.** Suma la distancia *Haversine* de su fila a la distancia acumulada de la fila anterior.
- **Punto singular.** Tal y como se explica en el apartado 5.1.2, se etiquetan los puntos singulares pertenecientes a las paradas.

En este momento, ya se tienen todos los datos sobre el recorrido que van a realizar los autobuses encargados de realizar el transporte urbano de viajeros en la ciudad de Ávila. Se recuerda que en este texto se ha indicado como ejemplo la línea 1 de autobuses, pero se realiza de forma idéntica para las seis líneas existentes.

Conociéndose, además, cuál es la distancia que tiene que recorrer el autobús para ir de una parada a otra, para definir todas las características cinemáticas sólo queda introducir el tiempo, para que el movimiento de los autobuses quede definido totalmente. Para ello, puesto que el alcance de este estudio no contempla la adquisición de datos en tiempo real, se establecen unas hipótesis de partida que ha de cumplir el autobús a lo largo de todo el recorrido:

- El autobús habrá de detenerse en todas las paradas (velocidad  $v=0$  km/hora). Para este estudio, es indiferente el tiempo que el autobús se encuentre detenido, puesto que no realizará desplazamiento. El consumo que pueda hacer en esos momentos no es que se considere despreciable, sino que no se contempla, dado que el estudio se realiza con perspectiva de poder comparar autobuses de motor térmico, con motor eléctrico, en cuyo caso, este consumo no tendría sentido. En cualquier caso, en aras de garantizar la precisión y si se diera el caso, se podría establecer un consumo mínimo del motor al ralentí, que podría ser tenido en cuenta.
- El autobús aumenta de velocidad con aceleración  $a$  constante correspondiente a pasar de 0 a 50 km/h en 10 segundos ( $a = 1,39 \text{ m/s}^2$ ). El mismo valor de aceleración se utilizará para el frenado. Se toma esta hipótesis para poder homogeneizar los itinerarios, dado que no se dispone de datos reales.
- El autobús no podrá exceder de 50 km/h. Velocidad máxima permitida dentro de núcleo urbano. Para los cálculos que se van a realizar, una vez que el autobús llegue a esta velocidad, permanecerá constante en este valor hasta que el autobús tenga que realizar la próxima parada.
- Las condiciones del tráfico, quedan excluidas del alcance de este estudio, por tratarse de condiciones altamente cambiantes y dependientes de los horarios.

Toda vez establecidas las hipótesis de partida anteriores, quedan ya definidas las funciones velocidad y aceleración (Figura 26), ambas dependientes de la variable definida como independiente: el tiempo. Esta relación tiempo-velocidad, es la que se establece para distintos ciclos de conducción ampliamente utilizados para estudios de consumo en carretera [126–128].

Tal y como se expuso en el apartado 4.1.2.- *ciclos de conducción*, todos estos ciclos se han diseñado de tal manera que su variable independiente sea el tiempo, y los intervalos que se consideran son de un segundo. De la misma manera, la totalidad de los estudios consultados para la realización de este trabajo, por ejemplo en [56] o [59], se toman datos en tiempo real mediante posicionadores *GPS*, la frecuencia con la que se toman las posiciones *GPS* es de 1 Hz, lo que significa que se hace una toma de datos cada segundo. Esta forma de tomar y representar los datos es idéntica a la forma en la que se presentan los datos en los ciclos de conducción pertenecientes a organizaciones internacionales.

Dada la estandarización de criterios, el valor de intervalo de la variable independiente en este trabajo, también será de 1 segundo. En la metodología que se va a seguir en este trabajo, se van a calcular las velocidades medias, aceleraciones medias y distancia recorrida en cada intervalo de un segundo. Para cumplir con las hipótesis de partida (el autobús habrá de detenerse en todas las paradas), los valores de velocidad decrecerán con la antelación suficiente para que, cuando la variable posición coincida con la correspondiente a una parada, la variable velocidad sea igual a cero en ese punto.

Una vez que están definidas las características cinemáticas del movimiento del autobús (Figura 26), se definen también sus características técnicas: (i) Altura ( $H$ ); (ii) Anchura ( $B$ ); (iii) Masa ( $m$ ); (iv) Masa en Orden de Marcha ( $MOM$ ); (v) Masa Máxima Autorizada ( $MMA$ ); (vi) Número de pasajeros ( $pax$ ); y (vii) Coeficiente de arrastre aerodinámico ( $C_x$ ) [129], que quedan reflejadas en la Tabla 3.

Tabla 3: Características técnicas del autobús tipo utilizado para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

H (m)	B (m)	MOM (kg)	MMA (kg)	pax	C <sub>x</sub>
3,10	2,55	10000	18000	86	0,65

Una de las premisas que se ha tomado en este artículo es la de realizar los cálculos energéticos partiendo de los datos de un autobús que realiza, sin ningún pasajero a bordo, los recorridos considerados.

El fabricante del autobús considerado no proporciona datos acerca de la masa en orden de marcha ( $MOM$ ). Para calcular este dato del autobús, se le resta a la  $MMA$ , la masa de los ocupantes para los que está concebido. Como dato para la masa media de un pasajero, se recurre a la masa del *Humanetics harmonized Hybrid III 50th Male ATD*, el maniquí de pruebas de automoción más utilizado en el mundo para la evaluación de los sistemas de retención de seguridad de los automóviles en las pruebas de choque frontal, y que representa el 50 percentil de la población para ensayos regulados en el Código de Reglamentos Federales de los Estados Unidos y también en los Reglamentos Europeos *ECE* [130]. La masa considerada, por tanto, para cada pasajero será de 77,7 kg. La  $MRO$  calculada es, por tanto.

$$MOM = MMA - (86pax \cdot 77,7 \text{ kg}) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde  $MOM$  es la masa en orden de marcha y la  $MMA$  es la Masa Máxima Autorizada.

Finalmente, el dato considerado para  $MOM$  se redondea a 10.000 kg, a fin de tener en cuenta el peso adicional del equipaje que pueda portar cada pasajero. La decisión de tomar como masa del autobús la mínima posible obedece a la intención de realizar el estudio contemplando los casos más desfavorables posibles, considerando desfavorable el hecho de que los consumos en las distintas líneas de transporte sean similares. Cuanta mayor masa se contemple en el estudio, mayor será la energía que tendrá que ser desplegada para mover el autobús haciendo, por tanto, que las diferencias se acrecienten. En cuanto al coeficiente de resistencia aerodinámico, se ha tomado un valor de  $C_x = 0,65$ , valor típico para autobuses de pasajeros [84].

### 5.2.2.- Características dinámicas

Partiendo de los datos del autobús (Tabla 3) y de su comportamiento cinemático, se pasa a calcular las fuerzas, energías y potencias que tienen lugar para cada intervalo de un segundo a lo largo de todo el recorrido (Figura 26).

Para ello, es necesario determinar las distintas fuerzas relacionadas con las distintas situaciones en las que se puede encontrar todo vehículo que se desplaza en el seno de un fluido como es el aire. El vehículo, en su desplazamiento ha de vencer 3 fuerzas que se oponen a su avance y que han sido estudiadas y definidas en el apartado 4.2, a saber: (i) la resistencia a la rodadura; (ii) la resistencia al ascenso y (iii) la resistencia aerodinámica. También habrá de aportar una energía a mayores si quiere acelerar. Esta energía se considerará como (iv) energía para la aceleración.

En primer lugar, la resistencia a la rodadura de los neumáticos en superficies duras se debe principalmente al concepto de histéresis, concepto introducido en el apartado 4.2.1 del capítulo “Estado del arte”. Esta fuerza se denomina Resistencia a la rodadura ( $F_{rod}$ ) (Fase II, Figura 20) y se expresa de la siguiente forma:

$$F_{rod} = m \cdot g \cdot f_r \quad (Ec. 12)$$

donde

$m$ : masa

$g$ : constante de gravedad que actúa en el centro de la rueda

$f_r$ : coeficiente de resistencia a la rodadura [84].

En el caso de que el vehículo se halle en una pendiente, habrá que aplicar la componente del peso que corresponda. Por lo tanto, la expresión ( $F_{rod}$ ) (Fase II, Figura 20), será de la forma mostrada en la (Ec. 4).

El coeficiente  $f_r$  es función del material del neumático, su estructura, la presión, la temperatura, el dibujo del neumático, la rugosidad de la carretera, etc. Para el cálculo del rendimiento del vehículo, es suficiente considerar el coeficiente  $f_r$  como una función lineal de la velocidad. Para la mayoría de los rangos de inflado de vehículos, teniendo en cuenta un turismo que circula por una carretera asfaltada, se puede utilizar la expresión indicada en la (Ec. 6).

Sobre la resistencia al ascenso, cuando un vehículo se desplaza por una pendiente, la descomposición vectorial de su propio peso, producirá una componente en la dirección longitudinal del vehículo [84]. El efecto de esta componente en el movimiento longitudinal del vehículo puede ser de oposición al movimiento (en caso de que la pendiente sea  $\alpha > 0$ ) o de ayuda (en el caso en que el ángulo de la pendiente  $\alpha < 0$ ). Esta fuerza relacionada con la pendiente suele denominarse resistencia al ascenso o Fuerza gradiente ( $F_{grad}$ ) (Fase II, Figura 20). Se expresa de la manera indicada en la (Ec. 7):

El criterio de signos utilizado es tal que la energía que tenga que ser aportada por el motor será de signo positivo y la energía disipada por el conjunto de los sistemas de frenado, será considerada con signo negativo. Este concepto de energía “tradicionalmente disipada por el sistema de frenado” es de vital importancia en este estudio, puesto que es considerada energía susceptible de ser aprovechada en el caso de instalar un sistema de frenado regenerativo.

Por último, respecto a la resistencia aerodinámica del vehículo es necesario tener en cuenta que un vehículo que se desplaza en el seno de un fluido (aire) experimenta una fuerza que se resiste a su avance [84]. Esta fuerza se denomina resistencia aerodinámica ( $F_{aero}$ ) (Fase II, Figura 20) y se desarrolla en la (Ec. 9):

### 5.3.- Análisis energético

Calculadas las 3 fuerzas resistentes que se consideran en el estudio (Figura 20), es fácil calcular la potencia requerida para mantener el vehículo rodando a una velocidad constante, sin más que multiplicar la fuerza por la velocidad en cada instante. Habida cuenta que el intervalo de la variable independiente es el segundo, los términos de potencia son iguales a los términos energéticos referidos a ese intervalo de un segundo. Por lo tanto, la potencia de rodadura  $P_{rod}$  (Fase III, Figura 20) será igual a:

$$P_{rod} = F_{rod} \cdot v \quad (Ec. 13)$$

donde  $F_{rod}$  es la resistencia a la rodadura.

En cuanto a la potencia de ascenso  $P_{grad}$  (Fase III, Figura 20), será igual a:

$$P_{grad} = F_{grad} \cdot v \quad (Ec. 14)$$

donde  $F_{grad}$  es la resistencia al ascenso.

Y la potencia aerodinámica  $P_{aero}$  (Fase III, Figura 20), será:

$$P_{aero} = F_{aero} \cdot v \quad (Ec. 15)$$

donde  $F_{aero}$  es la resistencia aerodinámica.

Cuando un vehículo circula a una velocidad constante tiene una energía cinética que está determinada por la (Ec. 16). Para que se mantenga esa velocidad constante, hay que aportar una potencia igual a la suma de todas las potencias anteriormente expuestas ( $P_{rod}$ ,  $P_{grad}$  y  $P_{aero}$ ). Si, por el contrario, se quiere acelerar el vehículo será necesario aportarle una energía determinada para incrementar su velocidad (Ec. 17). Esta potencia no es calculada en función del producto de una fuerza por una velocidad sino como la diferencia de energía cinética entre un estado y el siguiente dividido entre el tiempo que transcurre entre estos dos estados (Fase III, Figura 20). Esta energía será la correspondiente a la variación de la energía cinética ( $\Delta E_C$ ).

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (Ec. 16)$$

que en términos incrementales se representa de la siguiente manera:

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} m \cdot \Delta v^2 \quad (Ec. 17)$$

donde:

$m$ : masa

$\Delta v^2$ : incremento de la velocidad al cuadrado.

En el caso en el que se presenten los cuatro términos de la energía que se han expuesto (además de vencer las tres potencias, sea necesario acelerar), la expresión utilizada para calcular la potencia necesaria está representada en la (Ec. 18).

Al utilizarse el tiempo como variable independiente para los cálculos y discretizar la variable tiempo en intervalos de un segundo, la variación de energía a lo largo de un intervalo de un segundo es, literalmente, la definición de potencia, por lo tanto, la variación de energía cinética tiene unidades de potencia, al igual que  $P_{rod}$ ,  $P_{grad}$  y  $P_{aero}$  (Fase III, Figura 20).

Una vez calculadas para cada segundo las potencias correspondientes a los cuatro fenómenos tenidos en cuenta en el estudio (Fase III, Figura 20), se realiza el sumatorio de los cuatro valores de potencia, por lo que se tendrá una serie temporal de la potencia aportada o “recuperable” del vehículo en función del tiempo.

Una vez conocidos todos los datos de la distancia, la altura, y la velocidad se puede calcular la Potencia Instantánea  $-PI-$  (Fase III, Figura 20).

$$PI = P_{rod} + P_{grad} + P_{aero} + \Delta Ec \quad (Ec. 18)$$

donde

$P_{rod}$ : Potencia de rodadura

$P_{grad}$ : Potencia de ascenso

$P_{aero}$ : Potencia aerodinámica

$\Delta Ec$ : Incremento de la energía cinética

Para conocer el valor de  $PI$  que es necesario suministrar al vehículo en cada momento, sólo hay que sumar la potencia necesaria para mantener el vehículo a una velocidad constante y el incremento de energía cinética que experimenta el vehículo al cambiar su velocidad en un intervalo de tiempo determinado (en el caso de este estudio el intervalo de tiempo analizado es de 1 segundo). Los valores de  $P_{rod}$  y de  $P_{aero}$  (Fase III, Figura 20), siempre serán positivos para cualquier velocidad  $v$  dada, sin embargo  $P_{grad}$  y  $\Delta Ec$  (Fase III, Figura 20), podrán ser positivos y oponerse al movimiento del vehículo –el vehículo está subiendo una pendiente ( $P_{grad} > 0$ ) o acelerando ( $\Delta Ec > 0$ ) – o negativos, favoreciendo al movimiento –en el caso de estar descendiendo una pendiente ( $P_{grad} < 0$ ) o estar reduciendo la velocidad ( $\Delta Ec < 0$ ) –.

Los valores positivos obtenidos de la variable  $PI$ , se dan cuando el resultado de la (Ec. 18) tiene un valor positivo. Corresponden a la potencia que es necesario aportar al vehículo para acelerar éste, para vencer las fuerzas resistentes o para una combinación de ambas. A los valores positivos de la variable  $PI$  se les denomina potencia suplida ( $P^{sup}$ ) o potencia aportada (Fase III, Figura 20).

$$P^{sup} = |PI|; \forall PI > 0 \quad (Ec. 19)$$

donde  $PI$  es la Potencia Instantánea.

Los valores negativos de  $PI$  se dan cuando el resultado de la (Ec. 18) tiene un valor negativo. Estos valores negativos, representan un insumo energético (que generaría un incremento de la energía almacenada en el vehículo si éste estuviera dotado de un sistema de frenado regenerativo). Esta potencia, que en vehículos dotados de sistemas de frenado regenerativo es susceptible de ser almacenada, se le denomina potencia recuperable ( $P^{rec}$ ) (Fase III, Figura 20).

$$P^{rec} = |PI|; \forall PI \leq 0 \quad (Ec. 20)$$

El resto de valores de potencia (positiva o negativa) se obtiene dependiendo de cuál sea la combinación entre los factores de fuerza aerodinámica, de rodadura, gradiente y  $\Delta E_c$  necesaria para acelerar (Ec. 18). Los resultados vertidos a continuación, se basan en el análisis de las variaciones energéticas de esta serie temporal.

#### 5.4.- Herramienta de cálculo.

Para realizar el estudio energético llevando a cabo la metodología explicada en los apartados anteriores, se crea una hoja de cálculo donde se encuentran recogidas todas las ecuaciones ya comentadas.

Todos los ciclos de conducción estudiados para este trabajo y gran cantidad de artículos consultados, son mostrados en tablas tiempo-velocidad [55, 57, 60, 64, 67, 74, 76], en los cuales los valores son dados en variables discretas. Además, en multitud de estudios realizados a pie de campo [56, 59], los datos son adquiridos por sistemas *GPS* con una tasa de muestreo de 1 segundo dando lugar a conjuntos de datos en los que, una vez más, la información cinética viene dada como conjuntos de datos discretos. En ningún artículo, revista o libro utilizados para documentar este trabajo se ha encontrado una función continua como representación de las características cinemáticas del vehículo en cuestión. Por estos motivos, se ha escogido la opción de realizar todos los cálculos utilizando una hoja de cálculo y evitar programas más complejos de cálculo o simuladores matemáticos que trabajan en variable continua, puesto que al final, este proceso, requeriría trabajar con *lookup tables* e interpolaciones de los datos existentes, añadiendo un trabajo que sólo conllevaría mayores dificultades y errores de cálculo sin añadir ninguna ventaja significativa.

Una de las líneas principales de este trabajo es la de crear una herramienta que permita analizar y estudiar, de forma rápida y sencilla, distintas situaciones que se pueden dar en el ejercicio del transporte. La concepción y desarrollo de la herramienta no se limita, por tanto, a la mera resolución de las situaciones recogidas en el alcance del actual trabajo sino que se crea la base para poder continuar con la investigación en otros escenarios que puedan tener interés de cara a los eventuales estudios posteriores que se puedan realizar y que quedan contemplados en el apartado 9.- Líneas futuras de investigación.

La hoja de cálculo preparada, ha sido desarrollada con tres partes bien diferenciadas, tomando el aspecto que se muestra en la Figura 26:

- Datos de entrada. Se agrupan las distintas variables que participan en el estudio ya sean, o no, dependientes del tiempo. Las variables no dependientes del tiempo podrían ser consideradas como condiciones de contorno, tales como la densidad del aire o distintos coeficientes que intervendrán en las ecuaciones. Por otro lado, las variables dependientes del tiempo, representarán el movimiento del vehículo estudiado en todos sus aspectos tales como posición, velocidad o aceleración.
- Cálculos. En este apartado, se engloban tanto cambio de unidades, como cálculos trigonométricos, de posición, energéticos o cualquier otro necesario para el análisis del vehículo e itinerarios considerados.
- Datos resumen. Fruto de los cálculos realizados a lo largo de todo el dominio del tiempo considerado, se recoge en este apartado un resumen de aquellos valores calculados que puedan ser representativos o especialmente indicativos de cualquier característica considerada importante.

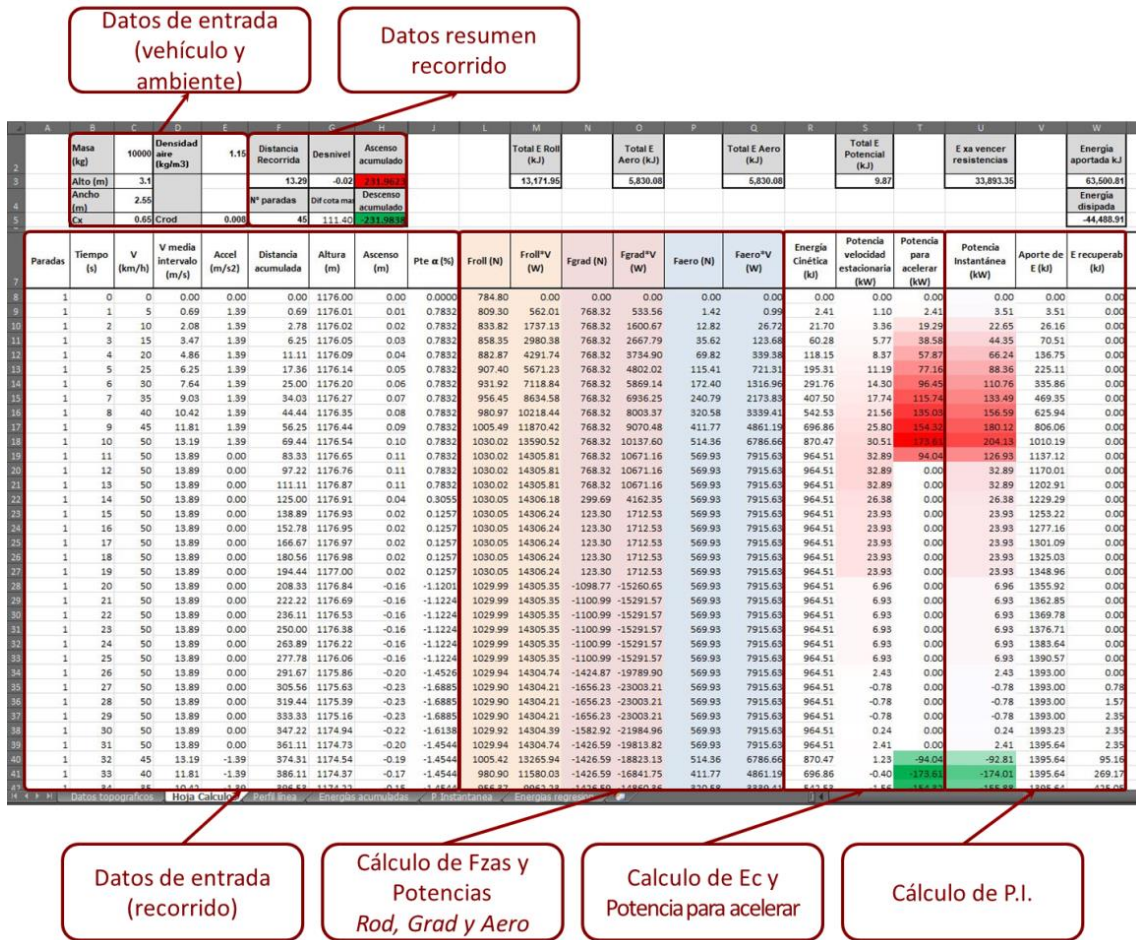


Figura 26: Imagen de la herramienta de cálculo utilizada. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se desglosan todas las variables que tienen lugar en el estudio energético realizado: (i) Datos de entrada del vehículo y el ambiente; (ii) Datos de entrada del recorrido; (iii) Datos resumen del recorrido y (iv) Cálculo de fuerzas y potencias.

### 5.4.1.- Datos de entrada del vehículo y el ambiente

- **Masa:** Se trata del valor masa en orden de marcha. Este valor es de vital importancia, puesto que intervendrá en multitud de cálculos energéticos, tales como la energía cinética o potencial que adquirirá el autobús a lo largo de los distintos recorridos estudiantos. El valor que se ha tomado para este estudio es de 10000 kg. tal y como se ha explicado en el punto 5.2.1 de este mismo capítulo.
- **Alto:** Altura del vehículo considerado. En este caso, se toma como altura 3,1 metros correspondientes al modelo Mercedes Citaro [129].
- **Ancho:** Anchura del vehículo considerado. Este valor, junto con el anterior servirá para calcular la superficie frontal del vehículo, necesaria para calcular la resistencia aerodinámica del autobús considerado para el estudio. En este caso, se toman 2,55 metros de ancho, que corresponde a la anchura (sin contemplar los espejos) del modelo indicado y referenciado en el apartado anterior.
- **C<sub>x</sub>:** Se tomará un valor de C<sub>x</sub> correspondiente a 0,65, valor típico para autobuses de pasajeros [84].
- **Densidad del aire:** La densidad del aire cambia por múltiples factores como la altitud, la temperatura o la humedad relativa del aire. Dadas las condiciones

cambiantes de los dos últimos factores, se ha tomado como referencia un valor de  $\rho=1,15 \text{ kg/m}^3$ .

- $f_r$ : se calcula mediante la expresión (Ec. 6), indicada anteriormente.

#### 5.4.2.- Datos de entrada del recorrido

- **Paradas:** Se trata de un campo llave, para identificar el tramo de la línea en el que se está trabajando. Cada vez que ocurre el evento ‘velocidad es igual a cero’, este contador aumenta una unidad indicando que se ha realizado una parada. Por tanto, el valor de esta columna indica cuantas paradas se han realizado hasta el momento. El inicio de la línea se toma como la primera parada, por tal motivo empieza con el valor igual a 1.
- **Tiempo (s):** Esta columna se toma como clave maestra (única e irrepitable) para toda la tabla, al tratarse de la variable independiente de todos los cálculos que se van a realizar. En esta columna se representan los valores que toma el tiempo, tratado como variable discreta, a lo largo del ciclo de conducción que se va a estudiar. Básicamente, se trata de un contador de segundos a lo largo de todo el dominio del ensayo.
- **Velocidad instantánea  $v_i$  (km/h):** Se trata de la velocidad instantánea que lleva el autobús en un instante dado del ensayo.
- **Velocidad media intervalo  $v$  (m/s):** Como se ha indicado anteriormente, el estudio se hace tomando el tiempo como variable discreta a lo largo de intervalos de un segundo de duración. Este campo se utiliza, además de para hacer el cambio de unidades de km/h a m/s, para calcular la velocidad media del intervalo. Puesto que se toma la aceleración constante, la velocidad media se calcula como:

$$v = \frac{v_{final} + v_{inicial}}{2} \quad (Ec. 21)$$

donde  $v_{final}$  es la velocidad indicada en la fila actual ( $n$ ) y  $v_{inicial}$  la velocidad indicada en la fila anterior ( $n-1$ ).

Nótese que al haber elegido el tamaño del intervalo de un segundo, el valor velocidad media del intervalo, coincide con la distancia recorrida en ese mismo intervalo, al ser la distancia recorrida:

$$d = v \cdot t \quad (Ec. 22)$$

donde  $v$  es la velocidad y el tiempo  $t=1s$ .

Por este motivo, y a fin de no ser recurrente, se prescinde de colocar la variable ‘distancia recorrida en el intervalo’.

- **Aceleración ( $m/s^2$ ):** Este campo está referido a la aceleración, calculada esta como:

$$a = \frac{v_{final} - v_{inicial}}{t} \quad (Ec. 23)$$

donde:

$v_{final}$ : es la velocidad al final del intervalo de tiempo  $t=1s$

$v_{inicial}$ : es la velocidad en el inicio del intervalo de tiempo  $t=1s$

- **Distancia acumulada:** En esta columna se calcula la distancia que ha recorrido el autobús desde el instante  $t=0$  hasta el instante  $t=n$  correspondiente. Simplemente, se suma la distancia recorrida en el intervalo  $n$ , a la distancia acumulada hasta ese momento (desde  $t=0$ , hasta  $t=n-1$ ).
- **Altura (m):** Este campo, no es calculado, sino que es un dato de entrada. Pertenece a las ternas de puntos *GPS* que se han recolectado de la aplicación desde donde obtenemos las coordenadas X, Y y altitud. El procedimiento aparece descrito en el punto 5.1.1. La herramienta está diseñada para tener en cuenta la fuerza de ascenso o descenso. En los ciclos de conducción estándar, éste dato es constante e igual a cero, es decir, se supone que el ciclo de conducción se realiza en un recorrido totalmente plano. Esta herramienta, al incluir la altura, va más allá que los cálculos que se suelen tener en cuenta para calcular el consumo de un vehículo. La altura se calcula acudiendo a la pestaña “datos topográficos”. Si no hay coincidencia exacta en el valor “distancia acumulada” (no se espera que la haya) se busca la altura correspondiente mediante interpolación de los valores de la altura correspondientes a los puntos de distancia inmediatamente anterior y posterior de los cuales se tienen datos.
- **Ascenso (m):** Se calcula el ascenso que experimenta el autobús en cada intervalo de tiempo. Este dato es obtenido restando la altitud del punto  $n$  menos la altitud del punto  $n-1$ . De esta manera, se deja preparado el dato necesario para calcular la variación de energía potencial en el intervalo.
- **$\alpha$  (rad):** Mediante trigonometría se obtiene la pendiente de cada uno de los intervalos. Se calcula como el arco-seno de la altura ascendida en el intervalo (cateto opuesto), dividido entre la distancia recorrida en el intervalo (velocidad por el tiempo), y que representa a la hipotenusa de la relación trigonométrica. Este ángulo está calculado en radianes.
- **$\alpha$  (%):** Se trata de una equivalencia de la variable anterior. Únicamente se hace un cambio de unidades para representar la pendiente. Puesto que las pendientes en las carreteras están indicadas en porcentaje y no en radianes, se ha optado por mostrar este dato de una forma más intuitiva al usuario. Esta variable solo aparece a título ilustrativo y no participa de ningún cálculo.

#### 5.4.3.- Datos resumen del recorrido

- **Distancia recorrida:** Este campo está referido a la distancia recorrida acumulada al final del recorrido. Se obtiene del último valor obtenido en el campo *Distancia acumulada*, del punto 5.4.2.
- **Número de paradas:** Al igual que en el punto anterior, este dato se obtiene del último valor obtenido en el campo *Paradas*.
- **Diferencia de cota máxima:** Se obtiene a partir de los datos del campo *Altitud*. Se busca el valor máximo y mínimo que alcanza esta variable. Una vez conocidos estos dos, se obtiene la diferencia de cota máxima restando el valor de altitud mínima al valor de altitud máxima obtenido.
- **Ascenso acumulado:** Este campo obtiene los datos a partir de la variable *Ascenso*. Se barren todos los valores que toma esta variable a lo largo del tiempo, sumando todos los valores con signo positivo a lo largo de todo el dominio de la función.
- **Descenso acumulado:** De forma similar que el apartado anterior. Este campo se obtiene barriendo todos los valores que toma la variable *Ascenso* a lo largo del

tiempo, sumando el módulo de todos los valores con signo negativo a lo largo de todo el dominio de la función.

- **Desnivel:** Este dato se obtiene a partir de los datos *Ascenso acumulado* y *Descenso acumulado*. Se resta el segundo del primero para obtener el desnivel. En el caso del estudio, todas las rutas estudiadas son circulares. Este hecho hace que el valor esperado no pueda ser otro que cero. Sin embargo, valores distintos de cero son esperados debido a errores de redondeo, puesto que se suman series de más de 1500 en todos los casos.

#### 5.4.4.- Cálculo de fuerzas y potencias

- **Resistencia a la rodadura;  $F_{rod}$  (N):** Se calcula la resistencia a la rodadura en newtons según se muestra en (Ec. 4).
- **$F_{rod} \cdot v$  (W):** Para calcular la potencia instantánea que es necesario aportar para vencer la resistencia a la rodadura en un instante de tiempo  $t$  dado, al cual le corresponde una velocidad  $v$  determinada, se multiplica la resistencia de rodadura en newtons por la velocidad en m/s, obteniendo la potencia en vatios, según se explicó en el apartado 5.2.2 – Características dinámicas –, donde se enuncia la (Ec. 13).
- **Resistencia al ascenso;  $F_{grad}$  (N):** La resistencia al ascenso o fuerza gradiente, se calcula tal y como se indica en la (Ec. 7).
- **$F_{grad} \cdot v$  (W):** De forma similar al cálculo de la potencia instantánea para vencer la resistencia a la rodadura, en este caso también se multiplica la fuerza resistente por la velocidad que lleva en cada instante  $t$  para calcular la potencia que es necesario vencer en cada instante  $t$  de tiempo. La (Ec. 14) muestra con exactitud los términos de la expresión matemática.
- **Resistencia aerodinámica;  $F_{aero}$  (N):** La resistencia aerodinámica, está influida por la superficie frontal del vehículo, por el coeficiente aerodinámico de éste y por el cuadrado de la velocidad a la que circula, tal y como se encuentra recogido en la (Ec. 9)
- **$F_{aero} \cdot v$  (W):** En la (Ec. 15) se recoge la forma de calcular la potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica. Para ello, se multiplica la fuerza por la velocidad que tiene el móvil en un instante en concreto.

#### 5.4.5.- Cálculo de energías

- **Energía Cinética (kJ):** Conocida la masa del vehículo como dato de entrada y la velocidad media de un intervalo  $n$ , se calcula la energía cinética, mediante la (Ec. 16). El resultado se muestra en kilojulios.
- **Potencia a velocidad estacionaria (kW):** Un vehículo que se encuentra en movimiento en el seno de un fluido, necesita vencer una fuerza determinada para avanzar a velocidad constante. Haciendo un análisis dinámico, se puede calcular la potencia que hay que aportar en un instante determinado para avanzar a velocidad constante. En la herramienta propuesta, esta potencia a velocidad estacionaria se calcula como las sumas de las tres potencias relacionadas con las tres fuerzas resistentes que hay que vencer: resistencia de rodadura, de ascenso y aerodinámica, tal y como se describe a continuación:

$$P_{\text{vel est}} = P_{\text{rod}} + P_{\text{grad}} + P_{\text{aero}} = (F_{\text{rod}} + F_{\text{grad}} + F_{\text{aero}}) \cdot v \quad (\text{Ec. 24})$$

donde

$P_{\text{rod}}$  ;  $P_{\text{grad}}$  ;  $P_{\text{aero}}$ : Potencias de Rodadura, de Ascenso y Aerodinámica respectivamente

$F_{\text{rod}}$  ;  $F_{\text{grad}}$  ;  $F_{\text{aero}}$ : Resistencias de Rodadura, de Ascenso y Aerodinámica respectivamente

$v$ : velocidad

- **Potencia para acelerar (kW):** Se calcula como la diferencia de energía cinética en el instante  $n$ , menos la energía cinética en el instante  $n-1$ . Se recuerda, que al ser intervalos de un segundo, la diferencia de energía entre dos instantes, separados un segundo, es, por definición, la propia potencia. Este término, queda definido en la (Ec. 17).
- **Potencia instantánea (PI) (kW):** Para calcular la potencia instantánea que ha de aportar el vehículo en cada momento, se suman las potencias relacionadas con las tres fuerzas resistentes (de rodadura, gradiente y aerodinámica) y la potencia necesaria para acelerar, definida en el punto anterior. Este término será crucial en el análisis, pues representa la potencia instantánea, en cada instante de tiempo, que tiene lugar en el vehículo.

Tal y como se explica en (Ec. 19), en el estudio realizado, cuando esta variable tome un valor positivo, será denominada como  $P^{\text{sup}}$  (Potencia suplida por el sistema de almacenamiento energético). Por el contrario, según se indica en (Ec. 20), cuando el valor de la PI sea negativa, se le denominará  $P^{\text{rec}}$  (Potencia susceptible de ser recuperada por el sistema de frenado regenerativo).

- **Aporte de energía (kJ):** Se trata de una variable que cuantifica la energía aportada por el vehículo en el total del trayecto hasta un instante de tiempo determinado. Se trata de un campo acumulado, que suma cada una de las potencias instantáneas ( $PI$ ) en el caso de que éstas últimas tengan valor positivo (sea una energía aportada por el vehículo).
- **Energía recuperable (kJ):** Se utiliza el mismo concepto que en el campo anterior pero en este caso, se suman las potencias instantáneas ( $PI$ ) de signo negativo. El signo negativo de la potencia indica una energía que hay que sustraer del vehículo, bien sea para reducir su velocidad o porque esté descendiendo una pendiente. En cualquier caso, este campo mide la energía bruta que es susceptible de ser recuperada mediante un eventual equipo de frenado regenerativo instalado en el vehículo. En caso de no contar con un equipo que sea capaz de procesar y almacenar la energía, ésta habría de ser disipada en forma de calor por el equipo de frenado convencional. Aunque no es el objeto de este estudio, este campo bien podría ser usado como dato inicial para el cálculo de las necesidades de refrigeración de un equipo de frenado convencional, al conocer la energía que necesita ser disipada.

## 6.- Resultados

El presente trabajo está basado en la creación de una herramienta capaz de evaluar las necesidades energéticas de distintos vehículos en función de sus propias características y del entorno y recorrido que han de recorrer. El fin último de esta herramienta no es otro que el de detectar patrones en los distintos ciclos de conducción analizados que permitan sacar conclusiones que conduzcan a una mejora significativa del entendimiento del consumo energético que tiene lugar en la utilización de los distintos medios de transporte, permitiendo tomar decisiones que fomenten una mejora de la eficiencia energética, y del aprovechamiento de los combustibles.

A modo de ejemplo, se ha aplicado el modelo de cálculo propuesto en apartados anteriores en la red de transporte público urbano de la ciudad de Ávila, presentando en este apartado los resultados obtenidos para las distintas líneas de transporte de viajeros existentes en dicha ciudad. En el momento del estudio seis líneas comprenden la totalidad de los recorridos existentes en la ciudad.

La circulación rodada en la ciudad de Ávila es un tanto particular debido a que, se trata de un recinto amurallado, y como es lógico, solo se puede entrar dentro del recinto por las distintas puertas de acceso a la fortificación. De ahí su particular disposición de las líneas. Como se puede observar en la Figura 27, se observa que la totalidad de las líneas, de una u otra manera rodean el recinto amurallado hasta llegar a un acceso a éste que les permita el mejor tránsito hacia su destino. También se puede observar que cinco de las seis líneas tienen un inicio común, partiendo desde la Escuela de la Policía Nacional y dirigiéndose hacia el casco histórico al que rodean hasta alcanzar los posibles puntos de acceso a la ciudad.



Figura 27: Plano de las líneas de transporte urbano en la ciudad de Ávila. Fuente: [123].

## 6.1.- Altitud

En primer lugar, se representan los resultados generales de la orografía de las distintas rutas (Tabla 4).

Tabla 4: Orografía de las distintas líneas de transporte de Ávila. Fuente: Elaboración propia.

Nº de línea	Distancia de cada línea (km)	Nº de paradas	Ascenso acumulado (m)
1	13,286	45	231,96
2	13,030	48	189,09
3	14,390	47	190,85
4	16,641	50	234,53
5	14,683	46	192,26
6	20,729	65	200,38

Según los resultados expuestos en la Tabla 4, se puede observar que las distintas líneas estudiadas tienen una longitud total comprendida entre los 14 y los 20 kilómetros. Las distancias de los recorridos observados no difieren mucho entre ellos, de forma que salvo la línea 6 que recorre casi 21 kilómetros, el resto de las líneas se mueven entre los 13 y los 16 kilómetros sin mucha variabilidad.

En cuanto al número de paradas, este está comprendido entre 45 y 65. Al igual que con la distancia, se presenta más o menos la misma tendencia. Las líneas 1 a 5 presentan entre 45 y 50 paradas, mientras que la línea 6 es la que más paradas tiene, alcanzando un total de 65.

En lo referente al ascenso acumulado ya se rompe la tendencia manifestada en las dos primeras variables de la Tabla 4. El ascenso acumulado se sitúa entre los 189 metros y los 231 metros. Sin embargo, ya no es la línea 6 la que tiene el mayor ascenso acumulado, algo en principio esperable, dado que es la que más longitud acumula, sino que es la línea 1 la que ostenta el mayor ascenso acumulado con solamente 13 kilómetros de recorrido frente a los más de 20 kilómetros de la línea 6.

Ya en este punto se puede comprobar que efectivamente, tal y como se comentaba en la introducción, la ciudad de Ávila tiene una orografía muy agreste que propicia grandes ascensos acumulados en una relativamente escasa distancia recorrida.

La información plasmada en la Tabla 4 se muestra también gráficamente en la Figura 28 como distintos perfiles de línea. En los seis apartados de la Figura 28 se pueden observar distintos aspectos: (i) la altura en cada punto del recorrido; (ii) las pendientes que ha de recorrer el autobús en su recorrido; (iii) los desniveles acumulados; y (iv) las cotas máximas y mínimas.

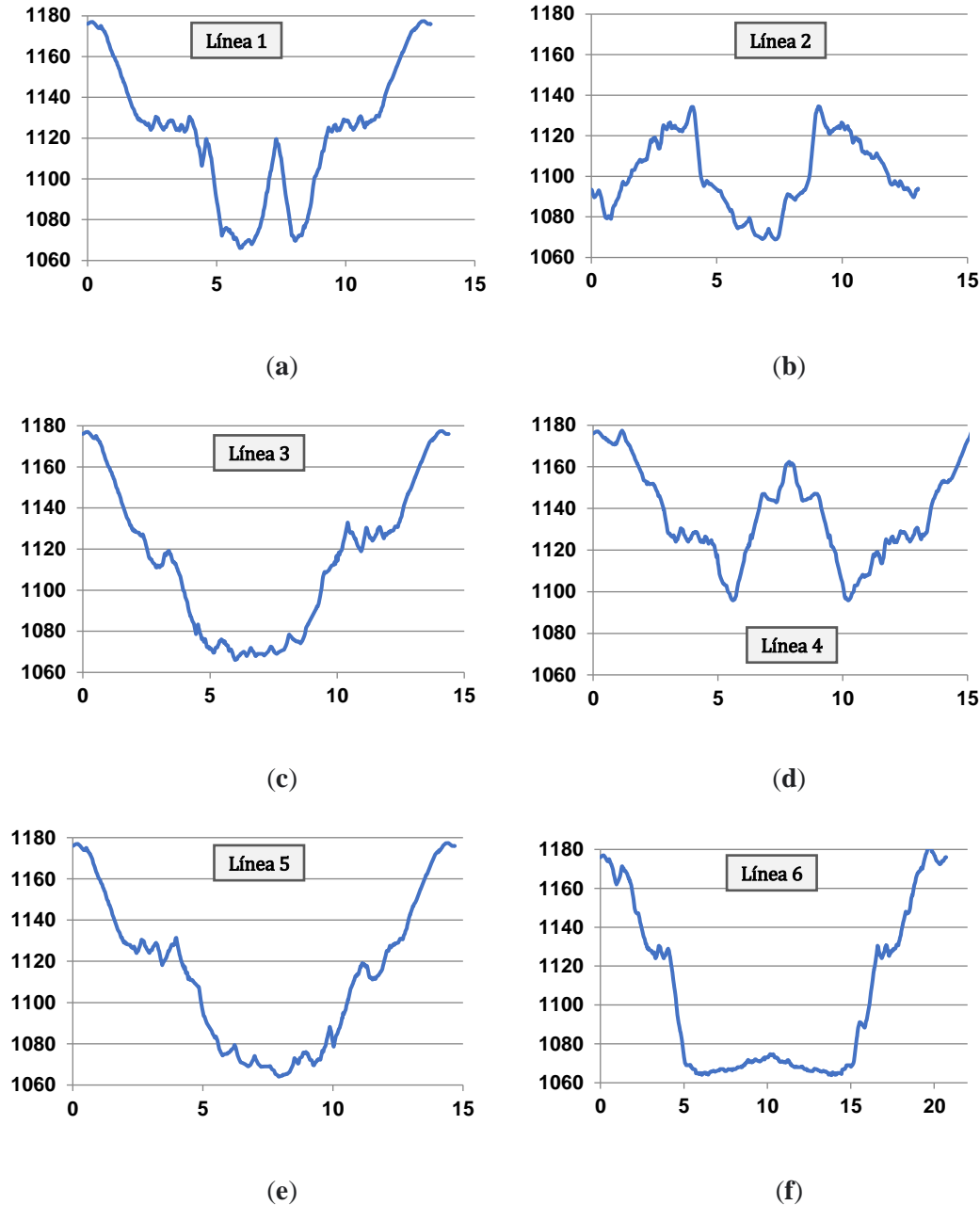


Figura 28: Perfil de las distintas líneas. Altitud (m) vs distancia (km). Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se explicaba en el punto 5.1.1.- Posiciones *GPS*, al tomar todas las rutas como circulares, se puede observar en las gráficas que el punto inicial y el punto final del recorrido son el mismo. Este hecho va a causar que la cota inicial y final de todos los recorridos presentados sea la misma. Consecuentemente, el potencial gravitatorio y la suma a lo largo de todo el recorrido de las energías potenciales, será igual a cero al ser el campo gravitatorio un campo conservativo.

Nótese que aunque los recorridos sean tomados como circulares, las gráficas de elevación frente al tiempo no necesariamente han de ser simétricas, puesto que el vehículo en cuestión no recorre exactamente el mismo recorrido, sino que por motivos de planeamiento urbanístico, normativa de tráfico, o el propio interés de la ruta, este puede hacer el recorrido de ida por unas determinadas calles y realizar el recorrido de vuelta a su lugar de origen por otras calles diferentes.

## 6.2.- Velocidades

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la velocidad de las distintas líneas estudiadas. En la Tabla 5 se presenta un resumen de los datos obtenidos.

Tabla 5: Velocidades de las distintas líneas de transporte de Ávila. Fuente: Elaboración propia.

Nº de línea	Distancia de cada línea (km)	Tiempo empleado (mm:ss)	Velocidad media (km/h)
1	13,286	23:17	34,24
2	13,030	23:29	33,29
3	14,390	24:58	34,58
4	16,641	28:09	35,47
5	14,683	25:08	35,05
6	20,729	35:32	35

Según los criterios impuestos por este estudio en el apartado 5.2.1.- *Características cinemáticas*, la aceleración se considera constante de valor  $1,39 \text{ m/s}^2$  y la velocidad está acotada superiormente a 50 km/h, velocidad máxima permitida en recorridos urbanos. Partiendo de estas condiciones iniciales se han calculado los tiempos que le toma al autobús realizar los seis recorridos estudiados (Tabla 5), donde se puede apreciar que los tiempos en recorrer cada una de las líneas está comprendido entre los 23 y los 28 minutos a excepción de la línea 6, que le toma 35 minutos realizar el recorrido al autobús asignado.

Con respecto a las velocidades medias registradas, no se observan grandes diferencias entre las seis líneas estudiadas, quedando todas ellas comprendidas entre los 33 y los 35 km/h de velocidad media a lo largo de todo el recorrido. Al ser las velocidades medias parecidas y las distancias recorridas diferentes, como el caso de la línea 6, se podría decir que las velocidades se mantienen en el máximo durante más tiempo, puesto que parece no afectar a la velocidad media de la línea 6 el hecho de que tenga que realizar muchas más paradas que las otras cinco líneas.

Los datos sobre las velocidades que se establecen a lo largo de los recorridos de las 6 líneas de transporte urbano estudiadas quedan representados gráficamente en la Figura 29. Allí se puede apreciar que los perfiles de las etapas tienen una apariencia similar y homogénea. Este hecho se debe a las condiciones de contorno establecidas, que condicionan principalmente dos aspectos: (i) las velocidades están acotadas superiormente por lo que el máximo en todos los gráficos siempre será 50 km/h a lo largo de todo el recorrido y (ii) las aceleraciones se han establecido como constantes en  $1,39 \text{ m/s}^2$  lo que implica que las pendientes de la función velocidad son iguales (aunque con signo positivo si se trata de una aceleración y negativo en el caso de que se trate de una frenada). Las diferencias entre unos recorridos y otros solamente vienen dadas por las diferentes paradas y la distancia existente entre ellas.

El alcance de este estudio obvia las condiciones cambiantes del tráfico y se centra únicamente en el análisis de la cantidad y posición de las paradas, puesto que, en un hipotético rediseño de las rutas, no tendría sentido llegar a conclusiones utilizando datos cambiantes en el tiempo.

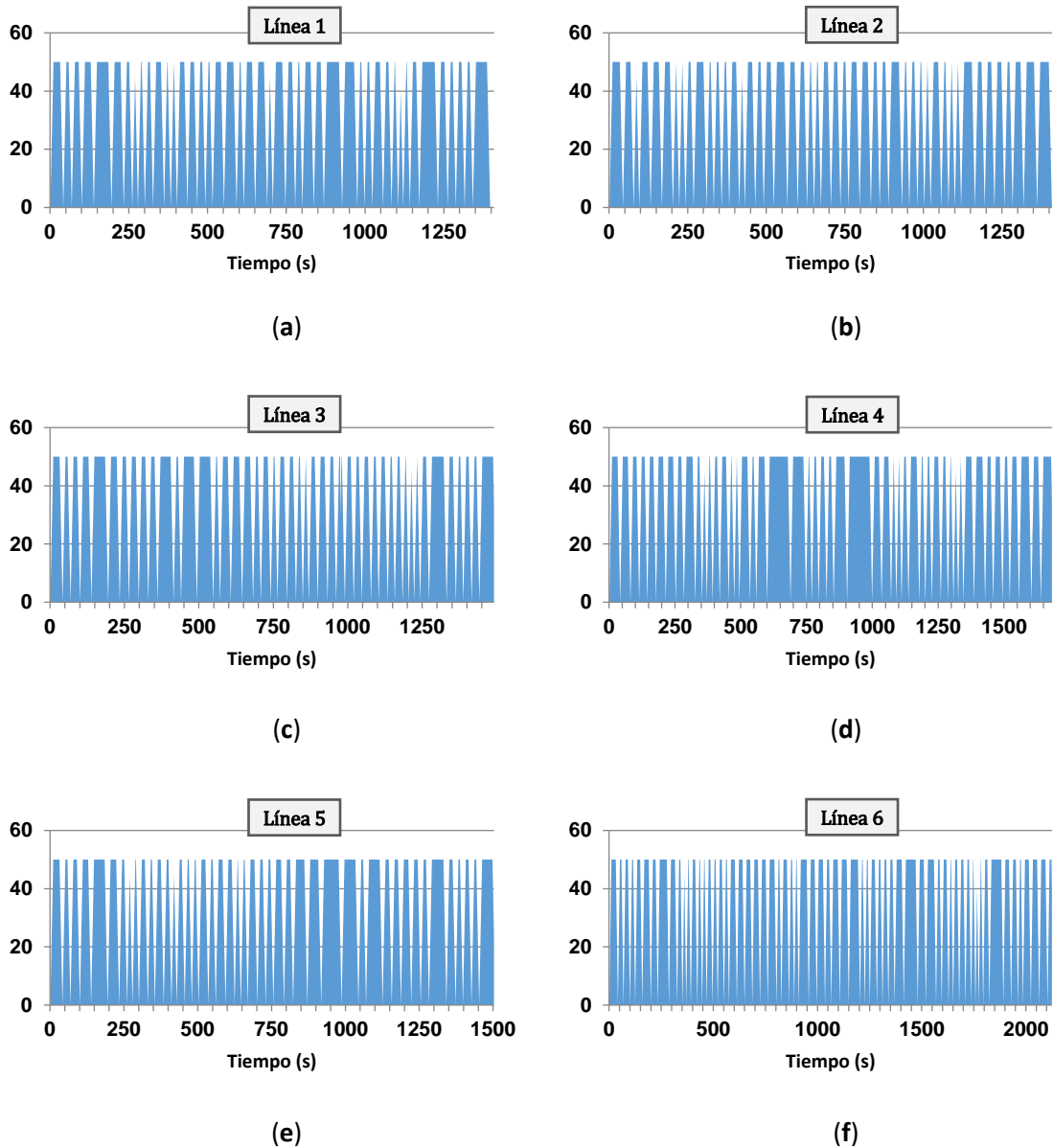


Figura 29: Velocidades (km/h) vs tiempo (s) en cada una de las líneas. Fuente: Elaboración propia.

Para contener el consumo de combustible, la situación ideal sería aquella en la que toda la gráfica se mostrara como una masa uniforme de tal manera que toda la masa de color quedara por debajo de una curva de velocidad que creciera una sola vez en el inicio del recorrido, permaneciera constante a lo largo de éste y descendiera una sola vez al final del mismo. Lógicamente en ningún transporte urbano tendría sentido esta condición. Desde el punto de vista del viajero, lo ideal sería que existiera el mayor número de paradas para tener que recorrer a pie el menor espacio posible para tomar el autobús.

Este estudio se centrará, entre otras cosas, en analizar cuál es el coste energético del aumento de paradas en relación a otros factores de transporte aunque en un primer vistazo, ya se puede intuir que cuanto más vacía se observa la masa de color de la gráfica velocidad-tiempo, tantas más paradas se realizarán perjudicando con ello la eficiencia energética.

### 6.3.- Aceleraciones

Otro de los parámetros interesantes a analizar en el estudio realizado es el campo de las aceleraciones. A continuación, se presenta la Tabla 6, donde está condensada la información de las seis líneas estudiadas en relación con esta variable.

Tabla 6: Tiempo de aceleración en las distintas líneas. Fuente: Elaboración propia.

Nº de línea	Nº de paradas	Tiempo acumulado de aceleración (mm:ss)
1	45	7:16
2	48	7:48
3	47	7:43
4	50	8:08
5	46	7:28
6	65	10:37

En la Tabla 6 se puede observar cómo se han recogido los tiempos acumulados a lo largo de todo el recorrido, en los que el vehículo ha estado acelerando. Dadas las condiciones de contorno que se han tomado, al ser la aceleración constante, el tiempo que ha estado el vehículo acelerando es proporcional al número de paradas realizadas.

En la Figura 30, se puede observar, como si fuera un gráfico de densidad, dónde se producen las aceleraciones. Las aceleraciones tienen lugar únicamente donde hay paradas, por lo tanto, es razonable pensar que allí donde exista una concentración de aceleraciones es debido a que se encuentran zonas de gran densidad poblacional o alto interés que hace que abunden las paradas diseñadas por la empresa concesionaria del transporte público.

Se toman las aceleraciones propiamente dichas como aceleraciones de signo positivo, al estar en consonancia este criterio de signos con el que tradicionalmente se ha tomado en las ecuaciones de la cinemática. Estas se representan en color rojo, por representar una un gasto de energía para el sistema de almacenamiento energético. Mientras tanto, las deceleraciones se toman como aceleraciones negativas y se representan en color verde, por ser éstas un potencial insumo energético. Posteriormente se analizará la verosimilitud de que ese “posible” insumo energético, se convierta finalmente en un aporte de energía que se pueda almacenar.

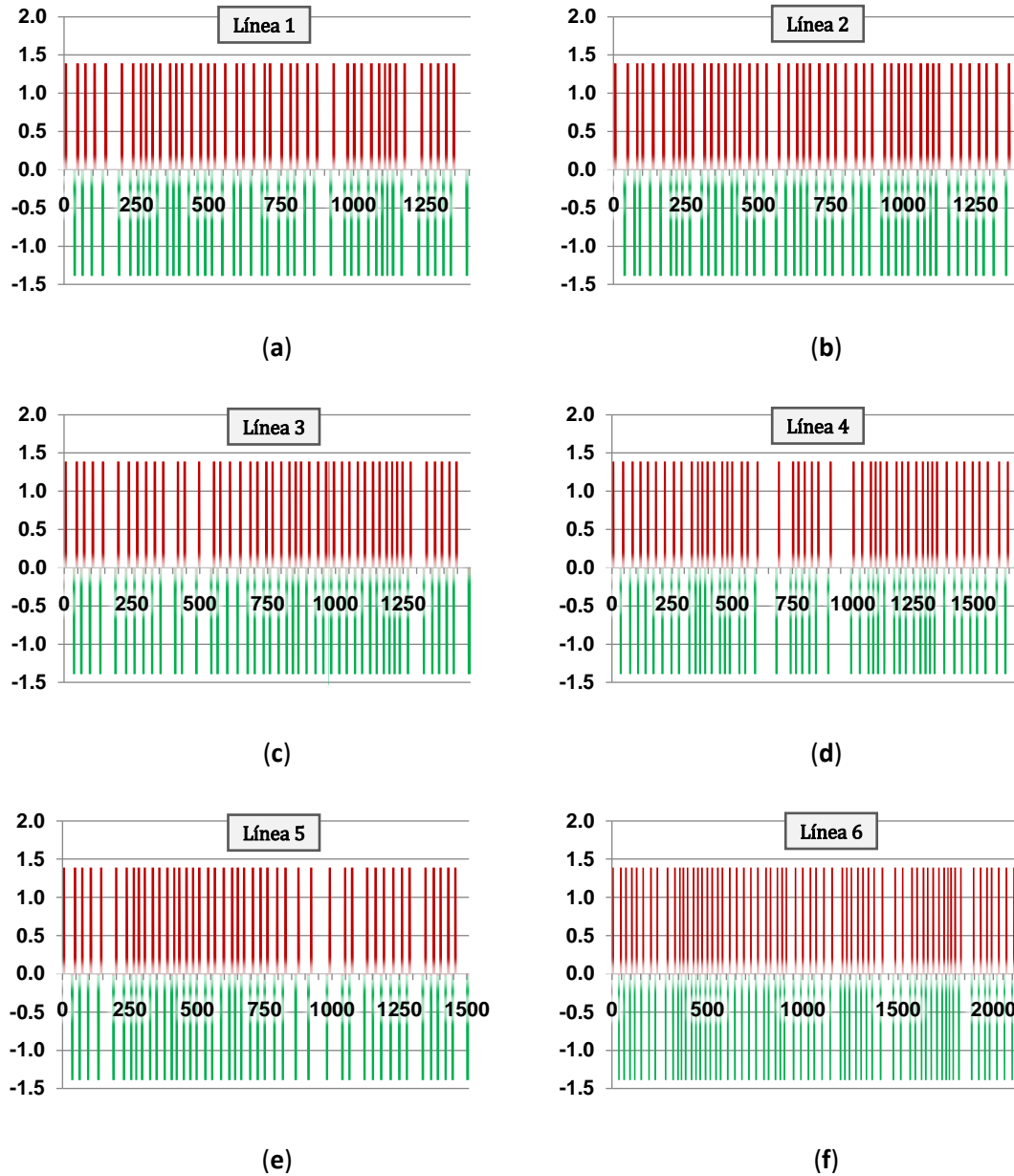


Figura 30: Aceleraciones ( $m/s^2$ ) vs tiempo (s) en cada una de las líneas. Fuente: Elaboración propia.

## 6.4.- Potencias

Una vez mostrados y comentados los datos cinemáticos (Fase II, Figura 20), a continuación, se exponen los datos dinámicos calculados (Fase III, Figura 20). Las potencias transmitidas al vehículo desde el motor (Ec. 19), o desde los frenos a la batería del vehículo (Ec. 20), han sido calculados mediante la herramienta propuesta y se grafican en la Figura 31. En ella, se representan los valores de la potencia para las seis líneas de transporte urbano en la ciudad de Ávila.

El cálculo continuo y a lo largo de todo el recorrido es importante puesto que, aunque exista mucha energía susceptible de ser recuperada, la forma en la que se tiene que almacenar ésta influye sobremanera en la elección y dimensionamiento tanto del generador, como del sistema de almacenamiento. No es lo mismo tener que almacenar una energía constante y mantenida a lo largo del tiempo (como la que se produciría como resultado de retener la inercia del autobús descendiendo una pendiente) que tener que absorber la misma cantidad de energía en pocos y grandes picos de potencia espaciados en el tiempo.

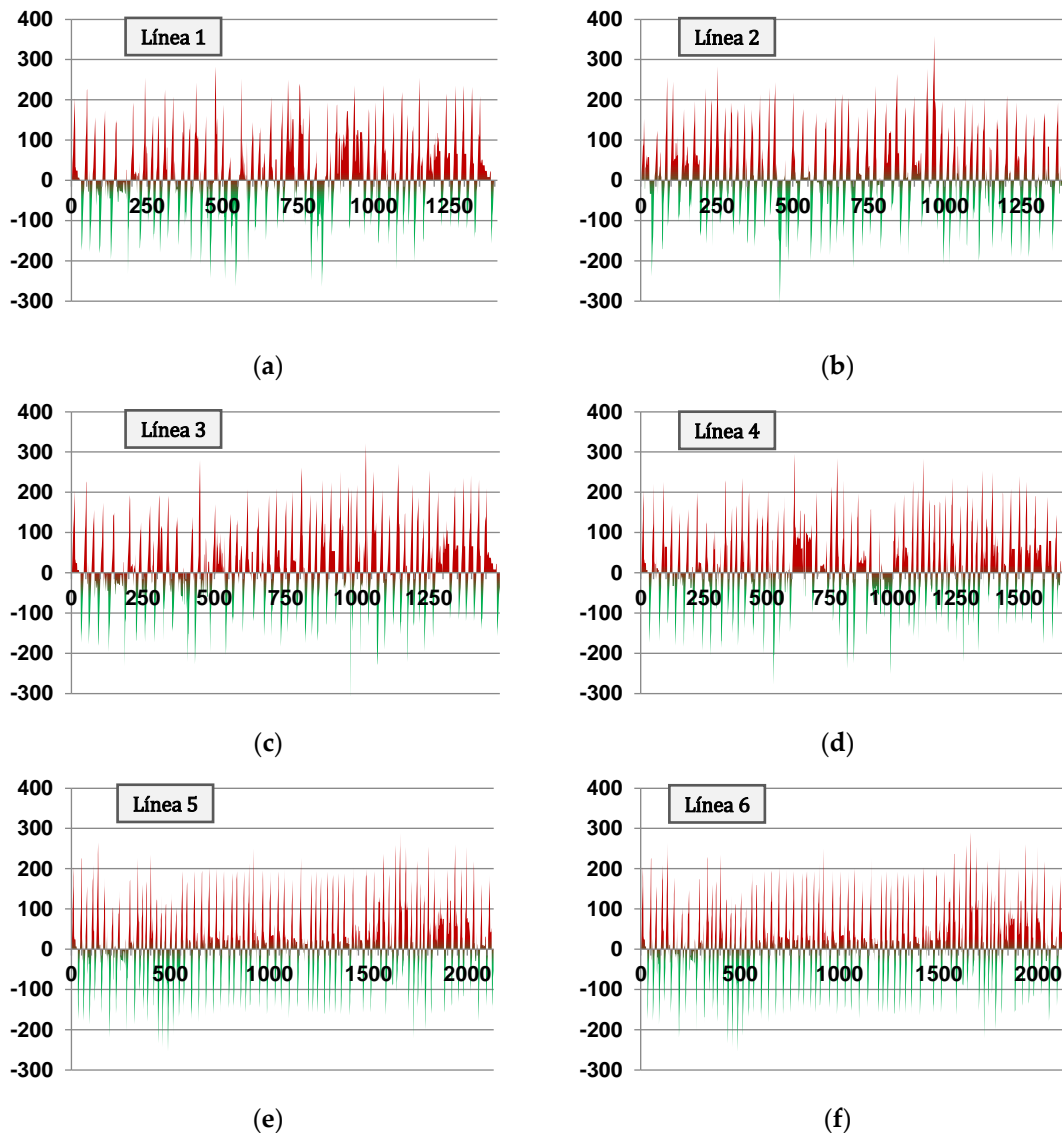


Figura 31: Distribución de potencia (kW) vs tiempo (s) en las distintas rutas de la ciudad de Ávila. Fuente: Elaboración propia.

Recordando que la parte inferior de la gráfica, coloreada en verde, corresponde a la energía susceptible de ser recuperada, en la Figura 31 se puede observar cómo, en general, hay pocos momentos en los que se necesite almacenar picos superiores a los 200 kW. De la misma manera, se puede observar que prácticamente todos los picos de potencia que se dan en las frenadas superan los 100 kW.

En la Figura 32 se muestra una representación de la superposición de la serie potencias, con la serie altitud que ayuda a observar un interesante fenómeno. En el gráfico se puede apreciar la influencia de la  $F_{grad}$  en la potencia sin mas que fijarse como las potencias susceptibles de ser recuperadas (coloreadas en verde), son significativamente mayores en los intervalos donde la pendiente es negativa. Este hecho se acentúa cuanto mayor es la pendiente. El mismo hecho ocurre en sentido contrario, siendo mayores las potencias que hay que suplir al vehículo (las coloreadas en rojo) cuanto más pronunciada es la pendiente que ha de subir el vehículo.

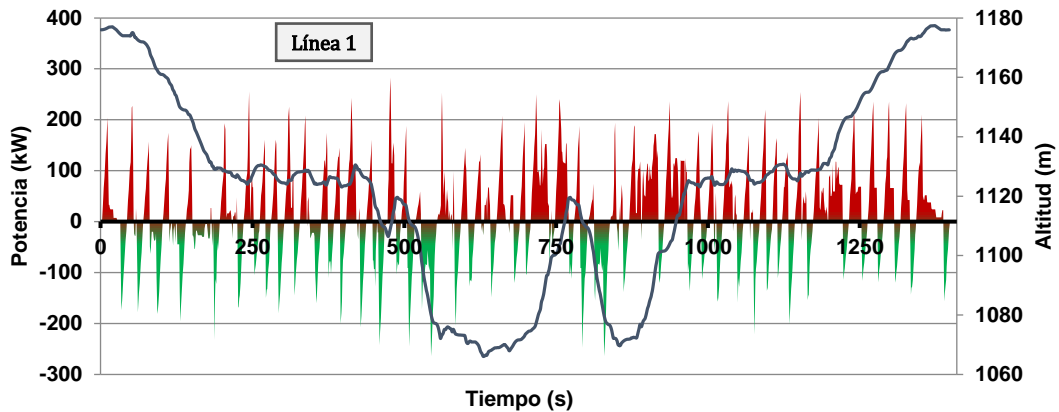


Figura 32: Potencias vs altitud en línea 1. Fuente: Elaboración propia.

Otro análisis significativo que se puede hacer es el de comparar las series de potencias con las aceleraciones. En la Figura 33, donde se muestran las dos series superpuestas, se puede observar que los picos de potencia tanto suplida  $P^{sup}$  como recuperable  $P^{rec}$  quedan en gran proporción inscritos dentro de la región de las aceleraciones. Existen masas de la serie de potencias que se encuentran fuera de las regiones que indican la presencia de aceleraciones. Esto se debe a que existen pendientes positivas donde, aunque no se esté acelerando, hay que aportar energía para que el vehículo mantenga su velocidad. Lo mismo ocurre cuando no hay que realizar ninguna frenada pero el vehículo recorre una pendiente negativa. En este caso existirá una energía recuperable que aparece en el gráfico en forma de masa de color verde fuera de las regiones que marcan una desaceleración.

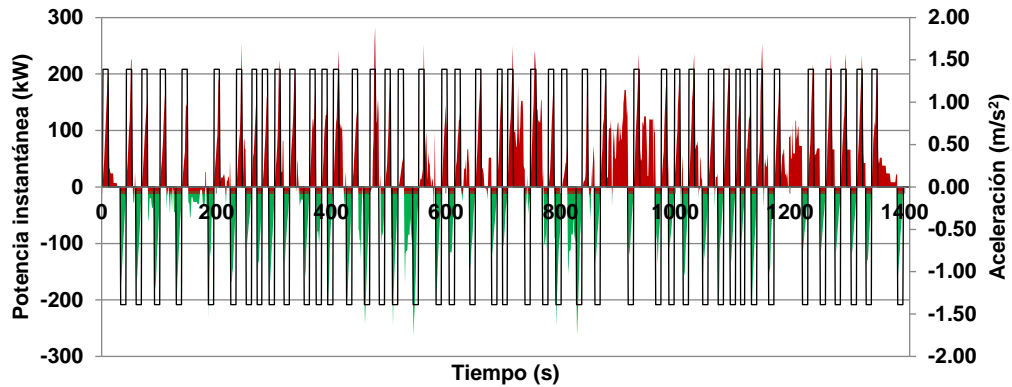


Figura 33: Potencia vs aceleraciones en línea 1. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 34 se superponen tres series temporales. Potencia instantánea, altitud y aceleración. En los ejes se muestran los valores de la potencia instantánea y la altitud. Los valores de la aceleración no son mostrados pero las observaciones que se van a hacer sólo se refieren a los intervalos donde habrá aceleración y no tanto al valor de ésta, que por otro lado, se estableció en  $1.39 \text{ m/s}^2$  por convenio.

La Figura 34 muestra un detalle de la Figura 33 y pretende ilustrar lo comentado anteriormente. Como se puede observar en el gráfico de la Figura 34, se puede observar que en el intervalo comprendido entre los 500 y los 550 segundos, la masa de color verde que representan los valores negativos de la potencia instantánea son mínimos comparados con la masa de color rojo que representa los valores positivos de la potencia instantánea. Esto es debido a que en ese intervalo se encuentra una pendiente pronunciada descendente, y por ese motivo, la potencia que hay que aportar al vehículo es mínima comparada con la potencia recuperable. El ejemplo contrario se observa en el periodo comprendido entre los 700 y los 750 segundos.

Nótese que en los intervalos donde se produce una aceleración, las masas de color rojo se desplazan hacia la parte derecha del recinto que marca la aceleración, mientras que en las frenadas, las masas de color verde se desplazan hacia la izquierda. Esto es debido a que la potencia está calculada como la fuerza por la velocidad, por lo que el valor de la potencia será mayor cuanto mayor sea la velocidad del automóvil en ese momento.

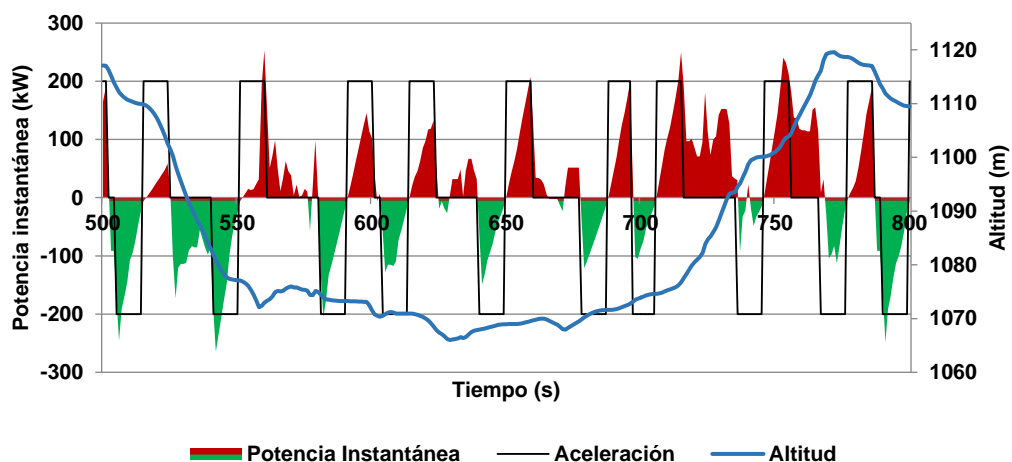


Figura 34: Potencia vs aceleraciones en detalle de línea 1. Fuente: Elaboración propia.

Es sobre este concepto de potencia y energía recuperable sobre el que se va a trabajar a continuación. Cada uno de los picos con valor negativo (color verde), es la potencia necesaria para detener el vehículo en el instante en el que se está produciendo una deceleración previa a la detención completa del vehículo. El  $P^{rec}$  en vehículos convencionales no puede ser aprovechado y ha de ser disipado en forma de calor a través del conjunto de frenado convencional del vehículo.

En la Tabla 7 se muestran, a modo de resumen, los resultados obtenidos en cuanto a la Máxima Potencia Recuperable (kW) y Potencia Recuperable media (kW) en cada una de las líneas objeto del estudio.

Tabla 7: Máxima Potencia Recuperable y Potencia Recuperable media (kW) en las distintas líneas de transporte. Fuente: Elaboración propia

Línea	Máxima $P^{rec}$ (kW)	$P^{rec}$ media (kW)
1	264,55	73,29
2	305,37	71,59
3	321,84	67,81
4	278,28	68,74
5	263,50	71,59
6	254,93	75,29

## 7.- Discusión

Una vez conocidos los valores de la potencia con respecto al tiempo, se puede calcular la energía que es necesaria aportar al vehículo sin más que integrar la función potencia a lo largo de un intervalo de tiempo definido:

$$W = \int P \cdot dt \quad (\text{Ec. 25})$$

donde P es la potencia.

Atendiendo a la definición de la propia integral, se puede comprobar en los gráficos de la Figura 31, que el área encerrada bajo la curva  $P^{\text{sup}}$  (en rojo) corresponde a la Energía Suplida ( $E^{\text{sup}}$ ) (Fase III, Figura 20) que se ha aportado al vehículo entre dos instantes de tiempo determinados.

$$E^{\text{sup}} = \int_{P>0} P \cdot dt \quad (\text{Ec. 26})$$

De igual manera, el área encerrada bajo la curva  $P^{\text{rec}}$  corresponde a la Energía Recuperable ( $E^{\text{rec}}$ ) (Fase III, Figura 20) que ha sido disipada, pero es susceptible de ser aprovechada en caso de disponer de sistemas de frenado regenerativo.

$$E^{\text{rec}} = \int_{P \leq 0} P \cdot dt \quad (\text{Ec. 27})$$

En la Tabla 8 se representan los resultados acumulados de las variables  $E^{\text{sup}}$  y la  $E^{\text{rec}}$  (Fase III, Figura 20) en cada una de las líneas de UT de la ciudad de Ávila.

Tabla 8: Energía aportada y recuperable (MJ) en las distintas líneas de transporte de Ávila. Fuente: Elaboración propia.

Línea	$E^{\text{sup}}$ total en cada línea (MJ)	$E^{\text{rec}}$ total en cada línea (MJ)
1	63,50	44,48
2	63,43	44,95
3	65,87	45,23
4	73,19	49,08
5	66,65	45,46
6	90,14	60,24

Sin embargo, a la hora de valorar la incorporación de sistemas de frenado regenerativo, la información aportada en la Tabla 8 no es suficiente para estudiar en qué líneas la  $E^{\text{rec}}$  (Fase III, Figura 20) es mayor. En la Tabla 9 se muestra un resumen de los distintos términos que intervienen en este estudio en función de la unidad de desplazamiento considerada (km). Para poder comparar las  $E^{\text{sup}}$  y la  $E^{\text{rec}}$  (Fase III, Figura 20), con independencia de la longitud del recorrido, es necesario trabajar con términos relativos. En la Tabla 9 se puede apreciar que las cantidades de energía necesaria para recorrer un kilómetro de cada una de las líneas distan bastante menos de lo que cabría esperar atendiendo a las cantidades de energía aportadas en un recorrido completo. La  $E^{\text{sup}}$  por kilómetro en el recorrido más exigente (línea 2) es un 12% mayor que la necesaria para recorrer un km de la línea 6. De igual manera, se puede observar que la  $E^{\text{rec}}$  por km en la línea 2 es un 18.5% mayor que sobre la línea 6.

Tabla 9: Número de paradas, elevación acumulada,  $E^{sup}$  y  $E^{rec}$  (por km de recorrido) en las distintas línea. Fuente: Elaboración propia.

Línea	Distancia total en cada línea (km)	Datos relativos		Datos energéticos relativos		Porcentaje de Energía Recuperable (%)
		Paradas por km ( $n^{\circ}/km$ ) $X_1$	Elevación acumulada por km (m/km) $X_2$	$E^{sup}$ por km (MJ/km)	$E^{rec}$ por km (MJ/km)	
2	13,0305	3,68	14,51	4,87	3,45	70,87
1	13,2861	3,39	17,46	4,78	3,35	70,06
6	20,7292	3,14	9,67	4,35	2,91	66,84
3	14,3902	3,27	13,26	4,58	3,14	68,66
5	14,6833	3,13	13,09	4,54	3,10	68,21
4	16,6416	3,00	14,09	4,40	2,95	67,06

Las distintas líneas de transportes aparecen en la Tabla 9 ordenadas según su porcentaje de  $E^{rec}$  frente a  $E^{sup}$  (columna derecha). Basándose en el cociente entre la  $E^{rec}$  y la  $E^{sup}$ , se puede deducir que la línea que mayor porcentaje de energía puede recuperar es la línea 2, con un 70.87% de  $E^{sup}$  susceptible de ser recuperada. Es importante señalar que el alcance de este estudio es calcular la energía bruta teórica disponible para ser recuperada y que no tiene en cuenta ni la calidad/disponibilidad de la energía ni los rendimientos que aplican a cada una de las transformaciones de la energía. Este trabajo es, por tanto, un estudio que compara el tamaño de los nichos de energía recuperables pero que, sin embargo, ha permitido hacer una clasificación de las líneas en función del porcentaje de Energía Recuperable.

Hasta el momento se puede observar que a igualdad de distancia recorrida, hay cambios significativos tanto en la  $E^{sup}$  como en la  $E^{rec}$ , debidos a dos variables: Número de paradas por km ( $X_1$ ) y Elevación acumulada por km ( $X_2$ ). Para poder estimar el aporte del desnivel acumulado y del número de paradas por kilómetro en el cómputo global tanto de la  $E^{sup}$ , como de la  $E^{rec}$ , se propone el siguiente modelo de regresión lineal múltiple:

$$E_{est}^{sup} \left( \frac{MJ}{km} \right) = 1,296 \cdot X_1 + 0,031 \cdot X_2 \quad (Ec. 28)$$

$$E_{est}^{rec} \left( \frac{MJ}{km} \right) = 0,826 \cdot X_1 + 0,032 \cdot X_2 \quad (Ec. 29)$$

donde  $E_{est}^{sup}$  es la Energía Suplida Estimada, y  $E_{est}^{rec}$  es la Energía Recuperable Estimada (Fase III, Figura 20).

Dicho modelo de regresión lineal múltiple, arroja un coeficiente de correlación múltiple de 0.9995 y un coeficiente de determinación de  $R^2=0,9990$ .

La obtención de estas ecuaciones aporta una forma de estimar, tanto la  $E_{est}^{sup}$  como la  $E_{est}^{rec}$  por kilómetro, permitiendo de esta manera poder realizar comparaciones entre los distintos trayectos independientemente de la longitud de éstos.

Unas primeras conclusiones que se pueden extraer de la (Ec. 28) y la (Ec. 29) es que la cantidad de  $\Delta E_{est}^{sup}$  necesaria para volver a poner el vehículo en movimiento después de realizar una sola parada es equivalente a la cantidad de energía necesaria para ascender 40 metros. En el caso de la  $E_{est}^{rec}$ , esta relación disminuye, estableciéndose en 25 metros de descenso para poder recuperar la misma energía que se podría recuperar en una sola parada.

Utilizando el modelo de estimación propuesto, se puede calcular de una forma sencilla la cantidad de energía aportada  $E_{est}^{sup}$  y la cantidad de energía recuperable  $E_{est}^{rec}$  para cada trayecto en cada punto, sin más que utilizar los coeficientes  $X_1$ : nº de paradas por km y  $X_2$ : desnivel acumulado por km (m/km). Estas operaciones están recogidas en la Tabla 10 y pueden ser calculadas fácilmente para cualquier recorrido susceptible de ser evaluado para cualquier distancia  $d$  en km.

Tabla 10: Resultados obtenidos  $E_{est}^{sup}$  y  $E_{est}^{rec}$  con el modelo de regresión. Fuente: Elaboración propia.

UT line	$X_1$	$X_2$	$E_{est}^{sup}$ (MJ)	$E_{est}^{rec}$ (MJ)
1	3,39	17,46	4,93 $d$	3,36 $d$
2	3,68	14,51	5,22 $d$	3,50 $d$
3	3,27	13,26	4,65 $d$	3,13 $d$
4	3,00	14,09	4,32 $d$	2,93 $d$
5	3,13	13,09	4,46 $d$	3,00 $d$
6	3,14	9,67	4,37 $d$	2,90 $d$

A continuación, se procede a comparar los resultados arrojados por el modelo propuesto:  $E_{est}^{sup}$  y  $E_{est}^{rec}$  (Fase III, Figura 20), en rojo discontinuo y verde discontinuo respectivamente utilizando la (Ec. 28) y la (Ec. 29), frente a los datos calculados en intervalos de un segundo a lo largo de todo el trayecto mediante ( $E^{sup}$  y  $E^{rec}$ ) en línea roja continua y línea verde continua, respectivamente. El estudio se realiza en la línea 1 de transporte público en la ciudad de Ávila (Figura 35). Todos los valores de energía expuestos en el gráfico son acumulados. Se añade, además, el perfil de elevación (en color azul y valores en el eje secundario):

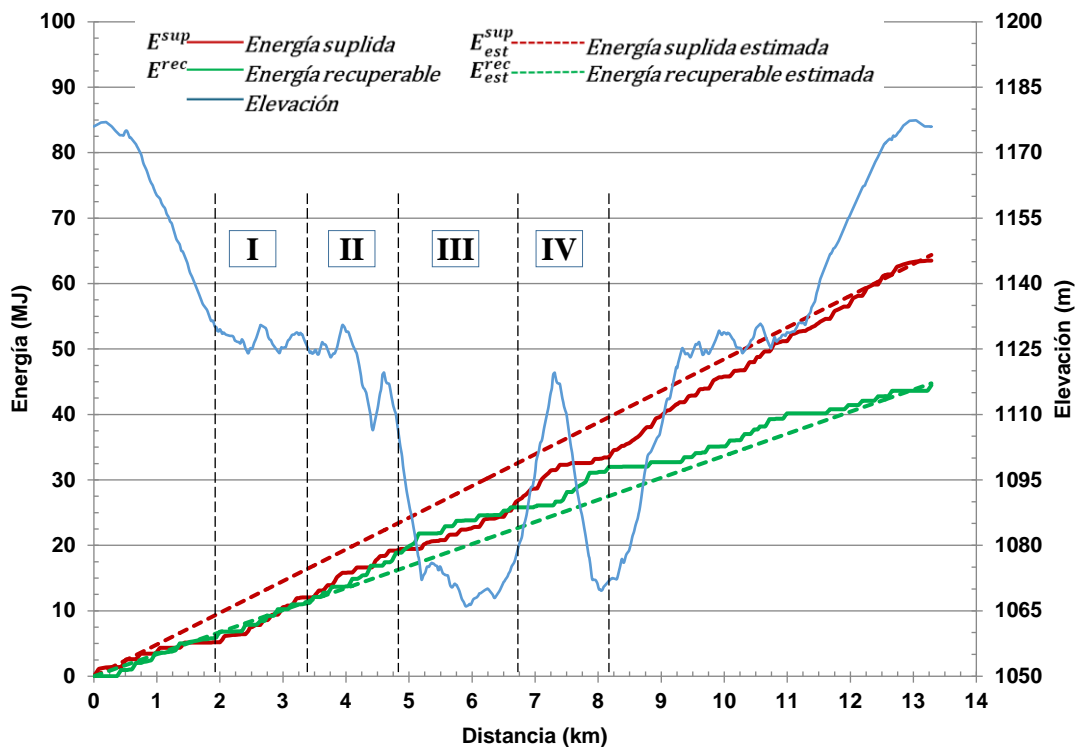


Figura 35: Distribución de Energía Acumulada en la línea 1 de transporte urbano de la ciudad de Ávila. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 35 se puede observar que los valores de la  $E_{est}^{sup}$  y  $E_{est}^{rec}$ , según el modelo propuesto, siguen una línea recta de pendiente según los coeficientes correspondientes  $X_1$  y  $X_2$  de la Tabla 10. Los valores de la  $E^{sup}$  calculados según la (Ec. 26), se alejan de los valores estimados  $E_{est}^{sup}$  (disminuyendo) conforme disminuye la altitud. Esto es debido a que en los intervalos donde el desnivel acumulado es menor que el valor  $X_2 \cdot d$ , la  $E^{sup}$  disminuye (es necesario suministrar menos energía puesto que el vehículo se desplaza sobre una pendiente negativa). Por el mismo razonamiento, se deduce que la  $E^{rec}$  es mayor que la  $E_{est}^{rec}$  que cabría esperar para ese intervalo. Por lo tanto, unos valores reales de desnivel acumulado local que se encuentren por debajo del desnivel acumulado total para un tramo determinado, hacen que disminuya la  $E^{sup}$  frente a la  $E_{est}^{sup}$  y aumente la  $E^{rec}$  frente a la  $E_{est}^{rec}$ . Este comportamiento se puede observar en el intervalo III de la Figura 35. Cuanto menor es la altitud, más se alejan los valores calculados de los estimados. En el intervalo IV (Figura 35) se puede observar que conforme aumenta la altitud, los valores calculados se aproximan a los estimados hasta el valor de máxima altura relativa, momento en que se vuelven a alejar. En los valores finales del gráfico, el valor de desnivel acumulado hasta el momento, coincide con el valor de desnivel acumulado total del tramo, coincidiendo los valores estimados y calculados.

Otra tendencia que se observa y que no es tan evidente, es que en determinadas ocasiones las dos curvas de  $E^{sup}$  disminuyen su valor con respecto a los valores de  $E_{est}^{sup}$ , lo que se debe a la escasez de paradas. En el intervalo I existen 2 paradas en un espacio de 1,3 kilómetros, lo que arroja un ratio de 1,5 paradas/km, muy por debajo del coeficiente  $X_1 = 3,39$  paradas/km que tiene el cómputo total de la línea 1. La particular escasez de paradas en este intervalo propicia que sea necesario muy poco aporte de energía y, a su vez, exista muy poca disponibilidad de  $E^{rec}$ . El comportamiento opuesto se encuentra en el intervalo II (Figura 35), donde en 2 km se acumulan 10 paradas, lo que establece un ratio de 5 paradas/km, mayor que el coeficiente global  $X_1 = 3,39$  paradas/km, y que hace que los valores calculados de  $E^{sup}$  vuelvan a subir con respecto a los valores estimados de  $E_{est}^{sup}$ . Una tendencia similar se observa con los valores calculados de  $E^{rec}$ , que vuelven a subir con respecto a sus equivalentes estimados de  $E_{est}^{rec}$ . De la misma manera que ocurre con la variable “desnivel acumulado”, al final del gráfico (Figura 35), los valores acumulados coinciden con el valor del intervalo, obteniéndose valores calculados muy cercanos a los del modelo estimado.

Los razonamientos que se han expuesto para la línea 1 de transporte urbano de Ávila, son plenamente válidos y se pueden extrapolar a cualquier línea de transporte que se estudie. Sin embargo, condiciones de contorno distintas, hacen que los resultados sean diferentes. A continuación se estudian las situaciones particulares de cada una de las restantes líneas de transporte y se representa gráficamente cada una de las líneas en la Figura 36

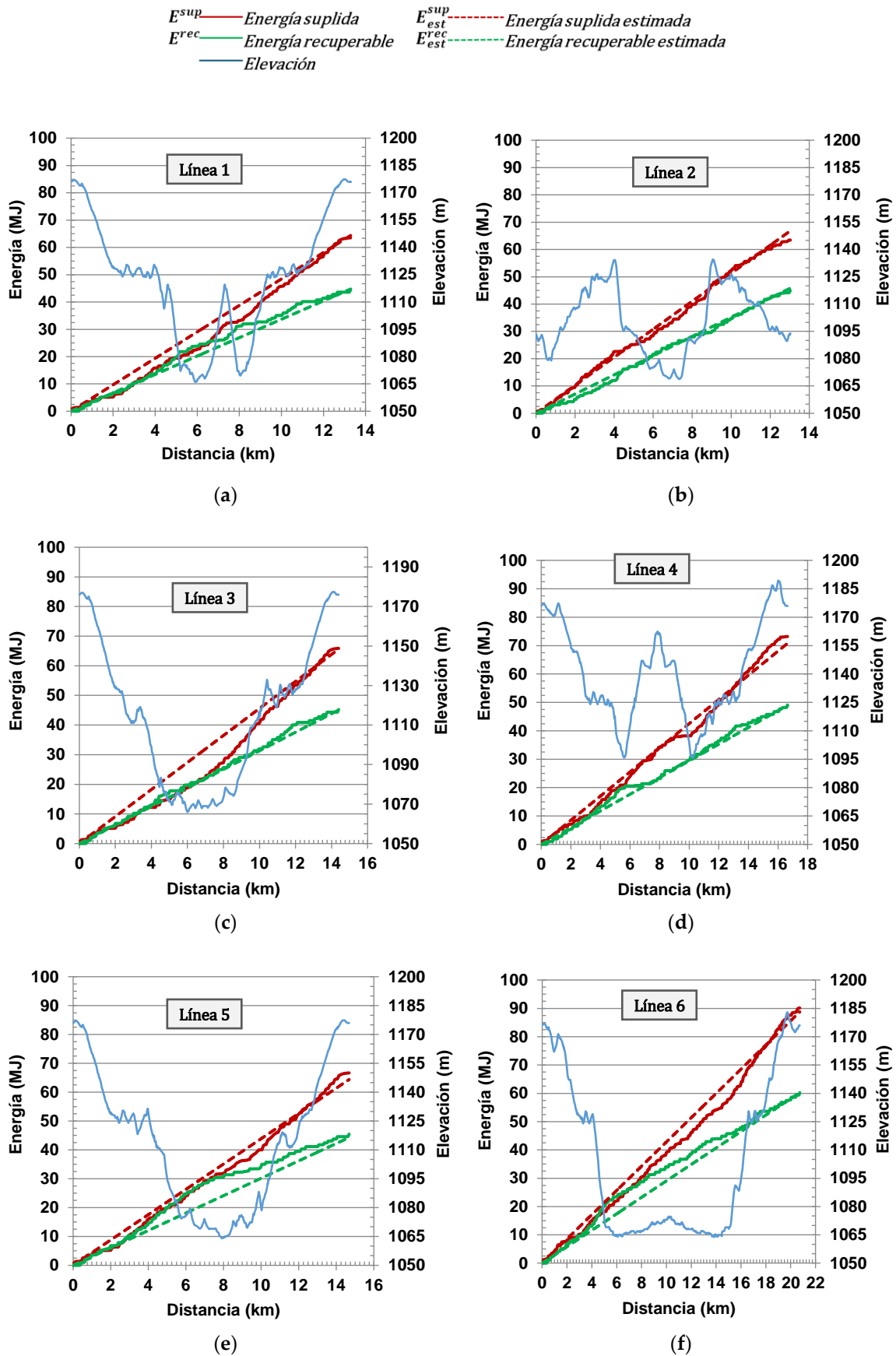


Figura 36: Distribución de la energía acumulada en las distintas líneas de la ciudad de Ávila. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la Línea 2 (Figura 36.b) se puede observar que inicia con un ascenso desde el km 0 hasta el km 4, lo que hace que los valores de  $E^{\text{sup}}$  y  $E^{\text{rec}}$  se alejen entre ellos y de forma simétrica a la bisectriz de las líneas  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  y  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ . A partir del km 4 y hasta el km 7,5 el perfil de la línea es descendente y los valores de  $E^{\text{sup}}$  y  $E^{\text{rec}}$  se acercan entre ellos y de forma simétrica a la bisectriz de las líneas  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  y  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$ . Los mismos efectos se vuelven a repetir en el intervalo ascendente desde 7,5 km a 9 km y del intervalo descendente desde 9 km a 13 km.

En la Línea 3 (Figura 36.c) se observa un fenómeno no visto hasta el momento. En el intervalo desde 0 km a 9 km se produce una bajada muy considerable de la  $E^{\text{sup}}$  frente a la  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  sin que haya un desplazamiento similar de  $E^{\text{rec}}$  frente a  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ . Esto es debido a que en ese intervalo 0-9 km existe una conjunción de dos factores. Por un lado, existe un descenso muy pronunciado y, por otro lado, muy poca concentración de paradas, 2,7 paradas/km frente a 3,27 paradas/km en la línea 3 al completo. Esto se produce porque el vehículo al desplazarse a una  $v$  constante y por una pendiente negativa, no necesita mucha  $E^{\text{sup}}$  para desplazarse. Sin embargo, al haber menos paradas en ese intervalo, hay menos frenadas (el evento donde más  $E^{\text{rec}}$  se puede recuperar), por lo que no hay un aumento significativo de  $E^{\text{rec}}$  frente a  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ . En el intervalo desde 9 km a 13 km ocurre lo contrario, muchas paradas con una pendiente positiva, lo que hace que se necesite una gran cantidad de  $E^{\text{sup}}$  por lo que, en este intervalo, la  $E^{\text{sup}}$  vuelve a aproximarse a los valores de  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$ .

El fenómeno opuesto ocurre en la línea 5 (Figura 36.e). En esta línea 5, se produce un descenso muy pronunciado, pero, a diferencia de la línea 3 (Figura 36.c), en la línea 5 aparecen muchas paradas juntas. El intervalo 4-6 km, tiene 4,5 paradas por km, frente a 3,13 paradas/km en la línea 5 al completo. Al frenar muchas veces, los valores de  $E^{\text{rec}}$  aumentan mucho, mientras que hay que aportar una cantidad de  $E^{\text{sup}}$  muy similar a  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  debido a que hay que acelerar el autobús muchas veces.

Para la línea 4 (Figura 36.d) y línea 6 (Figura 36.f) se observa una distribución muy homogénea de las paradas, por lo que existe una relación directa entre la pendiente del recorrido y el alejamiento de  $E^{\text{sup}}$  y  $E^{\text{rec}}$  respecto de sus homólogas correspondientes.

Por último, como se puede observar en las seis líneas (Figura 36) de la ciudad de Ávila, existe una variación de la energía calculada con respecto a la energía estimada mediante el método propuesto. Ello es debido a que, para el cálculo de  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  y de  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  según el modelo numérico propuesto, tanto el desnivel acumulado como el número de paradas, se suponen constantes a lo largo de todo el recorrido, mientras que, en los valores de energía calculados  $E^{\text{sup}}$  y  $E^{\text{rec}}$ , se tiene en cuenta el desnivel en cada intervalo de un segundo.

## 8.- Conclusiones

El sector del transporte urbano está evolucionando hacia la sostenibilidad y la descarbonización, aprovechando cada vez mejor la energía consumida y consiguiendo unas tasas de eficiencia nunca vistas hasta la fecha. La forma de alcanzar rápidamente estos objetivos de eficiencia en el transporte urbano de viajeros, sería la de renovar toda la flota de autobuses por otros más modernos dotados con sistema de frenado regenerativo. Sin embargo, en muchas ocasiones, los recursos de los que disponen las administraciones locales son limitados y no permiten la sustitución de una flota entera de autobuses, o esta sustitución ha de hacerse de una forma progresiva a lo largo de los años. Es en esta situación en la que es primordial un entendimiento profundo de cuáles son las condiciones que más contribuyen a la ineficiencia en el transporte.

En el caso de las ciudades patrimonio de la humanidad, como es el presente estudio realizado en la ciudad de Ávila (España), un conocimiento de dichas condiciones puede hacer que los recursos disponibles se dediquen allí donde más falta hacen, y, por lo tanto, se maximicen los beneficios de las inversiones en transporte público. No se trata solamente de invertir recursos en transporte sostenible, sino de asegurarse de que los recursos asignados, se aprovechan de la mejor manera posible.

Una de las formas de conseguir los anteriores objetivos, es recuperando la mayor energía posible en los trayectos de transporte público urbano. Gracias al modelo matemático planteado en la presente investigación, la energía recuperable por unidad de distancia recorrida por los autobuses urbanos, será mayor cuanto mayor sea el número de aceleraciones (número de paradas por km;  $X_1$ ) y el paisaje sea más abrupto (desnivel acumulado por km;  $X_2$ ). Por lo tanto, si la conducción se realiza incluyendo una cantidad grande de estas variables, será necesario implementar un sistema de frenado regenerativo, mientras que, si la conducción se realiza de forma suave y en llano, el beneficio del frenado regenerativo apenas tiene importancia.

El modelo matemático desarrollado en la presente investigación no solo recoge la anterior afirmación, si no que cuantifica en qué proporción contribuye cada una de las variables contempladas en la energía que es necesario aportar para realizar un recorrido urbano y en la energía susceptible de ser recuperada en dicho recorrido. Además, el modelo matemático desarrollado facilita el diseño de rutas de transporte urbano de una manera más eficiente, basándose en una combinación de criterios energéticos no puestos en relieve hasta la fecha, como son la estimación de la Energía Suplida ( $E^{sup}$ ) y de la Energía Recuperable ( $E^{rec}$ ) partiendo de la conjunción de dos datos fácilmente obtenibles en cualquier recorrido de líneas de transporte del mundo, tales como Número de paradas por km ( $X_1$ ) y Elevación acumulada por km ( $X_2$ ).

Además, este modelo matemático permite optimizar el proceso de implantación de sistemas de frenado regenerativo asegurando su máximo aprovechamiento, debido a que en el caso de una eventual implantación parcial de sistemas de frenado regenerativo en una flota de transporte urbano, el modelo permite priorizar la utilización de estos sistemas en aquellos lugares donde mayor aprovechamiento se obtenga de ellos. En el caso de la ciudad de Ávila, los resultados obtenidos han permitido clasificar las 6 líneas de transporte urbano existentes, estableciendo claramente un orden preferente de sustitución de los vehículos más antiguos por nuevos vehículos dotados con frenado regenerativo. El hecho de establecer un método con el que priorizar la implementación de vehículos con frenado regenerativo en las líneas donde más energía puede ser recuperada propiciaría un máximo aprovechamiento de los recursos energéticos y, por ende, de los recursos económicos, obteniendo las mayores cotas de eficiencia posible.

## 9.- Líneas futuras de investigación

En este trabajo se ha hecho un análisis teórico de la energía consumida en distintos trazados de las líneas de transporte urbano de una ciudad. Se ha pretendido desarrollar un método que permita estimar, de una manera sencilla, el consumo energético basándose en las condiciones de contorno del vehículo estudiado y exponiendo los resultados en base al desnivel y el número de paradas. Por último se ha intentado demostrar la viabilidad de los cálculos mediante un análisis multivariante, aplicando las herramientas de correlación múltiple.

Este estudio teórico abre múltiples posibilidades a la hora de continuar el trabajo iniciado. Las acciones que se podrían emprender a partir de este trabajo se condensan en las siguientes líneas de investigación propuestas:

### 9.1.- Correlación de los resultados

Realizando una toma de datos en las flotas de transporte público, se estaría en disposición de validar el modelo matemático, en primera instancia, y de aumentar las variables de entrada de una manera abrumadora, permitiendo una capacidad de análisis y de información mucho mayor que posibilitaría llevar la optimización energética a unas cotas mucho más altas.

En este trabajo se han referenciado estudios de movilidad en los que se han tomado datos de las posiciones de vehículos utilizando dispositivos *GPS* embarcados en ellos.

Utilizando datos reales, se podría tomar en consideración una gran cantidad de situaciones del tráfico que, por lo azaroso de éstas, quedan irremisiblemente fuera del alcance de este trabajo. Los tiempos en las paradas que, por convenio, se han tomado como instantáneos en este trabajo ( $t=0$ ), podrían ser tenidos en consideración cuantificando el tiempo que les toma a los viajeros tomar o dejar el autobús. Los tiempos que pasa el vehículo en atascos, tiempos empleados en semáforos en rojo, que en este trabajo se han obviado por la imposibilidad material de realizarlos al no contar con los permisos pertinentes por parte de la empresa de transporte, podrían ser estudiados.

De la misma manera, se podría realizar el estudio de la variabilidad de estos tiempos a lo largo de un día, o realizar análisis estacionales a lo largo de un año entero que permitieran tomar conocimiento de los patrones temporales que toma el transporte de viajeros.

Es un deseo personal del autor que la presentación material de este trabajo a las empresas de transporte urbano, ayude a la consecución del permiso de alguna de ellas para la realización de esta línea de investigación futura.

### 9.2.- Optimización de flotas

Aprovechando la oportunidad de la emergente inteligencia artificial no parece descabellado alimentar este tipo de tecnología con los datos recogidos en el apartado anterior y, con las premisas adecuadas, diseñar un algoritmo que asigne los autobuses más eficientes a las líneas con mayor potencial de ahorro en tiempo real y aplicarlo, no solamente para realizar la renovación de una flota como se ha realizado en el presente trabajo, sino para asignar los buses a las líneas diariamente.

### **9.3.- Aplicación en otras flotas municipales**

Desde el comienzo de este trabajo se ha fijado la atención en el transporte urbano de viajeros, pero no se ha podido perder de vista otro tipo de flotas con tremendas similitudes: la recogida de residuos sólidos urbanos.

Tal vez el ejemplo más obvio de lo anterior sería proponer que se realizaran las paradas sólo en las bajadas y tratar de evitar detenerse en las subidas. Esta afirmación es una obviedad pero lo importante, no es la afirmación en sí, sino la posibilidad de cuantificar este hecho y diseñar las rutas bajo el criterio de la mínima energía consumida.

En este trabajo se ha podido estimar la correspondencia entre una parada y los metros que se podrían recorrer con la energía consumida en reemprender la marcha. Nuevos recorridos podrían ser diseñados aplicando estos criterios y tal vez fuera más eficiente subir una ladera sin realizar ni una sola parada y bajarla realizando las paradas para poder lanzar el vehículo aprovechando la pendiente favorable.

El autor está convencido de que existe un gran margen de mejora aplicando las enseñanzas adquiridas en la realización de este trabajo en esta área en concreto. Si se rediseñan las rutas teniendo en cuenta lo visto en este trabajo podrían conseguirse grandes beneficios.

## 10.- Transferencia de resultados

### 10.1.- Artículo de investigación

El trabajo de investigación realizado para esta Tesis Doctoral se ha visto materializado en la publicación de un artículo en la revista Sustainability, perteneciente a la editorial MDPI. Dicha revista, está incluida en la base JCR categorizada como Q2. Cuenta con un índice de impacto (impact factor) de 3.3 y una puntuación de citación (citescore) de 6.8.

El artículo, titulado “Energy Consumption of the Urban Transport Fleet in UNESCO World Heritage Sites: A Case Study of Ávila (Spain)” fué publicado el 7 de mayo de 2022, en el volumen 14, Issue 9, del Special Issue: “Sustainable Development: The Need for Technological Change” (ANEXO A3). doi:10.3390/SU14095641.

En el artículo se presenta una herramienta que permite realizar un estudio energético de cada una de las distintas rutas de la ciudad de Ávila modelizadas en base a distintos parámetros que permiten calcular la energía consumida en cada segundo, por el vehículo en su recorrido. Con los resultados obtenidos se propone un modelo matemático de fácil aplicación y escalable a cualquier otra ciudad dada, que permite comparar las distintas rutas de transporte urbano de la ciudad y localizar los mayores nichos de mejora.

Las aportaciones del modelo propuesto se centran en varios aspectos: (i) optimizar los recursos económicos; (ii) destinar los equipos más eficientes adonde más se puede optimizar el consumo energético; y (iii) simplificar la tarea de optimización de rutas de transporte de viajeros.

### 10.2.- Congreso

Como resultado de parte del trabajo realizado para esta tesis, se participó en el Encuentro Internacional de Ciencia y Tecnología EICYTEC - 2022, organizado por la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, el día 17 de noviembre del 2022. con la ponencia "Viabilidad del frenado regenerativo en el transporte urbano de la ciudad de Ávila (Patrimonio de la Humanidad)". Carlos Santos-Iglesia, Pablo Fernández Arias, Álvaro Antón-Sancho y Diego Vergara Rodríguez. (ANEXO A4)

### 10.3.- Premio

Premio a proyectos de formación, tesis o trabajos fin de grado en empresas de los sectores agroalimentario, energías renovables y automoción en Ávila, en el marco del centro de transferencia de conocimiento, innovación y emprendimiento del programa territorial de fomento para Ávila y su entorno 2020-2024. Excm. Diputación Provincial de Ávila. (ANEXO A5)

## 11.- Bibliografía

1. Fleming, J.R. John Tyndall, Svante Arrhenius, and Early Research on Carbon Dioxide and Climate. *Historical Perspectives on Climate Change* **1998**, doi:10.1093/oso/9780195078701.003.0011.
2. Houghton, J.T.; Jenkins, G.J.; Ephraums, J.J. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*; University Press, 1990; ISBN 052140360X.
3. UNFCCC What Is the United Nations Framework Convention on Climate Change? | UNFCCC Disponible online: <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change%0Ahttps://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change> (recuperado el 25 Julio 2024).
4. Gkoumas, K.; Dos Santos, F.L.M.; Stepniak, M.; Pekár, F. Research and Innovation Supporting the European Sustainable and Smart Mobility Strategy: A Technology Perspective from Recent European Union Projects. *Applied Sciences* **2021**, *11*, doi:10.3390/app112411981.
5. von Homeyer, I.; Oberthür, S.; Jordan, A.J. EU Climate and Energy Governance in Times of Crisis: Towards a New Agenda. *Journal of European Public Policy* **2021**, *28*, 959–979, doi:10.1080/13501763.2021.1918221.
6. Quintana-Rojo, C.; Callejas-Albiñana, F.E.; Tarancón, M. ángel; Martínez-Rodríguez, I. Econometric Studies on the Development of Renewable Energy Sources to Support the European Union 2020-2030 Climate and Energy Framework: A Critical Appraisal. *Sustainability* **2020**, *12*, doi:10.3390/su12124828.
7. Kulovesi, K.; Oberthür, S. Assessing the EU's 2030 Climate and Energy Policy Framework: Incremental Change toward Radical Transformation? *Review of European, Comparative and International Environmental Law* **2020**, *29*, 151–166, doi:10.1111/reel.12358.
8. Ossewaarde, M.; Ossewaarde-Lowtoo, R. The Eu's Green Deal: A Third Alternative to Green Growth and Degrowth? *Sustainability* **2020**, *12*, 1–15, doi:10.3390/su12239825.
9. Rhodes, C.J. The 2015 Paris Climate Change Conference: COP21. *Science Progress* **2016**, *99*, 97–104, doi:10.3184/003685016X14528569315192.
10. Pietrzak, M.B.; Olczyk, M.; Kuc-Czarnecka, M.E. Assessment of the Feasibility of Energy Transformation Processes in European Union Member States. *Energies* **2022**, *15*, doi:10.3390/en15020661.
11. Tian, J.; Yu, L.; Xue, R.; Zhuang, S.; Shan, Y. Global Low-Carbon Energy Transition in the Post-COVID-19 Era. *Applied Energy* **2022**, *307*, doi:10.1016/j.apenergy.2021.118205.
12. Pakulska, T. Green Energy in Central and Eastern European (Cee) Countries: New Challenges on the Path to Sustainable Development. *Energies* **2021**, *14*, doi:10.3390/en14040884.
13. Wójcik-Jurkiewicz, M.; Czarnecka, M.; Kinelski, G.; Sadowska, B.; Bilińska-Reformat, K. Determinants of Decarbonisation in the Transformation of the Energy Sector: The Case of Poland. *Energies* **2021**, *14*, doi:10.3390/en14051217.

14. Calise, F.; Fabozzi, S.; Vanoli, L.; Vicidomini, M. A Sustainable Mobility Strategy Based on Electric Vehicles and Photovoltaic Panels for Shopping Centers. *Sustainable Cities and Society* **2021**, *70*, doi:10.1016/j.scs.2021.102891.
15. Gössling, S.; Cohen, S. Why Sustainable Transport Policies Will Fail: EU Climate Policy in the Light of Transport Taboos. *Journal of Transport Geography* **2014**, *39*, 197–207, doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.07.010.
16. Morgan, J. Electric Vehicles: The Future We Made and the Problem of Unmaking It. *Cambridge Journal of Economics* **2020**, *44*, 953–977, doi:10.1093/cje/beaa022.
17. Pavlínek, P. Transition of the Automotive Industry towards Electric Vehicle Production in the East European Integrated Periphery. *Empirica* **2023**, *50*, 35–73, doi:10.1007/s10663-022-09554-9.
18. Casper, R.; Sundin, E. Electrification in the Automotive Industry: Effects in Remanufacturing. *Journal of Remanufacturing* **2021**, *11*, 121–136, doi:10.1007/S13243-020-00094-8.
19. Verma, S.; Dwivedi, G.; Zare, A.; Verma, P. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles in India. *SAE Technical Papers* **2022**, doi:10.4271/2022-01-0749.
20. Pamuła, T.; Pamuła, W. Estimation of the Energy Consumption of Battery Electric Buses for Public Transport Networks Using Real-World Data and Deep Learning. *Energies* **2020**, *13*, doi:10.3390/en13092340.
21. Kim, J.; Song, I.; Choi, W. An Electric Bus with a Battery Exchange System. *Energies* **2015**, *8*, 6806–6819, doi:10.3390/en8076806.
22. Abdelaty, H.; Mohamed, M. A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. *Energies* **2021**, *14*, doi:10.3390/en14102824.
23. Bottiglione, F.; Contursi, T.; Gentile, A.; Mantriota, G. The Fuel Economy of Hybrid Buses: The Role of Ancillaries in Real Urban Driving. *Energies* **2014**, *7*, 4202–4220, doi:10.3390/en7074202.
24. Goldman, T.; Gorham, R. Sustainable Urban Transport: Four Innovative Directions. *Technology in Society* **2006**, *28*, 261–273, doi:10.1016/j.techsoc.2005.10.007.
25. Pojani, D.; Stead, D. Sustainable Urban Transport in the Developing World: Beyond Megacities. *Sustainability* **2015**, *7*, 7784–7805, doi:10.3390/SU7067784.
26. Alcántara, V.; Roca, J. Energy and CO2 Emissions in Spain. Methodology of Analysis and Some Results for 1980-1990. *Energy Economics* **1995**, *17*, 221–230, doi:10.1016/0140-9883(95)00014-L.
27. Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge Sector Transporte Available online: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx> (recuperado el 30 Mayo 2022).
28. Navas-Anguita, Z.; García-Gusano, D.; Iribarren, D. Long-Term Production Technology Mix of Alternative Fuels for Road Transport: A Focus on Spain. *Energy Conversion and Management* **2020**, *226*, doi:10.1016/j.enconman.2020.113498.
29. Junta de Castilla y León. Estrategia Regional Contra El Cambio Climático En Castilla y León 2009 - 2012 - 2020 Disponible online: <https://medioambiente.jcyl.es/web/jcyl/MedioAmbiente/es/Plantilla100Detalle/1246988359553/Programa/1284497829991/Comunicacion> (recuperado el 30 Mayo 2022).

30. Martín-Viso, I. Commons and the Construction of Power in the Early Middle Ages: Tenth-Century León and Castile. *Journal of Medieval History* **2020**, *46*, 373–395, doi:10.1080/03044181.2020.1784777.
31. UNESCO. UNESCO World Heritage Centre - World Heritage List Statistics. Disponible online: <https://whc.unesco.org/en/list/> (recuperado el 30 Mayo 2022).
32. Selje, T.; Schmid, L.A.; Heinz, B. Community-Based Adaptation to Climate Change: Core Issues and Implications for Practical Implementations. *Climate* **2024**, *12*, 155, doi:10.3390/CLI12100155.
33. Boutang, J.; Feutren, E.; Bachelet, B.; Lacomme, C. Climate Change Adaptation: Operational Taxonomy and Metrics. *Sustainability* **2020**, *12*, 7631, doi:10.3390/SU12187631.
34. Kongsager, R. Linking Climate Change Adaptation and Mitigation: A Review with Evidence from the Land-Use Sectors. *Land* **2018**, *7*, 158, doi:10.3390/LAND7040158.
35. Sinay, L.; Carter, R.W. Climate Change Adaptation Options for Coastal Communities and Local Governments. *Climate* **2020**, *8*, 7, doi:10.3390/CLI8010007.
36. González-Hernández, D.L.; Meijles, E.W.; Vanclay, F. Factors That Influence Climate Change Mitigation and Adaptation Action: A Household Study in the Nuevo Leon Region, Mexico. *Climate* **2019**, *7*, 74, doi:10.3390/CLI7060074.
37. Grossi, C.M.; Brimblecombe, P.; Harris, I. Predicting Long Term Freeze-Thaw Risks on Europe Built Heritage and Archaeological Sites in a Changing Climate. *Science of the Total Environment* **2007**, *377*, 273–281, doi:10.1016/j.scitotenv.2007.02.014.
38. Leissner, J.; Kilian, R.; Kotova, L.; Jacob, D.; Mikolajewicz, U.; Broström, T.; Ashley-Smith, J.; Schellen, H.L.; Martens, M.; Van Schijndel, J.; et al. Climate for Culture: Assessing the Impact of Climate Change on the Future Indoor Climate in Historic Buildings Using Simulations. *Heritage Science* **2015**, *3*, 1–15, doi:10.1186/s40494-015-0067-9.
39. Silva, L.F.O.; Oliveira, M.L.S.; Neckel, A.; Maculan, L.S.; Milanes, C.B.; Bodah, B.W.; Cambrussi, L.P.; Dotto, G.L. Effects of Atmospheric Pollutants on Human Health and Deterioration of Medieval Historical Architecture (North Africa, Tunisia). *Urban Climate* **2022**, *41*, 101046, doi:10.1016/j.uclim.2021.101046.
40. Gullino, P.; Beccaro, G.L.; Larcher, F. Assessing and Monitoring the Sustainability in Rural World Heritage Sites. *Sustainability* **2015**, *7*, 14186–14210, doi:10.3390/su71014186.
41. Ramos-Soler, I.; Martínez-Sala, A.M.; Campillo-Alhama, C. ICT and the Sustainability Ofworld Heritage Sites. Analysis of Senior Citizens' Use of Tourism Apps. *Sustainability* **2019**, *11*, doi:10.3390/su11113203.
42. Manisalidis, I.; Stavropoulou, E.; Stavropoulos, A.; Bezirtzoglou, E. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health* **2020**, *8*, 505570, doi:10.3389/fpubh.2020.00014.
43. Miller, K.A.; Siscovick, D.S.; Sheppard, L.; Shepherd, K.; Sullivan, J.H.; Anderson, G.L.; Kaufman, J.D. Long-Term Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women. *New England Journal of Medicine* **2007**, *356*, 447–458, doi:10.1056/nejmoa054409.

44. Tran, H.M.; Tsai, F.J.; Lee, Y.L.; Chang, J.H.; Chang, L. Te; Chang, T.Y.; Chung, K.F.; Kuo, H.P.; Lee, K.Y.; Chuang, K.J.; et al. The Impact of Air Pollution on Respiratory Diseases in an Era of Climate Change: A Review of the Current Evidence. *Science of the Total Environment* **2023**, *898*, 166340, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.166340.
45. Newbury, J.B.; Stewart, R.; Fisher, H.L.; Beevers, S.; Dajnak, D.; Broadbent, M.; Pritchard, M.; Shiode, N.; Heslin, M.; Hammoud, R.; et al. Association between Air Pollution Exposure and Mental Health Service Use among Individuals with First Presentations of Psychotic and Mood Disorders: Retrospective Cohort Study. *British Journal of Psychiatry* **2021**, *219*, 678–685, doi:10.1192/bjp.2021.119.
46. Chen, Z.; Xiong, R.; Wang, K.; Jiao, B. Optimal Energy Management Strategy of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on a Particle Swarm Optimization Algorithm. *Energies* **2015**, *8*, 3661–3678, doi:10.3390/en8053661.
47. Chidambaram, R.K.; Chatterjee, D.; Barman, B.; Das, P.P.; Taler, D.; Taler, J.; Sobota, T. Effect of Regenerative Braking on Battery Life. *Energies* **2023**, *16*, 5303, doi:10.3390/en16145303.
48. Guo, B.; Zhang, H. Analysis of Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles Based on Braking Intention. *Journal of Physics: Conference Series* **2023**, *2450*, 012026, doi:10.1088/1742-6596/2450/1/012026.
49. May, A.D. Urban Transport and Sustainability: The Key Challenges. *International Journal of Sustainable Transportation* **2013**, *7*, 170–185, doi:10.1080/15568318.2013.710136.
50. Lin, C.L.; Hung, H.C.; Li, J.C. Active Control of Regenerative Brake for Electric Vehicles. *Actuators* **2018**, *7*, doi:10.3390/act7040084.
51. Zhao, X.; Li, L.; Wang, X.; Mei, M.; Liu, C.; Song, J. Braking Force Decoupling Control without Pressure Sensor for a Novel Series Regenerative Brake System. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2019**, *233*, 1750–1766, doi:10.1177/0954407018785740.
52. Cai, J.W.; Chu, L.; Fu, Z.C.; Ren, L.P. Regenerative Braking System for a Pure Electric Bus. *Applied Mechanics and Materials* **2014**, *543–547*, 1405–1408, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.543-547.1405.
53. Han, T.; Zeng, B.; Tong, Y. Theoretical Study on Energy Recovery Rate of Regenerative Braking for Hybrid Mining Trucks with Different Parameters. *Journal of Energy Storage* **2021**, *42*, doi:10.1016/j.est.2021.103127.
54. Yadav, D.; Kumar, R.; Kulshrestha, U.; Jain, A.; Rani, S. Enhancement of Fuel Efficiency in Heavy Duty Vehicles through Integrated Module of TEG, Piezoelectric and Regenerative Braking Solutions. *Materials Today: Proceedings* **2022**, *63*, 1–5, doi:10.1016/j.matpr.2021.10.372.
55. Ericsson, E. Independent Driving Pattern Factors and Their Influence on Fuel-Use and Exhaust Emission Factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2001**, *6*, 325–345, doi:10.1016/S1361-9209(01)00003-7.
56. Lois, D.; Wang, Y.; Boggio-Marzet, A.; Monzon, A. Multivariate Analysis of Fuel Consumption Related to Eco-Driving: Interaction of Driving Patterns and External Factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2019**, *72*, 232–242, doi:10.1016/j.trd.2019.05.001.
57. Brundell-Freij, K.; Ericsson, E. Influence of Street Characteristics, Driver Category and Car Performance on Urban Driving Patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2005**, *10*, 213–229, doi:10.1016/j.trd.2005.01.001.

58. Gallus, J.; Kirchner, U.; Vogt, R.; Benter, T. Impact of Driving Style and Road Grade on Gaseous Exhaust Emissions of Passenger Vehicles Measured by a Portable Emission Measurement System (PEMS). *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2017**, *52*, 215–226, doi:10.1016/j.trd.2017.03.011.
59. Zheng, F.; Li, J.; Van Zuylen, H.; Lu, C. Influence of Driver Characteristics on Emissions and Fuel Consumption. *Transportation Research Procedia* **2017**, *27*, 624–631, doi:10.1016/j.trpro.2017.12.142.
60. Smit, R.; Rose, G.; Symmons, M. Assessing the Impacts of Ecodriving on Fuel Consumption and Emissions for the Australian Situation. In Proceedings of the ATRF 2010: 33rd Australasian Transport Research Forum; 2010.
61. Ministerio de Economía y Hacienda. Manual de Conducción Eficiente Para Conductores Del Parque Móvil Del Estado. **2002**, Depósito Legal: M-38872-2002.
62. Monzón, A.; Boggio-Marzet, A. Eco-Driving: Eficiencia Energética y Conducción Responsable. *Papeles de Energía* **2020**, *10*, 93–123.
63. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía Eficiencia y Ahorro Energético. *Manual de Conducción Eficiente para conductores de vehículos industriales* **2006**, Depósito Legal: M-8928-2006.
64. Galgamuwa, U.; Perera, L.; Bandara, S. Developing a General Methodology for Driving Cycle Construction: Comparison of Various Established Driving Cycles in the World to Propose a General Approach. *Journal of Transportation Technologies* **2015**, *05*, 191–203, doi:10.4236/jtts.2015.54018.
65. André, M.; Hickman, A.J.; Hassel, D.; Joumard, R. Driving Cycles for Emission Measurements under European Conditions. In Proceedings of the SAE Technical Papers; 1995.
66. Duarte, G.O.; Gonçalves, G.A.; Farias, T.L. Analysis of Fuel Consumption and Pollutant Emissions of Regulated and Alternative Driving Cycles Based on Real-World Measurements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2016**, *44*, 43–54, doi:10.1016/j.trd.2016.02.009.
67. Achour, H.; Olabi, A.G. Driving Cycle Developments and Their Impacts on Energy Consumption of Transportation. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *112*, 1778–1788, doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.007.
68. TransportPolicy Eu: Light-Duty: New European Driving Cycle Disponible online: <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-light-duty-new-european-driving-cycle/> (recuperado el 12 Octubre 2024).
69. Gieseke, J.; Gerbrandy, G.-J. Report on the Inquiry into Emission Measurements in the Automotive Sector. *Committee of Inquiry into Emission Measurements in the Automotive Sector* **2017**, 100.
70. Stellantis Pagará 300 Millones de Dólares Por El Fraude de Motores Diésel Disponible online: <https://www.lavanguardia.com/vida/20220802/8445318/stellantis-pagara-300-millones-dolares-fraude-motores-diesel.html> (recuperado el 23 Marzo 2023).
71. Un Investigador Avisó Del Fraude de Las Emisiones de Volkswagen Hace Un Año Disponible online: [https://www.lainformacion.com/asuntos-sociales/un-investigador-aviso-del-fraude-de-las-emisiones-de-volkswagen-hace-un-ano\\_o4jo9ulyopzqeagdpmn3f3/](https://www.lainformacion.com/asuntos-sociales/un-investigador-aviso-del-fraude-de-las-emisiones-de-volkswagen-hace-un-ano_o4jo9ulyopzqeagdpmn3f3/) (recuperado el 23 Marzo 2023).

72. La Justicia de La UE Sentencia Que Afectados Por El “dieselgate” Tienen Derecho a Indemnización Disponible online: [https://www.elconfidencial.com/economia/2023-03-21/tjue-derecho-indemnizacion-estafados-dieselgate\\_3596569/](https://www.elconfidencial.com/economia/2023-03-21/tjue-derecho-indemnizacion-estafados-dieselgate_3596569/) (recuperado el 23 Marzo 2023).
73. UNITED NATIONS. Addendum 15: Global Technical Regulation No. 15 Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure. **2014**.
74. Pavlovic, J.; Ciuffo, B.; Fontaras, G.; Valverde, V.; Marotta, A. How Much Difference in Type-Approval CO<sub>2</sub> Emissions from Passenger Cars in Europe Can Be Expected from Changing to the New Test Procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **2018**, *111*, 136–147, doi:10.1016/j.tra.2018.02.002.
75. TransportPolicy US: Light-Duty: FTP-72. Transport Policy Disponible online: <https://www.transportpolicy.net/standard/us-light-duty-ftp-72/> (recuperado el 16 Marzo 2023).
76. Karavalakis, G.; Short, D.; Hajbabaie, M.; Vu, D.; Villela, M.; Russell, R.; Durbin, T.; Asa-Awuku, A. Criteria Emissions, Particle Number Emissions, Size Distributions, and Black Carbon Measurements from PFI Gasoline Vehicles Fuelled with Different Ethanol and Butanol Blends. *SAE Technical Papers* **2013**, *2*, doi:10.4271/2013-01-1147.
77. Japan Automobile Manufacturers Association *Automobile Manufacturing: A Core Industry Motor Vehicles*; 2022;
78. Abe, M. Achieving a Sustainable Automotive Sector in Asia and the Pacific: Challenges and Opportunities for the Reduction of Vehicle CO<sub>2</sub> Emissions. *Asia-Pacific Research and Training Network on Trade Working Paper Series* **2011**.
79. National Standard of People’s Republic of China. China Automotive Test Cycle - Part 1: Light-Duty Vehicles Disponible online: <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GBT38146.1-2019> (recuperado el 18 September 2024).
80. Policy, T. International Heavy Duty World HARMONIZED Transient Cycle (WHTC) Disponible online: <https://www.transportpolicy.net/standard/international-heavy-duty-world-harmonized-transient-cycle-whtc/> (recuperado el 12 Octubre 2024).
81. United Nations. ECE/TRANS/180/Add.4 Global Technical Regulation No. 4. **2007**.
82. Gebisa, A.; Gebresenbet, G.; Gopal, R.; Nallamothe, R.B. Driving Cycles for Estimating Vehicle Emission Levels and Energy Consumption. *Future Transportation* **2021**, *1*, 615–638, doi:10.3390/futuretransp1030033.
83. International Standard Organization ISO 8855:2011 Road Vehicles. Vehicle Dynamics and Road-Holding Ability. Vocabulary. 2011.
84. Ehsani Mehrdad; Gao Yimin; Longo Stefano; Ebrahimi Kambiz *Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles*; CRC Press, 2018; Vol. 3; ISBN 9781498761772.
85. Greenwood, J.A.; Minshall, H.; Tabor, D. Hysteresis Losses in Rolling and Sliding Friction. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **1961**, *259*, 480–507, doi:10.1098/rspa.1961.0004.
86. Reza N. Jazar *Vehicle Dynamics. Theory and Application*; 2008; ISBN 978-0-387-74243-4.
87. Guide for Pavement Friction. *Guide for Pavement Friction* **2009**, *1*, 25, doi:10.17226/23038.

88. Wong, J.Y. *Theory of Ground Vehicles, Fifth Edition*; 3rd ed.; Jonh Wiley & Sons, Inc, 2022; ISBN 9781119719984.
89. Komandi, G. Evaluation of the Concept of Rolling Resistance. *Journal of Terramechanics* **1999**, *36*, 159–166, doi:10.1016/S0022-4898(99)00005-1.
90. Gillespie, T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*; Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1992;
91. Peña, F.J.A. En El Túnel de Viento. *Cesvimap* **2007**, 12–15.
92. Çengel, Y.A.; Cimbala, J.M. *Mecánica de Fluidos*; 2012; ISBN 978-607-15-0779-2.
93. Ajanovic, A.; Haas, R.; Schrödl, M. On the Historical Development and Future Prospects of Various Types of Electric Mobility. *Energies* **2021**, *14*, 1070, doi:10.3390/en14041070.
94. Ali, Q.; Silvestre, M.L. Di; Lombardi, P.A.; Sanseverino, E.R.; Zizzo, G. Electrifying the Road to Net-Zero: Implications of Electric Vehicles and Carbon Emission Coefficient Factors in European Power Systems. *Sustainability* **2024**, *16*, 5084, doi:10.3390/SU16125084.
95. Zaino, R.; Ahmed, V.; Alhammadi, A.M.; Alghoush, M. Electric Vehicle Adoption: A Comprehensive Systematic Review of Technological, Environmental, Organizational and Policy Impacts. *World Electric Vehicle Journal* **2024**, *15*, 375, doi:10.3390/WEVJ15080375.
96. García, B.A.; Casals, L.C. Barriers to Electrification: Analyzing Critical Delays and Pathways Forward. *World Electric Vehicle Journal* **2024**, *15*, 409, doi:10.3390/WEVJ15090409.
97. INE Cifras Oficiales de Población de Los Municipios Españoles: Revisión Del Padrón Municipal. Disponible online: <https://www.ine.es/uc/fmEOECZQi1> (recuperado el 19 Octubre 2024).
98. Empresa Municipal de Transportes de Madrid, S.A. Cuentas Anuales e Informes de Gestión Disponible online: <https://www.emtmadrid.es/Elementos-Cabecera/Enlaces-Pie-vertical/EMPRESA/Somos/Informes-anuales.aspx> (recuperado el 19 Octubre 2024).
99. Transports Metropolitans de Barcelona, S.L. Dades Salarials Ferrocarril Metropolità de Barcelona. Transparència TMB. Portal de La Transparencia Disponible online: <https://transparencia.tmb.cat/es/informacion-economica/datos-patrimoniales-sociedades/transports-de-barcelona> (recuperado el 19 Octubre 2024).
100. Empresa Municipal de Transportes de Valencia S.A.U Carta de Servicios 2016-2019. Disponible online: [https://www.emtvalencia.es/ciudadano/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1918&Itemid=643&lang=es](https://www.emtvalencia.es/ciudadano/index.php?option=com_content&view=article&id=1918&Itemid=643&lang=es) (recuperado el 19 Octubre 2024).
101. Transportes Urbanos de Sevilla Sociedad Anónima Municipal. Información Económica y Presupuestaria Disponible online: <https://www.tussam.es/es/tussam/portal-transparencia/informacion-economica-y-presupuestaria> (recuperado el 19 Octubre 2024).
102. Empresa Malagueña de Transportes Sociedad Anónima Municipal. Datos Básicos de La Empresa Disponible online: <https://www.emtmalaga.es/es/datos-basicos-de-la-empresa> (recuperado el 19 Octubre 2024).
103. Empresa Municipal de Transportes de Palma de Mallorca Memorias Anuales Disponible online: <https://www.emtpalma.cat/es/memorias-anuales> (recuperado el 19 Octubre 2024).

104. Editec S.L.U. Revista viajeros. La Flota de Urbanos de Granada Tiene Seis Nuevos Autobuses Híbridos - Viajeros Disponible online: <https://revistaviajeros.com/noticia/17260-la-flota-de-urbanos-de-granada-tiene-seis-nuevos-autobuses-hibridos/> (recuperado el 13 Octubre 2024).
105. Alicante Plaza S.L. Alicante Renovará 43 Autobuses de Su Flota Con 20 Híbridos y 23 Eléctricos Antes de Terminar 2024. Disponible online: <https://alicantepiazza.es/alicante-flota-autobuses-hibridos-electricos> (recuperado el 13 Octubre 2024).
106. ComunicaSurMedia S.L. La Voz del Sur Jerez, Hacia La Renovación de Sus Autobuses: Tiene 11 Vehículos Con 23 Años y Uno Con 29 Available online: [https://www.lavozdelsur.es/ediciones/jerez/jerez-hacia-renovacion-sus-autobuses-tiene-11-vehiculos-con-23-anos-con-29\\_321121\\_102.html](https://www.lavozdelsur.es/ediciones/jerez/jerez-hacia-renovacion-sus-autobuses-tiene-11-vehiculos-con-23-anos-con-29_321121_102.html) (recuperado el 13 Octubre 2024).
107. Canaria de Avisos S.L. Diario de Avisos. Santa Cruz Invertirá Más de 30 Millones de Euros En Renovar La Actual Flota de Guaguas Urbanas Disponible online: <https://diariodeavisos.elespanol.com/2024/02/santa-cruz-invertira-mas-de-30-millones-de-euros-en-renovar-la-actual-flota-de-guaguas-urbanas/> (recuperado el 13 Octubre 2024).
108. La Flota de Autobuses Urbanos Renovada En Cuatro Años | Onda Cádiz RTV Available online: <https://ondacadiz.es/noticias/2023-09/la-flota-de-autobuses-urbanos-renovada-en-cuatro-anos> (recuperado el 13 Octubre 2024).
109. La Flota de Autobuses Urbanos de Zaragoza Contará Con 40 Autobuses 100% Eléctricos Del Modelo Mercedes-Benz ECitaro. Noticia. Ayuntamiento de Zaragoza Disponible online: <https://www.zaragoza.es/sede/servicio/noticia/328094> (recuperado el 13 Octubre 2024).
110. CASTROSUA AUTOBUSES MÓSTOLES | Castrosua Aportará 21 Autobuses Eléctricos Para Renovar La Flota de Transporte Urbano de Móstoles Available online: <https://www.elcorreogallego.es/economia/2024/07/12/castrosua-aportara-21-autobuses-electricos-105519607.html> (recuperado el 13 Octubre 2024).
111. Red Eléctrica de España. *La Operación Del Sistema Eléctrico*; 2013; Depósito legal: B. 21.028-2013.
112. Tawadros, P.; Zhang, N.; Boretti, A. Integration and Performance of Regenerative Braking and Energy Recovery Technologies in Vehicles. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Towards Zero Carbon Transportation* **2014**, 541–563, doi:10.1533/9780857097422.2.541.
113. Boretti, A. Improvements of Vehicle Fuel Economy Using Mechanical Regenerative Braking. *SAE Technical Papers* **2010**, Tie, S. F., Tan, C. W. (2013). A review of energ, doi:10.4271/2010-01-1683.
114. Hedlund, M.; Lundin, J.; de Santiago, J.; Abrahamsson, J.; Bernhoff, H. Flywheel Energy Storage for Automotive Applications. *Energies* **2015**, 8, 10636–10663, doi:10.3390/en81010636.
115. Jaguar’s Advanced XF ‘Flybrid’ Automotive – PUNCH Flybrid Disponible online: <https://punchflybrid.com/automotive/> (recuperado el 1 Mayo 2023).
116. Tie, S.F.; Tan, C.W. A Review of Energy Sources and Energy Management System in Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2013**, 20, 82–102, doi:10.1016/j.rser.2012.11.077.
117. Cross, D.; Brockbank, C. Mechanical Hybrid System Comprising a Flywheel and CVT for Motorsport and Mainstream Automotive Applications. *SAE Technical Papers* **2009**, doi:10.4271/2009-01-1312.

118. Li, Z.; Khajepour, A.; Song, J. A Comprehensive Review of the Key Technologies for Pure Electric Vehicles. *Energy* **2019**, *182*, 824–839, doi:10.1016/j.energy.2019.06.077.
119. Bernagozzi, M.; Georgoulas, A.; Miché, N.; Marengo, M. Heat Pipes in Battery Thermal Management Systems for Electric Vehicles: A Critical Review. *Applied Thermal Engineering* **2023**, *219*, 119495, doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.119495.
120. Lemian, D.; Bode, F. Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. *Energies* **2022**, *15*, doi:10.3390/en15155683.
121. Martínez-Chao, T.E.; Menéndez-Díaz, A.; García-Cortés, S.; D'Agostino, P. Urban Pedestrian Routes' Accessibility Assessment Using Geographic Information System Processing and Deep Learning-Based Object Detection. *Sensors* **2024**, *24*, 3667, doi:10.3390/s24113667.
122. Liu, Y.; Ding, X.; Ji, Y. Enhancing Walking Accessibility in Urban Transportation: A Comprehensive Analysis of Influencing Factors and Mechanisms. *Information* **2023**, *14*, 595, doi:10.3390/INFO14110595.
123. Avanza Spain, S.L.U. Plano de Las Líneas de La Ciudad de Ávila Disponible online: <https://avila.avanzagrupo.com/lineas-y-horarios/%0Aplano-de-las-lineas> (recuperado el 11 Marzo 2022).
124. Adam Schneider GPS Visualizer Disponible online: <https://www.gpsvisualizer.com/> (recuperado el 12 Mayo 2024).
125. Dauni, P.; Firdaus, M.D.; Asfariani, R.; Saputra, M.I.N.; Hidayat, A.A.; Zulfikar, W.B. Implementation of Haversine Formula for School Location Tracking. *Journal of Physics: Conference Series* **2019**, *1402*, doi:10.1088/1742-6596/1402/7/077028.
126. Baure, G.; Dubarry, M. Synthetic vs. Real Driving Cycles: A Comparison of Electric Vehicle Battery Degradation. *Batteries* **2019**, *5*, doi:10.3390/batteries5020042.
127. Huzayyin, O.A.; Salem, H.; Hassan, M.A. A Representative Urban Driving Cycle for Passenger Vehicles to Estimate Fuel Consumption and Emission Rates under Real-World Driving Conditions. *Urban Climate* **2021**, *36*, doi:10.1016/j.uclim.2021.100810.
128. Cui, Y.; Xu, H.; Zou, F.; Chen, Z.; Gong, K. Optimization Based Method to Develop Representative Driving Cycle for Real-World Fuel Consumption Estimation. *Energy* **2021**, *235*, doi:10.1016/j.energy.2021.121434.
129. MERCEDES BENZ Mercedes Benz Bus. Disponible online: [https://www.mercedes-benz-bus.com/es\\_ES/models/citaro/facts/technical-data.html](https://www.mercedes-benz-bus.com/es_ES/models/citaro/facts/technical-data.html) (recuperado el 14 Febrero 2022).
130. HUMANETICS Humanetics. Disponible online: <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact/%0Ahybrid-iii-50th-male/hybrid-iii-50th-male> (recuperado el 14 Febrero 2022).

## 12.- Anexos

### 12.1.- Anexo 1. Variables.

Símbolo	Descripción de la variable
$a$	Aceleración
$\alpha$	Ángulo de pendiente
$A_f$	Área frontal
$B$	Anchura
$C$	Constante característica del material del neumático
$c_x$	Coefficiente aerodinámico
$d$	Distancia
$D$	Diámetro exterior de la rueda
$\Delta E_C$	Incremento de energía cinética
$\Delta z$	Elongación en la dirección z
$E^{rec}$	Energía Recuperable
$E_{est}^{rec}$	Energía Recuperable Estimada
$E^{sup}$	Energía Suplida
$E_{est}^{sup}$	Energía Suplida Estimada
$F$	Fuerza
$F_{aero}$	Resistencia aerodinámica
$F_{grad}$	Resistencia al ascenso
$f_r$	Coefficiente de resistencia a la rodadura
$F_R$	Suma de las resistencias al avance
$F_{rod}$	Resistencia a la rodadura
$F_T$	Fuerza de tracción total del vehículo
$F_x$	Fuerza en la dirección x
$F_{xp}$	Fuerza de arrastre por presión
$F_{xr}$	Fuerza de arrastre por rozamiento
$F_{zp}$	Fuerza de sustentación por presión
$F_{zr}$	Fuerza de sustentación por rozamiento
$F_z$	Fuerza en la dirección z
$\varphi$	Latitud
$g$	Aceleración terrestre
$\gamma$	Peso específico
$H$	Altura
$h_t$	Altura de la sección del neumático
$k$	Constante de elasticidad del muelle
$k_z$	Rigidez del neumático en la dirección z
$\lambda$	Longitud
$m$	Masa del vehículo
$MMA$	Masa máxima autorizada
$MOM$	Masa en orden de marcha
$pax$	Pasajeros
$p$	Presión
$P_{aero}$	Potencia aerodinámica
$P_{grad}$	Potencia de ascenso



$PI$	Potencia instantánea
$p^{rec}$	Potencia recuperable
$P_{rod}$	Potencia de rodadura
$p^{sup}$	Potencia suplida
$P_{vel\ est}$	Potencia a velocidad estacionaria
$r$	Radio de la Tierra
$\rho$	Densidad
$S$	Separación ortodrómica entre dos puntos
$v$	Velocidad
$v_w$	Velocidad del fluido
$w$	Anchura de la sección del neumático
$W$	Peso en la rueda
$x$	Elongación
$X_1$	Número de paradas por km
$X_2$	Elevación acumulada por km

---

## 12.2.- Anexo 2. Abreviaturas y siglas.

Abreviatura	Significado
a.C.	Antes de Cristo
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
COP	<i>Conference of the Parties</i>
CVT	<i>Continuos variable transmission</i>
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNC	Gas Natural Comprimido
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
km/h	kilómetros por hora
kW/Tm	kilowatios por tonelada
MMA	Masa Máxima Autorizada
MOM	Masa en Orden de Marcha
m/s <sup>2</sup>	metros partido por segundo al cuadrado
mi/h	millas por hora
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
ONU	Organización de las Naciones Unidas
RAE	Real academia española
RPMs	Revoluciones Por Minuto
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
WHS	<i>World Heritage Sites</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>



### **12.3.- Anexo 3. Artículo de investigación.**

A continuación se adjunta el artículo publicado:

Article

# Energy Consumption of the Urban Transport Fleet in UNESCO World Heritage Sites: A Case Study of Ávila (Spain)

Carlos Santos-Iglesia <sup>1</sup>, Pablo Fernández-Arias <sup>1</sup>, Álvaro Antón-Sancho <sup>2</sup> and Diego Vergara <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Catholic University of Ávila, C/Canteros, s/n, 05005 Ávila, Spain; carlos.santos@ucavila.es (C.S.-I.); pablo.fernandezarias@ucavila.es (P.F.-A.)

<sup>2</sup> Department of Mathematics and Experimental Science, Catholic University of Ávila, C/Canteros, s/n, 05005 Ávila, Spain; alvaro.anton@ucavila.es

\* Correspondence: diego.vergara@ucavila.es

**Abstract:** Emission reduction and energy efficiency are fundamental objectives for the sustainability of the urban transport (UT) sector. One of the actions to achieve these objectives is to replace the vehicles that make up the fleet of UT buses with more efficient ones, equipped with regenerative braking systems that allow the recovery of part of the energy used in travel. However, sometimes the total replacement of the fleet of UT buses is not feasible and only a partial replacement of the fleet is possible. The present study proposes a mathematical model of easy application to compare different UT routes and to locate the greatest improvement niches. The contributions of the proposed model focus on several aspects: (i) optimizing economic resources; (ii) allocating the most efficient equipment where energy consumption can be most optimized; and (iii) simplifying the task of optimizing passenger transport routes. Thanks to the proposed model, the 6 UT lines of the city of Ávila can be classified in order to maximize efficiency in a possible partial renewal of the fleet.

**Keywords:** energy optimization; energy efficiency; urban transport; Ávila



**Citation:** Santos-Iglesia, C.; Fernández-Arias, P.; Antón-Sancho, Á.; Vergara, D. Energy Consumption of the Urban Transport Fleet in UNESCO World Heritage Sites: A Case Study of Ávila (Spain). *Sustainability* **2022**, *14*, 5641. <https://doi.org/10.3390/su14095641>

Academic Editor: Marilisa Botte

Received: 22 March 2022

Accepted: 5 May 2022

Published: 7 May 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

In 2020, the European Commission approved the Sustainable and Intelligent Mobility Strategy, together with an action plan comprising 82 initiatives, grouped into 10 emblematic areas of action, differentiated into 3 dimensions: sustainability, intelligence, and resilience [1,2]. These initiatives, to be developed in the coming years, provide the basis for the European transport system to achieve its transformation towards a more sustainable, inclusive, intelligent, environmentally friendly, and digital transport system.

Given that the transport sector is responsible for a large share of the total greenhouse gas emissions of the European Union (EU), the main objective of this strategy is to be more resilient to future shocks, complying with the Green Deal [3]. In line with the Paris agreement [4], the Green Deal, the EU mechanism for the transformation of the energy system [5] and the development of a green and sustainable economy in a post-COVID-19 scenario [6], has as its main objectives to reduce greenhouse gas emissions by at least 55% from 2025 to 2030 and to reduce greenhouse gas emissions by 90% by 2050, reaching climate neutrality [3,7].

On the other hand, the Framework for Action on Climate and Energy until 2030, to be implemented in the EU as of 2021, includes the following European energy policy objectives for the year 2030: (i) to mandatorily reduce EU greenhouse gas emissions by at least 55%, compared to 1990 values; (ii) to increase the share of renewable energies in total EU energy consumption to at least 32% by the year 2030; and (iii) to improve energy efficiency by at least 32% [8,9].

Among the 82 initiatives developed in the EU Sustainable and Intelligent Mobility Strategy, there is the flagship initiative 2, which aims to boost the adoption of zero emission

vehicles [1,2] and the decarbonization of the transport sector [10]. Within this flagship initiative, road transport is developed, where zero emission solutions are being deployed [11,12]. As of today, manufacturers are investing numerous technical and economic resources in the development of battery electric vehicles [13]. The commercial acceptance of hybrid technology is growing, especially in the case of cars, vans and buses used in urban areas [14–16], while that of long-distance trucks and coaches is beginning to emerge [17,18].

In the Spanish case, transport emissions in 2014 were 77.2 MtCO<sub>2</sub>-eq, having increased by almost 50% since 1990, due to the increase in the demand for passenger and freight mobility [19–21]. However, since 2007 there has been a decrease in emissions, because of the economic crisis and mitigation measures implemented in this sector [21]. The transport sector accounts for 25% of total greenhouse gas emissions in Spain. Recently, in 2020, the national government approved the Long Term Decarbonization Strategy [21,22].

Finally, in the case of the Castile and Lion region (Spain), in 2009 its regional government approved the Regional Strategy against Climate Change [23], which develops regional policies to mitigate greenhouse gas emissions during this period. Castile and Lion (Figure 1), with an area of more than 90,000 km<sup>2</sup> [24], is the largest region in Spain, even larger than several states which are members of the EU, including Belgium and Portugal.



**Figure 1.** Geographical location of the city of Ávila (WHS). Own elaboration.

On the other hand, Castile and Lion is one of the regions in the world with the most World Heritage Sites (WHS) declared by UNESCO, with 8 sites: Burgos Cathedral, old town of Segovia and its aqueduct, old town of Ávila with its extra-muros churches, old city of Salamanca, San Millán Yuso and Suso Monasteries (Burgos), the Médulas (León), archaeological site of Atapuerca (Burgos) and prehistoric rock art sites in Siega Verde (Salamanca) [25]. In the case of the region's World Heritage Cities –Ávila, Salamanca, and Segovia–, they include monuments and architectural works of exceptional value, as well as groups of buildings, whether isolated or grouped together, whose architecture, unity and integration into the landscape give them an exceptional universal value from the point of view of history, art, or science.

These WHS cities must specially ensure the protection and conservation of the beauty and history of their urban centers against the effects produced by GHG (greenhouse gases) emissions such as local temperature rise, or changes in the chemical composition of the

atmosphere [26], which eventually lead to rain acidification. To achieve this, they must maintain low levels of atmospheric, noise, light pollution, etc. [27,28]. This indicates that WHS cities should be a priority target for energy sustainability policies. For this reason, it is necessary to carry out energy consumption analyses, particularly in these cities, to help drive these sustainability policies.

Considering this situation, the objective of the present research is to look for energy optimization in the Urban Transport (UT) fleet [29] of one of these WHS cities: Ávila. Regenerative braking systems provide an additional charge to the hybrid batteries while the vehicle is in motion [30–37]. In other words, they take advantage of a large part of the kinetic energy of the vehicle and transform it into electrical energy, which can then be used as a source of energy for the electric motor. The search for energy optimization will consist of finding a method that allows prioritizing the installation of regenerative braking in one line before another, based on energy criteria.

Energy efficiency, as well as the reduction of CO<sub>2</sub> emissions and environmental pollution, must be the criteria to be considered when opting for regenerative technology. The feasibility of this technology would allow the preservation of the monumental wealth of the old town of Ávila, thanks to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions from its UT. In the same way, once the viability of this technology is validated, it could be replicated by other fleets of UT buses, favoring the achievement of the desired goal of climate neutrality by the year 2050.

## 2. Materials and Methods

To develop the present research, a numerical method structured in different phases is developed (Figure 2): Phase I: data acquisition of the different UT routes of the city of Ávila (WHS); Phase II: data processing performing kinematic and dynamic computations; and Phase III: energy analysis determining the supplied power and the recoverable power.

### 2.1. Phase I: Route Data Collection

To develop Phase I (Figure 2), information is collected from the routes of the 6 passenger UT lines of the city of Ávila [38]. The information collected is based on the number of bus stops and their location along each of the UT lines in the city of Ávila (WHS).

### 2.2. Phase II: Data Processing

The GPS coordinates of the routes are not publicly available, so it is necessary to do some mapping work to obtain the data of each point of the route (latitude, longitude and altitude) necessary to carry out the study described in this article.

In Phase II (Figure 2), once information is obtained from the transport service provider [38], the route is mapped using the online software Google MyMaps<sup>®</sup>. Using cartographic techniques [39,40], the complete itinerary is defined, with all the route and stop data, for each of the transport lines included in the study. This information is exported to a file “\*.kmz”. The application GPSVisualizer<sup>®</sup> is used to extract all the information contained in the file “\*.kmz”. The obtained information will be exported in a file “\*.txt” containing the hundreds of points that make up the studied route. In addition to the information of the latitude and longitude of each point, the elevation data of each of the points is also available. Once all the information of the coordinates that make up the route is in text, the different parameters of the route are determined (Figure 2).

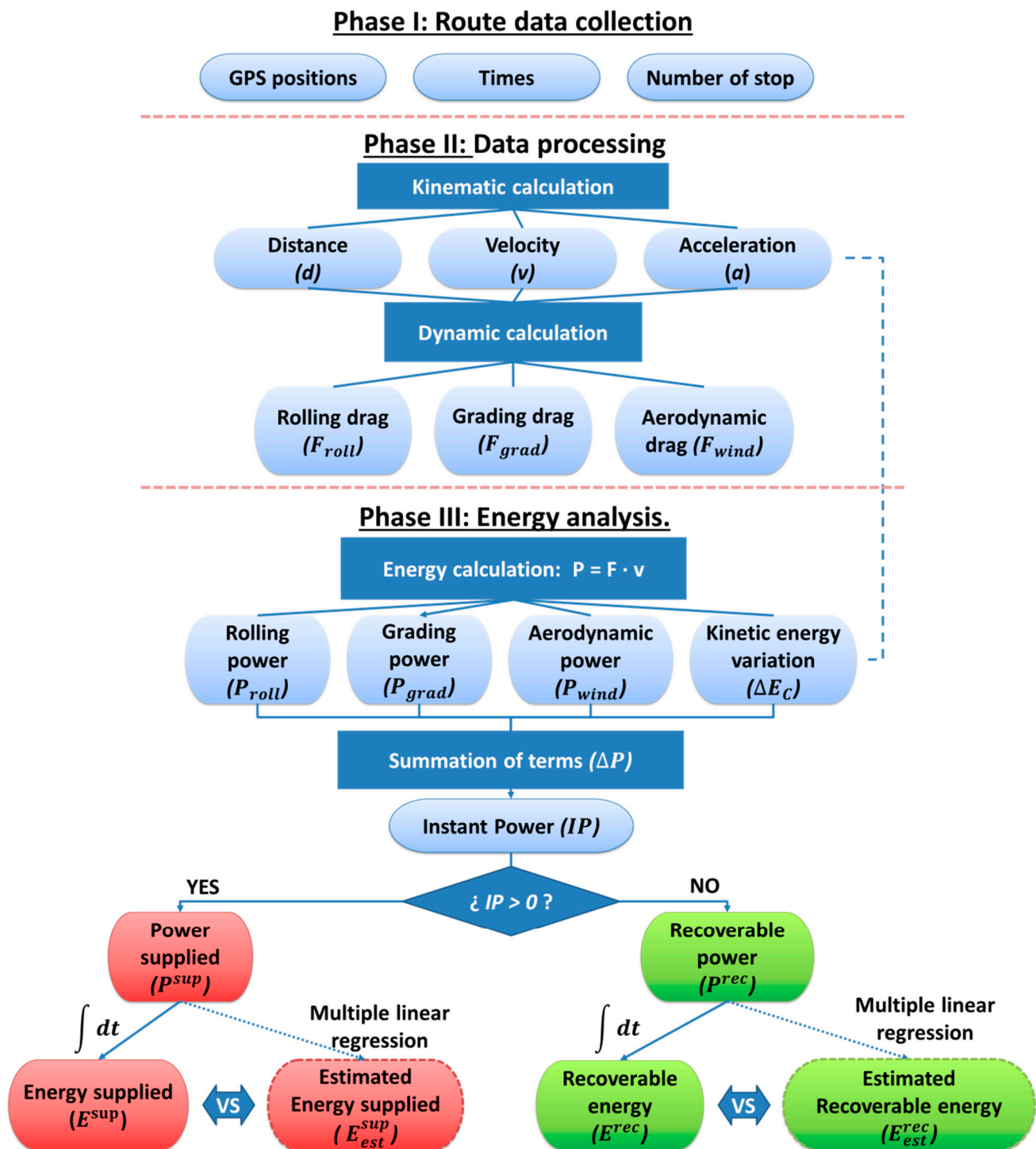


Figure 2. Flowchart of the numeric method.

### 2.2.1. Kinematic Characteristics

After importing the information, the first step is to compute the distance between two consecutive points on the route (Figure 2). This is calculated by considering the Haversine expression for computing the orthodromic distance between two points on the Earth's crust [41].

At this stage, information is available about the distance between two consecutive points on the route and the cumulative distance between different points. In the same way, it is possible to know the total distance traveled on each route.

From this point, it is possible to obtain what is the distance that the bus must travel to go from one stop to another. This study establishes the starting assumptions that the bus must fulfill along the entire route:

- The bus must be stopped at all bus stops (velocity  $v = 0$  km/h).
- The bus shall not exceed 50 km/h (maximum velocity allowed within the urban area).
- The bus increases its velocity with constant acceleration  $a$  corresponding to going from 0 to 50 km/h in 10 s ( $a = 1.39$  m/s<sup>2</sup>). The same acceleration value will be used for braking.

With the above starting hypotheses, values are given to the velocity and acceleration functions (Figure 2), both dependent on the variable defined as independent: time. This time-velocity relationship is the one established for different driving cycles widely used for road consumption studies [42–44].

The interval value of the independent variable will be 1 s. Therefore, the average velocities, average accelerations and distance traveled will be calculated for each one-second interval. To comply with the initial hypotheses, the velocity values will decrease sufficiently in advance so that, when the position variable coincides with the distance corresponding to a stop, the velocity variable is equal to zero at that point.

Once the kinematic characteristics of the bus motion are established (Figure 2), its technical characteristics can now be defined: (i) Height ( $H$ ); (ii) Width ( $W$ ); (iii) Mass ( $m$ ); (iv) Mass in Running Order ( $MRO$ ); (v) Maximum Authorized Mass ( $MAM$ ); (vi) Number of passengers ( $pax$ ); and (vii) Aerodynamic drag coefficient ( $C_x$ ) [45], indicated in Table 1.

**Table 1.** Technical characteristics of the standard bus used for the study.

$H$ (m)	$W$ (m)	$MRO$ (kg)	$MAM$ (kg)	$pax$	$C_x$
3.10	2.55	10,000	18,000	86	0.65

In all energy computations, it is assumed that the bus travels the routes considered in each case without any passengers on board. The bus manufacturer does not provide data on the Mass in Running Order ( $MRO$ ). To compute this data, the mass of the occupants for whom the bus is designed is subtracted from the  $MAM$ . The data for the average mass of a passenger is based on the mass of the Humanetics harmonized Hybrid III 50th Male ATD, the world's most widely used automotive test dummy for the evaluation of automotive safety restraint systems in frontal crash tests, which represents the 50th percentile of the population for tests regulated in the US Code of Federal Regulations and in the European ECE Regulations [46]. The mass considered, therefore, for each passenger will be 77.7 kg. Consequently, the computed  $MRO$  is:

$$MRO = MAM - (86 \text{ } pax \cdot 77.7 \text{ kg}) \quad (1)$$

Finally, the data considered for  $MRO$  is rounded to 10,000 kg, to take into account the additional weight of luggage that may be carried by each passenger. As for the aerodynamic drag coefficient, a value of  $C_x = 0.65$  has been taken, a typical value for passenger buses [47].

### 2.2.2. Dynamic Characteristics

Starting from the bus data (Table 1) and its kinematic behavior, the forces, energies, and powers that occur for each interval of one second along the entire route are computed (Figure 2). To do this, the forces involved are computed for the different situations in which any vehicle moving in a fluid such as air may find itself. In its displacement, the vehicle overcomes 3 forces that oppose its progress: (i) rolling drag; (ii) upward drag and (iii) aerodynamic drag. It should also provide additional energy to accelerate. This energy will be considered as (iv) energy for acceleration.

Firstly, the rolling drag of tires on hard surfaces is mainly due to the concept of hysteresis, which applies to the materials from which the tire is formed [48]. For the

purposes of this research, it is considered that the mentioned moment can be replaced by a horizontal force, of opposite direction to the movement and applied in the center of the wheel [49].

This force is called rolling drag ( $F_{\text{roll}}$ ) (Phase II, Figure 2), it is proportional to mass and gravity, affected by the rolling drag coefficient and then it is expressed in the following form:

$$F_{\text{roll}} = m \cdot g \cdot fr \quad (2)$$

where  $m$  is mass,  $g$  is the Earth gravity acceleration constant, which acts at the center of the wheel, and  $fr$  is the so-called rolling drag coefficient [47–52]. If the vehicle is on a slope, the appropriate weight component must be applied. Therefore, the expression of  $F_{\text{roll}}$  [53] (Phase II, Figure 2) is affected by the cosine of the angle of inclination and it is of the form:

$$F_{\text{roll}} = W \cdot fr \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

where  $\alpha$  is the slope angle.

The  $fr$  coefficient is a function of the tire material, its structure, pressure, temperature, tire tread, road roughness, etc. For the computation of vehicle performance, it suffices to consider the  $fr$  coefficient as a linear function of velocity. For most vehicle inflation ranges, considering a passenger car driving on a paved road, the following expression is used [47]:

$$fr = 0.01 \cdot \left(1 + \frac{v}{160}\right) \quad (4)$$

where  $v$  is the velocity of the vehicle measured in km/h.

On the drag to the ascent, when a vehicle moves up a slope, the vector decomposition of its own weight will produce a component in the longitudinal direction of the vehicle [47,53]. The effect of this component on the longitudinal motion of the vehicle may be to oppose the motion (in the case of a slope with an angle that is  $\alpha > 0$ ) or to assist (in the case when the slope angle is  $\alpha < 0$ ). This slope-related force is often referred to as drag to ascent or grading drag ( $F_{\text{grad}}$ ) (Phase II, Figure 2), which coincides with the weight affected by the sine of the angle of inclination. It is then expressed as follows:

$$F_{\text{grad}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

The sign criterion used here is that the energy that must be contributed by the motor will have a positive sign and the energy dissipated by the braking systems will be considered with a negative sign. This concept of energy “traditionally dissipated by the braking system” is of vital importance in this study, since it is considered energy that can be used in the case of installing a regenerative braking system. Finally, regarding the aerodynamic drag of the vehicle, it is necessary to consider that a vehicle moving in a fluid (air) experiences a force that resists its forward motion [47,54,55]. This force is called aerodynamic drag ( $F_{\text{wind}}$ ) (Phase II, Figure 2) and is developed in the following expression:

$$F_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Af \cdot C_x \cdot (v - v_w)^2 \quad (6)$$

where  $\rho$  is the air density,  $Af$  is the frontal area and  $v_w$  is the wind velocity.

### 2.2.3. Energetic Characteristics

Having computed the 3 resisting forces considered in the study (Figure 2), it is easy to compute now the power required to keep the vehicle rolling at a constant velocity by simply multiplying the force by the velocity at each instant [56]. Since the interval of the independent variable is one second, the power terms are equal to the energy terms referring to that interval of one second. Therefore, the rolling power ( $P_{\text{roll}}$ ) (Phase III, Figure 2) is equal to the following:

$$P_{\text{roll}} = F_{\text{roll}} \cdot v \quad (7)$$

where  $F_{\text{roll}}$  is the rolling drag, and  $v$  is the velocity.

Similarly, the grading power ( $P_{\text{grad}}$ ) (Phase III, Figure 2) coincides with the product of the grading drag times the velocity:

$$P_{\text{grad}} = F_{\text{grad}} \cdot v \quad (8)$$

where  $F_{\text{grad}}$  is the grading drag, and  $v$  is the velocity.

Based on an analogous reasoning to the previous ones, it follows that the aerodynamic power ( $P_{\text{wind}}$ ) (Phase III, Figure 2) is equal to:

$$P_{\text{wind}} = F_{\text{wind}} \cdot v \quad (9)$$

where  $F_{\text{wind}}$  is the aerodynamic drag, and  $v$  is the velocity.

Finally, there is a fourth power term to consider. When a vehicle circulates at a constant velocity, it is necessary to provide a power which is equal to the sum of all the powers above, but if the vehicle is accelerated, it is necessary to provide, in addition, certain energy to increase its velocity. This power is not computed as the product of a force with a velocity, but as the difference in kinetic energy between one state and the next divided by the time elapsing between these two states (Phase III, Figure 2). This energy is that corresponding to the increased kinetic energy ( $\Delta E_C$ ), whose expression is well-known:

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} m \cdot \Delta v^2 \quad (10)$$

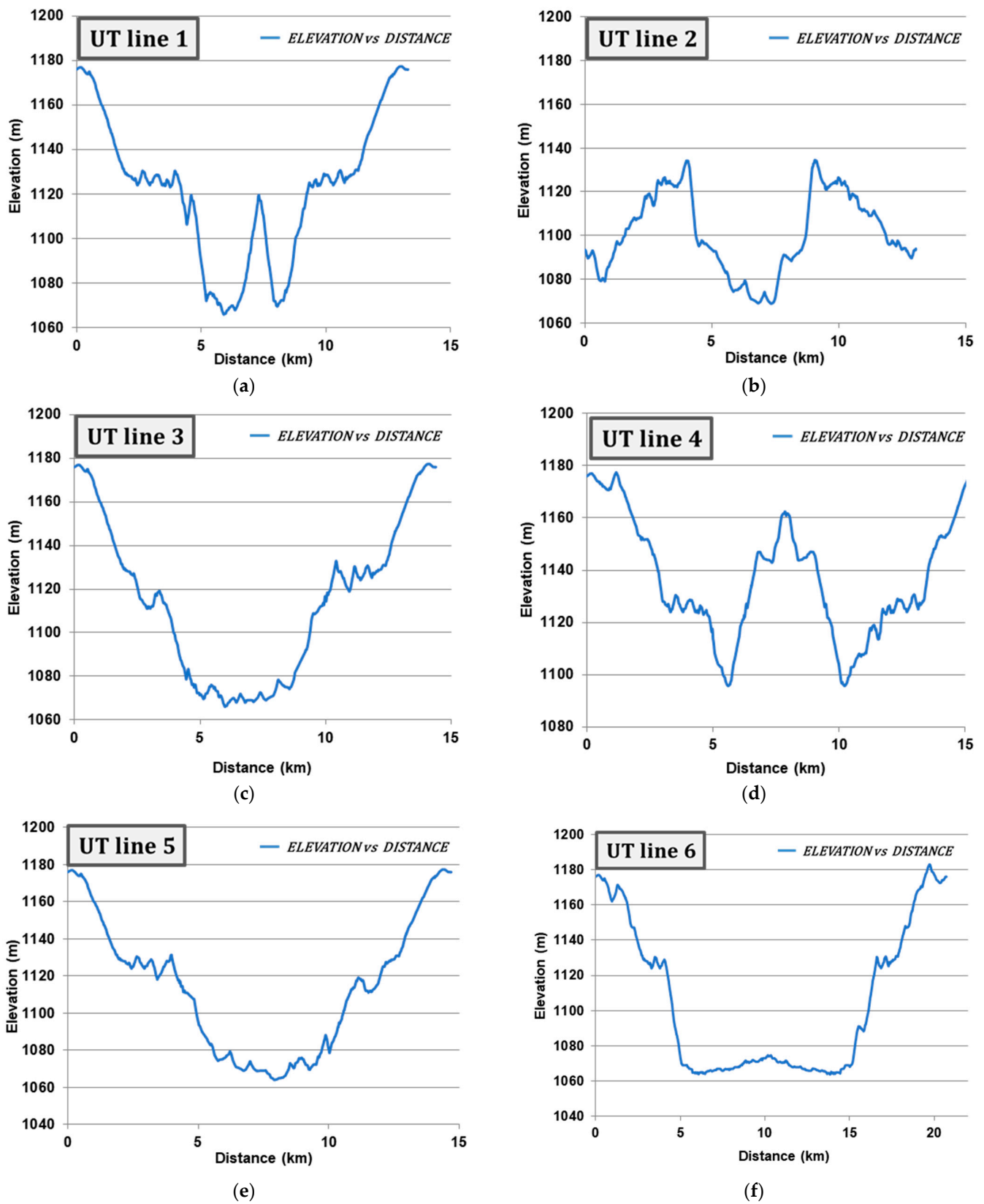
where  $m$  is the mass and  $\Delta v$  is the velocity variation between two states. By using time as the independent variable for the computations and discretizing the time variable into one-second intervals, the variation of energy over a one-second interval becomes the definition of power, and, therefore, the increased kinetic energy has units of power, as does  $P_{\text{roll}}$ ,  $P_{\text{grad}}$  and  $P_{\text{wind}}$  (Phase III, Figure 2). Once the powers corresponding to the four phenomena considered in the study have been computed for each second (Phase III, Figure 2), the sum of the four power values is calculated, so that a time series of the vehicle's power input or "recoverable" power as a function of time will be obtained. The results shown below are based on the analysis of the energy variations of this time series.

### 3. Results

Since this study is based on the application of the presented analysis to the city of Ávila, this section presents the most relevant results for the different UT lines of this city (WHS). First, the general results of the orography of the different routes are obtained (Table 2). These results are also represented as profiles of the line (Figure 3), in which the following aspects can be observed: (i) the height at each point along the route; (ii) the slopes that the bus will encounter; (iii) the accumulated slopes; and (iv) the maximum and minimum elevations.

**Table 2.** Orography of the different UT lines in Ávila (WHS).

UT Line	Total Distance in Each Line (km)	Number of Bus Stops	Cumulative Elevation Gain (m)
1	13.286	45	231.96
2	13.030	48	189.09
3	14.390	47	190.85
4	16.641	50	234.53
5	14.683	46	192.26
6	20.729	65	200.38



**Figure 3.** Profile of the different UT lines in the city of Ávila (WHS): (a) Line 1; (b) Line 2; (c) Line 3; (d) Line 4; (e) Line 5; and (f) Line 6.

Since all the distances, heights, and velocities are known, it is possible to compute the Instantaneous Power ( $IP$ ) (Phase III, Figure 2):

$$IP = P_{\text{roll}} + P_{\text{grad}} + P_{\text{wind}} + \Delta Ec \quad (11)$$

To compute  $IP$ , which is required to supply the vehicle at each moment, it is only necessary to add the power required to maintain the vehicle at a constant velocity and the increase in kinetic energy that the vehicle experiences when changing its velocity in each time interval (in the case of this study, the time interval analyzed is 1 s). The values of  $P_{\text{roll}}$  and  $P_{\text{wind}}$  (Phase III, Figure 2) will always be positive for every given velocity  $v$ ; however,  $P_{\text{grad}}$  and  $\Delta Ec$  (Phase III, Figure 2) may be positive and oppose the movement of the vehicle [the vehicle is ascending an slope ( $P_{\text{grad}} > 0$ ) or accelerating ( $\Delta Ec > 0$ )] or negative, favoring the movement [in the case of descending a slope ( $P_{\text{grad}} < 0$ ) or slowing down ( $\Delta Ec < 0$ )]. In this way, the powers transmitted to the vehicle from the engine, or from the vehicle to the brakes (in case the sum of Equation (11) has a negative value), are known and are plotted in Figure 4.

Figure 4 shows the power values for the six UT lines in the city of Ávila. The positive values of the  $IP$  variable (red color) that are observed correspond to the power that must be provided to the vehicle to accelerate it or to overcome the resisting forces. The positive values of the  $IP$  variable are called Supplied Power ( $P^{\text{sup}}$ ) (Phase III, Figure 2).

$$P^{\text{sup}} = |IP|; \forall IP > 0 \quad (12)$$

The maximum peaks of  $P^{\text{sup}}$  correspond to the moments when the vehicle accelerates from a standstill at the instant it starts after a stop.

Negative values of  $IP$  (in green) occur when the result of Equation (11) is negative. These negative values represent an energy input (which would generate an increase in the energy stored in the vehicle if it were equipped with a regenerative braking system). This power, which can be stored in vehicles equipped with regenerative braking systems, is called Recoverable Power ( $P^{\text{rec}}$ ) (Phase III, Figure 2).

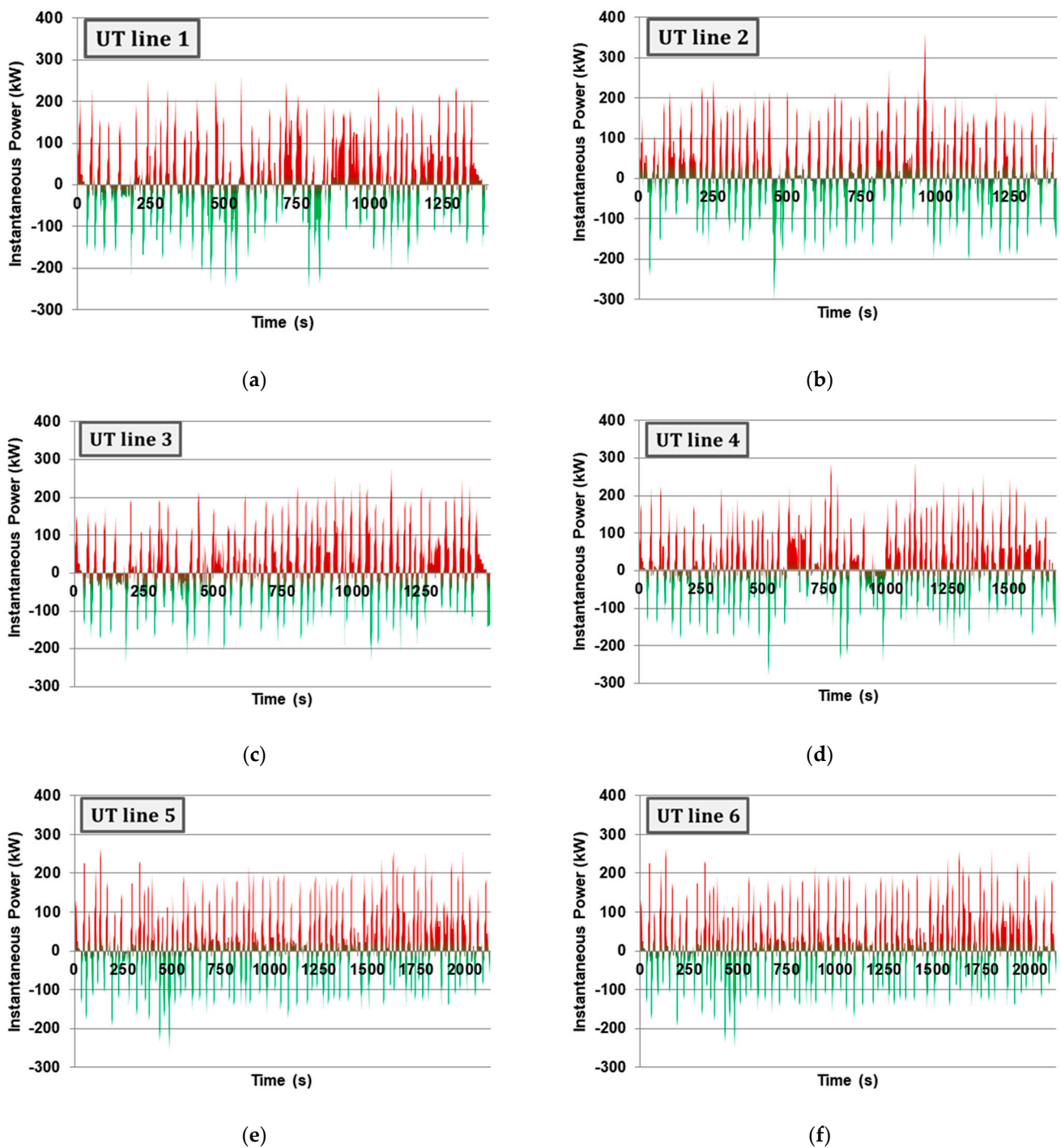
$$P^{\text{rec}} = |IP|; \forall IP \leq 0 \quad (13)$$

It is on this concept of power and recoverable energy that will be worked on below. Each of the peaks with a negative value (green color), is the power necessary to stop the vehicle at the instant in which a deceleration prior to the complete stop of the vehicle is occurring. In conventional vehicles,  $P^{\text{rec}}$  cannot be harnessed and must be dissipated as heat through the vehicle's conventional braking system.

The remaining power values (positive or negative) are obtained depending on the combination of the aerodynamic force, rolling force, gradient and  $\Delta E_c$  required to accelerate (Equation (11)). Table 3 shows, as a summary, the results obtained in terms of the Maximum Recoverable Power (kW) and the Average Recoverable Power (kW) in each of the lines under study.

**Table 3.** Maximum Recoverable Power and Average Recoverable Power (kW) in the different UT lines of Ávila (WHS).

UT Line	Maximum $P^{\text{rec}}$ (kW)	Average $P^{\text{rec}}$ (kW)
1	264.55	73.29
2	305.37	71.59
3	321.84	67.81
4	278.28	68.74
5	263.50	71.59
6	254.93	75.29



**Figure 4.** Power distribution of the different UT lines in the city of Ávila (WHS): (a) Line 1; (b) Line 2; (c) Line 3; (d) Line 4; (e) Line 5; and (f) Line 6.

#### 4. Discussion

Once the values of the power with respect to time are known, the energy required to supply the vehicle can be computed by simply integrating the power function over a defined time interval:

$$W = \int P \cdot dt \quad (14)$$

where  $P$  is the power.

According to the definition of the integral itself, it can be concluded from the graphs in Figure 4 that the area enclosed under the curve  $P^{\text{sup}}$  (in red) corresponds to the so-called

Supplied energy ( $E^{\text{sup}}$ ) (Phase III, Figure 2), which is the energy that has been supplied to the vehicle between two specific time instants.

$$E^{\text{sup}} = \int_{P>0} IP \cdot dt \quad (15)$$

Likewise, the area enclosed under the curve  $P^{\text{rec}}$  corresponds to the Recoverable Energy ( $E^{\text{rec}}$ ) (Phase III, Figure 2) that has been dissipated, but can be used if regenerative braking systems are available.

$$E^{\text{rec}} = \int_{P \leq 0} P \cdot dt \quad (16)$$

In Table 4, the cumulative results for the variables  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  (Phase III, Figure 2) on each of the UT lines in the city of Ávila (WHS) are computed. However, when evaluating the incorporation of regenerative braking systems, the information provided in Table 4 is not sufficient to study in which lines  $E^{\text{rec}}$  (Phase III, Figure 2) is greater. In Table 5, the different terms used in this study according to the unit of travel considered (km) is obtained. To compare  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  (Phase III, Figure 2), regardless of the length of the route, it is necessary to consider relative terms. From the data of Table 5 it is concluded that the amounts of energy required to cover one kilometer of each of the lines are much less than would be expected based on the amounts of energy provided in a complete route. The  $E^{\text{sup}}/\text{km}$  is 12% on the most demanding route (line 2), which is higher than that required to travel one km on line 6. Similarly, it can be observed that the  $E^{\text{rec}}$  per km on line 2 is 18.5% higher than on line 6.

**Table 4.** Supplied and recoverable energy (MJ) in the different UT lines of Ávila (WHS).

UT Line	Total $E^{\text{sup}}$ in Each Line (MJ)	Total $E^{\text{rec}}$ in Each Line (MJ)
1	63.50	44.48
2	63.43	44.95
3	65.87	45.23
4	73.19	49.08
5	66.65	45.46
6	90.14	60.24

**Table 5.** Number of bus stops, cumulative elevation gain,  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  (per km traveled) in the different UT lines of Ávila (WHS).

UT Line	Total Distance in Each Line (km)	Relative Results		Relative Energy Results		Percentage of Recoverable Energy (%)
		Number of Stop per km ( $n^{\circ}/\text{km}$ ) $X_1$	Cumulative Elevation Gains per km (m/km) $X_2$	$E^{\text{sup}}$ per km (MJ/km)	$E^{\text{rec}}$ per km (MJ/km)	
2	13.0305	3.68	14.51	4.87	3.45	70.84
1	13.2861	3.39	17.46	4.78	3.35	70.08
6	20.7292	3.14	9.67	4.35	2.91	66.90
3	14.3902	3.27	13.26	4.58	3.14	68.56
5	14.6833	3.13	13.09	4.54	3.10	68.28
4	16.6416	3.00	14.09	4.40	2.95	67.05

The different transport lines are listed in the table according to their percentage of  $E^{\text{rec}}$  versus  $E^{\text{sup}}$  (right column, Table 5). Based on the ratio between  $E^{\text{rec}}$  and  $E^{\text{sup}}$ , it can be concluded that the line with the highest percentage of energy that can be recovered is line 2, with 70.87% of  $E^{\text{sup}}$  recovered. It is important to observe that the scope of this study is to compute the theoretical gross energy available for recovery and that it does not consider either the quality/availability of the energy or the yields that apply to each of the

energy transformations. This is therefore a preliminary study which aims to compare the size of the recoverable energy niches, but it has nevertheless made it possible to classify the lines according to the percentage of recoverable energy. So far, it can be observed that for the same distance traveled, there are significant changes in both  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$ , due to two variables: (i) Number of Bus Stops per km ( $X_1$ ) and (ii) Cumulative elevation gain per km ( $X_2$ ). To estimate the contribution of the accumulated difference in elevation and the number of bus stops per kilometer in the overall computation of both  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$ , the following multiple linear regression model is proposed:

$$E_{\text{est}}^{\text{sup}} (\text{MJ}/\text{km}) = 1.296 \cdot X_1 + 0.031 \cdot X_2 \quad (17)$$

$$E_{\text{est}}^{\text{rec}} (\text{MJ}/\text{km}) = 0.826 \cdot X_1 + 0.032 \cdot X_2 \quad (18)$$

where  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  is the Estimated Supplied Energy and  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$  is the Estimated Recoverable Energy (Phase III, Figure 2). Equation (17) is obtained by means of a multiple linear regression, taking as dependent variable the values of the  $E^{\text{sup}}$  column, and as independent variable, the  $X_1$  and  $X_2$  values (Table 5). This linear regression model yields an  $R = 0.9995$  and an  $R^2 = 0.9990$ . Equation (18) is obtained by means of a multiple linear regression, taking as dependent variable the values of column  $E^{\text{rec}}$ , and as independent variable the values  $X_1$  and  $X_2$  (Table 5). This linear regression model yields an  $R = 0.9999$  and an  $R^2 = 0.9998$ .

Some initial conclusions that can be drawn from Equations (17) and (18) are that the amount of  $\Delta E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  needed to get the vehicle moving again after making a single stop is equivalent to the amount of energy needed to ascend 40 m. In the case of  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ , this ratio decreases, settling at 25 m of descent to recover the same energy as could be recovered in a single stop. From the proposed estimation analysis, the amount of energy input  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  and of recoverable energy  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$  can be computed in a simple way for each route at each point, by using the coefficients  $X_1$ : number of bus stops per km, and  $X_2$ : accumulated difference in altitude per km (m/km). These operations are listed in Table 6 and can be easily computed for any route that can be evaluated for any distance  $d$  in km.

**Table 6.** Results obtained for  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  and  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$  with the regression model.

UT Line	$X_1$	$X_2$	$E_{\text{est}}^{\text{sup}}$ (MJ)	$E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ (MJ)
1	3.39	17.46	4.93 <i>d</i>	3.36 <i>d</i>
2	3.68	14.51	5.22 <i>d</i>	3.50 <i>d</i>
3	3.27	13.26	4.65 <i>d</i>	3.13 <i>d</i>
4	3.00	14.09	4.32 <i>d</i>	2.93 <i>d</i>
5	3.13	13.09	4.46 <i>d</i>	3.00 <i>d</i>
6	3.14	9.67	4.37 <i>d</i>	2.90 <i>d</i>

Based on the data obtained in Table 6, the construction of a resource optimization strategy is suggested, giving top priority to the renovation of buses covering line 2, since this is where the highest energy recovery per km traveled occurs (3.50 MJ/km). Subsequently, to optimize resources, lines 1, 3, 5, 4 and 6 should be renewed respectively. The results obtained from the analysis are compared as follows:  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  and  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$  (Phase III, Figure 2), in dashed red and dashed green, respectively, versus the data computed at one-second intervals along the entire path using Equation (15) ( $E^{\text{sup}}$ ) and Equation (16) ( $E^{\text{rec}}$ ) in solid red line and solid green line, respectively. The study is carried out on UT line 1 in the city of Ávila (Figure 5). All the energy values shown in the graph are cumulative. In addition, the elevation profile is added (in blue color and values on the secondary axis).

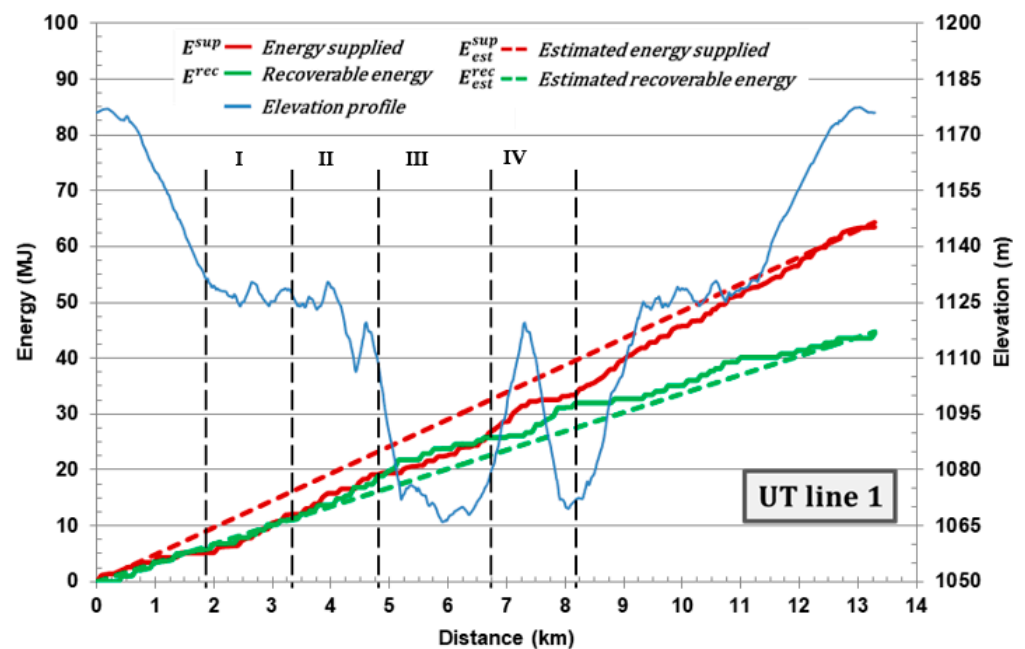


Figure 5. Distribution of Cumulative Energy on line 1 of UT in the city of Ávila (WHS).

From Figure 5, it can be observed that the values of  $E_{est}^{sup}$  and  $E_{est}^{rec}$ , according to the proposed analysis, follow a straight line with slope according to the corresponding coefficients  $X_1$  and  $X_2$  in Table 5. The values  $E^{sup}$  computed according to Equation (15), are far from the estimated values  $E_{est}^{sup}$  (decreasing) as the altitude decreases. This is because in the intervals where the accumulated elevation gain is less than the value  $X_2 \cdot d$ ,  $E^{sup}$  decreases (less energy needs to be supplied since the vehicle is moving on a negative slope). By the same reasoning, it follows that  $E^{rec}$  is greater than the expected  $E_{est}^{rec}$  for that interval. Therefore, real values of local accumulated vertical drop that are below the total accumulated vertical drop for a given stretch cause  $E^{sup}$  to decrease compared to  $E_{est}^{sup}$  and  $E^{rec}$  increases compared to  $E_{est}^{rec}$ . This behavior can be observed in interval III of Figure 5. The lower the altitude, the more the computed values are farther away from the estimated values. In interval IV (Figure 5) it can be observed that as the altitude increases, the computed values get closer to the estimated values until the maximum relative altitude value, when they move away again. In the final values of the graph, the accumulated elevation gains up to this point coincides with the total accumulated elevation gain of the stretch, and the estimated and calculated values coincide.

Another not-so-obvious trend observed is that, on certain occasions, the two curves of  $E^{sup}$  decrease in value with respect to the values for  $E_{est}^{sup}$ , which is due to the scarcity of bus stops. In interval I, there are 2 bus stops in a space of 1.3 km, which gives a ratio of 1.5 bus stops/km, far below the coefficient  $X_1 = 3.39$  bus stops/km of the total count of line 1. The scarcity of bus stops in this interval means that very little energy input is needed, and, at the same time, there is very little  $E^{rec}$  available. The opposite behavior is found in interval II (Figure 5), where 10 stops are accumulated in 2 km, which establishes a ratio of 5 bus stops/km, higher than the global coefficient  $X_1 = 3.39$  bus stops/km, which makes the computed values of  $E^{sup}$  go up again with respect to the estimated values of  $E_{est}^{sup}$ . A similar trend is observed with the computed values of  $E^{rec}$ , which again rise with respect to their estimated equivalents of  $E_{est}^{rec}$ . In the same way that occurs with the “accumulated slope” variable, at the end of the graph (Figures 5 and 6a), the accumulated values coincide with the value of the interval, obtaining computed values very close to those of the estimated model.

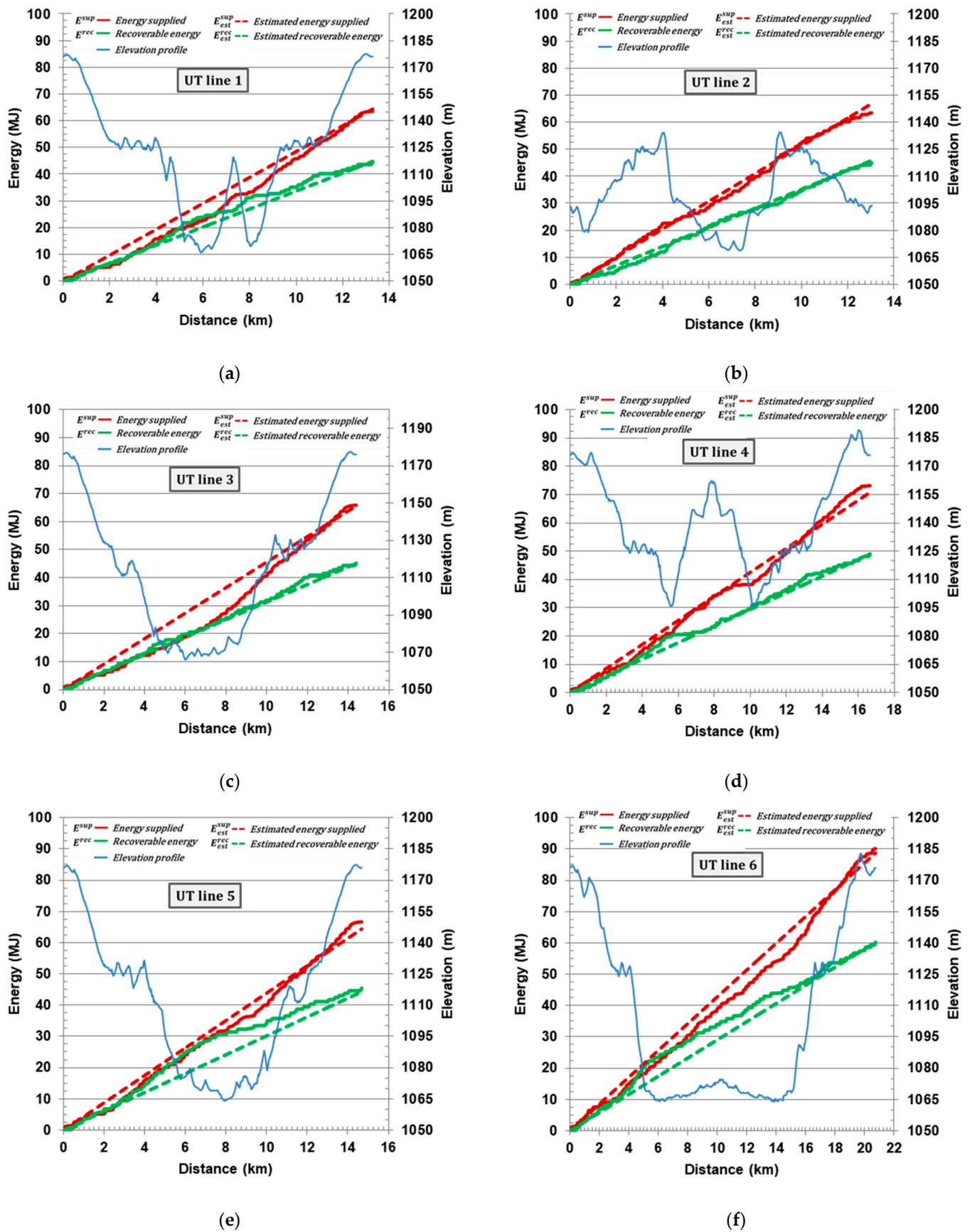


Figure 6. Distribution of accumulated energy in the different UT lines in the city of Ávila (WHS): (a) Line 1; (b) Line 2; (c) Line 3; (d) Line 4; (e) Line 5; and (f) Line 6.

In the case of Line 2 (Figure 6b) it starts with an ascent from km 0 to km 4, which makes the values of  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  move away from each other and symmetrically to the bisector of the lines  $E_{\text{est}}^r$  and  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ . From km 4 to km 7.5 the line profile is descending and the values of  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  approach each other and symmetrically to the bisector of the  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  and  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  lines. The same effects are repeated for the upward interval from 7.5 km to 9 km and for the downward interval from 9 km to 13 km.

In line 3 (Figure 6c), a heretofore unseen phenomenon is observed. In the interval from 0 km to 9 km there is a very considerable drop of  $E^{\text{sup}}$  versus  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  without a similar displacement of  $E^{\text{rec}}$  versus  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ . This is because in that 0–9 km interval there is a conjunction of two factors. On the one hand, there is a very steep decline and, on the other hand, very little concentration of bus stops, 2.7 bus stops/km versus 3.27 bus stops/km on the full line 3. This occurs because the vehicle moving at a constant  $v$  and down a negative gradient, does not need much  $E^{\text{sup}}$  to move. However, since there are fewer bus stops in that interval, there is less braking (the event where more  $E^{\text{rec}}$  can be recovered), so there is no significant increase in  $E^{\text{rec}}$  versus  $E_{\text{est}}^{\text{rec}}$ . In the interval from 9 km to 13 km the opposite occurs, many bus stops with a positive slope, which causes a large amount of  $E^{\text{sup}}$  to be needed so that, in this interval  $E^{\text{sup}}$  again approaches the values of  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$ .

The opposite phenomenon occurs in line 5 (Figure 6e). In this line 5, there is a very steep decline, but, unlike line 3 (Figure 6c), in line 5 there are many bus stops together. The interval 4–6 km, has 4.5 bus stops per km, compared to 3.13 bus stops/km on the entire line 5. By braking many times, the  $E^{\text{rec}}$  values increase a lot, while an amount of  $E^{\text{sup}}$  very similar to  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  must be contributed because the bus has to be accelerated many times. For line 4 (Figure 6d) and line 6 (Figure 6f) a very homogeneous distribution of bus stops is observed, so there is a direct relationship between the slope of the route and the distance of  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  with respect to their corresponding homologues.

Finally, as can be observed in the six UT lines (Figure 6) of the city of Avila (WHS), there is a variation of the computed energy with respect to the energy estimated by the proposed method. This is due to the fact that, for the computation of  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  and  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  according to the proposed numerical model, both the accumulated gradient and the number of bus stops are assumed constant along the entire route, while the computed energy values  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$ , considering the gradient in each one-second interval.

The proposed method can estimate  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  and  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  assuming a constant accumulated gradient and a constant number of bus stops. This means that the proposed method will yield results of  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  and  $E_{\text{est}}^{\text{sup}}$  very similar to  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  respectively, if the studied interval has values of  $X_1$  and  $X_2$  similar to those of a given run. The main difference is between the local values of  $X_1$  and  $X_2$  with respect to the global values of the considered path, this difference being greater the further the estimated energy values are from the calculated values.

The present study is oriented to the replacement of old fuel buses by new hybrid or fully electric buses, so energy units are taken, which are valid for any type of buses. In this sense, from the proposed method it is possible to make an energy study to classify the lines where there is the greatest possibility of energy use, allowing to generate strategies in the renovation of buses that allow better use of energy resources. On the other hand, the method is not able by itself to optimize the energy consumption, but it is only able to analyze the energy consumption of the different UT lines. The computation of the energy consumption is then proposed as a future line of research.

As a future research line, it is proposed to focus the study on the construction of a mathematical model for the energy supplied and recovered, by means of a statistical analysis of Bayesian inference, based on Markov Chain Monte Carlo algorithms. This statistical analysis would allow the identification of other variables related to the lines (different to the analyzed in this paper: number of stops, length, and cumulative elevation) that may be influencing the energy supplied and recovered variables, and thus help provide a stochastic model to optimize energy consumption.

## 5. Conclusions

The urban transport sector is evolving towards sustainability and decarbonization, making ever better use of the energy consumed and achieving efficiency rates never seen before. The way to quickly achieve these efficiency goals in urban passenger transport would be to renew the entire fleet of buses for more modern ones equipped with regenerative braking systems. However, on many occasions, the resources available to local administrations are limited and do not allow for the replacement of an entire fleet of buses, or this replacement must be done progressively over the years. It is in this situation that a thorough understanding of the conditions that contribute most to transport inefficiency is essential.

In the case of World Heritage Sites, such as the present study in the city of Ávila (Spain), knowledge of these conditions can ensure that available resources are directed to where they are most needed, and thus maximize the benefits of investments in public transport. It is not just a matter of investing resources in sustainable transport, but also of ensuring that the resources allocated are put to the best possible use.

One of the ways to achieve the above objectives is to recover as much energy as possible in urban public transport journeys. Thanks to the mathematical model proposed in this research, the recoverable energy per unit of distance traveled by urban buses will be greater the higher the number of accelerations (number of bus stops per km;  $X_1$ ) and the steeper the landscape (accumulated slope per km;  $X_2$ ). Therefore, if the driving is done including many of these variables, it will be necessary to implement a regenerative braking system, while, if the driving is done smoothly and on the flat, the benefit of regenerative braking is of little importance.

The mathematical model developed in the present research not only reflects the above statement, but also quantifies in what proportion each of the variables considered contributes to the energy that is necessary to make an urban route and the energy that can be recovered in this route. In addition, the mathematical model developed facilitates the design of urban transport routes in a more efficient way, based on a combination of energy criteria not highlighted to date, such as the estimation of  $E^{\text{sup}}$  and  $E^{\text{rec}}$  on the conjunction of two easily obtainable data in any UT route in the world, such as  $X_1$  and  $X_2$ .

In addition, this mathematical model allows optimizing the implementation process of regenerative braking systems, ensuring their maximum use, because in the case of a possible partial implementation of regenerative braking systems in a fleet of UT buses, the model allows prioritizing the use of these systems in those places where the greatest use is obtained from them. In the case of the city of Ávila (WHS), the results obtained have made it possible to classify the 6 existing UT lines, clearly establishing a preferential order for replacing older vehicles with new vehicles equipped with regenerative braking. The fact of establishing a method to prioritize the implementation of vehicles with regenerative braking in the lines where more energy can be recovered would lead to a maximum use of energy resources and, therefore, of economic resources, obtaining the highest possible efficiency levels.

**Author Contributions:** Conceptualization, C.S.-I., P.F.-A. and D.V.; methodology, C.S.-I., P.F.-A. and D.V.; validation, C.S.-I., P.F.-A. and D.V.; formal analysis, C.S.-I., P.F.-A., Á.A.-S. and D.V.; data curation, C.S.-I., P.F.-A. and D.V.; writing—original draft preparation, C.S.-I., P.F.-A., Á.A.-S. and D.V.; writing—review and editing, C.S.-I., P.F.-A., Á.A.-S. and D.V.; supervision, C.S.-I., P.F.-A., Á.A.-S. and D.V. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Abbreviations

Symbol	Variable Description
$P_{\text{wind}}$	Aerodynamic power
$F_{\text{wind}}$	Aerodynamic drag
$C_x$	Aerodynamic drag coefficient
$\rho$	Air density
$X_2$	Cumulative elevation gains per km
$d$	Distance
$g$	Earth gravity acceleration
$r$	Earth radius
$E_{\text{est}}^{\text{sup}}$	Estimated supplied energy
$E_{\text{est}}^{\text{rec}}$	Estimated recoverable energy
$A_f$	Frontal area
$P_{\text{grad}}$	Grading power
$F_{\text{grad}}$	Grading drags
$H$	Height
$\Delta E_C$	Increased kinetic energy
$IP$	Instantaneous power
$\varphi_1, \varphi_2$	Latitude of point 1 and latitude of point 2
$\lambda_1, \lambda_2$	Longitude of point 1 and longitude of point 2
$MRO$	Mass in running order
$MAM$	Maximum authorized mass
$pax$	Number of passengers
$X_1$	Number of bus stops per km
$p^{\text{sup}}$	Supplied power
$p^{\text{rec}}$	Recoverable power
$P_{\text{roll}}$	Rolling power
$F_{\text{roll}}$	Rolling drag
$fr$	Rolling drag coefficient
$S$	Separation between two points
$\alpha$	Slope angle
$E^{\text{sup}}$	Supplied energy
$m$	Vehicle mass
$v$	Velocity
$W$	Width
$v_w$	Wind velocity

## References

- Gkoumas, K.; Marques, F.L.; Stepniak, M.; Pekár, F. Research and Innovation Supporting the European Sustainable and Smart Mobility Strategy: A Technology Perspective from Recent European Union Projects. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 11981. [\[CrossRef\]](#)
- Von Homeyer, I.; Oberthür, S.; Jordan, A.J. EU climate and energy governance in times of crisis: Towards a new agenda. *J. Eur. Public Policy* **2021**, *28*, 959–979. [\[CrossRef\]](#)
- Ossewaarde, M.; Ossewaarde-Lowtoot, R. The EU's Green Deal: A Third Alternative to Green Growth and Degrowth? *Sustainability* **2020**, *12*, 9825. [\[CrossRef\]](#)
- Rhodes, C.J. The 2015 Paris Climate Change Conference: COP21. *Sci. Prog.* **2016**, *99*, 97–104. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Pietrzak, M.B.; Olczyk, M.; Kuc-Czarnecka, M.E. Assessment of the Feasibility of Energy Transformation Processes in European Union Member States. *Energies* **2022**, *15*, 661. [\[CrossRef\]](#)
- Tian, J.; Yu, L.; Xue, R.; Zhuang, S.; Shan, Y. Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era. *Appl. Energy* **2022**, *307*, 118205. [\[CrossRef\]](#)
- Pakulska, T. Green Energy in Central and Eastern European (CEE) Countries: New Challenges on the Path to Sustainable Development. *Energies* **2021**, *14*, 884. [\[CrossRef\]](#)
- Quintana-Rojo, C.; Callejas-Albiñana, F.-E.; Tarancón, M.-Á.; Martínez-Rodríguez, I. Econometric Studies on the Development of Renewable Energy Sources to Support the European Union 2020–2030 Climate and Energy Framework: A Critical Appraisal. *Sustainability* **2020**, *12*, 4828. [\[CrossRef\]](#)
- Kulovesi, K.; Oberthür, S. Assessing the EU's 2030 Climate and Energy Policy Framework: Incremental Change toward Radical Transformation? *Rev. Eur. Comp. Int. Environ. Law* **2020**, *29*, 151–166. [\[CrossRef\]](#)

10. Wójcik-Jurkiewicz, M.; Czarnecka, M.; Kinelski, G.; Sadowska, B.; Bilińska-Reformat, K. Determinants of Decarbonisation in the Transformation of the Energy Sector: The Case of Poland. *Energies* **2021**, *14*, 1217. [CrossRef]
11. Calise, F.; Fabozzi, S.; Vanoli, L.; Vicidomini, M. A sustainable mobility strategy based on electric vehicles and photovoltaic panels for shopping centers. *Sustain. Cities Soc.* **2021**, *70*, 102891. [CrossRef]
12. Gössling, S.; Cohen, S. Why sustainable transport policies will fail: EU climate policy in the light of transport taboos. *J. Transp. Geogr.* **2014**, *39*, 197–207. [CrossRef]
13. Pamuła, T.; Pamuła, W. Estimation of the Energy Consumption of Battery Electric Buses for Public Transport Networks Using Real-World Data and Deep Learning. *Energies* **2020**, *13*, 2340. [CrossRef]
14. Kim, J.; Song, I.; Choi, W. An Electric Bus with a Battery Exchange System. *Energies* **2015**, *8*, 6806–6819. [CrossRef]
15. Abdelaty, H.; Mohamed, M. A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. *Energies* **2021**, *14*, 2824. [CrossRef]
16. Bottiglione, F.; Contursi, T.; Gentile, A.; Mantriota, G. The Fuel Economy of Hybrid Buses: The Role of Ancillaries in Real Urban Driving. *Energies* **2014**, *7*, 4202–4220. [CrossRef]
17. Pojani, D.; Stead, D. Sustainable Urban Transport in the Developing World: Beyond Megacities. *Sustainability* **2015**, *7*, 7784–7805. [CrossRef]
18. Goldman, T.; Gorham, R. Sustainable urban transport: Four innovative directions. *Technol. Soc.* **2006**, *28*, 261–273. [CrossRef]
19. Sánchez-Chóliz, J.; Duarte, R. CO<sub>2</sub> emissions embodied in international trade: Evidence for Spain. *Energy Policy* **2004**, *32*, 1999–2005. [CrossRef]
20. Alcántara, V.; Roca, J. Energy and CO<sub>2</sub> emissions in Spain: Methodology of analysis and some results for 1980–1990. *Energy Econ.* **1995**, *17*, 221–230. [CrossRef]
21. Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge. Transport Sector. Available online: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx> (accessed on 11 January 2022).
22. Navas-Anguita, Z.; García-Gusano, D.; Iribarren, D. Long-term production technology mix of alternative fuels for road transport: A focus on Spain. *Energy Convers. Manag.* **2020**, *226*, 113498. [CrossRef] [PubMed]
23. Junta de Castilla y León. Regional Strategy against Climate Change in Castilla and León 2009–2012–2020. Available online: <https://medioambiente.jcyl.es/web/jcyl/MedioAmbiente/es/Plantilla100Detalle/1246988359553/Programa/1284497829991/Comunicacion> (accessed on 14 January 2022).
24. Martín-Viso, I. Commons and the construction of power in the early Middle Ages: Tenth-century León and Castile. *J. Medieval Hist.* **2020**, *46*, 1–23. [CrossRef]
25. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. World Heritage List. Available online: <https://whc.unesco.org/en/list/> (accessed on 4 January 2022).
26. Bigio, A.G.; Ochoa, M.C.; Amirtahmasebi, R. *Climate-Resilient, Climate-Friendly World Heritage Cities*; Urban Development Series; The World Bank Group: Washington, DC, USA, 2014.
27. Gullino, P.; Beccaro, G.L.; Larcher, F. Assessing and Monitoring the Sustainability in Rural World Heritage Sites. *Sustainability* **2015**, *7*, 14186–14210. [CrossRef]
28. Ramos-Soler, I.; Martínez-Sala, A.-M.; Campillo-Alhama, C. ICT and the Sustainability of World Heritage Sites. Analysis of Senior Citizens' Use of Tourism Apps. *Sustainability* **2019**, *11*, 3203. [CrossRef]
29. May, A.D. Urban Transport and Sustainability: The Key Challenges. *Int. J. Sustain. Transp.* **2013**, *7*, 170–185. [CrossRef]
30. Lin, C.-L.; Hung, H.-C.; Li, J.-C. Active Control of Regenerative Brake for Electric Vehicles. *Actuators* **2018**, *7*, 84. [CrossRef]
31. Zhao, X.; Li, L.; Wang, X.; Mei, M.; Liu, C.; Song, J. Braking force decoupling control without pressure sensor for a novel series regenerative brake system. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* **2019**, *233*, 1750–1766. [CrossRef]
32. Cai, J.W.; Chu, L.; Fu, Z.C.; Ren, L.P. Regenerative Braking System for a Pure Electric Bus. *Appl. Mech. Mater.* **2014**, *543–547*, 1405–1408. [CrossRef]
33. Han, T.; Zeng, B.; Tong, Y. Theoretical study on energy recovery rate of regenerative braking for hybrid mining trucks with different parameters. *J. Energy Storage* **2021**, *42*, 103127. [CrossRef]
34. Yadav, D.; Kumar, R.; Kulshrestha, U.; Jain, A.; Rani, S. Enhancement of fuel efficiency in heavy duty vehicles through integrated module of TEG, piezoelectric and regenerative braking solutions. *Mater. Today Proc.* **2021**, in press. [CrossRef]
35. Ghafouryan, M.M.; Atae, S.; Dastjerd, F.T. A novel method for the design of regenerative brake system in an urban automotive. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **2016**, *38*, 945–953. [CrossRef]
36. Ma, Z. Parameters design for a parallel hybrid electric bus using regenerative brake model. *Adv. Mech. Eng.* **2014**, *6*, 760815. [CrossRef]
37. Xiao, B.; Lu, H.; Wang, H.; Ruan, J.; Zhang, N. Enhanced Regenerative Braking Strategies for Electric Vehicles: Dynamic Performance and Potential Analysis. *Energies* **2017**, *10*, 1875. [CrossRef]
38. Avanza Spain, S.L.U. Plano de las Líneas de la Ciudad de Ávila. Available online: <https://avila.avanzagrupo.com/lineas-y-horarios/plano-de-las-lineas> (accessed on 11 March 2022).
39. Zhao, P.; Haitao, H.; Li, A.; Mansourian, A. Impact of data processing on deriving micro-mobility patterns from vehicle availability data. *Transp. Res. Part D Trans. Environ.* **2021**, *97*, 102913. [CrossRef]
40. Whang, F.; Chen, C. On data processing required to derive mobility patterns from passively-generated mobile phone data. *Transp. Res. Part C Emerg. Tech.* **2018**, *87*, 58–74. [CrossRef]

41. Dauni, P.; Firdaus, M.D.; Asfariani, R.; Saputra, M.I.N.; Hidayat, A.A.; Zulfikar, W.B. Implementation of Haversine formula for school location tracking. *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**, *1402*, 077028. [[CrossRef](#)]
42. Baure, G.; Dubarry, M. Synthetic vs. Real driving cycles: Baure, G.; Dubarry, M. Synthetic vs. Real Driving Cycles: A Comparison of Electric Vehicle Battery Degradation. *Batteries* **2019**, *5*, 42. [[CrossRef](#)]
43. Huzayyin, O.A.; Salem, H.; Hassan, M.A. A representative urban driving cycle for passenger vehicles to estimate fuel consumption and emission rates under real-world driving conditions. *Urban Clim.* **2021**, *36*, 100810. [[CrossRef](#)]
44. Cui, Y.; Xu, H.; Zou, F.; Chen, Z.; Gong, K. Optimization based method to develop representative driving cycle for real-world fuel consumption estimation. *Energy* **2021**, *235*, 121434. [[CrossRef](#)]
45. Mercedes Benz Bus. Available online: [https://www.mercedes-benz-bus.com/es\\_ES/models/citaro/facts/technical-data.html](https://www.mercedes-benz-bus.com/es_ES/models/citaro/facts/technical-data.html) (accessed on 14 February 2022).
46. Humanetics. Available online: <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact/hybrid-iii-50th-male/hybrid-iii-50th-male> (accessed on 14 February 2022).
47. Ehsani, M.; Gao, Y.; Gay, S.E.; Emadi, A. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005; pp. 21–29.
48. Greenwood, J.A.; Minshall, H.; Tabor, D. Hysteresis losses in rolling and sliding friction. *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* **1961**, *259*, 480–507. [[CrossRef](#)]
49. Komandi, G. An evaluation of the concept of rolling drag. *J. Terramechanics* **1999**, *36*, 159–166. [[CrossRef](#)]
50. Rill, G. *Road Vehicle Dynamics. Fundamentals and modeling*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012; pp. 225–227.
51. Guiggiani, M. *The Science of Vehicle Dynamics. Handling, Braking, and Ride of Road and Race Cars*; Springer: Dordrecht, The Netherlands; Heidelberg, Germany; New York, NY, USA, 2014; pp. 59–61.
52. Lin, N.; Zong, C.; Shi, S. The method of mass estimation considering system error in vehicle longitudinal dynamics. *Energies* **2019**, *12*, 52. [[CrossRef](#)]
53. Koreny, M.; Simonik, P.; Klein, T.; Mrovec, T.; Ligori, J.J. Hybrid research platform for fundamental and empirical modeling and analysis of energy management of shared electric vehicles. *Energies* **2022**, *15*, 1300. [[CrossRef](#)]
54. Guerrero, A.; Castilla, R.; Eid, G. A Numerical aerodynamic analysis on the effect of rear underbody diffusers on road cars. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 3763. [[CrossRef](#)]
55. Luján, J.M.; Piqueras, P.; de la Morena, J.; Redondo, F. experimental characterization of real driving cycles in a light-duty diesel engine under different dynamic conditions. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 2472. [[CrossRef](#)]
56. Kaluva, S.T.; Pathak, A.; Ongel, A. Aerodynamic drag analysis of autonomous electric vehicle Platoons. *Energies* **2020**, *13*, 4028. [[CrossRef](#)]

## 12.4.- Anexo 4. Congreso.

A continuación se adjunta el certificado del congreso:



*Las investigaciones, su esencia y arte*

La Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja, Otorga el presente



### CERTIFICADO

A:

## CARLOS DE SANTOS DE LA IGLESIA

Por su destacada participación en calidad de **EXPOSITOR INTERNACIONAL** con el tema:  
**"Viabilidad del frenado regenerativo en el transporte urbano de la ciudad de Avila (Patrimonio de la Humanidad)"** en el: **Congreso - Encuentro Internacional de Ciencia y Tecnología EICYTEC - 2022**, organizado por la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, el día 17 de noviembre del 2022.

Pampas, 17 de noviembre de 2022.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA  
DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO  
*Dr. Daniel Hernández Morillo*  
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA  
DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO  
*Dr. Jorge Rafael Díaz Dumont*  
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN



## 12.5.- Anexo 5. Premio.

A continuación, se adjunta el certificado del premio obtenido por la presentación del artículo presentado en el ANEXO A3.



Alberto López Casillas, coordinador del Centro de Transferencia del Conocimiento enmarcado en el Plan Territorial de Fomento para Ávila y su entorno,

CERTIFICA

Que **D. Diego Vergara Rodríguez** ha recibido un premio dentro de la convocatoria de la CONVOCATORIA DE PREMIOS A PROYECTOS DE FORMACIÓN, TESIS O TRABAJOS FIN DE GRADO EN EMPRESAS DE LOS SECTORES AGROALIMENTARIO, ENERGÍAS RENOVABLES Y AUTOMOCIÓN EN ÁVILA, EN EL MARCO DEL CENTRO DE TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO, INNOVACIÓN Y EMPRENDIMIENTO DEL PROGRAMA TERRITORIAL DE FOMENTO PARA ÁVILA Y SU ENTORNO 2020-2024 , por resolución por Decreto de fecha 02/09/2024, por valor de 1.000 euros, por la presentación del artículo:

Santos-Iglesia, C.; Fernández-Arias, P.; Antón-Sancho, Á.; Vergara, D. Energy Consumption of the Urban Transport Fleet in UNESCO World Heritage Sites: A Case Study of Ávila (Spain). *Sustainability* 2022, 14, 5641.  
<https://doi.org/10.3390/su14095641>

Para que conste a los efectos oportunos.

Ávila

TÉCNICO AREA TURISMO, ASUNTOS EUROPEOS Y ENERGÍA

Alberto López Casillas.

Cod. Validación: 6T483DY7NNS3JJEHSN3J  
Verificación: <https://sedelectronica.es/validacion/>  
Documento firmado electrónicamente desde la Plataforma esPúblico Gestiona | Página 1 de 1

