

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio de planificación para la electrificación de las autopistas E18 y E39 en 2025

Autor: Joan Pino Ruiz
Directores: Andreas Sumper – Verónica Anadón
Convocatoria: Julio 2022





Resumen

En este estudio se detalla a continuación una propuesta de instalar cargadores rápidos para vehículos eléctricos en las autopistas noruegas E18 y E39. Esta misma propuesta contempla el escenario donde los vehículos eléctricos van a dominar el panorama de la movilidad en los próximos años. Debido a esta situación, resulta necesario analizar una infraestructura viable que cubra dicha demanda de cara a 2025, tanto para turismos o vehículos ligeros (en inglés *Light Duty Vehicles*, abreviado LDV) como para vehículos de mercancías o vehículos pesados (en inglés *Heavy Duty Vehicles*, abreviado HDV). Para ello, se ha empleado una metodología bien clara basada en análisis de datos: partiendo del estudio del comportamiento del tráfico en las autopistas noruegas, se ha diseñado un modelo que trate dichos datos y simule la demanda asociada con la ayuda de las librerías Pandas y NumPy de Python. En primera instancia, se pretende estudiar la demanda actual y de los años anteriores, a partir de la eclosión del vehículo eléctrico en el país escandinavo, para poder predecir a través de un modelo de regresión la demanda energética en 2025. Gracias a ello, finalmente se van a poder obtener unos resultados que permitan conocer la potencia necesaria a instalar en los alrededores de las autopistas E18 y E39, proponiendo una solución factible en términos medioambientales y económicos.

Sumario

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 3 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 7 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 8 |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | 9 |
| PREFACIO | 11 |
| INTRODUCCIÓN | 12 |
| Objetivos del proyecto | 12 |
| Alcance del proyecto | 13 |
| 1. SISTEMAS DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS | 14 |
| 1.1 Introducción | 14 |
| 1.2 Tecnologías de carga | 15 |
| 1.2.1 Carga estática | 15 |
| 1.2.2 Carga inductiva | 16 |
| 1.2.3 Carga conductiva | 17 |
| 1.3 Comparativa y consideraciones | 17 |
| 2. ANÁLISIS PRELIMINAR | 20 |
| 2.1 Introducción | 20 |
| 2.2 Ubicación del estudio | 20 |
| 2.3 Abastecimiento de la red eléctrica | 22 |
| 2.3.1 Sistema eléctrico | 22 |
| 2.3.2 Infraestructura actual | 23 |
| 2.4 Tecnología de electrificación | 24 |
| 2.4.1 Situación actual | 25 |
| 2.4.2 Tecnología escogida | 26 |
| 3. DISEÑO DEL MODELO DE DEMANDA | 27 |
| 3.1 Modelo de datos | 27 |
| 3.1.1 Input data | 27 |
| 3.1.2 Output data | 30 |
| 3.2 Simplificaciones y consideraciones | 32 |
| 3.3 Descripción del modelo de simulación | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 4. MODELO ESTADÍSTICO DE REGRESIÓN | 38 |
| 4.1 Input data..... | 38 |
| 4.2 Predicción de la penetración máxima | 40 |
| 4.2.1 Análisis exploratorio | 40 |
| 4.2.2 Construcción del modelo | 41 |
| 4.3 Predicción de la demanda para LDV..... | 42 |
| 4.3.1 Análisis exploratorio | 43 |
| 4.3.2 Construcción del modelo..... | 43 |
| 4.4 Predicción de la demanda para HDV | 45 |
| 4.4.1 Análisis exploratorio | 46 |
| 4.4.2 Construcción del modelo..... | 46 |
| 5. SIMULACIÓN I RESULTADOS DEL MODELO | 49 |
| 5.1 Modelo actual..... | 49 |
| 5.1.1 Resultados del LDV..... | 49 |
| 5.1.2 Resultados del HDV | 52 |
| 5.2 Modelo 2025 | 54 |
| 5.2.1 Resultados del LDV..... | 55 |
| 5.2.2 Resultados del HDV | 59 |
| 6. PROPUESTA DEFINITIVA | 64 |
| 6.1 Instalación de las nuevas estaciones para el LDV..... | 64 |
| 6.2 Instalación de las nuevas estaciones para el HDV | 65 |
| 7. PRESUPUESTO | 67 |
| 7.1 Presupuesto del personal..... | 67 |
| 7.2 Presupuesto del material | 68 |
| 7.3 Presupuesto del software y suscripciones | 68 |
| 7.4 Presupuesto total del proyecto | 69 |
| 8. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL | 70 |
| CONCLUSIONES | 73 |
| FUTUROS TRABAJOS | 74 |
| AGRADECIMIENTOS | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA | 76 |
| Referencias bibliográficas | 76 |



Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Esquema de la alimentación para la carga estática de un coche eléctrico [2]..... | 15 |
| Figura 1.2. Esquema básico de la carga inductiva [5]. | 16 |
| Figura 1.3. Esquema de un sistema de alimentación por catenaria [9] | 17 |
| Figura 2.1. Mapa de la intensidad del tráfico en Noruega [10] | 20 |
| Figura 2.2. Segmento elegido para el proyecto | 21 |
| Figura 2.3. Distribución del sistema eléctrico [13]..... | 22 |
| Figura 2.4. Mapa de la red de transmisión en Noruega..... | 24 |
| Figura 2.5. Estaciones de carga cercanas a la E18 y a la E39 [18]..... | 25 |
| Figura 3.1. Ejemplo de la selección del tráfico de un nodo en la autopista E18 [20] | 28 |
| Figura 3.2. Ubicación de las estaciones de carga para vehículos LDV | 29 |
| Figura 3.3. Ubicación de las estaciones de carga para vehículos HDV | 30 |
| Figura 3.4. Esquema representativo de la hipótesis del porcentaje de entrada y salida de vehículos | 32 |
| Figura 3.5 Esquema representativo del procedimiento a realizar para obtener el porcentaje de entrada-salida | 32 |
| Figura 3.6. Diagrama de flujo representando la mecánica del modelo | 35 |
| Figura 5.1. Infraestructura de estaciones de carga definitiva para 2025 con las dos nuevas estaciones en rojo..... | 55 |
| Figura 5.2. 1ª Iteración del conjunto de estaciones de carga para HDV en 2025 con las nuevas estaciones en rojo..... | 59 |
| Figura 5.3. 2ª Iteración del conjunto de estaciones de carga para HDV en 2025 con las nuevas estaciones en rojo..... | 61 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1. Ejemplo de un fragmento del datasheet 'Tráfico' | 27 |
| Tabla 3.2. Ejemplo de un fragmento del datasheet 'Nodos' | 28 |
| Tabla 3.3. Datasheet 'Estaciones' para vehículos LDV | 29 |
| Tabla 3.4. Datasheet 'Estaciones' para vehículos HDV | 30 |
| Tabla 3.5. Ejemplo de datasheet del consumo energético horario y por estación en kWh 'e_estaciones' | 31 |
| Tabla 3.6. Ejemplo de datasheet resultante del tiempo de carga por vehículo y por estación en minutos 't_carga' | 31 |
| Tabla 3.7. Caracterización de los parámetros energéticos input considerados | 34 |
| Tabla 4.1. Ejemplo de un fragmento del datasheet 'Histórico' en una fase inicial | 38 |
| Tabla 4.2. Comparativa de tipos de regresión para la penetración máxima..... | 42 |
| Tabla 4.3 Comparativa de tipos de regresión para la variable eLDV | 44 |
| Tabla 4.4. Comparativa de la calidad de los tipos de regresión para la variable eHDV..... | 47 |
| Tabla 4.5. Tabla comparativa para el análisis de la varianza de los modelos | 47 |
| Tabla 6.1. Plan de instalación de puntos de carga para LDV..... | 64 |
| Tabla 6.2 . Plan de instalación de puntos de carga para HDV | 66 |
| Tabla 7.1 Presupuesto del personal | 67 |
| Tabla 7.2. Presupuesto del material | 68 |
| Tabla 7.3. Presupuesto de licencias | 69 |
| Tabla 7.4. Presupuesto total | 69 |

Índice de Gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1.1. Comparativa de consumo entre los distintos modos de propulsión [9]..... | 18 |
| Gráfico 1.2. Desglose del peso de los principales componentes del camión [9]..... | 18 |
| Gráfico 1.3. Comparativa de los costes del ciclo de vida de las diferentes tecnologías [9] | 19 |
| Gráfico 2.1. Evolución de la producción eléctrica y el consumo de la red eléctrica de Noruega | 23 |
| Gráfico 4.1. Evolución del share de EV para vehículo pesado [22] | 39 |
| Gráfico 4.2. Evolución del share de EV para vehículo ligero [23]..... | 39 |
| Gráfico 4.3. Evolución del share del LDV eléctrico a lo largo del tiempo..... | 41 |
| Gráfico 4.4. Evolución de la cantidad de LDVs eléctricos a lo largo del tiempo | 43 |
| Gráfico 4.5. Representaciones gráficas de los residuos del modelo definitivo para eLDV | 44 |
| Gráfico 4.6. Evolución de la cantidad de HDVs eléctricos a lo largo del tiempo | 46 |
| Gráfico 4.7. Gráficos de los residuos del modelo definitivo para HDV..... | 48 |
| Gráfico 5.1. Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo ligero en período invernal | 50 |
| Gráfico 5.2. Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo ligero en período estival..... | 51 |
| Gráfico 5.3 Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo pesado en período invernal | 52 |
| Gráfico 5.4 Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo pesado en período estival..... | 53 |
| Gráfico 5.5. Evolución temporal del uso energético máximo de las estaciones para vehículo ligero en 2025 | 56 |
| Gráfico 5.6. Evolución temporal del uso energético máximo de la nueva estación 2, para vehículo ligero en 2025 | 57 |

| | |
|---|----|
| Gráfico 5.7. Evolución temporal del uso energético máximo de la nueva estación 12, para vehículo ligero en 2025 | 57 |
| Gráfico 5.8. Evolución temporal del uso energético medio de las estaciones para vehículo ligero en 2025 | 58 |
| Gráfico 5.9. 1ª iteración de la evolución temporal del uso energético máximo para vehículo pesado en 2025 | 60 |
| Gráfico 5.10. 2ª iteración de la evolución temporal del uso energético máximo para vehículo pesado en 2025 | 61 |
| Gráfico 5.11. Evolución temporal del consumo máximo de la nueva estación 2A, para vehículo pesado en 2025 | 62 |
| Gráfico 5.12. Evolución temporal del consumo máximo de la nueva estación 2B, para vehículo pesado en 2025 | 62 |
| Gráfico 5.13. Evolución temporal del uso energético medio de las estaciones para vehículo pesado en 2025 | 63 |
| Gráfico 8.1. Comparativa del impacto ambiental de los distintos cargadores que hay en el mercado [31] | 71 |

Prefacio

En un contexto actual de emergencia climática y aumento poblacional a escala mundial, la creciente demanda energética ha tomado una trascendencia equiparable a las épocas de las anteriores revoluciones industriales. Ante esta situación, los líderes políticos junto al apoyo de la comunidad científica, se han visto obligados a desplegar una estrategia a largo plazo para aumentar el uso de energías renovables en detrimento de los combustibles fósiles. Esta medida no tiene otro objetivo que reducir las emisiones de gases con efectos invernaderos, a fin de cumplir los Acuerdos de París.

Una pieza clave para conseguir este gran reto a nivel mundial es fomentar el uso del vehículo eléctrico (en inglés, abreviado EV). Si bien es cierto que, toda la tecnología que hace la posible el funcionamiento del automóvil eléctrico no estaba suficientemente madura a principios de siglo, en estos momentos nos encontramos en una situación bien distinta. Cada vez existen más líneas de investigación en la mejora de la capacidad de almacenaje de energía en la batería del vehículo traduciéndose en una autonomía más que aceptable. En paralelo, cabe destacar la reducción de los tiempos de carga en los últimos años a causa de la aparición de supercargadores rápidos. Dada la coyuntura actual, con estos últimos avances tecnológicos, favorecen que, a día de hoy, el automóvil eléctrico ya sea más que una alternativa real al coche de combustión y estemos hablando de una realidad.

Desde que ha quedado patente la madurez actual de la tecnología del transporte eléctrico, la UE ha puesto fecha de caducidad del vehículo de combustión. El Parlamento Europeo, con la finalidad de descarbonizar las carreteras europeas, ha aprobado una ley que prohíbe que la comercialización de todo vehículo que use combustible de origen fósil en 2035, de este modo, a su vez, también prohíbe la circulación de dicha tipología de vehículo a partir de 2050 [1]. Por este motivo, muchos países de la eurozona ya han anunciado paquetes de medidas y ayudas que apuestan por el coche eléctrico, sin embargo existe un país que es pionero en este aspecto y no es otro que Noruega. El país escandinavo presume de la mayor tasa de matriculación de coches eléctricos del mundo, elevándose hasta aproximada el 75% [3].

Dada la posición tan favorable del país noruego en términos de EV, resulta oportuno plantear el estudio en cuestión para poder proyectar una foto más cercana a la situación que puede darse en 2035 y 2050, respectivamente. De este modo, puede tomarse como ejemplo para proponer diversas mejoras y propuestas para optimizar el modelo de electrificación propugnado por la UE.

Introducción

Objetivos del proyecto

Resumidamente, el proyecto trata de proponer una solución para la movilidad interurbana, basada en garantizar el suministro de energía para la carga de vehículos eléctricos a corto plazo.

Para llevar a cabo un plan más completo y amplio se van no solamente se va a considerar el abastecimiento eléctrico a los turismos, siendo el medio más numeroso, sino que también se va tener en cuenta en este aspecto los medios de transportes comerciales o de mercancías, los cuáles también disponen de la posibilidad de funcionar de forma libre de emisiones.

A partir de la posibilidad de trabajar con dos tipologías de movilidad, los LDV y los HDV, con la intención de hacer el estudio más fiel a la realidad, se va a tratar de analizar y comparar la movilidad entre dos estaciones del año bien diferenciadas: invierno y verano. Así, se posibilita formular un segundo objetivo, el cual pretende analizar el consumo eléctrico procedente de las estaciones de carga según la temporada del año, así como comprender que factores resultan los más determinantes en relación a la fluctuación de la demanda.

Finalmente, como último objetivo, aparte de realizar el estudio desde el punto de vista del sistema eléctrico se va a intentar dar una visión desde el punto de vista del usuario, sin entrar en demasiada profundidad, mediante ciertos indicadores que puedan medir su propia satisfacción.

El proyecto se va a hacer efectivo pasando por las siguientes etapas:

- Documentarse previamente en conceptos relacionados con el funcionamiento de los distintos sistemas de carga para vehículos eléctricos, tratando todas aquellas alternativas que posibilitan el suministro eléctrico al automóvil. Este tema queda bien descrito en los primeros capítulos.
- Proponer un escenario dentro del país noruego donde llevar a cabo el estudio, así como las diferentes estaciones de carga existentes en el mismo escenario. También resulta necesario examinar las conexiones de la red eléctrica a las mismas estaciones.
- Presentar un modelo que dé respuesta a la demanda eléctrica de los vehículos en el escenario y periodo escogido, tanto para la situación actual como para la situación futura a corto plazo.

- Por último, partiendo de los resultados del modelo de la demanda energética, diseñar un plan para instalar la potencia necesaria en los próximos años, en base a un modelo estadístico de regresión.

Alcance del proyecto

El alcance del proyecto consiste en sugerir detalladamente un modo de suministro eléctrico para la carga de automóviles propulsados eléctricamente en autopistas de Noruega. Primeramente, se van a tener en consideración las distintas maneras de abastecer a los LDV y a los HDV.

Segundamente, una vez estudiadas las distintas formas de suministro, las cuales se van a describir en los primeros apartados, se va a optar por una de ellas con la idea de acotar el proyecto y profundizar en esa tecnología. Por lo tanto, en primera instancia se va considerar un modo de suministro y si fuera oportuno para acabar de completar el estudio se explorarían las otras formas de provisión de energía.

Finalmente, resulta necesario acotar el alcance de la temporalidad de la propuesta ya que se va a definir una fecha con un criterio concreto y que siga las directrices europeas aprobadas, mencionadas anteriormente. Todo ello se va a fundamentar en una base de estadística y en la dinámica de los sistemas eléctricos.

1. Sistemas de carga para vehículos eléctricos

1.1 Introducción

Plantear un sistema de abastecimiento energético para la movilidad vehículos, que pueda suplir alternativamente al modelo convencional basado en la quema de combustibles fósiles, supone uno de los mayores retos del actual siglo para asegurar un desarrollo sostenible. En este contexto de transición energética, las últimas líneas de investigación apuntan que la solución a dicho reto pasa por la electrificación de las vías interurbanas principales. En otros términos más concretos, se trata de dotar a las autopistas de una infraestructura de recarga adecuada para la futura demanda de movilidad eléctrica [4]. Además, el hecho que circulen distintas tipologías de transportes por las vías urbanas provoca que se genere una demanda diferente entre los LDVs y los HDVs, detalle que complica substancialmente el diseño de la infraestructura.

Actualmente, el sistema de los EV está fundamentado en el almacenamiento de energía en baterías. Sin embargo, en función de la tipología del medio de transporte el rango de la energía nominal puede variar ampliamente: para el vehículo ligero o LDV, discurre entre 35 kWh – 120 kWh, mientras que para el vehículo pesado puede oscilar entre 300 kWh – 825 kWh [3]. Generalmente, el modo más común para recargar las baterías para estas tipologías de transporte es mediante la recarga en estático, donde un cargador estático alimenta la batería del EV proveniente de una subestación de la red. Si bien es cierto que para el caso del LDV, en el cual con una potencia de carga estándar los tiempos de carga no son excesivamente altos, en el caso del HDV usando la misma potencia los tiempos de carga se ven notablemente incrementados. Asimismo, debe sumarse el efecto perjudicial que tienen las baterías sobre el medio ambiente al final de su ciclo de vida, especialmente aquellas que funcionan en el vehículo pesado cuyas grandes dimensiones pueden causar pérdidas de eficiencia de hasta el 20% de su capacidad máxima [3]. Vistas las mencionadas pérdidas de eficiencia de las grandes baterías, se han explorado otras soluciones alternativas basadas en una recarga dinámica. En definitiva, gracias a pequeñas pruebas piloto y a una viabilidad más que estudiada en su diseño existen tres soluciones para el sistema de carga para EV [4]:

- Estática: Los LDV y HDV se cargan en estaciones de carga estática situadas a lo largo de la autopista.
- Inductiva: Los LDV y HDV se abastecen mediante una infraestructura de carga dinámica inductiva a lo largo de la ruta.
- Conductiva: Los LDVs se cargan en estaciones de carga estáticas, y los HDVs son alimentados por la infraestructura de carga dinámica en catenaria.

1.2 Tecnologías de carga

Una vez comentadas los distintos diseños de la electrificación de las autopistas dedicados a la carga de vehículos propulsados eléctricamente, en este apartado se presentan as tecnologías de carga para vehículos eléctricos (EV) que soportan y hacen posible los sistemas anteriormente mencionados. Estos pueden clasificar según tres categorías principales.

1.2.1 Carga estática

La primera tecnología usada en el sector se basa en la carga estática soportada por cargadores enchufables conectados a la red de baja tensión. Para el caso del vehículo ligero o LDV resulta ser la opción más viable dado que no se necesitan alojar un gran tamaño de baterías. La práctica más habitual para aplicar este tipo de carga suele ser en el propio domicilio donde la batería del vehículo se va cargando paulatinamente durante unas horas debido a la limitada potencia contractada. Sin embargo, una gran parte de los cargadores rápidos o supercargadores de acceso público presenta características de potencia adecuadas para la carga de vehículos de pasajeros en un tiempo aceptable. Por otro lado, en el terreno de los cargadores para vehículos pesados, pese al gran tamaño de las baterías que supone un coste económico y ambiental, estas están mejorando su potencia a suministrar que pueden llegar a superar los 400 kW. Para poder suministrar tal cantidad de potencia, las estaciones de carga rápida funcionan en corriente continua (CC) con una potencia nominal específicamente para camiones eléctricos de alta potencia. En el siguiente esquema conceptual (**Figura 1.1**) se refleja el flujo energético para hacer posible la carga en estático:

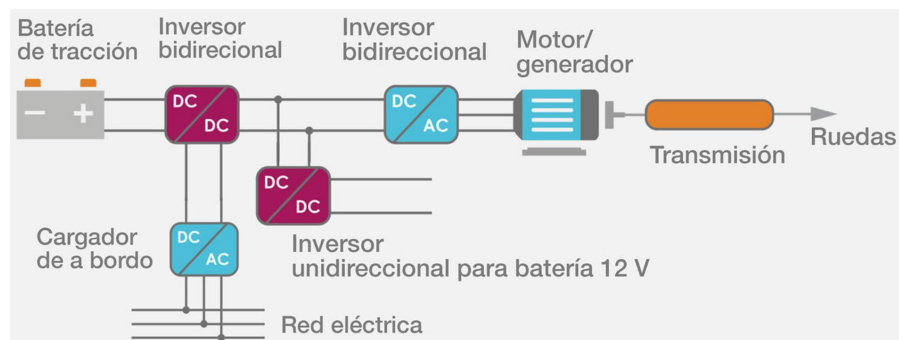


Figura 1.1. Esquema de la alimentación para la carga estática de un coche eléctrico [2].

Aguas arriba partiendo de la tracción de las ruedas, se encuentra el motor eléctrico (puede ser síncrono o asíncrono) que viene alimentado en corriente alterna (CA). Previamente al motor funcionando con CA, se dispone de un inversor bidireccional que convierte la CC en CA y viceversa. A este inversor, se le unen dos convertidores CC-CC: uno de ellos para suministrar la batería auxiliar convencional de 12 V y la otra rama para conectarse con el inversor bidireccional que está en conexión con la red de media tensión. En paralelo, en la misma **Figura 1.1** aparece el conjunto de baterías que almacena la energía abastecida.

1.2.2 Carga inductiva

Alternativamente, debido a la problemática de las baterías grandes para el HDV presentada en anterioridad, surge el sistema de carga dinámica, una carga simultánea al propio movimiento del coche. Dentro de las posibilidades de la carga dinámica, existe la solución de la carga inductiva: en este diseño la energía se transfiere de forma inalámbrica a través de la inducción un campo magnético. En cierto modo, el diseño puede llegar a recordar al emparejamiento magnético de un transformador, donde se coloca una bobina inductora alimentada por una corriente alterna (CA), situada debajo del asfalto de la carretera representando el lado primario, mientras que una bobina receptora alojada bajo el depósito del coche representa el lado secundario o inducido [5 (**Figura 1.2**):

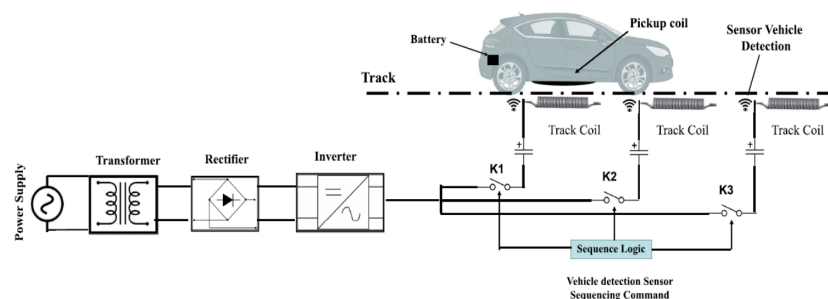


Figura 1.2. Esquema básico de la carga inductiva [5].

Todo empieza con el abastecimiento eléctrico a la subestación de transformación. A continuación mediante una conexión adecuada de los diodos del rectificador, el corriente y el voltaje quedan alterados para pasar a corriente continua (CC). De este modo, se adapta a una tensión más óptima para posteriormente hacer uso de un inversor que vuelve a convertir a 400V de CA. En este punto ya se está en disposición de dirigir el corriente hacia las bobinas del circuito primario situados justo bajo la superficie de la carretera. Cuando un vehículo se sitúa por encima de un tramo determinado de la carretera, la corriente se transmite hacia estos pequeños segmentos de que pueden ir entre 1-50 m, provocando la inducción del campo magnético sobre el conjunto receptor de bobinas alojado en el coche.

Finalmente, haciendo uso de un convertidor de tipo rectificador, el corriente pasa de CA a CC para adecuarla y hacer llegar la energía a la batería del EV. [6]

Aunque la implementación de la carga inductiva supone un incremento de costes debido a la necesidad de instalar un acoplador magnético bajo la carretera y una bobina de captación instalada en el EV, la carga inductiva supera la mayoría de los problemas del EV, como la ansiedad por la autonomía, el tamaño de la batería y su propio coste [7].

1.2.3 Carga conductiva

Finalmente, una última tecnología con la que se han hecho ciertas pruebas piloto en unos tramos determinados como en Suecia (2 km), California (1,6 km) o en Alemania (5 km) es la carga en catenaria [6]. El esquema de carga en catenaria tiene cierto parecido al de una fuente de alimentación ferroviaria de CC, no obstante el dimensionamiento del sistema de catenaria puede resultar más complejo que en el caso de los trenes por diversos factores como el horario o bien las distancias entre los vehículos pesados, cuyas no pueden regularse tan fácilmente como en el caso de los trenes o metros [6].

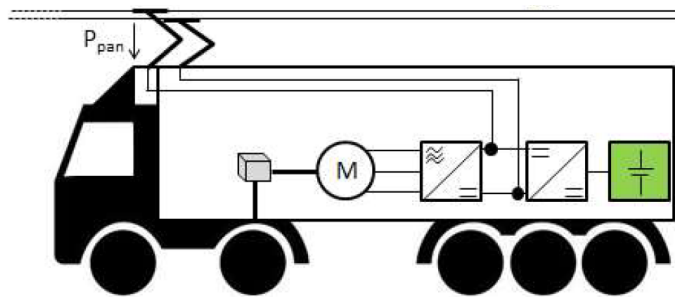


Figura 1.3. Esquema de un sistema de alimentación por catenaria [9]

Las subestaciones de tracción suelen incluir transformadores y rectificadores no controlados de 6 o 12 pulsos rectificadores a base de diodos, o en algunos casos, un convertidor bidireccional CA-CC. Los convertidores bidireccionales como el de la **Figura 1.3** que aparece entre el motor y el convertidor CC-CC, pueden instalarse como sustitutos o en paralelo a rectificadores para aprovechar la energía regenerada durante los tramos en aquellos tramos de bajada con el objeto de inyectar electricidad de nuevo en la red [8].

1.3 Comparativa y consideraciones

En este apartado se van a comentar algunos criterios a partir de los cuales se puede establecer una comparación entre los distintos métodos de carga para los EV, sobretodo en el caso del vehículo pesado, donde existe un dilema mayor respecto a que sistema utilizar.

En términos de consumo, la opción conductiva es realmente competitiva ya que incluso en algún tipo de conexiones como la catenaria continua puede llegar a reducir el consumo

ligeramente respecto a la solución de la carga estática. En el siguiente **Gráfico 1.1**, podemos observar esta ligera diferencia y la gran ventaja respecto al camión propulsado por combustible fósil:

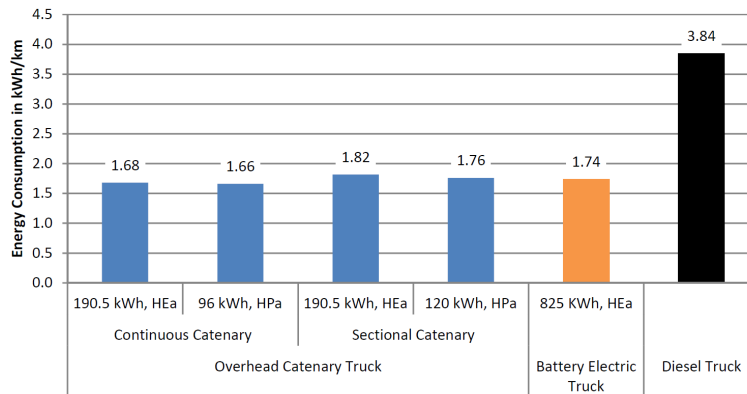


Gráfico 1.1. Comparativa de consumo entre los distintos modos de propulsión [9].

En cuestión de peso del vehículo, el método de carga tiene una implicación definitiva en el tamaño de las baterías. Tal y como se ha dado a entender en las distintas tecnologías descritas, para la carga estática se requiere almacenar gran cantidad de energía y por lo tanto se necesita un tamaño de batería superior. En cambio, en el uso de carga dinámica la batería no debe guardar tanta energía ya que el suministro es semicontínuo. Seguidamente, en el próximo **Gráfico 1.2** se muestra el efecto del peso de las baterías según la tecnología usada indicada por la franja color salmón, donde se evidencia el peso y correspondiente espacio que se pierde en los HDVs con carga estática:

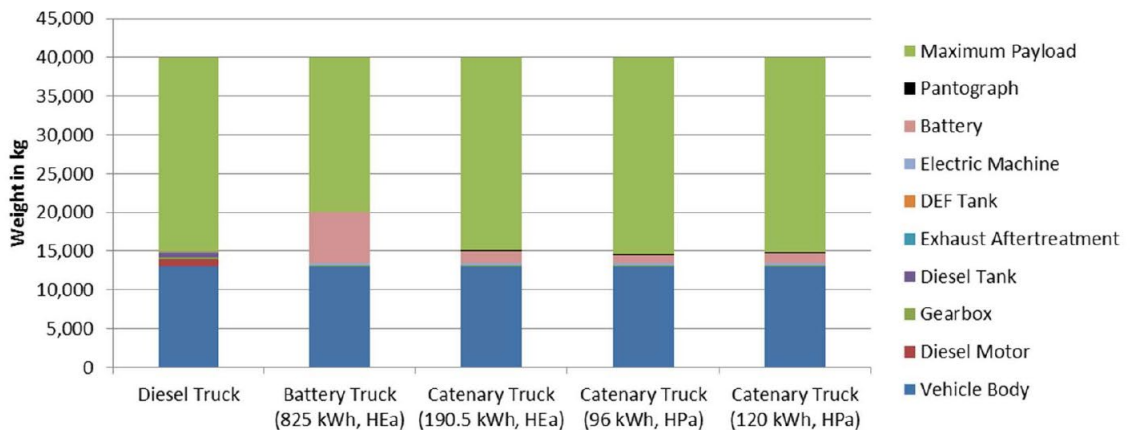


Gráfico 1.2. Desglose del peso de los principales componentes del camión [9].

Después de valorar, el tema del peso y el consumo, se pretende analizar cómo estas dos variables repercuten en el aspecto económico, aspecto fundamental para valorar la instalación de una tecnología u otra.

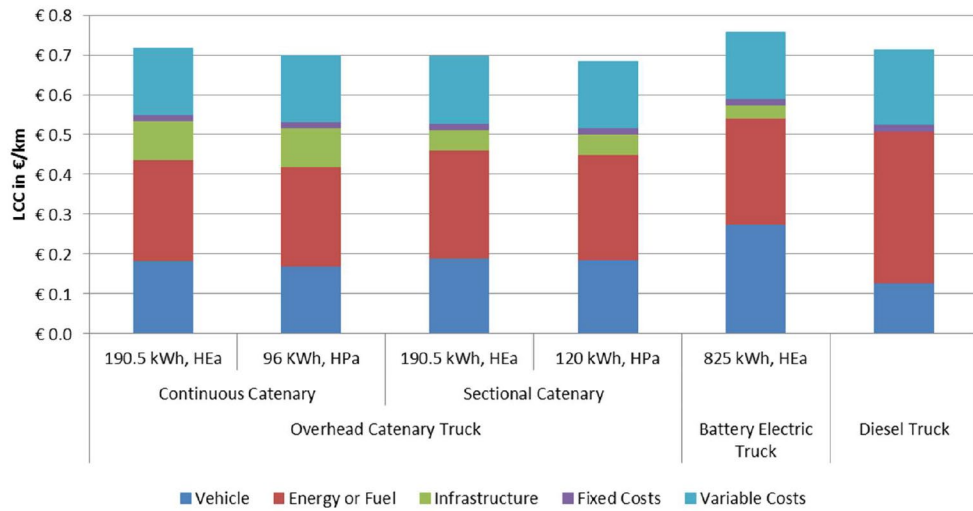


Gráfico 1.3. Comparativa de los costes del ciclo de vida de las diferentes tecnologías [9]

Examinando la anterior **Gráfico 1.3**, se puede comprobar que según la tecnología usada, los costes por cada kilómetro asociados a cada tipo de concepto fluctúan. Por ejemplo, en el aspecto del coste de fabricación del vehículo, en el HDV basada en carga estática se denota claramente un cierto sobrecoste. En cambio, en cuanto a infraestructura la opción de la catenaria continua resulta ser la más costosa. Sin embargo, en conjunto y siguiendo el criterio del coste total asociado al ciclo de vida, se puede denotar ligeramente que la alternativa de la carga estática acaba siendo la menos rentable. Por este motivo, se están empleando recursos en investigar y realizar pruebas piloto en pequeños tramos para la solución del vehículo pesado en catenaria, en detrimento del vehículo pesado propulsado con diésel.

2. Análisis preliminar

2.1 Introducción

En el capítulo anterior se han descrito los tres sistemas que dominan el panorama en cuanto a recarga de EV: estático, dinámico y conductivo. También, se ha hecho especial énfasis a las tecnologías que hacen posible el propio funcionamiento. En cambio, en este segundo capítulo se pretende aterrizar todos estos conceptos teóricos y empezar a ponerlos en práctica en el proyecto actual concretando aspectos desde la ubicación del estudio, pasando por el contexto de la red eléctrica de Noruega en el emplazamiento escogido y finalmente la tecnología elegida por el estudio junto a su estado actual.

2.2 Ubicación del estudio

De acuerdo con las fases establecidas en la introducción del proyecto, se definió que el estudio se va a realizar en Noruega ya que el país escandinavo es el referente en temas de electrificación a autopistas para el consumo energético de EVs. Se dispone de considerada documentación y publicaciones al respecto, así como numerosas bases de datos de distinguida fiabilidad sobre el tráfico de sus carreteras y autopistas, datos a partir de los cuales se puede empezar a plantear el estudio.

El relieve tan accidentado y montañoso en el interior de Noruega provoca que las grandes arterias del país discurren a través de sus costas bañadas por el Océano Atlántico. Este panorama obliga a los noruegos a concentrar el transporte de vehículos interurbano en las autopistas costeras tal y como se muestra en la siguiente **Figura 2.1** [10]:

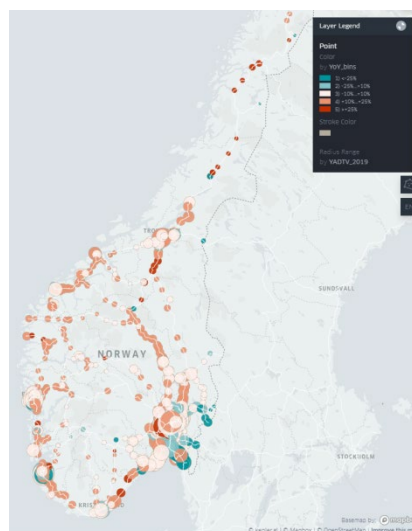


Figura 2.1. Mapa de la intensidad del tráfico en Noruega [10]

Delante de la gran concentración del tráfico en las autopistas de la costa, las cuales pasan por las ciudades más pobladas y relevantes social y económicamente como Oslo, Stavanger, Bergen o Trondheim, parece lógico que se elija para el estudio en cuestión una de ellas.

Finalmente, después de analizar detenidamente la intensidad del tráfico mediante la **Figura 2.1** y con el objeto de ampliar el estudio realizado en [11], se pretende dar continuidad a la electrificación parcial de la E18 tomando como segmento principal a análisis dos tramos de las siguientes autopistas: la E18 y la E39. Ambos tramos unen las ciudades de Oslo, la capital, y Stavanger por la zona sur del país separadas por 551 km. El primer tramo es el correspondiente a la E18, el cual va desde Oslo hasta la poblada ciudad de Kristiansand, uno de los puntos más meridionales del país noruego. En cuanto al segundo tramo, perteneciente a la E39, parte desde donde acaba la E18 y rodea la costa sur hasta llegar a la ciudad de Stavanger. Tal y como se muestra en la próxima **Figura 2.2** [12] se distinguen ambos segmentos comentados:

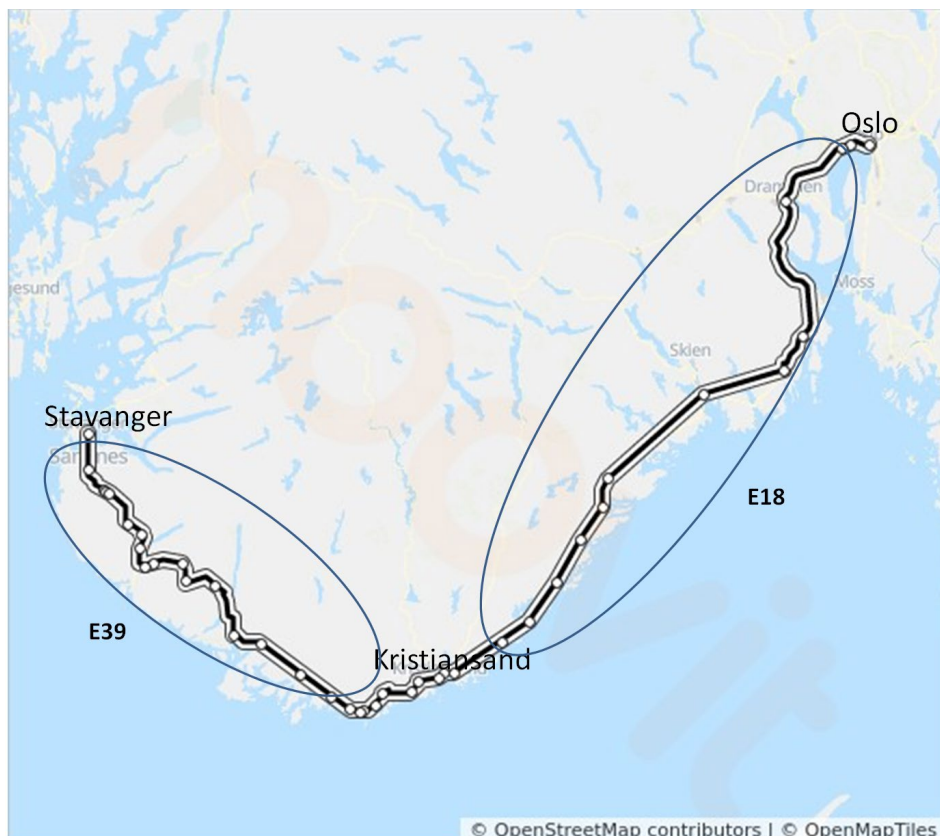


Figura 2.2. Segmento elegido para el proyecto

El tráfico de la ruta escogida, aparte de ser intenso es estacional debido principalmente al turismo, sobre todo en verano, por sus buenas temperaturas y clima suave. Sin embargo, existe también un cierto pico de tráfico en invierno, aunque bastante menor que en verano, ya que a causa de su proximidad al mar, las temperaturas no son demasiado extremas y propician desplazamientos de vehículos para aquellos que buscan practicar deportes de invierno es para esquiar. Esta es la razón por la que el flujo de tráfico se va a tener en especial consideración estas dos etapas del año por la previsible alta demanda energética de abastecer los EVs.

2.3 Abastecimiento de la red eléctrica

En el presente apartado se darán algunas pinceladas de la red eléctrica noruega y que factores pueden tener una implicación en el suministro del sistema de electrificación escogido.

2.3.1 Sistema eléctrico

En relación al panorama del sistema eléctrico, Noruega puede presumir de tener la mayor proporción de electricidad producida a partir de fuentes renovables de Europa, y por lo tanto las emisiones más bajas del sector eléctrico. Gracias a su potente hidrografía, el país escandinavo ha decidido por apostar en centrales hidroeléctricas, obteniendo la mitad de la capacidad de los embalses hidroeléctricos de Europa [13] (**Figura 2.3**). De este modo se aporta enorme flexibilidad a la producción, debido al gran nivel de reacción que tienen las plantas hidroeléctricas para cubrir cualquier pico de demanda no planificado, sobre todo principalmente a la explotación del sector manufacturero y al uso generalizado de la electricidad para la calefacción.

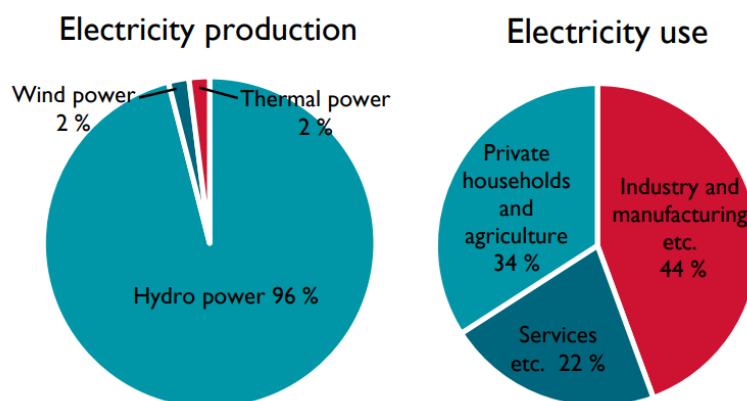


Figura 2.3. Distribución del sistema eléctrico [13]

Actualmente, Noruega está desarrollando más capacidad de producción de energía renovable para no tener una dependencia completa de la energía hidroeléctrica y poder así variar su mix energético. En estos momentos, si bien es cierto que la energía eólica representa una parte relativamente modesta de la capacidad de producción, el plan de futuro que contempla el gobierno Noruego es invertir en parques eólicos que puedan sumar a la potencia instalada actual de 37.732 [MW] (en 2021) [14].

En estos últimos años, tal y como se muestra en la siguiente **Gráfico 2.1** [14] se valida que el sistema eléctrico noruego está capacitado para soportar incrementos de demanda a la red. Por lo que la tendencia marca en el mismo gráfico, en los próximos años se puede prever fácilmente que la creciente producción eléctrica será capaz de absorber la instalación que propone el mismo estudio en cuestión.

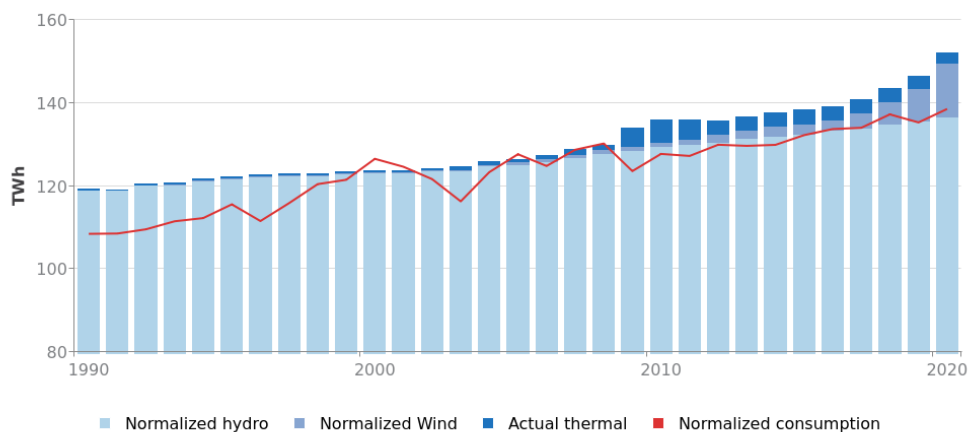


Gráfico 2.1. Evolución de la producción eléctrica y el consumo de la red eléctrica de Noruega

2.3.2 Infraestructura actual

La red eléctrica noruega consta de tres niveles: la red de transmisión (operada por Statnett), la red regional y la red de distribución. Tanto la red regional como la de distribución se consideran sistemas de distribución, según la definición de la legislación de la UE.

La red de transmisión tiene como finalidad conectar a los productores con los consumidores a alta tensión, normalmente de 300 a 420 [kV], sin embargo en algunas partes del país también hay líneas de 132 [kV]. Estos niveles de voltaje tan elevados hacen disminuir el corriente i por tanto se minimizan las pérdidas por Efecto Joule. De este modo, se garantiza un suministro estable evitando posibles picos que puedan alterar la red y su frecuencia (50 Hz). En la siguiente **Figura 2.4** [15], se muestra la red de transmisión de Noruega, donde cabe destacar que se utilizan ramales de transmisión a lo largo de la ruta seleccionada entre Oslo y Stavanger, lo cual, hace posible el abastecimiento eléctrico a los tramos a electrificar.

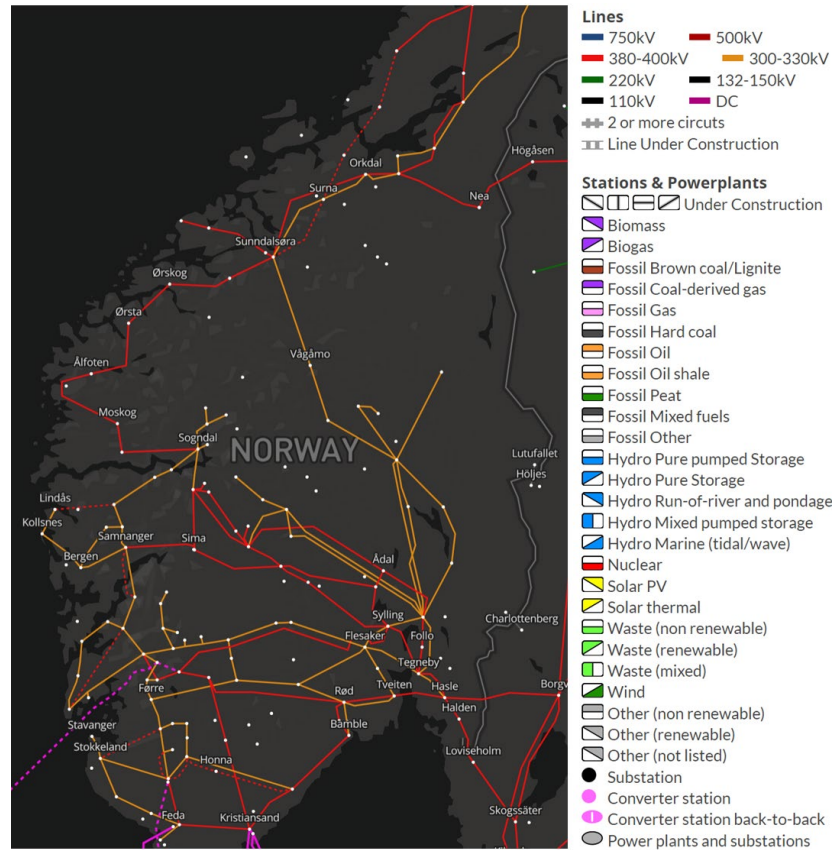


Figura 2.4. Mapa de la red de transmisión en Noruega

En el siguiente eslabón de la cadena aparece la red regional, cuya función es enlazar la red de transporte con la de distribución. En el país escandinavo, dicha tipología de red transporta una tensión de 33 a 132 [kV].

Sin embargo, la red que tiene más influencia en el proyecto que se quiere desarrollar es la red de distribución, formada por las redes eléctricas locales que generalmente suministran energía a los usuarios finales. Esta lleva una tensión de hasta 22 [kV], dividida en segmentos de alta y baja tensión. La línea intermedia entre ambos segmentos es de 1 [kV] [16], llamada media tensión, cuyo papel es fundamental para el abastecimiento del sistema de electrificación que se desea proyectar.

2.4 Tecnología de electrificación

Finalmente, en este último apartado del análisis preliminar se tiene como objetivo principal determinar que tecnologías de las presentadas previamente va a ser la finalmente empleada en el proyecto actual. Además se va a analizar en qué punto de madurez se encuentra actualmente la propia tecnología y si ya existen ciertos tramos electrificados desde Oslo a Stavanger por los tramos de autopista E18 y E39.

2.4.1 Situación actual

A estas alturas de 2022, el país escandinavo presenta un panorama muy favorable para la electrificación de sus carreteras debido a su gran porcentaje de vehículos matriculados del 75% [3]. Concretamente, en estos últimos años se han proyectado electrificar algunos tramos de la E39 mediante tecnología dinámica. Se estima que si se siguiera con esta política y se electrificaran tan solo un 5% de las carreteras, los vehículos de mercancías verían reducidas sus emisiones a la mitad [17]. Por lo que se puede considerar que Noruega ya está en camino de realizar pruebas piloto, así como lo han hecho en otros determinados tramos de Europa o Norte-América: Suecia (2 km), California (1,6 km), tres pruebas de campo en Alemania con el ELISA piloto (5 km) y, por último, una infraestructura de catenaria que se construirá en el norte de Italia (6 km a corto plazo y hasta 62 km) con la integración de paneles fotovoltaicos a lo largo de la carretera [4].

Sin embargo, si bien es cierto que la tecnología basada en inducción y la catenaria son tecnologías crecientes y con posibilidades que se materialice en las carreteras noruegas, la realidad es bien distinta. La tecnología que domina la red de carreteras actual es la carga en estático con más de 3.400 estaciones de carga y con un total de 22.300 puntos de carga públicos [18]. Entrando en detalle para el caso del recorrido escogido comprendido entre Oslo y Stavanger de las autopistas E18 y la E39, se concentran numerosas estaciones de carga tal y como se muestra en la **Figura 2.5**:

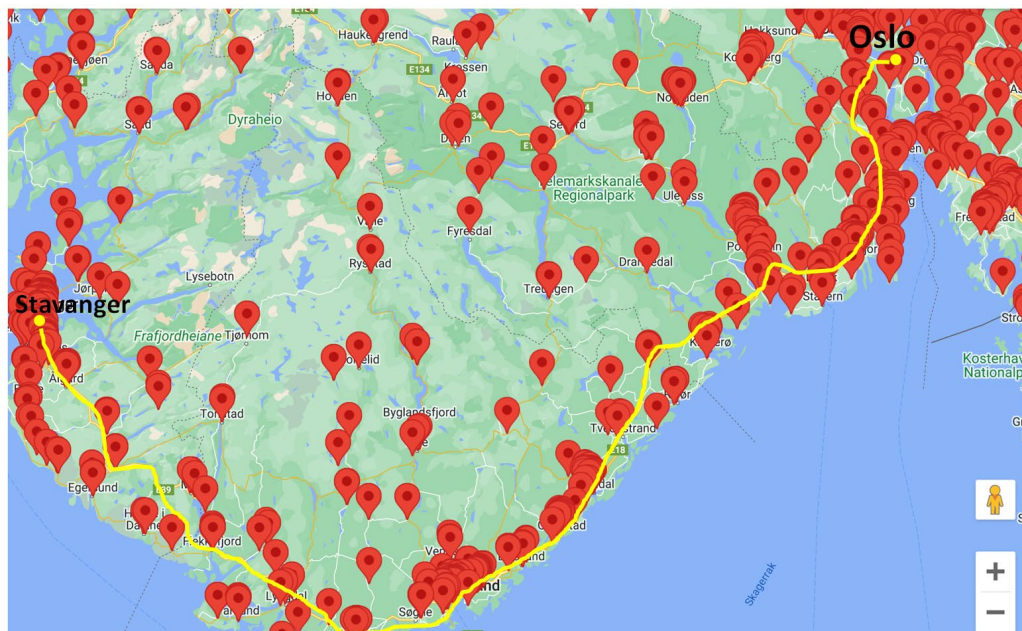


Figura 2.5. Estaciones de carga cercanas a la E18 y a la E39 [18].

2.4.2 Tecnología escogida

Delante de este paisaje tan halagüeño para la electrificación de los tramos elegidos solamente falta decantarse por una de las tecnologías descritas de cara a la proyección del estudio en cuestión. Finalmente, después de observar el gran número de puntos de carga existentes en la **Figura 2.5**, a lo largo del recorrido estimado, lo cual permitirá cubrir gran parte de la demanda prevista en 2025 y la reducción del coste asociado a la capacidad de aprovechar la existente infraestructura, invita claramente a escoger la tecnología de carga estática.

En términos del coste de electrificación con tecnología dinámica, las autopistas E18 y E39 a causa de su larga distancia abarcada requieren de una considerable inversión, como el de cualquier electrificación de carreteras [19]. Sin embargo, al reducir la necesidad de nuevas infraestructuras de transmisión y distribución (como el cableado y la necesidad de nuevas subestaciones para manejar el flujo de energía adicional), el coste puede reducirse sensiblemente, como es el caso de las estaciones de carga rápida.

Por estos motivos, teniendo en cuenta la gran infraestructura ya instalada y por ende, el coste, se ha optado por considerar la carga en estático como la elegida. Además, en cuanto a la realización del estudio, simplifica notoriamente los cálculos ya que con la tecnología escogida, la metodología de cálculo para medir el consumo resulta ser más sencilla. De este modo, es posible saber cuánto que cantidad de potencia se suministra al vehículo y por cuanto tiempo, planteándose así hipótesis más fiables a la realidad.

3. Diseño del modelo de demanda

3.1 Modelo de datos

Desde un principio, la finalidad primordial del proyecto ha sido planificar la electrificación del tramo desde Oslo a Stavanger. Para ello, se requiere obtener el grado de uso de los vehículos eléctricos para dichas autopistas. Así, se podrá establecer un consumo energético asociado a las estaciones de carga y también de esta manera se va a poder modelizar la demanda para los siguientes años hasta 2025, fecha en la cual se cree que el *share* del LDV va a rondar el 100%.

Para conseguir determinado propósito, con el objeto de establecer un modelo de simulación basado en datos que sea capaz de calcular la demanda energética de las autopistas E18 y E39, se requiere de unos datos *Input* para conseguir el *Output* esperado en forma de energía o potencia, el cual permita determinar la cantidad de potencia a instalar en la fecha señalada.

3.1.1 Input data

Antes de empezar a recopilar los datos necesarios, resulta imprescindible establecer una metodología bien clara y ordenada con tal de procesarlos sin problema en el modelo de simulación de demanda. Para las distintas tipologías de datos que se van a considerar; se van a exportar los datos necesarios, se van a limpiar y van a ser ordenados en *datasheets* para su posterior procesamiento en un fichero Excel.

En primer lugar e imprescindible, el primer tipo de dato que se va a tratar va ser el tráfico. Es decir, se pretende obtener la cantidad de coches que pasan por diferentes puntos de la ruta Oslo – Stavanger para conocer en qué grado es utilizada las estaciones de carga existentes. Para ello, se va a trabajar con la API *Trafikkdata* [20], aplicación a través de la cual se va a poder extraer la información sobre la cantidad de vehículos, tanto HDV como LDV, que pasan por determinados puntos de la ruta estimada en un tiempo determinado. Cada observación del *datasheet* 'Tráfico' representa en una hora determinada, la cantidad de vehículos que pasan por cada uno de los puntos de control considerados para el modelo. Esto supone que habrá tantas columnas como puntos de control tenidos en cuenta:

| | OSLO | LYSAKERLOKKET RAMPE | GYSSESTAD | BOLSTAD TUNNEL | HANEKLEIV SYD |
|------------------------|------|---------------------|-----------|----------------|---------------|
| 2022-01-01T00:00+01:00 | 0 | 334 | 557 | 91 | 97 |
| 2022-01-01T01:00+01:00 | 0 | 621 | 303 | 149 | 155 |
| 2022-01-01T02:00+01:00 | 0 | 399 | 112 | 66 | 70 |
| 2022-01-01T03:00+01:00 | 0 | 242 | 56 | 36 | 43 |
| 2022-01-01T04:00+01:00 | 0 | 151 | 36 | 18 | 20 |

Tabla 3.1. Ejemplo de un fragmento del *datasheet* 'Tráfico'

En segundo lugar y enlazando con el primer punto se va a tener en cuenta un segundo *datasheet* que merece también especial mención: los puntos de control. Este *datasheet* indica la posición relativa de los puntos de tráfico contemplados en la exportación de los datos de tráfico empezando por Oslo y acabando en Stavanger. El número de puntos o nodos tenidos en cuenta para el estudio no se ha basado en un criterio arbitrario, sino que mediante la API *Trafikkdata*, se han seleccionado aquellos nodos en la misma autopista sin considerar los colindantes ni en los carriles de aceleración o deceleración. También, se ha procurado elegir puntos que garanticen de una cierta calidad del dato, ya que en algunas ocasiones se daba la situación donde algún nodo no tenía registrado el tráfico para todas las horas consideradas:

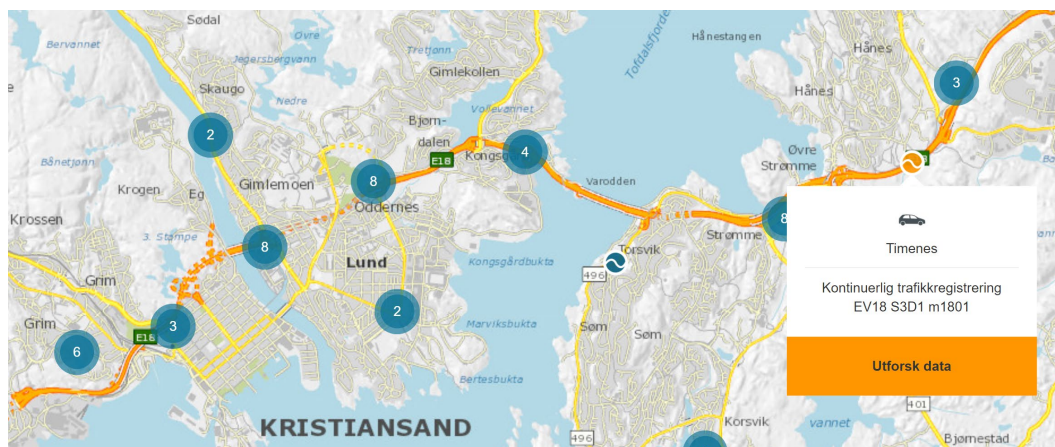


Figura 3.1. Ejemplo de la selección del tráfico de un nodo en la autopista E18 [20]

En definitiva, el *datasheet* que recoge la posición relativa se hace llamar 'Nodos'. Una vez, seleccionados estos 30 nodos para el estudio, mediante la herramienta de navegación Google Maps [21], se ha ido calculando la distancia relativa (en km) de cada uno de ellos y sistemáticamente se ha ido organizando el mencionado *datasheet* 'Nodos' (**Tabla 3.2**).

| Nodo | Distancia [km] |
|---------------------|----------------|
| OSLO | 0 |
| LYSAKERLOKKET RAMPE | 8 |
| GYSSESTAD | 14 |
| BOLSTAD TUNNEL | 61 |
| HANEKLEIV SYD | 66 |

Tabla 3.2. Ejemplo de un fragmento del *datasheet* 'Nodos'

Finalmente, la última tabla de datos que se va a contemplar será la relativa a las estaciones, conocida como 'Estaciones'. Para este último *datasheet*, solamente se deben incluir aquellas estaciones de carga con cargadores rápidos que estén en la misma autopista. Es decir, en la **Figura 2.5**, aparecen un cierto número de estaciones de carga a lo largo de la ruta, sin embargo, muchos de ellos son de poca potencia o se encuentran a una notoria distancia de la autopista difícil de asumir por el conductor a la hora de realizar la carga o incluso no están

repartidas de forma equidistante a lo largo de la ruta. Por lo tanto, solo se han tenido en cuenta aquellas estaciones de carga que cumplan los requisitos previamente expuestos. Para el caso de vehículos ligeros, después de realizar el filtro mencionado, se contabilizado el total de 10 estaciones. Como se muestra en la siguiente **Figura 3.2** [20], se observan las 10 estaciones repartidas de forma bastante uniforme. También, resulta oportuno comentar que para este caso del vehículo LDV, como se va a suponer que dicha tipología de vehículo solamente va a recorrer entre 20 y 120 km desde que entra hasta que sale de la E18/E39 en un desplazamiento diario como por ejemplo ir a trabajar, se ha procurado seleccionar aquellas estaciones que ofrezcan distancias relativas entre ellas comprendidas en este rango:

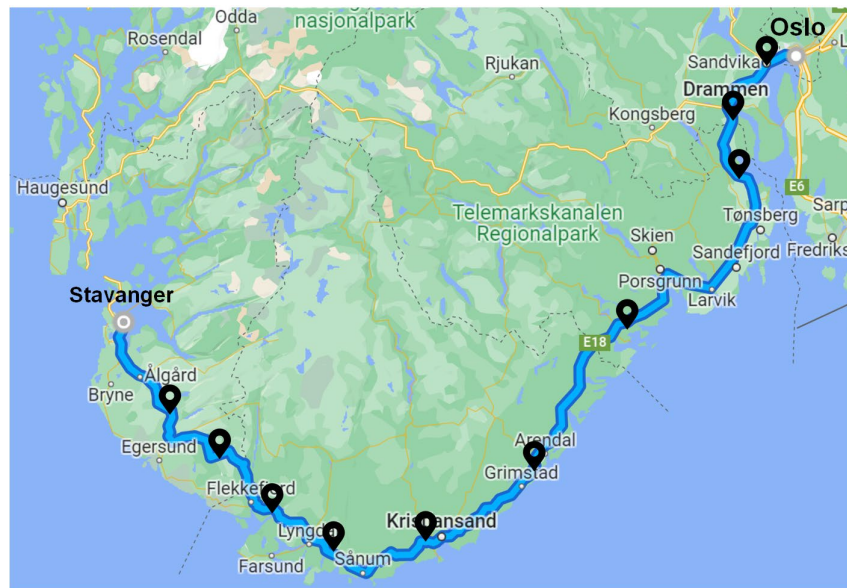


Figura 3.2. Ubicación de las estaciones de carga para vehículos LDV

A continuación se muestra el *datasheet* 'Estaciones' (**Tabla 3.3**) para los vehículos de tipo LDV:

| Estaciones | Distancia [km] |
|------------|----------------|
| 1 | 16 |
| 2 | 41 |
| 3 | 71 |
| 4 | 161 |
| 5 | 266 |
| 6 | 318 |
| 7 | 370 |
| 8 | 400 |
| 9 | 460 |
| 10 | 509 |

Tabla 3.3. Datasheet 'Estaciones' para vehículos LDV

Dado que la naturaleza de los vehículos HDV es bien distinta a la de los LDV, donde las distancias que se recorren son mayores, no se es necesario considerar la cantidad de 10 estaciones ya que el rango de distancia estimado para el HDV será entre 125 y 500 km, desde que entra a la autopista hasta que sale, solamente se han considerado 6 estaciones:

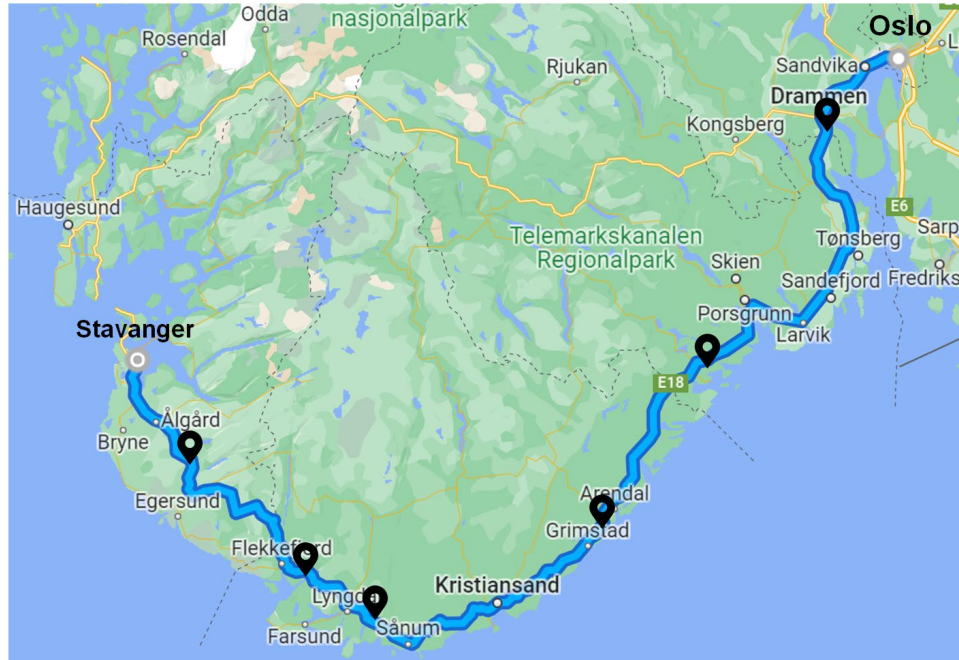


Figura 3.3. Ubicación de las estaciones de carga para vehículos HDV

Seguidamente, se muestra el *datasheet* 'Estaciones' para los vehículos de tipo HDV (**Tabla 3.4**):

| Estaciones | Distancia [km] |
|------------|----------------|
| 1 | 41 |
| 2 | 161 |
| 3 | 266 |
| 4 | 370 |
| 5 | 400 |
| 6 | 509 |

Tabla 3.4. *Datasheet* 'Estaciones' para vehículos HDV

3.1.2 Output data

Por lo que hace a los resultados a obtener, se quiere tabular la energía consumida por estación y hora del día en kWh. De este modo, se puede llegar a graficar la evolución de la demanda para cada una de las estaciones y así de este modo observar en que tramo de autopistas se producen los picos de demanda para planificar adecuadamente la instalación de las futuras instalaciones. Un ejemplo de dicho *datasheet output* llamado *e_estaciones* se puede visualizar a continuación:

| stations | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 2022-05-31 22:00:00+00:00 | 422.798822 | 3066.218141 | 2523.121906 | 811.399330 | 1168.049172 | 1193.904910 | 1157.659493 | 1003.481926 | 1123.377383 | 1204.655976 |
| 2022-05-31 23:00:00+00:00 | 176.825413 | 1318.752532 | 1204.860314 | 123.991671 | 619.444811 | 1118.176348 | 509.802987 | 483.075200 | 748.253239 | 1225.363819 |
| 2022-06-01 00:00:00+00:00 | 127.183307 | 989.858454 | 886.991813 | 384.073841 | 331.584035 | 432.056808 | 171.599924 | 136.904423 | 282.724552 | 453.593125 |
| 2022-06-01 01:00:00+00:00 | 196.466693 | 950.567075 | 808.417626 | 128.447694 | 320.765111 | 365.147183 | 208.410000 | 276.888851 | 234.513246 | 362.117336 |
| 2022-06-01 02:00:00+00:00 | 196.313836 | 1640.974668 | 1451.258529 | 637.732166 | 687.034920 | 504.238495 | 654.404692 | 835.979481 | 468.751933 | 442.606798 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2022-08-31 17:00:00+00:00 | 4737.103183 | 24939.228150 | 20344.472966 | 6082.800577 | 14260.569844 | 17811.781468 | 11134.435584 | 12476.531932 | 4445.478658 | 2140.248744 |
| 2022-08-31 18:00:00+00:00 | 3077.782083 | 19915.642755 | 14100.922723 | 3544.897701 | 12021.006357 | 13344.478607 | 7961.605860 | 9491.184554 | 4495.083406 | 2336.687572 |
| 2022-08-31 19:00:00+00:00 | 2566.012545 | 15633.398728 | 11343.889511 | 2361.499523 | 8231.020098 | 10761.730256 | 5841.832663 | 6146.944593 | 2363.851995 | 1814.838133 |
| 2022-08-31 20:00:00+00:00 | 1897.440602 | 11909.666753 | 8034.254517 | 1750.098981 | 5887.317662 | 7949.416956 | 4121.678270 | 4474.793647 | 2099.488317 | 1250.063369 |

Tabla 3.5. Ejemplo de datasheet del consumo energético horario y por estación en kWh 'e_estaciones'

En paralelo, también resulta interesante poder obtener los tiempos de carga de todos los vehículos que han cargado en las distintas estaciones en cada hora considerada y almacenarlos en un *datasheet* llamado *t_charged*. Por lo que cada celda almacena una lista de tiempos de carga expresada en minutos en la estación en cuestión:

| stations | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| 2022-05-31 22:00:00+00:00 | [16.571089072850572, 20.52657317521045, 1.8189... | [11.98291084843507, 19.765568136307046, 13.167... | [12.023319760793592, 20.522854031672203, 18.57... | [17.374612904743525, 22.973028707692748, 9.884... | [4.357574221367259, 13.895676401057944, 12.993... | [20.83254691849194, 18.57285153555258, 19.5088... |
| 2022-05-31 23:00:00+00:00 | [15.158457502345078, 22.648609350644485, 6.728... | [10.29455074800751, 20.268793515644667, 18.425... | [19.511799858419433, 16.187861887133288, 19.61... | [16.26418066745264, 21.06006966351914, 8.11879... | [21.46495602826181, 16.12186542611154, 17.8546... | [21.30454242307441, 19.805944051515784, 2.5547... |
| 2022-06-01 00:00:00+00:00 | [23.79057167410791, 12.573760942770184, 9.0986... | [16.02828891926871, 19.157173559453295, 20.692... | [16.02526439567837, 16.42028250120215, 22.226... | [11.182583930490464, 12.296495680444725, 10.37... | [14.444591908693141, 20.09989374160816, 11.112... | [20.307854507284404, 21.683214157019993, 16.26... |
| 2022-06-01 01:00:00+00:00 | [11.294861202377504, 17.46791149929334, 11.890... | [21.418319773395247, 14.297627414315572, 20.72... | [17.974105982596274, 11.948940102540396, 13.88... | [19.687759401779253, 16.561684755670758, 12.83... | [14.646602915592803, 23.17375012985509, 19.741... | [8.096488969991881, 11.627977557235004, 18.794... |
| 2022-06-01 02:00:00+00:00 | [7.425098541517764, 15.161162654948239, 8.9497... | [20.570735170834897, 7.496353289564647, 18.895... | [14.655822376153836, 13.931117337077234, 15.27... | [11.73747258012692, 19.01318016392434, 12.9560... | [13.215271817661609, 16.234017115436483, 7.049... | [11.011126310761611, 2.3488791688217456, 4.636... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2022-08-31 17:00:00+00:00 | [9.567911021048644, 20.0685770097232, 19.27099... | [13.776162878452629, 8.382977731433867, 20.757... | [21.824625796776157, 12.876856452098323, 16.35... | [17.14722496064568, 22.96885659823589, 16.0956... | [18.665869580345504, 8.872424700287961, 6.7606... | [17.56361896195306, 16.006948824609694, 22.917... |
| 2022-08-31 18:00:00+00:00 | [13.882254060425105, 19.376352247444565, 17.99... | [11.53926973074373, 19.466277119135285, 19.682... | [12.61445102465122, 17.85482205372312, 21.3429... | [17.868130920799466, 16.260829908488127, 22.33... | [15.633835522662665, 17.325660920505914, 14.76... | [14.319338533836815, 20.258958055147307, 19.92... |
| 2022-08-31 19:00:00+00:00 | [20.05872542547461, 19.872587938054497, 18.834... | [18.853756717842387, 21.786107681602836, 21.59... | [15.488667365102678, 17.250758567437806, 22.07... | [7.362244103796018, 23.108855289480825, 15.656... | [17.199240025267386, 15.550896842449447, 17.86... | [16.020121988451763, 13.657408254757213, 14.12... |
| 2022-08-31 20:00:00+00:00 | [17.059011241508262, 15.238348587411492, 16.99... | [8.528385621906175, 22.5733238534047, 16.49147... | [16.299157955886287, 12.012860072339857, 19.12... | [23.512369005043464, 16.094904820257295, 17.04... | [15.492619062345485, 6.01748824349017, 18.4492... | [18.585949124969073, 19.52135810166446, 15.865... |
| 2022-08-31 21:00:00+00:00 | [17.875896115517723, 13.941354399999573, 9.607... | [14.303170211873624, 16.39702651898788, 16.439... | [18.99321527648549, 20.560983795130625, 15.423... | [14.511394167310907, 17.561706974219693, 6.985... | [12.42724442588356, 15.636158857596552, 19.286... | [15.680901812507939, 21.116321959752696, 15.62... |

Tabla 3.6. Ejemplo de datasheet resultante del tiempo de carga por vehículo y por estación en minutos 't_carga'



3.2 Simplificaciones y consideraciones

Con el objeto de diseñar un modelo de demanda energética de forma simple pero eficaz y evitando entrar en situaciones particulares, ha sido necesario hacerse valer de una serie de consideraciones que simplifiquen el propio modelo y por ende el estudio. Por esta razón a continuación, se van a recoger una serie de hipótesis que se han contemplado a la hora de diseñar el modelo:

Antes de empezar con la definición de la metodología es necesario comentar que se va a suponer que, en cada punto de control pueden entrar y salir vehículos. Es decir, para empezar a tratar el modelo resulta imprescindible comprender que la posible carga de un vehículo en la autopista se activa en el momento que entra un vehículo en la autopista y se desactiva cuando este sale. Sin embargo, disponiendo del *datasheet* 'Tráfico', se tiene que un número de vehículos pasan por un determinado nodo, pero habrá un porcentaje de vehículos de entrada a la autopista antes del siguiente nodo y otro porcentaje respecto al total de vehículos de salida antes del siguiente punto de control. Por lo que, resulta necesario calcular ambos porcentajes para determinar el verdadero uso de la carretera. En la siguiente **Figura 3.4**, se muestra el dilema a resolver:

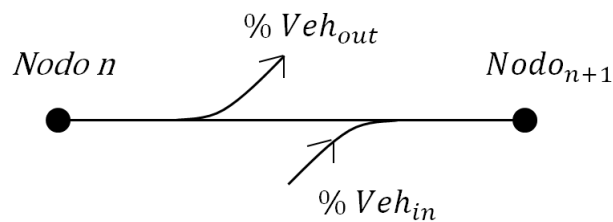


Figura 3.4. Esquema representativo de la hipótesis del porcentaje de entrada y salida de vehículos

Por lo tanto, detectada esta necesidad de conocer ambos porcentajes medios tanto para las entradas como las salidas, se aplica el siguiente procedimiento [11] representado por la **Figura 3.5**:

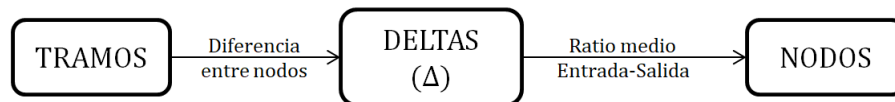


Figura 3.5 Esquema representativo del procedimiento a realizar para obtener el porcentaje de entrada-salida

En primer lugar, partiendo del conocimiento del flujo de vehículos en el *Nodo n* y *Nodo n+1*, realizando una simple resta se define una nueva variable llamada Delta (Δ):

$$\Delta_n = Tramo_n - Tramo_{n+1} \quad (1)$$

En segundo lugar, dado que de la **Figura 3.4** solamente se tienen 2 de los 4 datos ya que el tráfico de entrada y de salida en principio sigue siendo aleatorio, hace falta conocer las variables Veh_{out} y Veh_{in} . Para ello, se ha procedido de tal manera que en la misma API de *Trafikkdata*, se han exportado la información de los nodos a las salidas de las autopistas E18 y E39 obteniendo un *datasheet* del tipo 'Tráfico', por lo tanto en este momento ya se conoce la variable Veh_{out} . A partir de ahora se simplifica significativamente el cálculo ya que Veh_{in} se puede obtener de la siguiente manera:

$$Veh_{in} = Veh_{out} - \Delta_n \quad (2)$$

En tercer lugar, una vez conocidas todas las variables presentadas es cuestión de crear los ratios de entrada y salida del siguiente modo:

$$\% Veh_{in} = \frac{Veh_{in}}{\Delta_n} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\% Veh_{out} = \frac{Veh_{out}}{\Delta_n} \cdot 100 \quad (4)$$

Finalmente, una vez se tienen estos ratios para cada uno de los nodos y a cada hora de las consideradas, se realiza una media aritmética de cada uno generando los dos ratios resultantes:

$$\overline{\% Veh_{in}} = \frac{\sum_{k=1}^N \% Veh_{in_n}}{N} = 32 \% \quad (5)$$

$$\overline{\% Veh_{out}} = \frac{\sum_{k=1}^N \% Veh_{out_n}}{N} = 68 \% \quad (6)$$

Si bien es cierto que los porcentajes obtenidos no son previsiblemente los esperados, se entiende que quizás debido a que los datos del *datasheet* de la variable Veh_{out} recogidos en *Trafikkdata* no representan verazmente el flujo de vehículos de salida y por lo tanto el de vehículos de entrada (expresión (2)), con el objeto de simplificar aún más los cálculos al modelo de demanda se van a fijar estos ratios a 50% y 50%. Con tal de validar dicha hipótesis, se ha comparado un valor obtenido por el algoritmo mediante esta suposición y un valor real del conjunto de datos. Los valores resultaron ser similares, por lo que se puede validar la hipótesis contemplada para el análisis.

Después de contemplar esta simplificación, resulta oportuno hacer énfasis en una segunda consideración en relación al sentido del vehículo y la distancia que va a recorrer. Dado que no es posible conocer la intención de cada conductor se va asignar de forma aleatoria pero dentro de unos parámetros. En definitiva, a los vehículos se les va asignar un sentido (Oslo o

bien Stavanger) y la distancia l_t que van a recorrer. Los vehículos LDV van a recorrer entre 20 y 120 km, mientras que los vehículos HDV van a conducir entre 125 y 500 km.

Por último, la consideración que merece especial mención es aquella en referencia a la carga de la batería. El estado de carga inicial SoC va a tener un valor asignado en función de la hora de inicio del trayecto del vehículo. En caso que el vehículo inicie su trayecto entre las 6h y las 12h, el estado de carga asignado será superior, entre 60% y el 80%, mientras que si el vehículo es evaluado en las horas restantes del día, empezará con un estado de carga inferior, entre 30% y 50% [11]. El porqué de estos valores reside en que cuando se va a trabajar se entiende que el EV ha estado cargando toda la noche y posee un valor alto de la capacidad, mientras que aquel usuario cuando vuelve del trabajo dispone de un nivel bastante inferior. Cabe destacar que las estaciones de carga no contemplan un algoritmo de colas, es decir, el vehículo en cuanto llega realiza la recarga inmediatamente independientemente de los vehículos que estén cargando en aquella misma hora. Por este motivo, siendo una limitación del modelo, se tendrá en cuenta en siguientes pasos.

También, resulta interesante comentar que la capacidad de la batería del VE (en kWh), el consumo por km $f_e[\frac{km}{kWh}]$, la velocidad del vehículo $v[\frac{km}{h}]$, el *share* del EV $p_{ev}[-]$ o también llamada la penetración del tipo de vehículo eléctrico [3] [22] y finalmente la potencia del cargador rápido $p[kW]$ son conocidos [4]:

| Variable | Valor de las variables | | |
|-----------------------|------------------------|-----------|-----------|
| | Tiempo (h) | LDV | HDV |
| $l_t(km)$ | | 25/125 | 125/500 |
| <i>sentido</i> | | -1/+1 | -1/+1 |
| SoC | 0 – 12 | 0.6 – 0.8 | 0.6 – 0.8 |
| | 12 – 24 | 0.3 – 0.5 | 0.3 – 0.5 |
| $E_{bat}(kWh)$ | | 15/25 | 54/180 |
| $f_e[\frac{km}{kWh}]$ | | 5 | 0.45 |
| $p[kW]$ | | 50 | 250 |
| $p_{ev}[-]$ | | 0.78 | 0.15 |
| $v[km/h]$ | | 80 | 90 |

Tabla 3.7. Caracterización de los parámetros energéticos input considerados

3.3 Descripción del modelo de simulación

Tras definir los datos *input* con los *datasheets* presentados en el apartado 3.1.1 junto con los parámetros energéticos mostrados en la anterior **Tabla 3.7**, se está en disposición de empezar a crear el modelo de demanda. Para el caso del análisis en cuestión, se creyó oportuno generar las simulaciones de la demanda energética en las estaciones de carga con un código Python, haciendo uso de las librerías *Pandas* (ideal para trabajar con *dataframes*), *NumPy* (útil con *arrays*) y *Matplotlib* (necesario para graficar los datos *output*). Desde un principio, se tuvo claro que se va iba a estudiar la demanda de los LDV y los HDV por separado, por lo que se van a generar dos modelos para la situación actual de 2022 con los parámetros energéticos pertinentes para cada una de las dos tipologías de movilidad. Seguidamente se muestra un diagrama de flujo con la mecánica del modelo **Figura 3.6**:

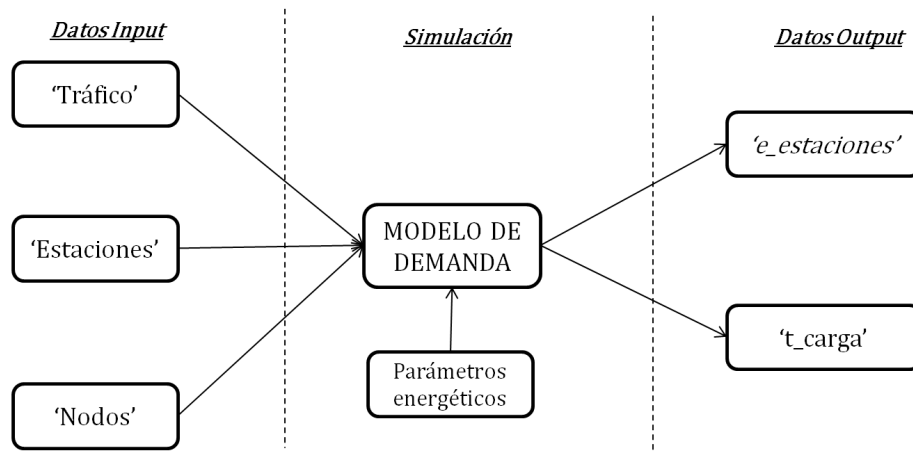


Figura 3.6. Diagrama de flujo representando la mecánica del modelo

Entrando en materia del propio modelo, el código de ambos modelos empieza almacenando los *datasheets* presentados en anterioridad en el apartado 3.1.1 ('Tráfico', 'Estaciones' y 'Nodos') en *dataframes*, tablas con las que se puede trabajar de forma más cómoda con las funciones de la librería *Pandas*. A continuación, se definen las variables de la **Tabla 3.7** con los valores asignados dependiendo de si el modelo es para LDV o HDV.

Seguidamente, es necesario tratar el *dataframe* 'Tráfico' para transformarlo en el *dataframe* *nodes_in*, el cual guarda la información de los vehículos que entran en la autopista, aplicando el ratio de entrada medio $\% Veh_{in} = 0,5$. De este modo, se tienen todos los vehículos que van a entrar a las autopistas E18 y E39 en un nodo concreto y a una hora determinada.

A partir de ahora, el modelo está listo para empezar a calcular el consumo energético de los vehículos que transitan dentro de la autopista en caso que necesiten recargar. Para cumplir con dicho objetivo, se define una función llamada *calcular_energia* que tiene como argumentos el *dataframe nodes_in*, el *dataframe* 'Tráfico', el *dataframe* 'Estaciones', el número de horas del año que va a evaluar, el consumo energético $f_e[\frac{km}{kWh}]$, la potencia del cargador rápido $p[kW]$, la velocidad del vehículo $v[km/h]$ para saber el consumo real y la penetración o *share* $p_{ev}[-]$ que sirve para discernir cuantos de los vehículos que entran en las autopistas del modelo son eléctricos o no.

La función *calcular_energia*, la cual tiene como objetivo calcular los *dataframes output* descritos en el apartado 3.1.2, inicia dos bucles para recorrer todos los nodos y las horas del *dataframe nodes_in*. A partir de aquí se plantean una serie de condiciones que deben de cumplirse para que el vehículo acabe parando en una estación de carga y por ende, que se registre el consumo energético. Por ejemplo, la principal condición que regula si el vehículo necesita recargar en el sistema es el nivel de carga o *SoC* al final de su recorrido. En caso que el valor del *SoC* esté por debajo de un umbral determinado (para el modelo en cuestión $SoC_{lim} = 0.20$), entonces el vehículo tendrá que recargarse para completar su viaje, por el contrario la energía a recargar asignada será igual a 0.

Por otro lado, en el caso hipotético que el vehículo terminara su viaje fuera de los límites de la sección de las autopistas E39 y E18, es decir más allá de Stavanger y Oslo, el *SoC* final se computará teniendo en cuenta solo el trayecto hasta Oslo o Stavanger. Aprovechando que se ha tratado el tema del cálculo del SoC_{final} , he aquí su expresión para toda la cantidad asociada de energía cargada al propio SoC_{final} [11]:

$$E_{cargada}[kWh] = \frac{[l_t]}{f_e} - E_{bat} \cdot (SoC_{inicial} - SoC_{lim}) \quad (7)$$

En esta expresión se muestra $E_{bat}[kWh]$, la capacidad de la batería, l_t o la distancia recorrida por el EV y finalmente SoC_{lim} cuyo valor de carga representa el umbral del 20% previamente mencionado.

A continuación, en el momento que se asigna a cada vehículo la energía que debe recargar, se selecciona a su vez la estación de carga más cercana al punto donde el EV puede llegar con la autonomía disponible hasta alcanzar el valor del SoC_{lim} . Una vez escogida la estación de carga más adecuada, resulta posible asignar al vehículo un determinado tiempo de recarga, el cual se va almacenar en el *dataframe* '*t_carga*' previamente descrito en el apartado 3.1.2.

Del mismo modo, la energía que debe recargarse en cada estación y por cada hora se suma en la celda en cuestión para obtener un valor acumulado, así se conforma el *datasheet* 'e_estaciones' tal y como se detalla en el apartado 3.1.2.

Finalmente, el modelo se encarga de computar datos interesantes de la simulación como por ejemplo el número de vehículos procesados, la cantidad de cuantos de estos son eléctricos e incluso cuantos han acabado cargando. Sin embargo, existen dos parámetros que son claves de cara al estudio de planificación: el consumo energético medio de todas las estaciones definido como $CE_{FCS} \left[\frac{kWh}{h} \right]$ y el ratio base de consumo energético por EV definido como $RBC_{EV} \left[\frac{kWh}{h \cdot EV} \right]$. Las expresiones de estos son las siguientes:

$$CE_{FCS} \left[\frac{kWh}{h} \right] = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^h e_{estaciones_{i,j}}}{h} \quad (8)$$

$$RBC_{EV} \left[\frac{kWh}{h \cdot EV} \right] = CE_{FCS} \cdot \frac{1}{N_{EV}} \quad (9)$$

Donde el CE_{FCS} trata de dar una idea del consumo energético de la actual infraestructura de estaciones de carga por cada hora, mientras que RBC_{EV} simplemente aporta una idea del consumo energético horario normalizado a la unidad de cada EV que hace uso de la infraestructura.

La razón por la cual este último ratio es vital para el estudio es que tal y como se va a detallar a continuación en los siguientes capítulos, ya que dado una cantidad pronosticada en el futuro de EVs que usen la misma infraestructura, será posible calcular el CE_{FCS} futuro siempre bajo la hipótesis de que el flujo de vehículos por los mismos nodos sea parecido. A partir de aquí se va a tener una referencia de la demanda futura a cubrir y solamente hace falta instalar la potencia que reste para conseguir cubrir dicho incremento.

4. Modelo estadístico de regresión

Actualmente, con los cargadores disponibles de las autopistas E39 y E18 se está cubriendo un consumo energético que, en algunas estaciones, en un futuro podría llegar a ser inasumible a causa de los picos de voltaje que puede causar tan alta demanda y por ende la descompensación de la red. Por esta razón, surge la necesidad de realizar una predicción de la demanda energética que se va a tener que satisfacer en un futuro inmediato en función de una serie de variables. La predicción en cuestión es especialmente útil en aquellos tramos críticos de la ruta seleccionada, donde el actual consumo puede repuntar aún más si cabe. A partir de ahí será necesario poner en marcha, el plan de instalación de los cargadores rápidos que suplan el previsible incremento allí donde realmente sea necesario.

Por el motivo argumentado, en este capítulo se van a describir las bases de un modelo estadístico de regresión apoyándose en conceptos estadísticos que quizás distan del sector energético, pero realmente necesarios para predecir el incremento energético deseado.

4.1 Input data

En todo modelo estadístico de regresión, una vez aclarado el objetivo del estudio, el siguiente paso que se presenta es empezar a trabajar con los datos que se van a usar. Por lo que se requiere de nuevo de los servicios de la API *Trafikkdata* [20], proceso a través del cual se pretende exportar un *datasheet* con la información del tráfico de vehículos de la última década. Así, se puede conocer la suma total del flujo de tráfico de todos los nodos en cada periodo del año, tanto para categoría LDV como la HDV. Por este motivo, en este estudio dicha información va a ser organizada en la siguiente **Tabla 4.1** llamada 'Histórico', donde cada fila recoge la información del año (*Año*), el periodo del año (*Estación*), la cantidad de LDV (*LDV Total*) y la cantidad de HDV (*HDV Total*) total registrada en todos los nodos:

| Año | Estación | LDV Total | HDV Total |
|---------|-----------------|------------|-----------|
| 2010 | Total Invierno | 32.171.490 | 6.271.020 |
| 2010,25 | Total Otoño | 39.045.510 | 9.346.230 |
| 2010,5 | Total Primavera | 41.651.280 | 7.140.780 |
| 2010,75 | Total Verano | 43.793.280 | 9.864.990 |
| 2011 | Total Invierno | 32.322.150 | 6.546.150 |
| 2011,25 | Total Otoño | 39.072.870 | 9.355.770 |
| 2011,5 | Total Primavera | 40.031.280 | 7.107.480 |
| 2011,75 | Total Verano | 43.819.380 | 9.915.030 |
| 2012 | Total Invierno | 32.760.720 | 6.672.240 |

Tabla 4.1. Ejemplo de un fragmento del *datasheet* 'Histórico' en una fase inicial

En vista de los valores resultantes del *datasheet*, se percibe que hay una cierta diferencia entre el total de vehículos en verano y el total de vehículos en invierno. Por este motivo, se va a tener en cuenta este hecho en el siguiente capítulo dedicado a los resultados de las simulaciones del modelo.

Sin embargo, volviendo al análisis de regresión que nos atañe, la siguiente fase para organizar los datos de forma adecuada para luego hacer trabajar al modelo sin dar lugar a falsas interpretaciones es averiguar la cantidad real de EVs. La principal estrategia que se plantea al respecto es aplicar el *share* de EV o penetración p_{ev} [-] a la cantidad total de LDVs y HDVs calculada previamente. Así que, después de una búsqueda exhaustiva se han podido encontrar las evoluciones del *share* tanto para el LDV como para el HDV:

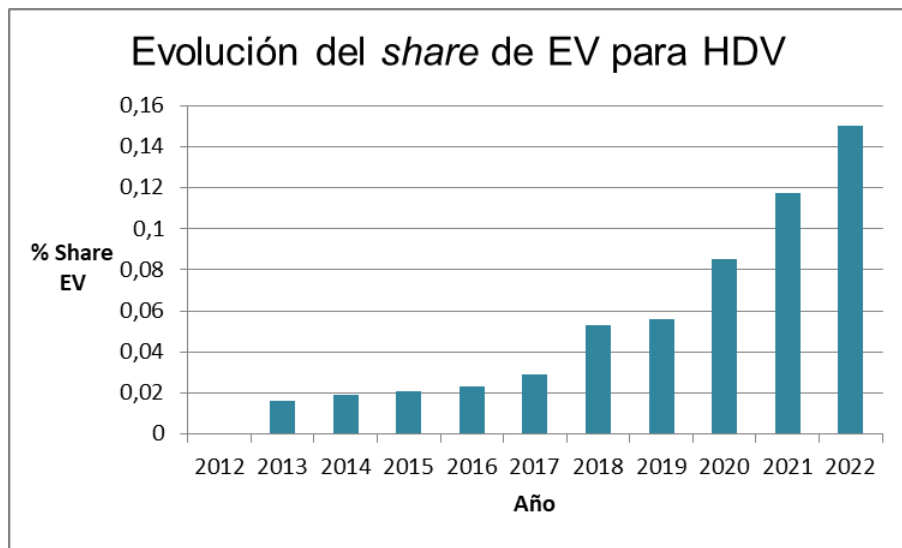


Gráfico 4.1. Evolución del share de EV para vehículo pesado [22]

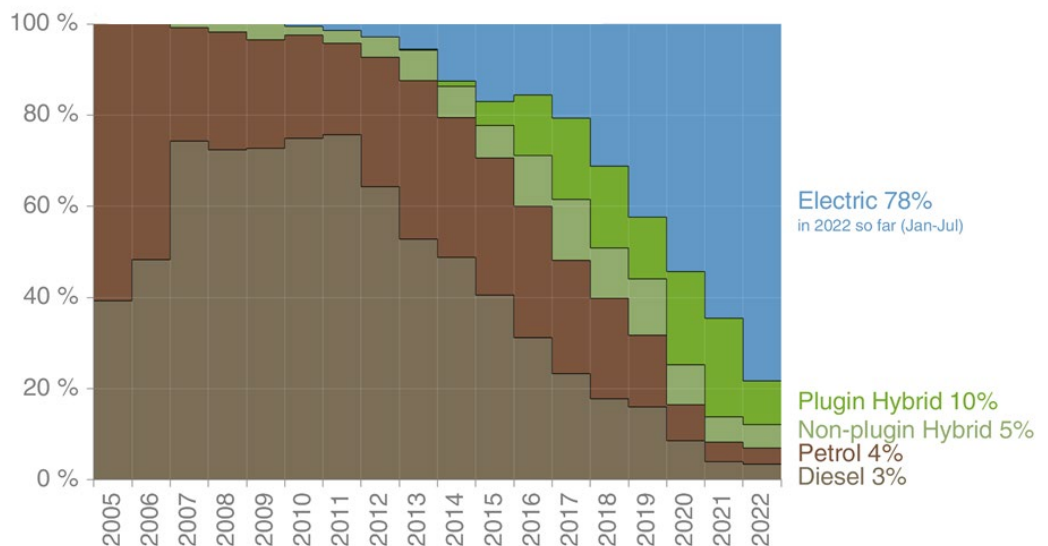


Gráfico 4.2. Evolución del share de EV para vehículo ligero [23]

Inmediatamente después de aplicar los porcentajes de vehículos eléctricos a la cantidad total de vehículos contabilizados, se tiene ya la tendencia creciente del uso del EV en los tramos de autopista considerados. Por lo que se puede intuir ya una correlación entre el tiempo y la cantidad de EV o el porcentaje de EV.

4.2 Predicción de la penetración máxima

Una de las incógnitas que se tienen desde que se propuso el estudio no es otra que conocer cuál es el horizonte temporal para la planificación de la infraestructura. En otros términos, a estas alturas del estudio se sabe que se quiere planificar la instalación de estaciones de carga rápida pero no se tiene claro en qué fecha futura deben instalarse. Por este motivo, antes de ponerse manos a la obra con la predicción de la potencia a instalar, es de vital importancia realizar un primer ejercicio de predicción temporal.

El razonamiento que se tiene pensado para la aplicación de la predicción temporal es el siguiente: dado que la instalación va a ser costosa económicamente y va a requerir un tiempo su instalación, no tiene sentido querer satisfacer la demanda de tan solo un 85% o 90% de los EV de tipo LDV cuando tarde o temprano se va a alcanzar la penetración máxima del 100%. Los últimos estudios apuntan que se va llegar a dicha cifra hacia allá el 2025 [24], por lo que se va a aprovechar la ocasión para tratar de confirmar dicha hipótesis. En resumen, se quiere crear un modelo solo para LDV donde la variable respuesta sea el año y la variable explicativa sea el *share* de EV para LDV.

4.2.1 Análisis exploratorio

En este momento en el que se tiene un *datasheet* bien estructurado con los datos bien correctamente dispuestos se cree oportuno cargar la propia tabla de datos a la herramienta de tratamiento de datos *RStudio Cloud* [25], donde haciendo uso de los conocimientos aprendidos en el Máster, se va a empezar a partir de ahora a crear el modelo de regresión estadístico mediante el lenguaje de programación R.

Antes de empezar a lanzar el modelo, cabe hacer hincapié en la tendencia comentada anteriormente del incremento del uso del vehículo eléctrico a lo largo del tiempo. A primera vista parece una evidencia más que razonable, a pesar de ello, a continuación se va a realizar un análisis exploratorio de los datos para identificar tal posible correlación y para detectar posibles valores anómalos:

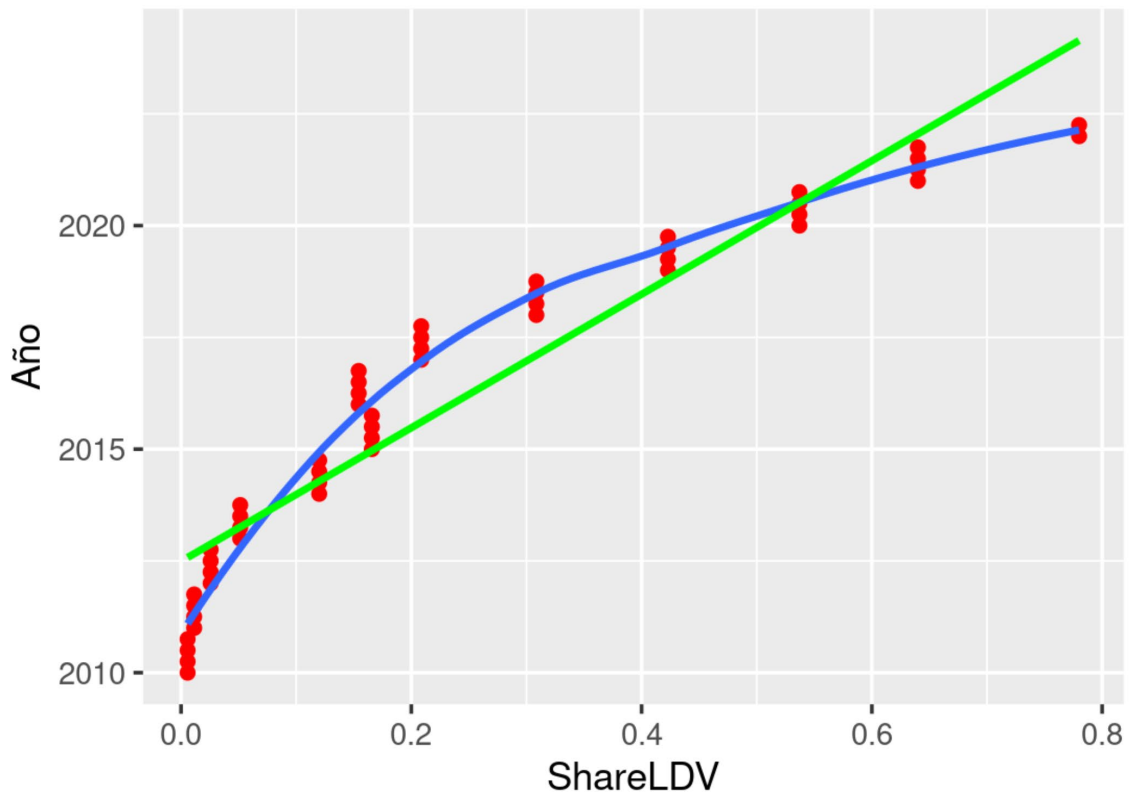


Gráfico 4.3. Evolución del share del LDV eléctrico a lo largo del tiempo

4.2.2 Construcción del modelo

Después de examinar el análisis exploratorio del **Gráfico 4.3** se puede observar a simple que la relación entre el tiempo y *ShareLDV* es directa, s in embargo no queda del todo claro con qué tipo de relación crece. Por este motivo, en este subapartado se van a proponer diferentes clases de regresión que puedan explicar al máximo la relación entre ambas variables. Pero antes de empezar, se debe comentar que la cantidad de vehículos eléctricos ha sido omitida en el modelo ya que es combinación lineal de la variable *ShareLDV*, por lo que solamente se va a considerar la siguiente relación: $Año = f(ShareLDV)$.

Por cada tipo de regresión es imprescindible medir la bonanza de la aproximación que hace el modelo mediante una serie de indicadores recogidos en una tabla llamada ANOVA [26], donde destaca por encima la R^2 . Además suele ser de ayuda estudiar la bonanza de los residuos del modelo a través de una serie de gráficos. Para el caso actual se van a comparar 4 tipos de regresión: lineal, cuadrática, inversa y logarítmica. Así se muestra la comparación en cuestión:

| Tipo de regresión | Ecuación | R ² | Bonanza de los residuos |
|-------------------|---|----------------|-------------------------|
| Lineal | Año ~ ShareLDV | 0.8896 | Dudosa |
| Cuadrática | Año ~ ShareLDV + ShareLDV ² | 0.9657 | Ok |
| Inversa | Año ~ ShareLDV + $\left(\frac{1}{\text{ShareLDV}}\right)$ | 0.9575 | Ok |
| Logarítmica | Año ~ ShareLDV + log(ShareLDV) | 0.9791 | Buena |

Tabla 4.2. Comparativa de tipos de regresión para la penetración máxima.

Delante de estos resultados obtenidos con las distintas tipologías de regresión, con el objeto de determinar cuál de ellos explica mejor el comportamiento de la variable respuesta *Año*, hay que fijarse primero si cumple la condición suficiente de los la validez de los residuos y posteriormente en el valor de R^2 . Por conocimientos estadísticos, se sabe que como mas cercana este la R^2 de la unidad, mejor capacidad tendrá el modelo para describir el comportamiento de la variable respuesta. Por cuanto respecta a la anterior **Tabla 4.2**, se puede discernir que el tipo de regresión que mayor R^2 posee es de logarítmico. Así que la ecuación que modela el tiempo en función del *share* es la presentada debajo:

$$\text{Año} = 2017.289 + 7.331 \cdot \text{ShareLDV} + 3.159 \cdot \log_{10}(\text{ShareLDV}) \quad (10)$$

Gracias a que se dispone de la ecuación solamente es cuestión de sustituir dentro de la expresión $\text{ShareLDV} = 1$:

$$\text{Año}_{\text{MaxShare}} = 2017.289 + 7.331 \cdot 1 + 3.159 \cdot \log_{10}(1) = \mathbf{2024,64} \text{ [años]}$$

Finalmente, se concluye que tal y como pronosticaban los estudios previos, este modelo de regresión refuerza la hipótesis que en 2025 se habrá llegado al 100% de *share* en los vehículos eléctricos ligeros. De este modo se da por finalizado este ejercicio previo de validación.

4.3 Predicción de la demanda para LDV

Tras dar por confirmado la monopolización del EV para el vehículo ligero en 2025, es el momento indicado para pronosticar el uso de la ruta por parte del LDV en el mismo año 2025 ya que sin este dato no sería posible seguir con el estudio de predicción. Para esta ocasión, se desea establecer una relación algo diferente a lo que se ha propuesto en anterioridad: la finalidad primordial es relacionar el número de vehículos eléctricos de tipo LDV (*eLDV*) con el tiempo, es decir, $eLDV = f(\text{Año})$.

4.3.1 Análisis exploratorio

Del mismo modo que antes se ha procedido con el modelo de predicción de la penetración máxima, se va a ejecutar una mecánica similar empezando por el análisis exploratorio de nuevo. En el eje horizontal se presenta la variable de tiempo *Año*, mientras que en el eje vertical se muestra la variable que representa la cantidad de vehículos eléctricos que transitan las autopistas trimestralmente *eLDV*:

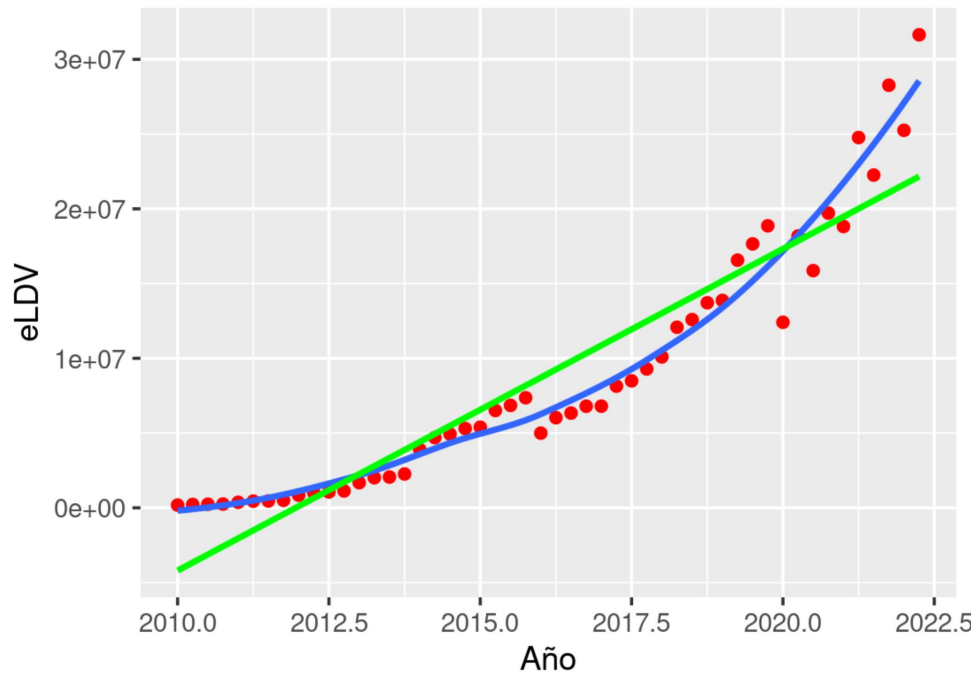


Gráfico 4.4. Evolución de la cantidad de LDVs eléctricos a lo largo del tiempo

4.3.2 Construcción del modelo

En el anterior análisis exploratorio se pone de manifiesto que la tendencia de EVs es creciente, pero no del todo lineal. Por lo que se van a plantear diferentes clases de regresión que puedan explicar en mayor medida la relación entre ambas variables y poder dar así una aproximación fiable del número de LDVs eléctricos que usarán en 2025 el tramo Oslo – Stavanger.

Acto seguido, resulta necesario operar con la misma metodología y hacerse valer de los mismos parámetros estadísticos como la R^2 o los residuos para discernir la mejor aproximación: la lineal, la cuadrática, la inversa y la logarítmica. Después de lanzar las mencionadas regresiones en *RStudio*, se pueden valorar los siguientes resultados en la **Tabla 4.3**:

| Comparativa de tipos de regresión (eLDV) | | | |
|--|--|----------------|-------------------------|
| Tipo de regresión | Ecuación | R ² | Bonanza de los residuos |
| Lineal | $eLDV \sim \text{Año}$ | 0.8805 | Dudosa |
| Cuadrática | $eLDV \sim \text{Año} + \text{Año}^2$ | 0.9613 | Buena |
| Inversa | $eLDV \sim \text{Año} + \left(\frac{1}{\text{Año}}\right)$ | 0.9368 | Ok |
| Logarítmica | $eLDV \sim \text{Año} + \log(\text{Año})$ | 0.9613 | Buena |

Tabla 4.3 Comparativa de tipos de regresión para la variable eLDV

Ante la tabla comparativa inmediatamente calculada, puede afirmarse que pese a la relativa bonanza de las regresiones propuestas hay dos tipologías que destacan por encima del resto: la cuadrática y la logarítmica. Con una R² por encima del 95%, es una buena referencia para establecer un punto de partida de una bonanza aceptable. Para el estudio, ya que ambas aproximaciones se muestran en igualdad de explicar la variable respuesta eLDV, se elige por una cuestión de sencillez la alternativa cuadrática. De todos modos, aunque este valor da unas altas garantías respecto a la validez del modelo, se quiere confirmar de forma definitiva el funcionamiento del modelo cuadrático. Para ello, en esta ocasión se va hacer uso de la inspección de los gráficos de los residuos:

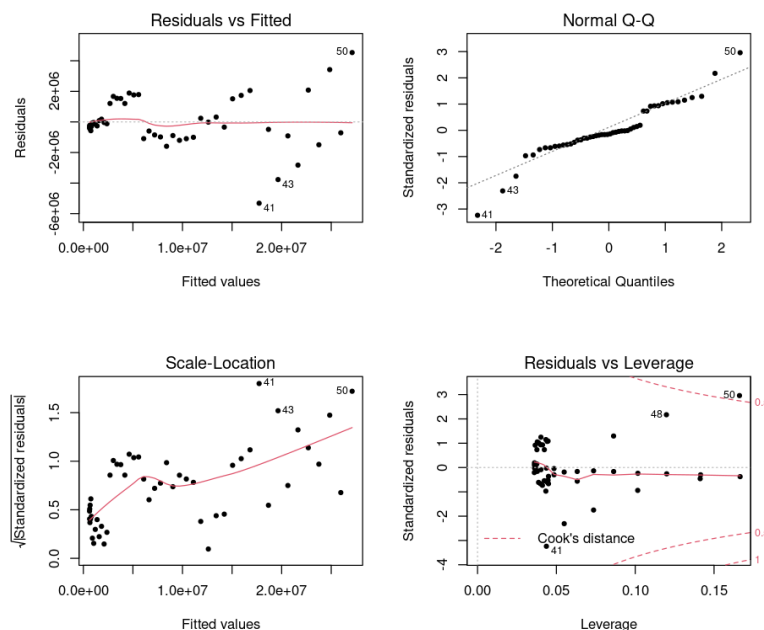


Gráfico 4.5. Representaciones gráficas de los residuos del modelo definitivo para eLDV



El gráfico de la esquina superior izquierda, llamado gráfico del residuo, pese alguna dispersión puntual sigue una línea recta y horizontal, por tanto, se considera que el modelo escogido es correcto y no hace falta una transformación. En cuanto a la gráfica de la esquina inferior derecha, conocida como *Residuos vs Leverage*, los puntos situados a la derecha tienen mucha influencia sobre la regresión, a pesar de ello, la distancia no es mayor a 0.7 y en consecuencia, no se considera que afecte a la regresión. Así que se opta por no eliminarlos del modelo.

Finalmente, la ecuación que modeliza el comportamiento del vehículo eléctrico ligero respecto al tiempo se define del siguiente modo:

$$eLDV = 8.172 \cdot 10^{11} - 8.128 \cdot 10^8 \text{ Año} + 2.021 \cdot 10^8 (\text{Año}^2)$$

Ahora es solo cuestión de introducir el valor de $\text{Año} = 2025$ en la ecuación para saber el número de vehículos ligeros propulsados eléctricamente en 2025, o bien también se puede calcular el valor deseado gracias al comando *predict* del lenguaje R con el objeto de averiguar el valor previsto. Mediante el uso de esta última técnica, se estima que el valor predicho es el siguiente:

$$eLDV_{2025} = 41.334.488 \text{ [ud]}$$

Merece especial atención este número ya su interpretación puede llegar a ser confusa, y es que no se puede considerar una cantidad de coches como tal, sino una cantidad de desplazamientos entre los nodos de la autopista a lo largo de un trimestre. Por esta razón debe matizarse el cálculo realizado.

Teniendo en cuenta que la finalidad del estudio de regresión no es solamente predecir la cantidad de vehículos eléctricos desplazados entre nodos, sino que realmente se ha efectuado tal estudio para conocer el incremento y poder así asociarlo a un consumo futuro a satisfacer. Reparando en este detalle, se propone calcular dicho incremento respecto a la situación actual:

$$\Delta eLDV = eLDV_{2025} - eLDV_{2022} = 41.334.488 - 25.252.976 = 16.081.512 \text{ [ud]}$$

4.4 Predicción de la demanda para HDV

Después de realizar la predicción de la demanda para el vehículo ligero, toca hacer lo propio también para el caso del vehículo pesado con la idea de computar los desplazamientos futuros en 2025. De este modo se acabaría por cubrir la otra tipología de desplazamiento interurbano. Para esta causa, el modelo que se pretende construir se fundamenta en explicar el número de vehículos eléctricos de tipo HDV ($eHDV$) con el tiempo, es decir, $eHDV = f(\text{Año})$. Por lo que, la metodología es bastante parecida a la operada con el LDV.

4.4.1 Análisis exploratorio

Ante la propuesta descrita previamente, como siempre en todo modelo estadístico resulta fundamental examinar cómo se comporta la relación entre las variables de forma gráfica, así que en esta parte del modelo se va a pretender representar en el eje horizontal la variable temporal *Año*, a la vez que en el eje vertical se muestra la variable que representa la cantidad de EV pesados que hacen uso de las autopistas trimestralmente *eHDV*:

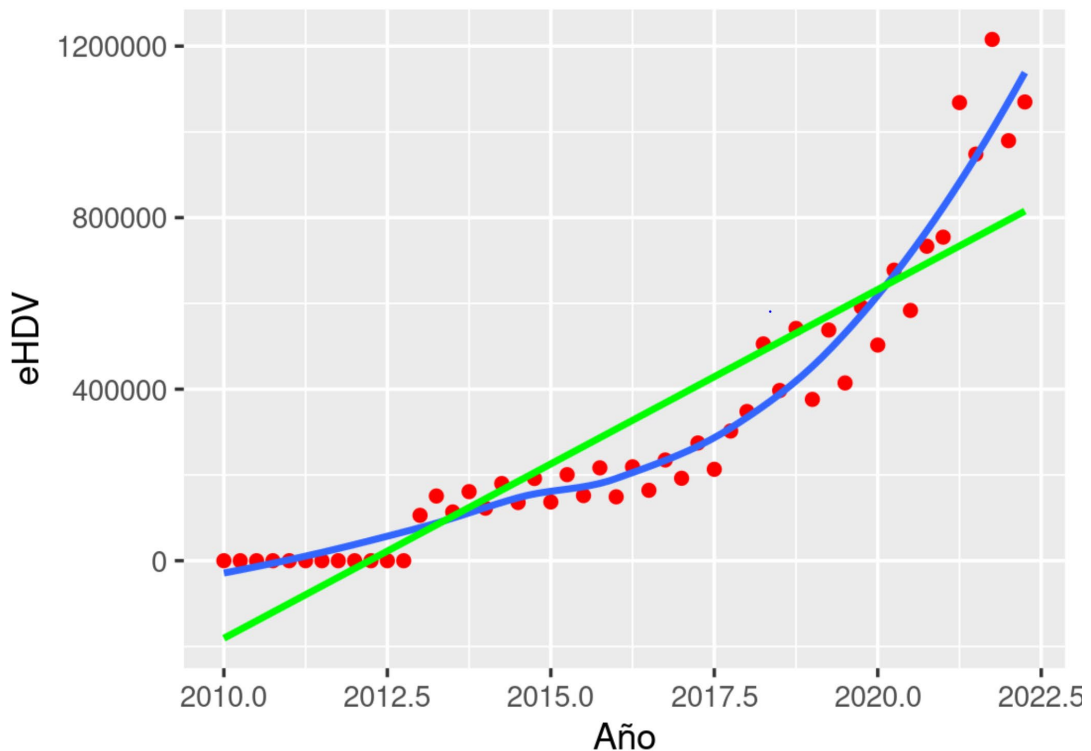


Gráfico 4.6. Evolución de la cantidad de HDVs eléctricos a lo largo del tiempo

4.4.2 Construcción del modelo

Gracias al análisis exploratorio realizado se hace de nuevo evidente el pronunciado crecimiento de los EVs con el tiempo, especialmente en los últimos años, por lo que nos puede dar una ligera idea de la no linealidad de la regresión que se va a calcular. Sin embargo, para explorar el máximo de opciones de dar explicación a la variable respuesta *eHDV*, se van a tratar diferentes aproximaciones regresivas con el objetivo de predecir de un modo más fiable la cantidad de desplazamientos de tipo HDVs eléctricos en 2025 .

Siguiendo con la articulación del modelo de predicción para HDV, se opta por utilizar la misma mecánica y basarse en los criterios estadísticos anteriores como la R^2 o los residuos para elegir la regresión más ajustada: la lineal, la cuadrática, la inversa y la logarítmica. Después de hacer correr las regresiones en *RStudio*, se obtienen los siguientes resultados en la **Tabla 4.4**:

| Comparativa de tipos de regresión (eHDV) | | | |
|--|--|--------|-------------------------|
| Tipo de regresión | Ecuación | R^2 | Bonanza de los residuos |
| Lineal | $eHDV \sim \text{Año}$ | 0.8222 | Dudosa |
| Cuadrática | $eHDV \sim \text{Año} + \text{Año}^2$ | 0.9367 | Ok |
| Inversa | $eHDV \sim \text{Año} + \left(\frac{1}{\text{Año}}\right)$ | 0.9366 | Ok |
| Logarítmica | $eHDV \sim \text{Año} + \log(\text{Año})$ | 0.9366 | Ok |

Tabla 4.4. Comparativa de la calidad de los tipos de regresión para la variable eHDV

Observando la tabla comparativa justo obtenida, se erigen tres alternativas bien válidas omitiendo la regresión lineal que presenta unos residuos algo elevados. Aunque por muy ligeramente la opción cuadrática es la alternativa que invita más a ser elegida, se va a hacer uso de un tercer criterio a parte de la R^2 y los residuos que va acabar por decantar la balanza hacia una de las regresiones. Este tercer método estadístico se basa en análisis de varianza de las distintas aproximaciones, donde la suma residual de cuadrados o RSS son las desviaciones predichas a partir de valores empíricos reales, por lo que a menor RSS más ajustado es el modelo [26]:

| Comparativa de tipos de regresión (eHDV) | |
|--|----------------|
| Tipo de regresión | RSS |
| Lineal | $9.3092e + 11$ |
| Cuadrática | $3.3122e + 11$ |
| Inversa | $3.3194e + 11$ |
| Logarítmica | $3.3170e + 11$ |

Tabla 4.5. Tabla comparativa para el análisis de la varianza de los modelos

En vista de los distintos RSS obtenidos se puede elegir el modelo cuadrático como el que mejor se ajusta a las posibles predicciones que se puedan ejercer. También, para confirmar

aún más si cabe la validez del modelo, se puede hacer uso de los gráficos de los residuos:

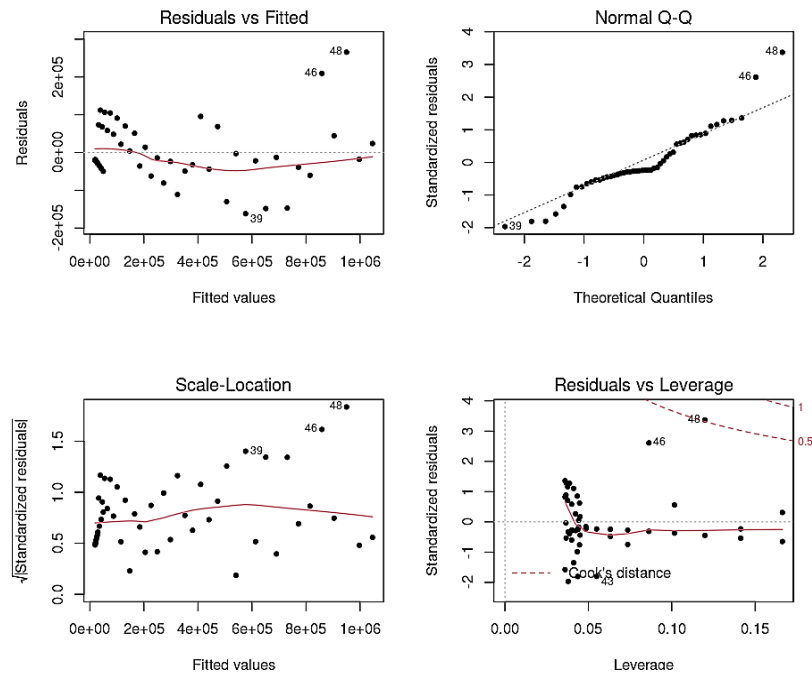


Gráfico 4.7. Gráficos de los residuos del modelo definitivo para HDV

Analizando el gráfico de la esquina superior derecha, conocido como gráfico del residuo normalizado, los valores se superponen a la recta del residuo y por tanto, se confirma que la aproximación elegida es válida y no hace falta una transformación. En relación a la gráfica de la esquina inferior derecha, *Residuos vs Leverage*, los residuos situados a la derecha y con más *Leverage* tienen mucha influencia sobre la regresión, aun así, la distancia resulta ser menor a 0.5. En definitiva, no se considera que afecte a la regresión y se cree oportuno no eliminarlos del modelo.

Al fin, se tiene la ecuación que modeliza el comportamiento del vehículo eléctrico pesado en relación el tiempo y se expresa de la siguiente forma:

$$eHDV = 3.81 \cdot 10^{10} - 3.787 \cdot 10^7 \text{ Año} + 9.413 \cdot 10^3 (\text{Año}^2)$$

A continuación, tal y como se ha operado con los vehículos ligeros, se propone sustituir el en la variable explicatoria $\text{Año} = 2025$ en la expresión para obtener la cantidad de desplazamientos de automóviles eléctricos HDV en 2025. Por lo que, se estima que el valor futuro es el que se muestra seguidamente:

$$eHDV_{2025} = 1.657.901 \text{ [ud]}$$

Habiendo obtenido el valor predicho, se está ya en disposición de calcular el incremento deseado tal y como se ha realizado para el vehículo ligero:

$$\Delta eHDV = eHDV_{2025} - eHDV_{2022} = 1.657.901 - 979.439 = 678.462 \text{ [ud]}$$

5. Simulación i resultados del modelo

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos mediante las pruebas de simulación ejecutadas en la interfaz de código abierto Jupyter Notebook, mediante lenguaje de programación Python. También comentar que gracias a las simulaciones ejecutadas no solamente se han podido obtener resultados en forma de gráficos que pueden dar una idea de las prestaciones de las estaciones de carga, sino que se han obtenido parámetros clave para la propuesta de instalación de las nuevas estaciones de carga. Cabe recordar que estos parámetros clave mencionados en anterioridad son el consumo energético medio de todas las estaciones definido como $CE_{FCS} [\frac{kWh}{h}]$ y el ratio base de consumo energético por EV definido como $RBC_{EV} [\frac{kWh}{h \cdot EV}]$.

En los dos modelos que se van a tratar de manera independiente en cada uno de los subapartados, se va a obtener la demanda energética de los vehículos eléctricos, tanto para el caso de LDV como el de HDV partiendo de la metodología descrita en el capítulo 3. Otro detalle que se va a tener en cuenta y que es trascendental a la hora de valorar los resultados es el periodo del año, donde dependiendo de la estación del año que se evalúe el modelo, el consumo puede variar sustancialmente como por ejemplo entre verano e invierno.

Gracias a la obtención de estos resultados, se podrá articular en el siguiente capítulo una solución al incremento de demanda energética prevista en un futuro inmediato debido al auge del coche eléctrico.

5.1 Modelo actual

Para el caso del modelo actual, se tiene como objetivo analizar que tramos de las autopistas E18 y E39 son más críticos. Previsiblemente, se puede deducir que aquellos lugares donde haya más densidad de población o un flujo mayor de vehículos van a ser donde las estaciones van a tener que suministrar más energía. Aun así, se va a verificar tanto en estación invernal como en estival los resultados obtenidos junto con el cálculo de los dos parámetros clave mencionado al inicio del capítulo.

5.1.1 Resultados del LDV

Haciendo un poco de recordatorio, actualmente en 2022, en la tipología de vehículo ligero se dispone de una red de estaciones de carga que eleva su número hasta 10 tal y como se muestra en la **Figura 3.2**, empezando por Oslo con la estación número 1 hasta Stavanger con la estación 10,

Primeramente, se va a pasar a analizar la estación invernal desde inicios de año 2022 hasta finales de marzo. A continuación se muestra la tendencia del consumo energético medio horario del día en $\left[\frac{kWh}{h}\right]$ a lo largo del primer trimestre:

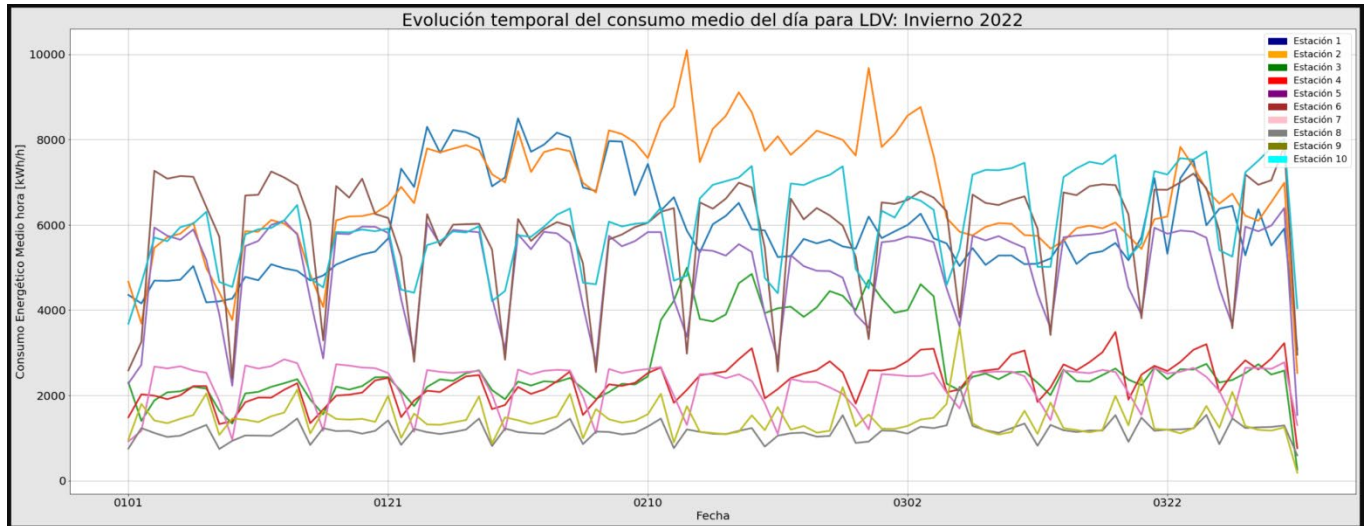


Gráfico 5.1. Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo ligero en período invernal

Examinando el **Gráfico 5.1** se detecta que hay ciertos repuntes de demanda energética en la segunda estación destacada en color naranja. También resulta interesante mencionar la tendencia de las estaciones 1 y 10. Este escenario, puede suponer que en invierno las estaciones más usadas son aquellas más cercanas a las grandes urbes como es el caso de Oslo y Stavanger debido a las bajas temperaturas del invierno noruego. En resumen, es de vital importancia no perder de vista el tramo de las estaciones 1, 2 y 10 para la planificación de las estaciones futuras.

En cuanto a los ratios asociados a tal consumo, se computan seguidamente:

$$CE_{FCS} = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^h e_{estaciones_{i,j}}}{h} = 39.967,25 \left[\frac{kWh}{h}\right]$$

$$RBCE_{EV,,LDV 2022} = CE_{FCS} \cdot \frac{1}{N_{EV}} = 39.967,25 \cdot \frac{1}{10.953.627} = 0,0036 \left[\frac{kWh}{h \cdot EV}\right]$$

Segundamente, cabe analizar el uso de las mismas estaciones de carga, pero esta vez en verano. Esto se va estudiar para el actual año y des del primero de junio hasta el último día de agosto. Del mismo modo, el comentado uso de las estaciones se va medir en consumo energético medio horario $\left[\frac{kWh}{h}\right]$ por cada uno de los días estivales. La tendencia de la energía consumida en las estaciones tiene el siguiente perfil:

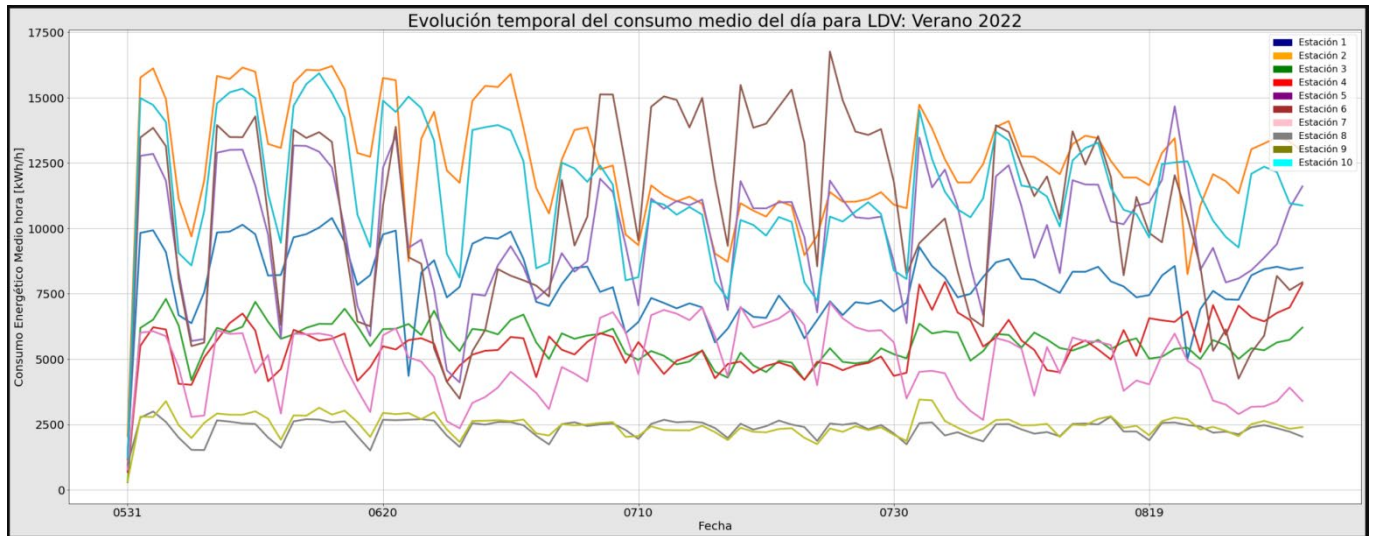


Gráfico 5.2. Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo ligero en período estival

En efecto, poniendo el foco en el aspecto cuantitativo en el anterior **Gráfico 5.2** se puede denotar un incremento considerable respecto la estación invernal en algunas estaciones, especialmente en las más críticas como en las estaciones 1, 2 y 10. Sin embargo, merece especial atención el consumo medio en la estación 6 de color marrón, donde a finales de julio consigue un pico realmente pronunciado. Se es previsible intuir que el hecho que esta estación situada a las afueras de la ciudad costera y muy turística de Kristiansand, tenga gran parte de culpa. Por lo tanto, se debe tener especial atención también a esta zona.

Nuevamente, se pretende calcular los parámetros clave del rendimiento de la infraestructura asociados a tal consumo, se computan seguidamente:

$$CE_{FCS} = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^h e_{estaciones_{i,j}}}{h} = 73.786,08 \left[\frac{kWh}{h} \right]$$

$$RBCE_{EV,LDV 2022} = CE_{FCS} \cdot \frac{1}{N_{EV}} = 73.786,08 \cdot \frac{1}{20.914.573} = 0,0035 \left[\frac{kWh}{h \cdot EV} \right]$$

En vistas de los parámetros resultantes, se observa que el $RBCE_{EV}$ computado es muy similar al obtenido en invierno. Este hecho invita a concluir que se puede considerar un único $RBCE_{EV,LDV 2022}$ para el presente año y para el vehículo LDV, que para curarse en salud acaba resultando ser $RBCE_{EV,LDV 2022} = 0,0036 \left[\frac{kWh}{h \cdot EV} \right]$.

En este punto tan trascendente de interpretación de los datos obtenidos, se está en disposición de conocer la demanda energética futura de 2025 para el LDV y para todas las estaciones. Suponiendo que el ratio $RBCE_{EV,LDV 2022}$ se mantiene constante hasta 2025, ya que se realiza la hipótesis que el flujo de vehículos en cada época del año es estacionario, se puede calcular el incremento $\Delta CE_{FCS LDV 2025}$ gracias también al incremento de EV ligeros predicho en el apartado 4.3.2:

$$\begin{aligned}\Delta CE_{FCS LDV 2025} &= RBCE_{EV,LDV 2022} \cdot \Delta eLDV = RBCE_{EV,LDV 2022} \cdot (eLDV_{2025} - eLDV_{2022}) \\ &= 0,0036 \cdot 16.081.512 = 57.893,44 \left[\frac{kWh}{h} \right]\end{aligned}$$

La magnitud incremental calculada representa el consumo total de las estaciones que habrá que satisfacer en 2025 sin tener en cuenta el consumo que ya está cubriendo. Es decir, en otros términos, se deben instalar estaciones de carga extra que puedan cubrir como mínimo el incremento de demanda $\Delta CE_{FCS LDV 2025}$ prevista en 2025. La cantidad de estaciones, la ubicación y la potencia instalada de estas, se tratará en el próximo apartado 5.2.

5.1.2 Resultados del HDV

En cuanto al terreno del vehículo pesado, la infraestructura de estaciones de carga es algo diferente ya que se recorren mayores distancias, las autonomías son mayores y las estaciones de carga requieren de una especial inversión para ser instaladas. De esta manera, las estaciones de carga para el vehículo pesado se concentran en las grandes metrópolis, allí donde se produce un mayor flujo de vehículos de mercancías y de forma estable originando el mapa de estaciones de la **Figura 3.3**

En primer lugar, se va pretende obtener los resultados de la estación invernal en el primer trimestre del año 2022. Por lo que, después de lanzar el modelo de demanda específico para HDV, seguidamente se muestra en el **Gráfico 5.3** la tendencia del consumo energético medio horario del día en $\left[\frac{kWh}{h} \right]$ a lo largo del invierno noruego:

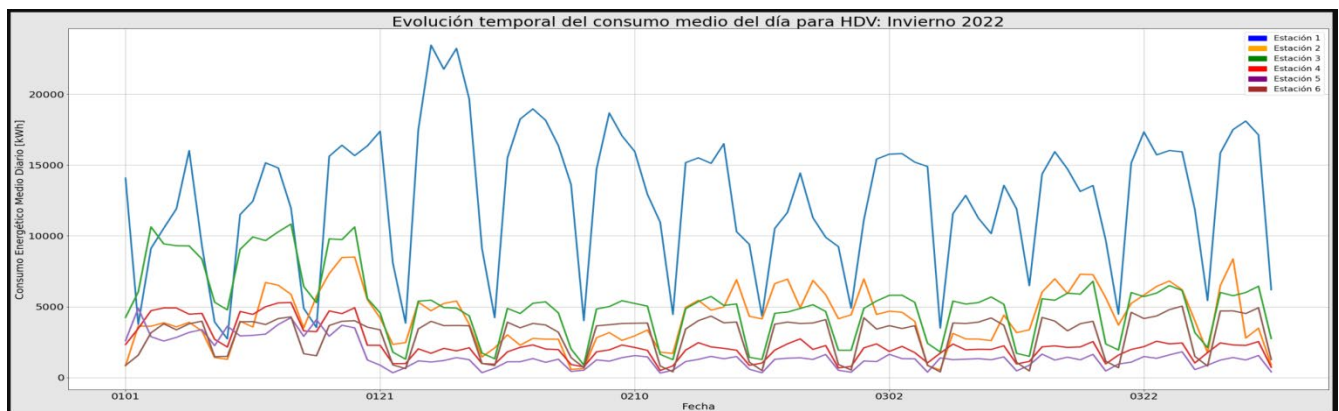


Gráfico 5.3 Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo pesado en período invernal

Analizando las distintas tendencias de consumo del gráfico se ve claramente que existe una estación, el consumo de la cual predomina respecto el resto. La tendencia azul que representa la primera estación alcanza unos máximos a finales del mes de enero cercanos a $25.000 \left[\frac{kWh}{h} \right]$. Por lo que cabe esperar que sea la estación de referencia para planificar la futura infraestructura de estaciones de carga en 2025. Presuntamente, la proximidad con Oslo, la capital del país escandinavo, tenga una gran influencia debido al más que probable elevado número de desplazamientos de mercancías que, llegan a causa de su influencia económica dentro del país.

En términos de los ratios asociados a tal consumo, se computan seguidamente:

$$CE_{FCS} = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^h e_{estaciones_{i,j}}}{h} = 29.162,65 \left[\frac{kWh}{h} \right]$$

$$RBCE_{EV,HDV 2022} = CE_{FCS} \cdot \frac{1}{N_{EV}} = 29.162,65 \cdot \frac{1}{284.311} = 0,103 \left[\frac{kWh}{h \cdot EV} \right]$$

En segundo lugar, resulta necesario seguir estudiando el uso de las mismas 6 estaciones de carga, pero en el período de verano y en 2022. De la misma manera, se tiene la idea de querer tener como resultado e consumo energético medio horario $\left[\frac{kWh}{h} \right]$ por cada uno de los días estivales. La tendencia de la energía consumida en las estaciones de carga muestra el siguiente perfil:

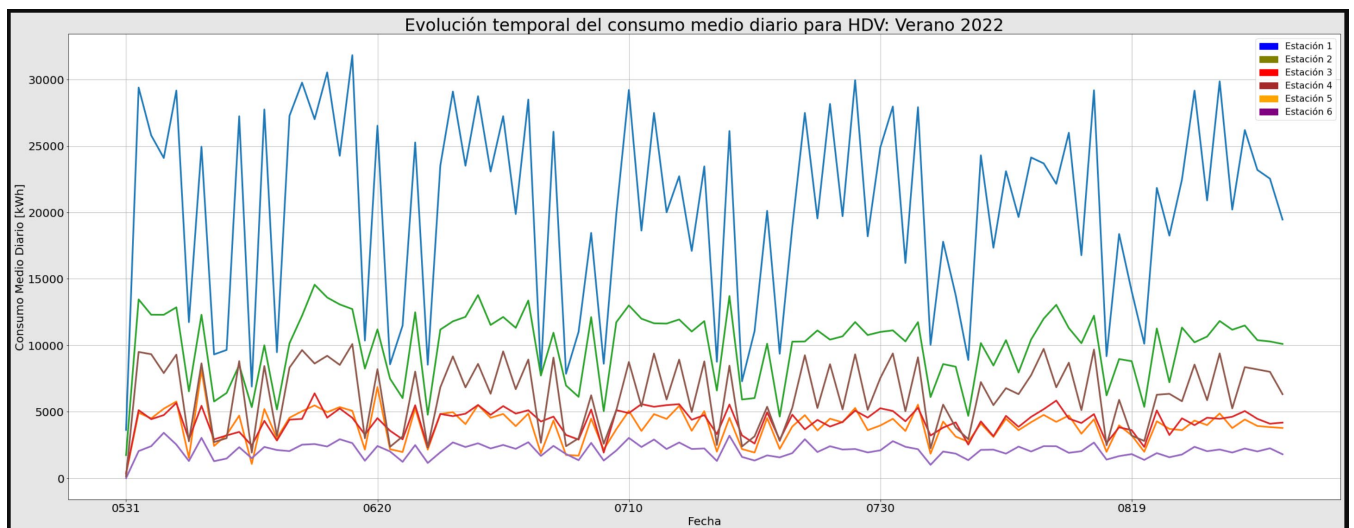


Gráfico 5.4 Evolución temporal del uso energético de las estaciones para vehículo pesado en período estival

Atendiendo al anterior **Gráfico 5.4**, puede claramente observarse que la estación 1 sigue encabezando el consumo energético medio horario, pero en esta ocasión, con motivo de la estación de verano, la magnitud del consumo correspondiente es superior. Si se hace especial atención, se atisba sutilmente la tendencia del consumo del transporte de mercancías en los días laborables, cosa que puede confirmar la veracidad de los resultados.

Para la ocasión del HDV, se ha obtenido los próximos parámetros clave del modelo ligados a tal consumo:

$$CE_{FCS} = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^h e_{estaciones_{i,j}}}{h} = 50.003,55 \left[\frac{kWh}{h} \right]$$

$$RBCE_{EV,HDV 2022} = CE_{FCS} \cdot \frac{1}{N_{EV}} = 50.003,55 \cdot \frac{1}{474.417} = 0,105 \left[\frac{kWh}{h \cdot EV} \right]$$

A partir de los cálculos resultantes, se observa que el $RBCE_{EV}$ se acerca considerablemente al obtenido en invierno. Esta casuística obliga a tomar una decisión respecto a qué valor tomar para proseguir con los cálculos. Por este motivo, se ha supuesto que la mejor alternativa es realizar una media aritmética entre los dos valores para tomar una referencia anual. El valor de referencia es $RBCE_{EV,HDV 2022} = 0,104 \left[\frac{kWh}{h \cdot EV} \right]$.

Operando con la misma metodología que con el vehículo ligero, se pretende conocer la demanda energética futura de 2025 para el HDV y para todas las estaciones. Para ello, suponiendo de nuevo que el ratio base $RBCE_{EV,HDV 2022}$ no varía hasta 2025, se puede calcular el incremento del consumo energético $\Delta CE_{FCS HDV 2025}$ definitivo con la ayuda del incremento de EV pesados predicho en el apartado 4.4.2:

$$\begin{aligned} \Delta CE_{FCS HDV 2025} &= RBCE_{EV,HDV 2022} \cdot \Delta e_{HDV} \\ &= RBCE_{EV,HDV 2022} \cdot (e_{HDV_{2025}} - e_{HDV_{2022}}) = 0,104 \cdot 678.462 \\ &= 70.560,05 \left[\frac{kWh}{h} \right] \end{aligned}$$

A partir del $\Delta CE_{FCS HDV 2025}$ resultante, se puede interpretar qué tipo de magnitud energética hay que instalar en las autopistas con el objeto de satisfacer el uso de EVs pesados en 2025. Por lo tanto, en los próximos tres años se debe instalar una potencia determinada para abastecer la energía objetivo presentada con anterioridad. La cantidad de estaciones, la ubicación y la potencia instalada de estas, se tratará al igual que el vehículo ligero en el próximo apartado 5.2 con unos criterios bien definidos.

5.2 Modelo 2025

Previamente, en el modelo actual se ha pretendido encontrar unos primeros resultados que puedan dar respuesta a varias de las incógnitas planteadas en la infraestructura de estaciones de carga. Entre ellas figuran la ubicación, cuántas de ellas son necesarias a instalar y la cantidad de potencia en cada parque de carga. Para este último punto se ha considerado un criterio concreto que, a partir del $\Delta CE_{FCS 2025}$ para ambas tipologías de vehículos, se podrá establecer la potencia necesaria.

Otro punto que cabe poner especial énfasis es el tipo de criterio a usar en relación al modo de abastecer el mencionado incremento energético. Des del principio y en todo momento se ha querido cubrir la demanda futura para todos los días del año. En otros términos, se pretende dimensionar los parques de carga en función de la demanda máxima del año con la finalidad de poder suministrar a todos los usuarios sea cual sea la estación del año. Para ello, en base a los resultados observados en el modelo actual, se ha visto claramente que en verano se requiere de mayor demanda en los diferentes puntos de carga. Por este motivo, en este modelo 2025 se ha decidido dimensionar en función de los $\Delta CE_{FCS\ 2025}$ calculados en la estación estival.

5.2.1 Resultados del LDV

Gracias a los gráficos del consumo energético medio representados con anterioridad nos han podido aportar cierta información sobre qué tramos resultan ser los más demandados y por lo tanto los más críticos para la infraestructura de electrificación de las autopistas escogidas. A partir de estos detalles clave, es posible empezar a dimensionar las nuevas estaciones que van a poder satisfacer la demanda de los LDV eléctricos. Pero antes es necesario tener en cuenta las líneas de alta tensión de la red eléctrica noruega colindantes con las autopistas, tal y como se muestra en la **Figura 2.4**. Una vez se combinan estos detalles, es posible hacer una propuesta de ubicación de las nuevas autopistas mediante un modelo iterativo donde la idea es alojar estaciones en los puntos críticos que tengan conexión con la red, hasta que se satisfaga el $\Delta CE_{FCS\ LDV\ 2025}$. Finalmente, el mapa resultante de las estaciones de carga de las autopistas electrificadas en 2025 es el siguiente (**Figura 5.1**):

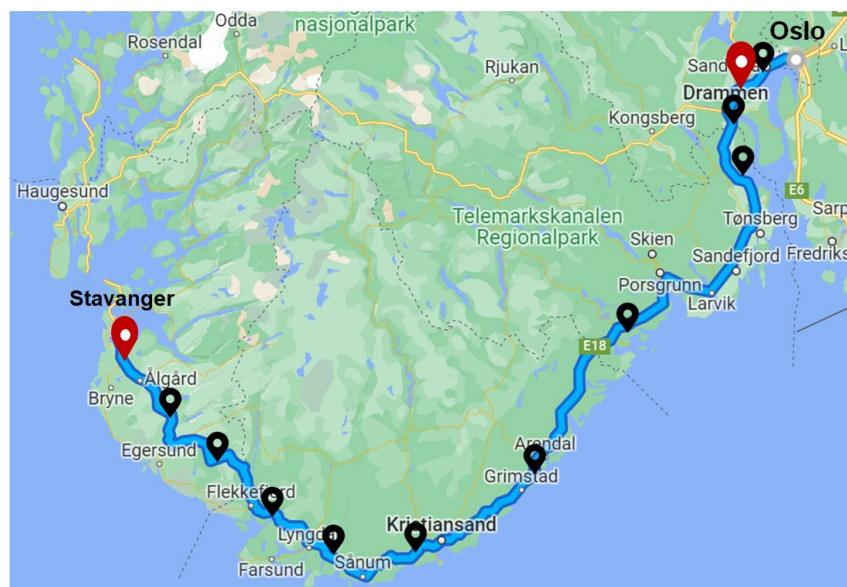


Figura 5.1. Infraestructura de estaciones de carga definitiva para 2025 con las dos nuevas estaciones en rojo

El motivo por el cual se ha decidido ubicar dos estaciones en la ruta es bien sencillo, ya que basándose en las valoraciones observadas a partir del **Gráfico 5.2** parece lógico intentar compensar los picos de demanda provocados por las estaciones 2 y 10. En este contexto, se decide instalar una estación antes de la estación 2 (ahora pasa a ser la estación 3) y finalmente con la idea de reforzar el alto consumo de los vehículos que circulan próximos a la gran ciudad de Stavanger, se opta por instalar la nueva estación 12.

Partiendo de esta nueva situación hipotética, donde ya se conocen 2 de las 3 incógnitas planteadas en un inicio, es buen momento para acabar encontrando la incógnita más compleja: la cantidad de potencia a instalar. Para establecer tal parámetro, se parte sabiendo que se tiene que satisfacer $\Delta CE_{FCS LDV 2025} = 57.893,44 \left[\frac{kWh}{h} \right]$. A continuación se erigen dos alternativas: una primera que considera que la potencia se debe dimensionar según los picos de demanda máxima con el objeto de cubrir en todo momento pero con riesgo de sobredimensionar la instalación; en cambio una segunda que opta por satisfacer el consumo medio aunque en gran parte del tiempo no se pueda abastecer a todos los EVs.

Finalmente, para el estudio en concreto siguiendo la filosofía de curarse en salud y cubrir la demanda máxima, la decisión tomada se ha decantado hacia la primera opción presentada. Por lo que, las dos nuevas estaciones deberán contar con una potencia nominal que sumadas supere el $\Delta CE_{FCS LDV 2025}$. En este contexto, donde se tiene por fin un criterio claro se pasa a lanzar el modelo con el objetivo de dar una magnitud de potencia a las nuevas estaciones 2 y 11. En el próximo **Gráfico 5.5** se muestran las tendencias de los consumos energéticos máximos de las estaciones en el nuevo modelo 2025:

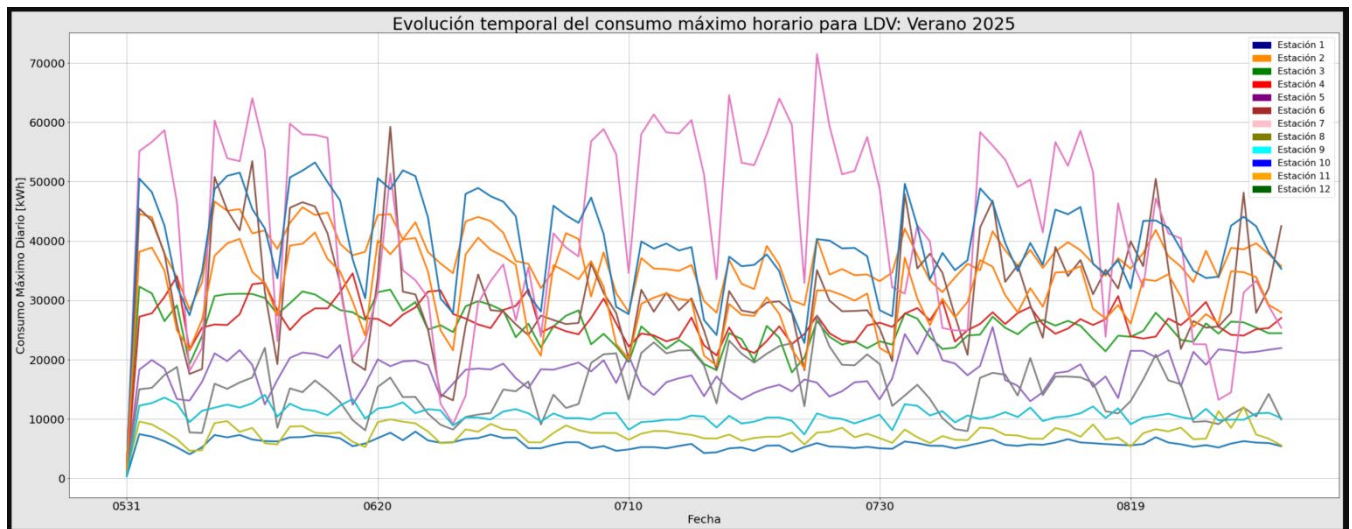


Gráfico 5.5. Evolución temporal del uso energético máximo de las estaciones para vehículo ligero en 2025

A partir de la representación gráfica obtenida, se puede denotar unos valores ciertamente altos que ya directamente se pueden entender como la potencia que deberían tener las estaciones partiendo de las hipótesis del modelo planteadas. Si bien es cierto que la evolución temporal de la estación 7 con color rosa es la más destacada, para el caso del estudio resulta imprescindible poner el foco en las nuevas estaciones 2 y 12, por lo que mediante los dos próximos **Gráfico 5.6** y **Gráfico 5.7** se va a poder observar el detalle de sus evoluciones respectivas:

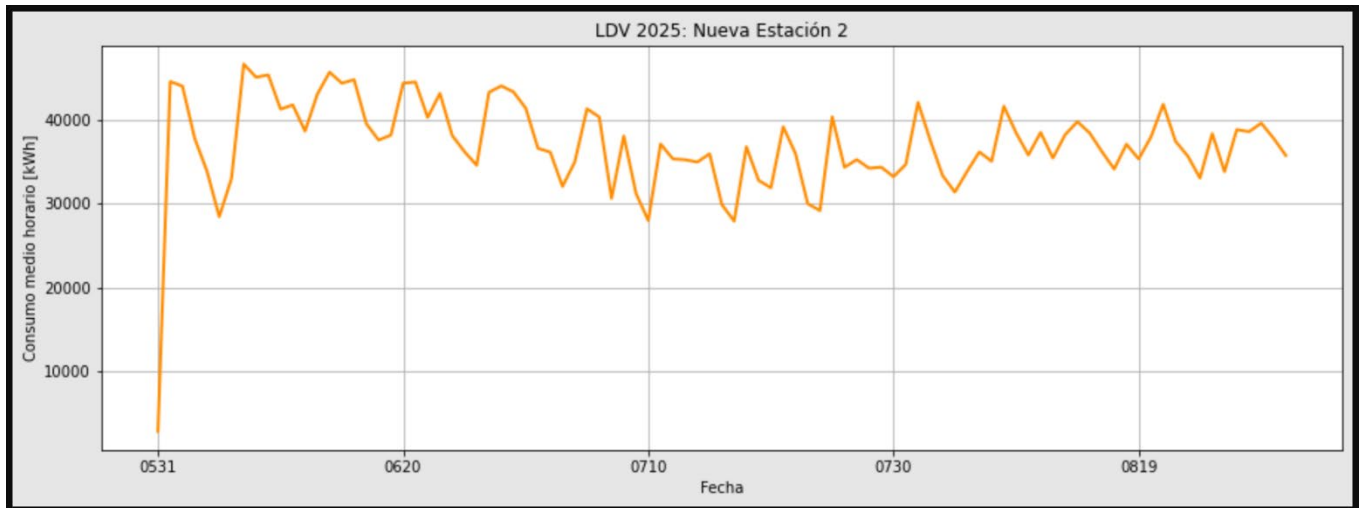


Gráfico 5.6. Evolución temporal del uso energético máximo de la nueva estación 2, para vehículo ligero en 2025

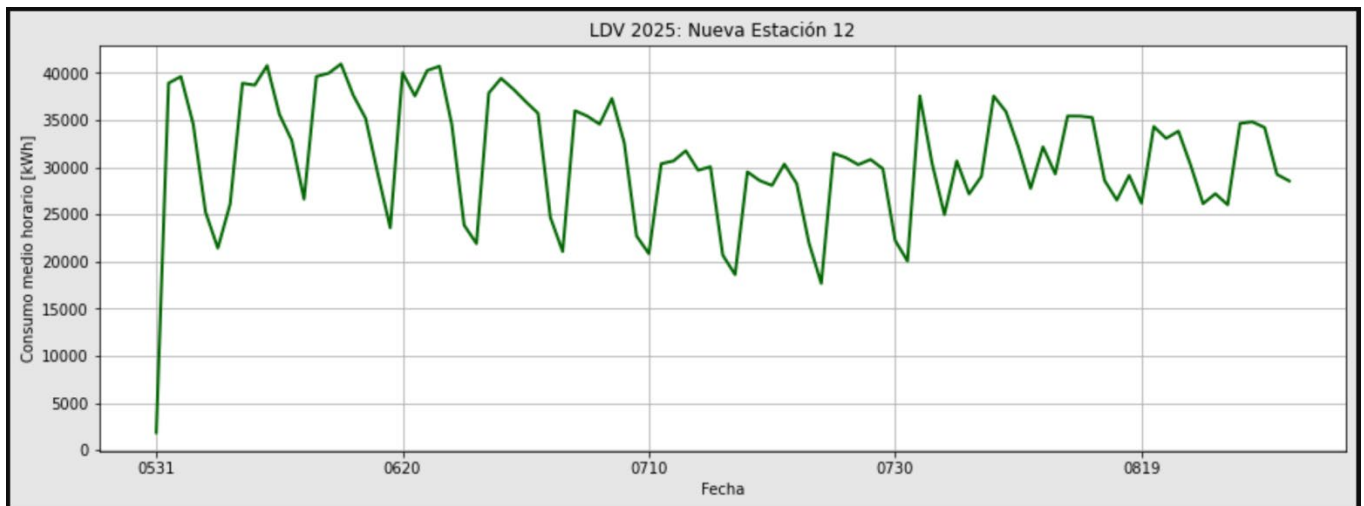


Gráfico 5.7. Evolución temporal del uso energético máximo de la nueva estación 12, para vehículo ligero en 2025

Finalmente, con la ayuda de los dos anteriores **Gráfico 5.6** y **Gráfico 5.7** se puede conocer que la potencia máxima que debe tener cada estación examinando el pico más pronunciado de su evolución. Por lo tanto, se concluye que se deben instalar para las estaciones 2 y 12 respectivamente, un total de 45.000 [kW] y 40.000 [kW].

Por otra parte, aunque ya se conocen todas las variables desconocidas del plan para vehículo ligero, puede ser interesante realizar una pequeña comparativa con el otro criterio mencionado con anterioridad con la intención de ofrecer una visión nominal del consumo medio de la instalación:

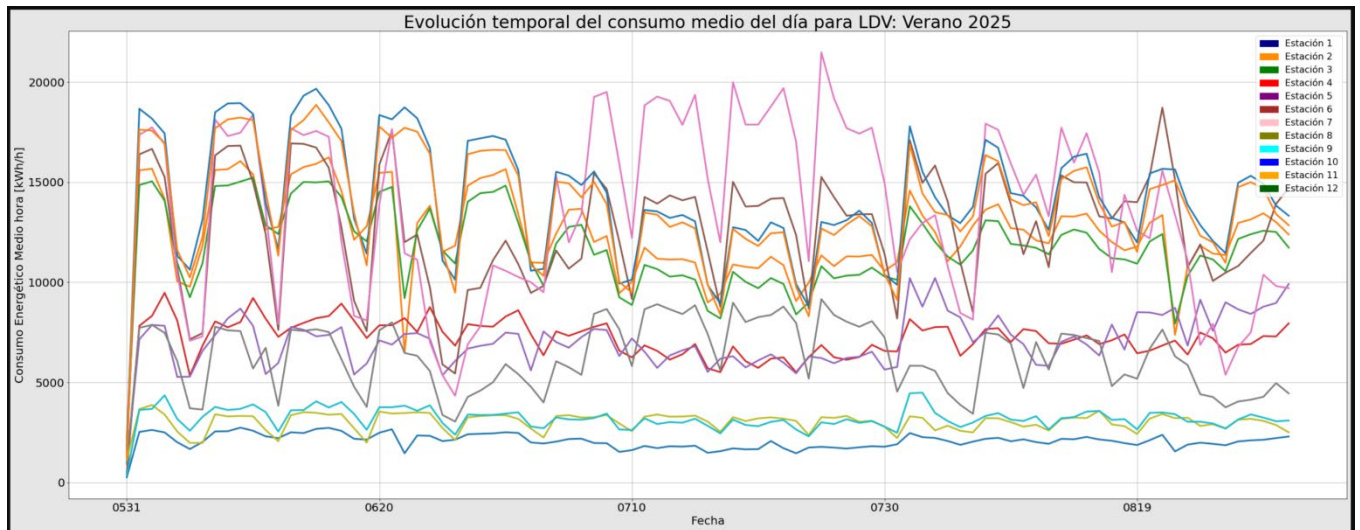


Gráfico 5.8. Evolución temporal del uso energético medio de las estaciones para vehículo ligero en 2025

Cuantitativamente, en el **Gráfico 5.8** previo, poniendo el foco en los picos más destacados del consumo medio, es posible establecer una comparación respecto a los consumos máximos del **Gráfico 5.5**. Un poco lo que puede reflejar esta comparación es que en el día a día existen horas pico y horas valle donde la demanda puede fluctuar con una relación global de $\frac{CE_{Max}}{CE_{Med}} = \frac{7}{2}$ ya que el pico máximo de la gráfica del consumo energético máximo se sitúa en $70.000 \left[\frac{kWh}{h}\right]$ mientras que en el gráfico medio se alcanzan los $20.000 \left[\frac{kWh}{h}\right]$. Con esta información se puede sentar un precedente para futuros estudios donde se quiera hacer alguna simplificación o extrapolación de consumos. Sobre todo en el caso que se quieran alojar unos bancos de baterías que almacenen la energía en horas valle y que puedan suministrar dicha energía en periodos punta, suponiendo eso sí una hipótesis de cero pérdidas en el almacenamiento y, en la transmisión de energía entre las baterías y los distintos puntos de carga.

5.2.2 Resultados del HDV

En referencia al vehículo pesado, la metodología empleada ha sido algo parecida: primeramente ubicar las estaciones o parques de carga pertinentes en los tramos críticos hasta cumplir con $\Delta CE_{FCS\ HDV\ 2025}$ computado de forma iterativa, en período de verano con la idea de satisfacer la demanda a lo largo de todo el año. Dicho esto, se muestra seguidamente el mapa resultante (**Figura 5.2**) de las estaciones de carga del vehículo pesado en las autopistas electrificadas en 2025, teniendo en consideración siempre las conexiones a las líneas de alta tensión de la **Figura 2.4**:

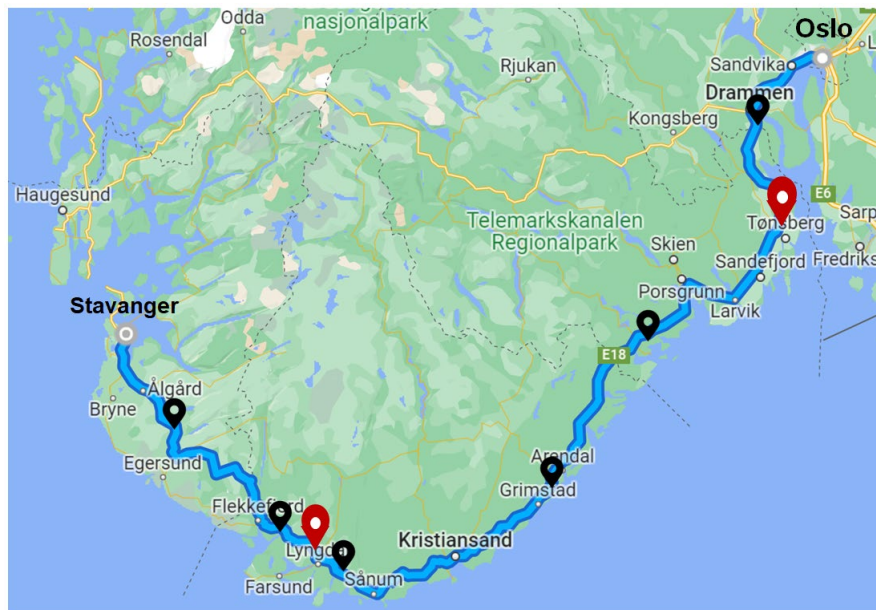


Figura 5.2. 1ª Iteración del conjunto de estaciones de carga para HDV en 2025 con las nuevas estaciones en rojo

En primera instancia se ha elegido instalar las dos nuevas estaciones representadas con el pin rojo, según las observaciones extraídas del **Gráfico 5.4**, donde principalmente resulta básico compensar la fuerte demanda que provoca la estación 1 por su proximidad a Oslo. En segundo lugar, se decide compensar la parte final de la autopista, entre Kristiansand y Stavanger ya que existe un consumo energético medio no desdeñable. En la nueva situación, estas dos estaciones pasan a ser respectivamente la 2 y la 5.

Resuelto una vez la ubicación y el número de estaciones escogido, en una primera iteración, se quiere conocer la cantidad necesaria de potencia a instalar. Para ello, de nuevo se van a considerar los dos criterios comentados para el caso del LDV, sin embargo, operando del mismo modo se va a usar el criterio del consumo energético máximo para ser coherente con la filosofía escogida previamente. Por lo que, recordando que del apartado anterior 5.1.2, donde el incremento de demanda a satisfacer es $\Delta CE_{FCS\ HDV\ 2025} = 70.560,05 \left[\frac{kWh}{h} \right]$, se pretende lanzar el modelo de demanda incorporando las dos nuevas estaciones para obtener de su tendencia máxima, la cantidad de potencia a instalar. Dicho esto, se muestra a continuación el perfil del consumo máximo de las distintas estaciones con el nuevo modelo de 2025 en el **Gráfico 5.9**:

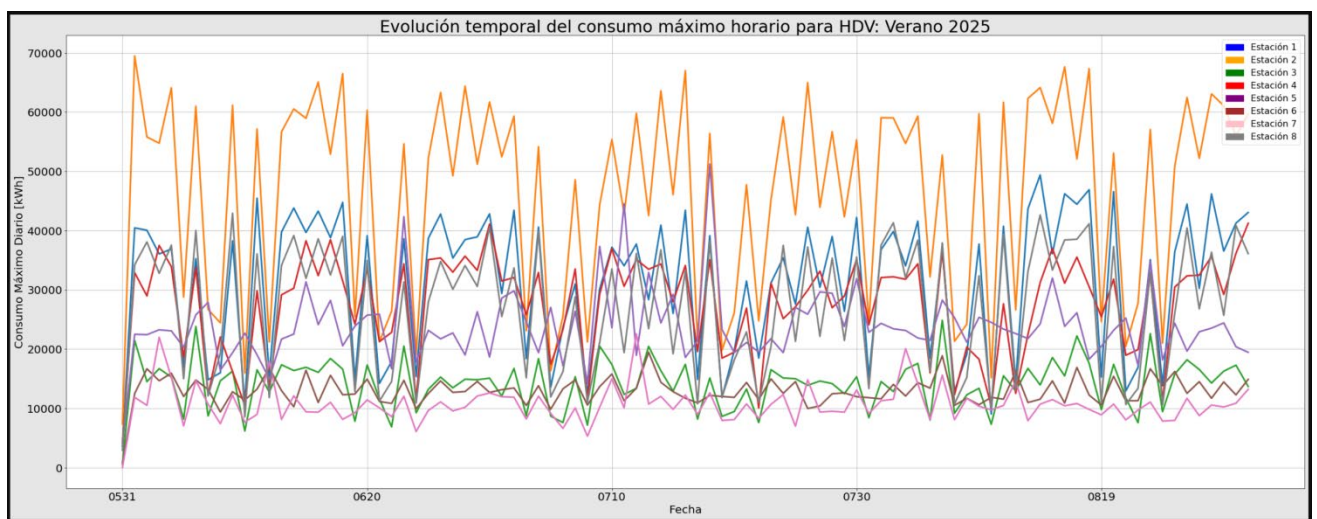


Gráfico 5.9. 1ª iteración de la evolución temporal del uso energético máximo para vehículo pesado en 2025

Observando las tendencias de consumo de las distintas estaciones del anterior **Gráfico 5.9** es evidente que de nuevo estas presentan unos valores superiores con creces a la del modelo actual de 2022. No obstante, la instalación el perfil de consumo de la estación 1, con color azul, queda algo menos pronunciado y más compensado respecto el modelo actual tal y como se muestra en el **Gráfico 5.4**. Esto se debe al gran peso que tiene la instalación de la nueva estación 2, el consumo de la cual roza en ocasiones los $en\ 70.000 \left[\frac{kWh}{h} \right]$. Este dato resulta ser muy significativo ya que indica que se concentra gran parte del consumo de la infraestructura en un tramo de pocos kilómetros, cercano a Oslo. Por esta razón es imprescindible poner el foco en este tramo ya que una instalación de $en\ 70.000 [kW]$ ya que se puede producir una caída voltaje considerable en alguna ocasión y puede ser algo perjudicial para la estabilidad de la red. Con esta premisa tenida en cuenta, se propone una segunda iteración al modelo que incorpore la instalación de una tercera estación incrustada entre las dos mencionadas que actúe de instalación de carga auxiliar para no saturar las dos principales (**Figura 5.3**):

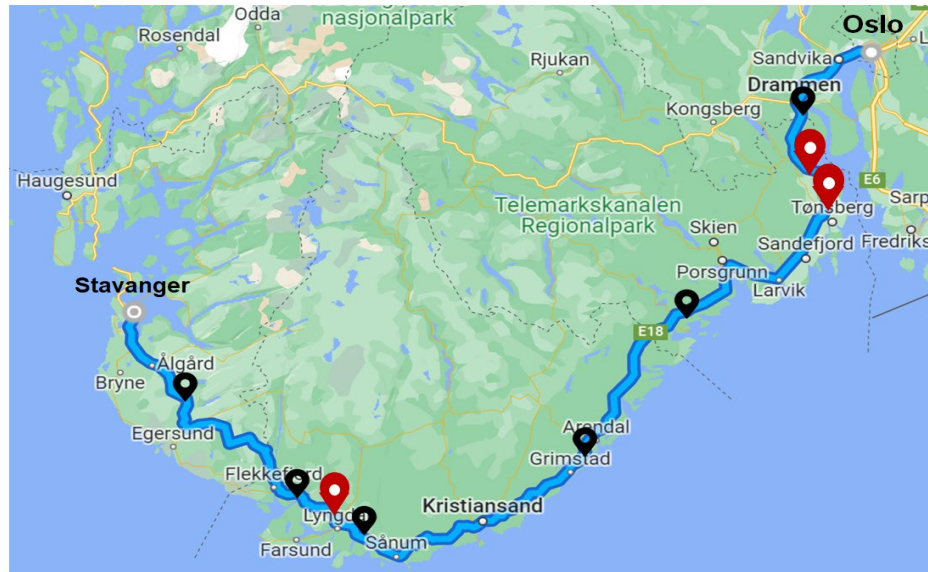


Figura 5.3. 2ª Iteración del conjunto de estaciones de carga para HDV en 2025 con las nuevas estaciones en rojo

A partir de la instalación la nueva estación de carga con una función auxiliar, se vuelve a hacer correr la simulación para obtener los siguientes resultados en el próximo **Gráfico 5.10**:

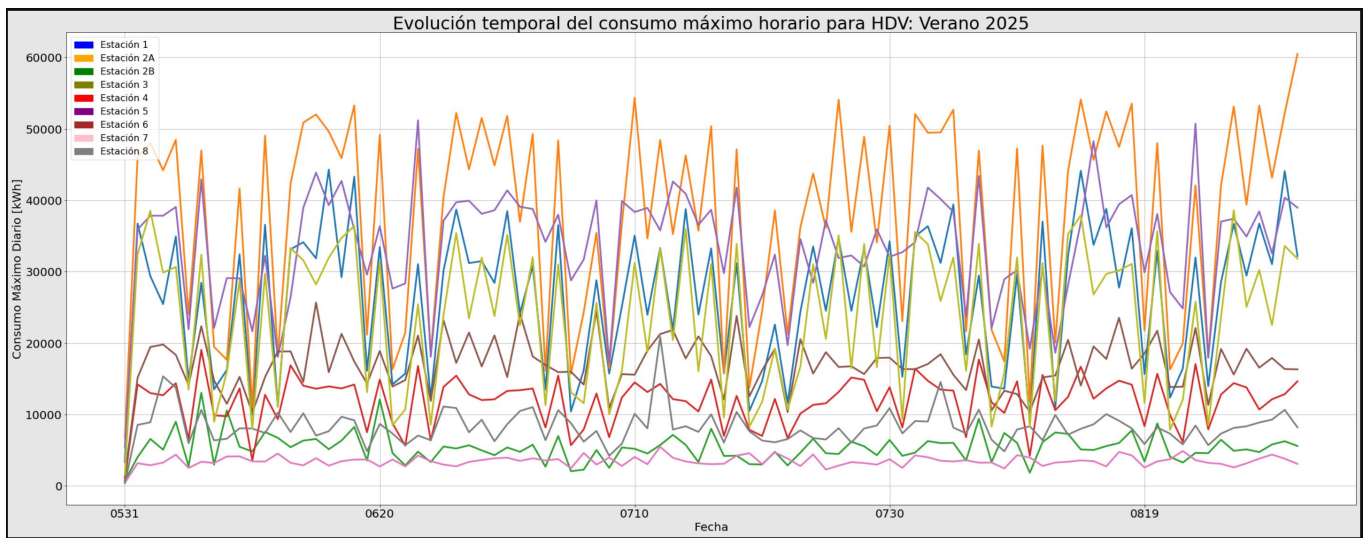


Gráfico 5.10. 2ª iteración de la evolución temporal del uso energético máximo para vehículo pesado en 2025

Reflexionando sobre esta segunda iteración, se puede concluir que sí efectivamente la incorporación de una nueva pequeña estación auxiliar rebaja la presión sobre la red y compensa los picos previamente inasumibles para la instalación. En términos cuantitativos, parece algo difícil distinguir entre que rango de potencias a instalar se mueve la nueva estación, por lo que se va a graficar en detalle las dos estaciones del tramo crítico: la estación principal 2A pintada en naranja y la estación auxiliar 2B representada en verde suave (**Gráfico 5.11** y **Gráfico 5.12**):

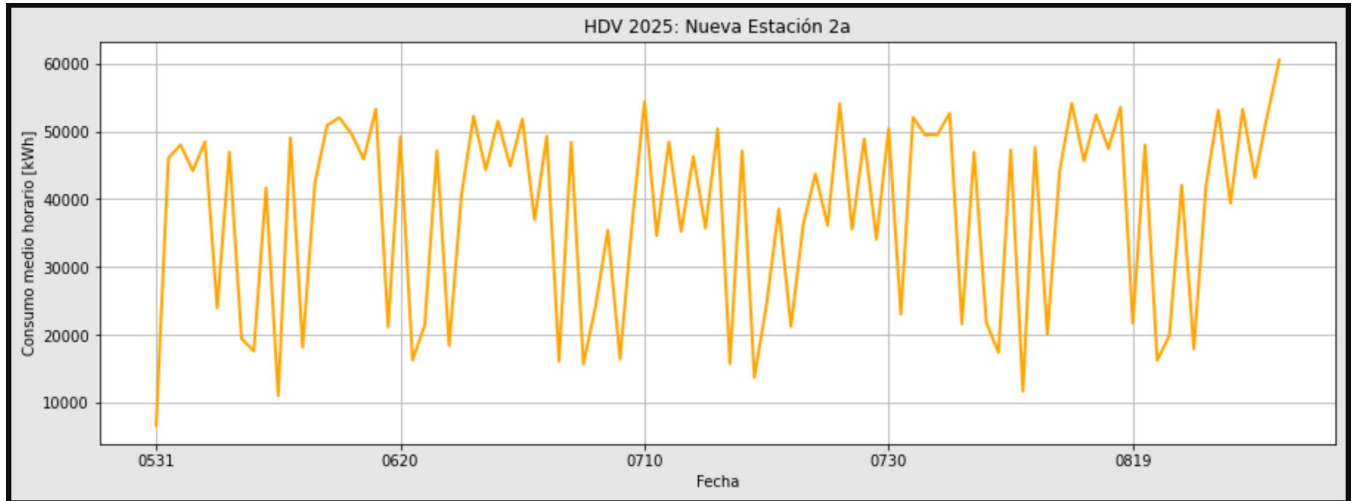


Gráfico 5.11. Evolución temporal del consumo máximo de la nueva estación 2A, para vehículo pesado en 2025

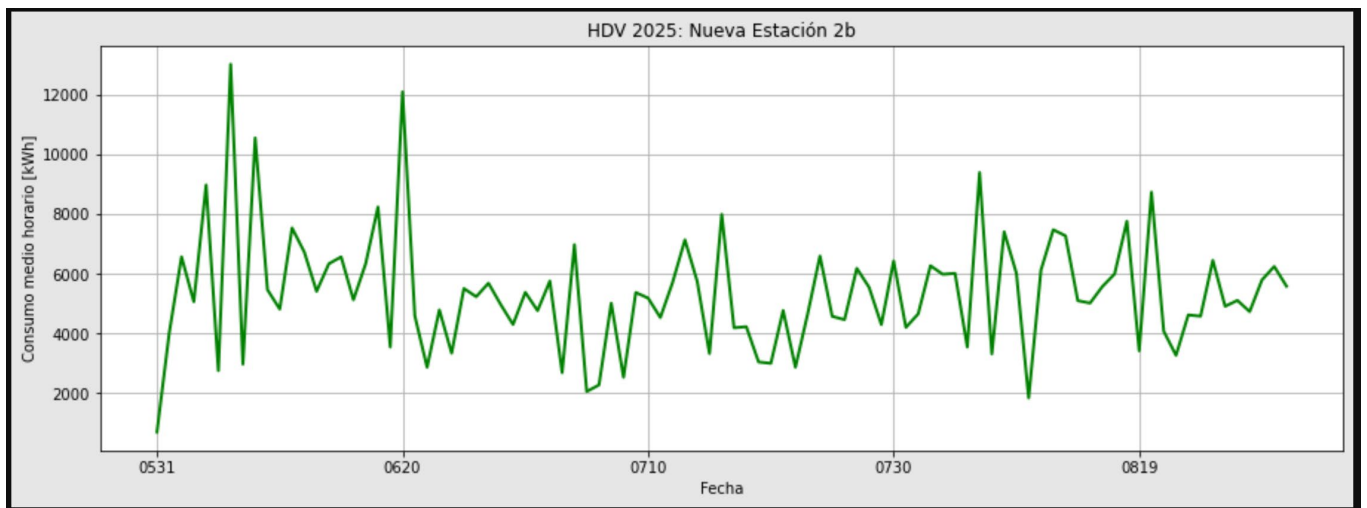


Gráfico 5.12. Evolución temporal del consumo máximo de la nueva estación 2B, para vehículo pesado en 2025

En estos momentos sí que se está en disposición de conocer las potencias necesarias a instalar en cada una de las dos estaciones del tramo crítico. Para el gráfico de la primera estación, el pico máximo se sitúa rozando los $60.000 \left[\frac{kWh}{h} \right]$, hecho que indica una cierta disminución de $10 [MW]$ respecto la primera iteración y por lo tanto se concluye que esta será la magnitud de referencia a instalar en la estación 2A. En cambio, observando el perfil de la segunda estación, dado que el pico más pronunciado se mueve entorno los $13.000 \left[\frac{kWh}{h} \right]$, siguiendo el criterio de satisfacer la demanda máxima se plantea instalar esta misma potencia en la estación 2B. Finalmente, si se recuerda la condición indispensable del incremento de demanda a cubrir para el HDV de $\Delta CE_{FCS HDV 2025} = 70.560,05 \left[\frac{kWh}{h} \right]$, se observa que la suma de las potencias que se pretenden instalar es superior al $\Delta CE_{FCS HDV 2025}$ y por lo tanto se puede dar por válida la propuesta del criterio máximo.

Antes de acabar el capítulo cabe plantear la situación donde el criterio utilizado es el consumo energético medio y por lo tanto, al igual que se propone en el caso del LDV sería necesario el almacenamiento de baterías para suplir la diferencia entre el perfil medio y los picos de demanda observados. Toda esta situación, se plantearía en un escenario ideal donde no habría pérdidas por almacenamiento de energía en los equipos y donde incluso se podría llegar a entregar energía a la red en caso que fuese necesario. En todo este contexto, los perfiles hipotéticos de demanda energéticos medios para las estaciones se plasman en el próximo **Gráfico 5.13**:

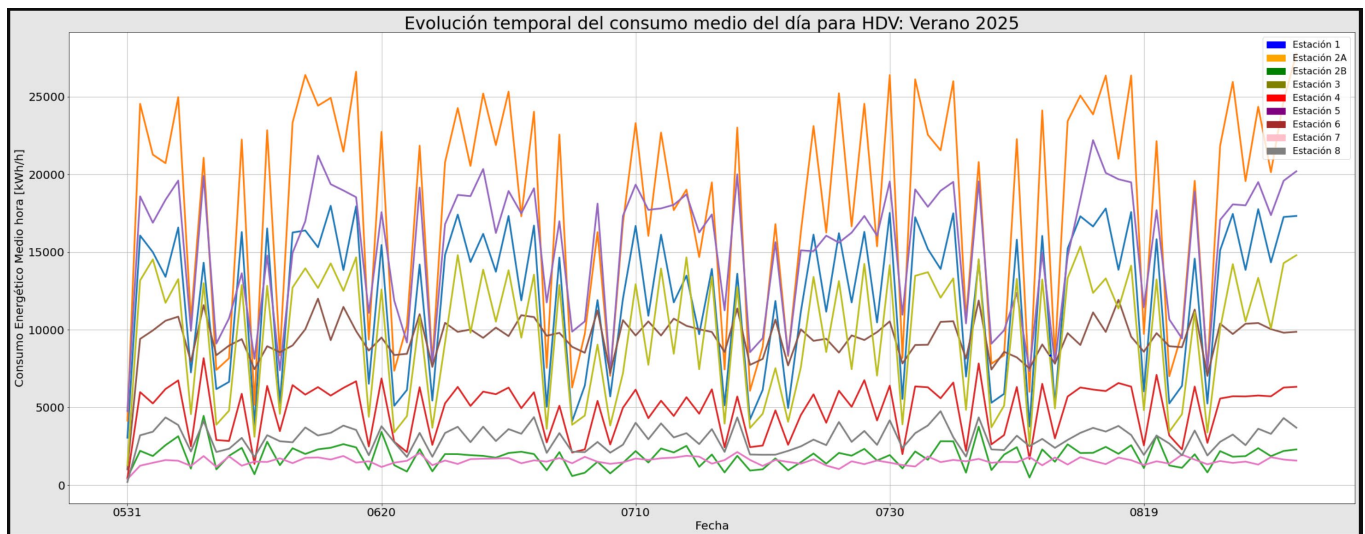


Gráfico 5.13. Evolución temporal del uso energético medio de las estaciones para vehículo pesado en 2025.

De la misma manera que se ha analizado previamente con el LDV, se calcula el ratio entre el pico del consumo máximo y el consumo medio obteniendo el siguiente valor: de $\frac{CE_{Max}}{CE_{Med}} = \frac{6}{2,5}$. Una vez más se observa que mantiene un ratio muy parecido al calculado con el LDV ya que con el criterio máximo se tienen de referencia unos $60.000 \left[\frac{kWh}{h} \right]$, mientras que para el criterio del consumo medio se tiene que el pico máximo ronda los $25.000 \left[\frac{kWh}{h} \right]$.

6. Propuesta definitiva

Una vez obtenidos los resultados deseados en las simulaciones, se está finalmente en disposición de plantear una propuesta formal de instalación de puntos de carga más detallada para poder llevarse a cabo paulatinamente hasta la fecha marcada. Esta misma propuesta pretende no solamente aportar un detalle cuantitativo de los puntos que se quieren alojar en cada parque de carga una pequeña sino que, también se va a dar una pequeña pincelada desde una visión económica.

6.1 Instalación de las nuevas estaciones para el LDV

En el panorama del vehículo ligero, a partir de los cálculos computados, se tiene que la solución para satisfacer la futura demanda son dos estaciones de carga de un total de 45.000 [kW] y 40.000 [kW] para cada una de ellas respectivamente. Para suministrar tal cantidad de potencia, en cada una de las estaciones se van a instalar un conjunto de cargadores rápidos de la marca Tesla. El modelo escogido para la instalación es el Tesla Supercharger V4 y actualmente está en proceso de desarrollo. Sin embargo, se espera que para 2025 el modelo ya esté testado y en el mercado. Entre las especificaciones técnicas más relevantes destacan principalmente una potencia nominal de 500 [kW], suministra en CC y el voltaje de entrada es de 900 [V] [32]. Gracias a esta información respecto a las prestaciones técnicas del dispositivo y a la potencia de la estación a suministrar ya se puede realizar un plan de instalación detallado:

| PLAN DE INSTALACIÓN DE PUNTOS CARGA PARA LDV | | | | | | | |
|--|------------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| Nº Estación | Potencia de la estación [kW] | Coefficiente de seguridad γ [-] | Potencia de la estación [kW] | Potencia nominal del cargador [kW] | Nº de super-cargadores | Coste unitario [€] [33] | Coste Total [€] |
| Estación 2 | 45.000 | 1,05 | 47.250 | 500 | 95 | 100.000 | 9.500.000 |
| Estación 12 | 40.000 | 1,05 | 42.000 | 500 | 84 | 100.000 | 8.400.000 |
| TOTAL (SIN IVA) | | | | | | | 17.900.000 |

Tabla 6.1. Plan de instalación de puntos de carga para LDV

Para el cálculo de la inversión total a realizar, es imprescindible mencionar que por un lado el precio estimado es aproximado según [33], mientras que por otro lado ha empleado un coeficiente de seguridad en la potencia requerida. La razón por la cual se ha aplicado no es otra que la protección de los equipos, la cual puede verse comprometida en caso de producirse una sobretensión a causa de un pico de demanda inesperado que finalmente pueda acabar elevando la temperatura y provoque un incendio indeseado.

6.2 Instalación de las nuevas estaciones para el HDV

En términos del vehículo pesado, la metodología que se va emplear para planificar con detalle los parques de carga no difiere prácticamente respecto el caso del LDV. Gracias a las observaciones de los perfiles de demanda futuros llevadas a cabo en el apartado 5.2.2, resulta posible empezar a proponer una solución definitiva que solo requiera de fondos de inversión para materializarse.

Recordando la situación futura para el vehículo pesado descrita en anterioridad se tiene que deben alojarse dos estaciones; una principal conocida como 2A que requiere de 60.000 [kW] y una auxiliar llamada previamente 2B que debe contar como mínimo con 12.000 [kW]. También cabe recordar que se tenía inicialmente una estación 5, considerada en la primera iteración, pero debido a su reducida influencia se ha acabado por descartar del plan en última instancia, por lo que solamente se pretenden instalar puntos de carga en las dos estaciones nombradas con una cantidad definida.

Para entregar la potencia requerida y teniendo en cuenta el gran tamaño de precisan las baterías, se debe instalar un cargador acorde a las necesidades del vehículo. Por este motivo se va a emplear un megacargador de última tecnología que sea capaz de cargar el vehículo en un tiempo aceptable para la realización óptima de sus rutas comerciales. Para ello, el megacargador elegido para su instalación es el Tesla Semi Megacharger. En estos momentos se encuentra en una prueba piloto en la gigafactoría de Tesla en Nevada y se espera que su comercialización se haga efectiva en los próximos años [34].

Si bien es cierto que no se tienen los detalles específicos de su ficha técnica ya que se encuentra en una fase muy prematura de su desarrollo, las últimas informaciones apuntan a que podría llegar a suministrar la no desdeñable cantidad de 1.500 [kW], una potencia nominal que podría llegar a cargar la batería de un vehículo comercial medio en poco más de media hora. Partiendo de estos niveles de potencia de carga y la potencia requerida en cada una de las estaciones, se propone realizar una tabla resumen tal y como se ha empleado previamente para arrojar algo más de luz respecto al plan de instalación de los vehículos eléctricos HDV:

| PLAN DE INSTALACIÓN DE PUNTOS CARGA PARA HDV | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| <i>Nº Estación</i> | <i>Potencia de la estación [kW]</i> | <i>Coefficiente de seguridad γ [-]</i> | <i>Potencia de la estación [kW]</i> | <i>Potencia nominal del cargador [kW]</i> | <i>Nº de super-cargadores</i> | <i>Coste unitario [€] [35]</i> | <i>Coste Total [€]</i> |
| <i>Estación 2A</i> | 60.000 | 1,05 | 63.000 | 1.500 | 42 | 750.000 | 31.500.000 |
| <i>Estación 2B</i> | 12.000 | 1,05 | 12.600 | 1.500 | 9 | 750.000 | 6.750.000 |
| TOTAL (SIN IVA) | | | | | | | 38.250.000 |

Tabla 6.2 . Plan de instalación de puntos de carga para HDV

De acuerdo con [35] se ha considerado un coste de 750.000 [€] ya que se estima el coste de una estación de 4 megacargadores en 3.000.000 [€]. Dado que el Tesla Semi Megacharger se trata de una prueba piloto y no se tiene un precio concreto, se debe tomar el coste total obtenido como una referencia aproximada. Sin embargo, pese a la incertidumbre respecto a las cifras concretas del coste, es evidente que supera con creces al coste correspondiente a la instalación del supercargador para vehículo ligero.

También, para el caso del HDV es de relevancia mencionar el coeficiente de seguridad usado en la potencia requerida. El motivo de su aplicación también se basa en un criterio para velar por la seguridad de los equipos y evitar sobrecalentamientos inesperados.

7. Presupuesto

Para realizar un buen estudio hay que tener en cuenta que se han consumido una serie de recursos que suponen un cierto coste. Para ello, se ha creído conveniente elaborar un pequeño análisis de todos los medios necesarios para llevar a cabo este proyecto. A continuación, se detallará en profundidad qué tipo de recursos se han emprendido desde diferentes puntos de vista.

7.1 Presupuesto del personal

En este ámbito, el término como presupuesto para el personal es el dedicado al número de horas necesarias computadas para la finalización del estudio, es decir, el global de horas trabajadas. Todo este conjunto de tareas se convierte en una clasificación que depende de la naturaleza de la actividad realizada, ya que cada una puede tener un coste asociado diferente. El tipo de actividades que se han realizado pueden dividirse en tareas de investigación con un coste aproximado de 20 €/h; tareas de redacciones con un precio de 25 €/h o también tareas de modelización y simulación, donde a causa de la naturaleza técnica se puede llegar a considerar un valor de 30 €/h.

A continuación se muestran los cálculos pertinentes para obtener el presupuesto final en este ámbito, considerando un número estimado de horas trabajadas en función de la tipología de las actividades del estudio en la próxima **Tabla 7.1**:

| PRESUPUESTO DEL PERSONAL | | | |
|--|----------------------------|------------------------------|------------------------|
| <i>Tipo de actividad</i> | <i>Número de horas [h]</i> | <i>Coste unitario [€/ h]</i> | <i>Coste total [€]</i> |
| Documentación | 100 | 20 | 2.000,00 |
| Redacción | 150 | 25 | 3.750,00 |
| Modelización | 175 | 30 | 5.250,00 |
| Presupuesto total (SIN IVA) | | | 11.000,00 |

Tabla 7.1 Presupuesto del personal

7.2 Presupuesto del material

En referencia a los recursos físicos necesarios, un ordenador portátil ha sido la herramienta indispensable para el proyecto. Paralelamente, en segundo lugar, se han realizado algunos apuntes de la asignatura de Ciencia de Datos para la Industria 4.0 para refrescar conceptos. Finalmente, un gráfico de plenos blancos y un bolígrafo se han utilizado para hacer esquemas del modelo y aclarar algunos aspectos. Con este conjunto de material físico, se ha creado la siguiente **Tabla 7.2**:

| PRESUPUESTO DEL MATERIAL | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|-----------------|
| Tipo de material | Unidades [ud.] | Coste unitario [€/ ut] | Vida útil [Años] | Tiempo amortizado [Meses] | Coste amortización [€] | Coste total [€] |
| Ordenador portátil | 1 | 1050,00 | 6 | 5 | 72,92 | 72,92 |
| Cuaderno de apuntes | 1 | 37,50 | - | - | - | 37,50 |
| Bolígrafo | 1 | 0,60 | 0,5 | 3 | 0,3 | 0,30 |
| Hojas blancas | 15 | 0,05 | - | - | - | 0,75 |
| Presupuesto total (SIN IVA) | | | | | | 111,47 |

Tabla 7.2. Presupuesto del material

Para el cálculo del coste unitario del cuaderno de notas de Ciencia de Datos para la Industria 4.0, se ha tenido en cuenta el coste asociado de 37,5 [€/ECTS] de la asignatura de Ciencia de Datos. Además, se han considerado unas 25 horas de clase para la elaboración de los apuntes relacionados con los temas de regresión lineal y múltiple. Finalmente, dado que un ECTS es paradójicamente 25 horas de forma aproximada, se puede concluir que el coste del cuaderno de apuntes es de unos 37,5 [€].

7.3 Presupuesto del software y suscripciones

Por lo que hace al coste dedicado a las licencias de software, se ha valorado lo que ha sido el conjunto de programas utilizados en el estudio. Concretamente, en este proyecto el software empleado ha sido Jupyter Notebook como editor de texto para hacer correr las simulaciones del modelo de demanda a coste cero. Sin embargo, también se ha hecho uso de RStudio Cloud para generar los modelos de regresión estadísticos que implica una suscripción anual.

En segundo lugar, se ha empleado el Paquete Office mediante Microsoft Word como editor de texto para la redacción. También a parte de este último, se ha usado Microsoft Excel, por lo que, el uso del propio Paquete Office ha comportado el coste de una suscripción anual.

Finalmente, para hacer la búsqueda bibliográfica se han visitado varios sitios web como IEEE Xplore y Elsevier donde se requiere una suscripción para obtener la información útil:

| PRESUPUESTO DE LICENCIAS | | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| <i>Programa - Suscripción</i> | <i>Coste [€/ año]</i> | <i>Tiempo usado [Meses]</i> | <i>Coste total [€]</i> |
| RStudio Cloud | 1.200 | 5 | 500,00 |
| Microsoft Word/Excel | 120 | 5 | 50,00 |
| IEEE Xplore | 27 | 3 | 6,75 |
| Elsevier | 134 | 3 | 33,50 |
| Presupuesto total (SIN IVA) | | | 590,25 |

Tabla 7.3. Presupuesto de licencias

7.4 Presupuesto total del proyecto

En este apartado se muestra toda la cantidad total de recursos económicos necesarios para mantener el estudio realizado. Mientras tanto, el presupuesto global se calcula a partir de una suma de gastos de prensa desglosados anteriormente en este punto (**Tabla 7.4**):

| PRESUPUESTO TOTAL | |
|------------------------------------|--------------------|
| <i>Tipo de presupuesto</i> | <i>Coste [€]</i> |
| Personal | 11.000,00 |
| Material | 111,47 |
| Licencias | 590,25 |
| Presupuesto total (SIN IVA) | 11.701,72 |
| IVA (21%) | 2.457,36 |
| PRESUPUESTO TOTAL (CON IVA) | 14.159,08 € |

Tabla 7.4. Presupuesto total

| Fecha: | Fecha de vencimiento: | Firma del presupuestante: | Firma del solicitante: |
|-------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 16 setiembre 2022 | 31 diciembre 2022 | JOAN PINO | x |



8. Evaluación del impacto ambiental

Dado el caso hipotético en que se diera luz verde al inicio del proyecto, sería necesario hacer hincapié en el aspecto básico que se contempla en todo proyecto de hoy en día: una evaluación de impacto ambiental para la instalación del conjunto estaciones de carga propuestas. Además, la presentación de este capítulo resulta más trascendente en cuanto a la tipología del estudio, completamente ligada a la responsabilidad sobre el medio ambiente.

La producción eléctrica del país escandinavo está basada principalmente en fuentes energías renovables, como es el caso de la hidroeléctrica, clave en la producción energética de Noruega. Esta política está claramente relacionada en tratar de reducir la huella de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de generación de energía eléctrica. No obstante, el suministro eléctrico de los cargadores rápidos de las estaciones de carga no está exento por completo de la generación de hidrocarburos. Previamente al proceso de producción energética, existen una serie de etapas previas que la hacen posible como por ejemplo la fabricación de convertidores y componentes eléctricos de protección, el transporte de los componentes hasta el lugar de la instalación o bien el propio proceso de obtención de materias primas, implican un cierto consumo de energía, que no tiene por qué proceder de fuentes renovables precisamente. Todo este conjunto de emisiones son emisiones indirectas, ya que vienen implícitas a causa de la propia fabricación de los productos.

Sin embargo, hay que destacar un componente que resulta imprescindible para que el suministro eléctrico se haga efectivo y ese no es otro que la batería del coche. Si bien es cierto, que en la propia instalación de puntos de carga no se incluye un banco de baterías, no se puede obviar el hecho que se esté apostando por el uso de las baterías en los vehículos. En referencia a su vida útil, las baterías disponen de una corta vida útil, por esta razón, el cambio y la eliminación del banco de baterías usadas tendrá un impacto u otro según el tipo de batería utilizada. Por ejemplo, aquellas baterías que emplean iones de litio tienen una vida útil más larga y son una tecnología más limpia que las baterías de ácido de plomo, por lo que las baterías de iones de litio tienen un menor impacto ambiental que las de ácido de plomo [27].

Es de mencionar también el grave problema que suponen las baterías de EV a final de su vida útil, por lo que hay que considerar que estas tengan una segunda vida. Un ejemplo de ello es el uso en aplicaciones estacionarias como por ejemplo el caso real de 2600 módulos de batería ya usados en EV que ahora sirven para almacenar la electricidad de la red general. La energía almacenada en estas baterías está disponible en cuestión de segundos y mantiene la estabilidad de la red [28]. Aunque la batería no rinda de forma tan óptima, se reduce aproximadamente en 75% [29] el impacto ambiental respecto una batería nueva.

Por otra parte, siendo meticulosos, todos los componentes necesarios para la instalación de los distintos cargadores requieren también de un análisis de ciclo de vida (ACV), el cual está regulado por las normas ISO 14040 [30]. El ACV consiste en una técnica útil que sirve para evaluar el impacto ambiental asociado a las diferentes etapas de la vida de un producto desde la extracción de materias primas pasando por la transformación y el uso, y finalmente el reciclaje de sus materiales. A continuación, se muestra como los diferentes tipos de cargador afectan en emisiones en relación a su manufactura, funcionamiento y reciclaje:

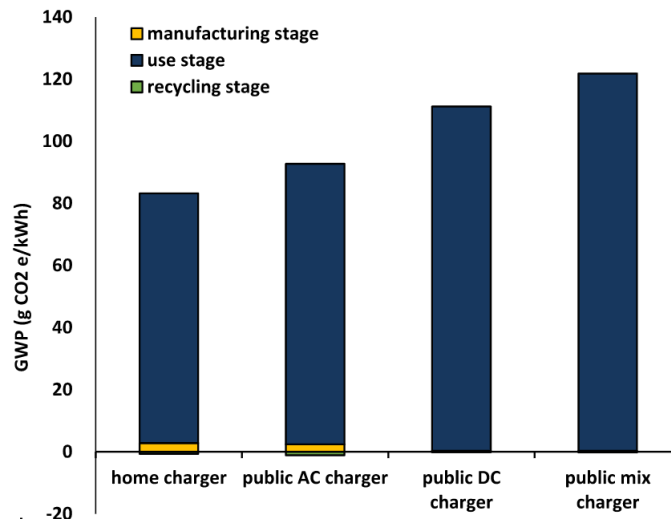


Gráfico 8.1. Comparativa del impacto ambiental de los distintos cargadores que hay en el mercado [31]

En el anterior **Gráfico 8.1**, se observa que impacto tienen en el medioambiente los distintos posibles cargadores que existen hoy en día. También, resulta interesante destacar que aquellos que emiten más contenido de CO₂ como es el caso de los cargadores públicos DC y mixto, a su vez proporcionan más cantidad de potencia. Así que no hay un cargador que cuente con todas las ventajas.

Poniendo el foco en el funcionamiento de las estaciones de carga propuestas a instalar, se pasan a valorar todos los aspectos relacionados con el mismo funcionamiento de la estación de carga que pueden tener un cierto impacto.

En primer lugar, resulta fundamental no olvidar que la eficiencia de los cargadores pese a no ser desdeñable no es del 100% y por lo tanto implica instalar un gran número de puntos de carga tal y como se propone en la solución final del estudio. Esto implica una gran extensión de terreno que provoca un considerable impacto visual, pero sobre todo al ecosistema de la zona en la fauna y la flora quedan considerablemente afectadas.

Por otra parte, la contaminación acústica provocada principalmente por los componentes, como el ruido de los convertidores, representa un impacto forzoso en el medio ambiente, ya que estas estaciones de carga pueden llegar a situarse en zonas cercanas a poblaciones.

También merece especial mención el hecho de tener un buen mantenimiento de los componentes eléctricos del punto de carga con el objeto de intentar reducir el riesgo de producir incendios. Por este motivo, resulta muy importante seguir un protocolo de instalación de protección contra incendios de acuerdo con la normativa vigente.

Finalmente en términos de reciclaje, dado que los cargadores llevan relativamente poco tiempo desarrollándose, la estimación del final de la vida útil es más bien una predicción que un cálculo. En relación a los cargadores rápidos, la vida útil está entorno a los 12 años aproximadamente [31]. Si bien es cierto que la fase de desmontaje del cargador rápido puede llegar a ser laboriosa, el reciclaje de los materiales que lo componen no es una quimera. Se prevé que el principal material reciclado serán los metales, cuyas tasas de reciclaje son del 85% para el hierro, el 90% para el acero y el 95% para el aluminio y el cobre. El vertedero se considera el método de eliminación final.

Conclusiones

En este proyecto se ha realizado un estudio exhaustivo de planificación de instalar estaciones de carga, realizando un análisis de la demanda futura a satisfacer mediante un modelo estadístico de regresión. Así y todo, el proyecto en cuestión no hubiera sido posible si no se hubiera modelizado la demanda actual de los EVs en los tramos de las autopistas E18 y E39. Gracias al diseño de estos modelos, se ha conseguido lanzar una serie de simulaciones que no sólo han servido para completar los objetivos propuestos originando un conjunto de resultados, sino que también han aportado información específica que ha permitido dar valor al proyecto. A continuación se exponen las conclusiones y resultados fruto de las experimentaciones:

- A partir del flujo del tráfico de una autopista y de la ubicación de las estaciones es posible diseñar un modelo de demanda energético de vehículos eléctricos. Gracias a este diseño, se permite obtener parámetros clave para la implantación de futuras estaciones de carga.
- La utilización del modelo estadístico de regresión se confirma como válida para el estudio. Los parámetros estadísticos que soportan su funcionamiento avalan su validez y por lo tanto, pese a que se pueden explorar otras alternativas, podría extrapolarse a más casos de estudio parecidos al presente.
- Los parámetros energéticos ofrecidos por el modelo de demanda entre el LDV y el HDV difieren considerablemente, especialmente el ratio base de consumo energético por vehículo siendo 30 veces superior para el vehículo pesado que para el vehículo ligero.
- Un buen recurso para rebajar la potencia a instalar en una estación en caso que esta sea muy elevada y perjudicial para la estabilidad de la red consiste en alojar una pequeña estación auxiliar cercana a la principal, para poder absorber toda aquella demanda restante en determinados picos de demanda.
- En relación al coste económico de la implantación de las nuevas estaciones, para el caso del LDV se presume viable por los cálculos realizados, mientras que para la tipología de vehículo pesado si bien es cierto que es una opción viable limitación técnica, en términos económicos supone una inversión de más del doble respecto al vehículo ligero. Por este motivo, resulta imprescindible estudiar otros medios de electrificación como el de tipo conductivo o inductivo.

Futuros trabajos

En este estudio se ha propuesto el diseño de un sistema de electrificación para las autopistas E18 y E39 basado en la carga estática por una cuestión de madurez actual de la tecnología y por una cuestión de complejidad respecto a otros sistemas de electrificación. Sin embargo, tal y como se ha dejado entrever en las conclusiones una línea de investigación viable es proponer un diseño con carga dinámica debido a las desventajas que presentan las grandes baterías de HDV.

En la conformación del modelo de demanda se han realizado una serie de simplificaciones con la finalidad de facilitar los cálculos y proponer unas primeras conclusiones. No obstante, se han realizado unas hipótesis que no muestran la realidad completamente como por ejemplo el hecho que en las estaciones de carga no se contemplan un algoritmo de colas, es decir, el vehículo en cuanto llega realiza la recarga inmediatamente independientemente de los vehículos que estén cargando en aquella misma hora. También podría ser interesante valorar el tiempo de carga para futuros estudios, algo que en principio se iba a presentar en el actual proyecto pero que finalmente ha quedado relegado en segundo plano.

Finalmente, en relación a la predicción del consumo energético futuro de los EVs, se puede proponer un modelo alternativo a la regresión lineal que podría dar una explicación más satisfactoria. Por este motivo, una vía a explorar en esta dirección sería mediante métodos basados en árboles como es el caso del *boosting*. También, para dar una mayor precisión de la predicción, existe otra posibilidad basada alguna técnica de tipo supervisado como es el caso de k-NN.

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a mi familia y amigos por el apoyo incondicional que siempre me han transmitido durante el transcurso del proyecto. Además, la realización del estudio no habría sido posible sin la ayuda de mis dos tutores: Andreas Sumper y Verónica Martínez por estar proponiéndome soluciones y alternativas delante de las complicaciones que han ido surgiendo a lo largo del estudio.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

Ejemplos de libros, artículos, catálogos, material informático y material obtenido en la red:

- [1] LA VANGUARDIA. *La UE prohibirá las ventas de coches nuevos con motor de combustión en 2035*. <https://www.lavanguardia.com/natural/20220629/8373253/ue-prohibira-ventas-coches-nuevos-motor-combustion-2035.html>
- [2] MOTORPASION (Abril 2020). *Anatomía de un coche eléctrico: su sencillez mecánica al desnudo*. <https://www.motorpasion.com/coches-electricos/anatomia-coche-electrico-su-sencilla-mecanica-al-desnudo>
- [3] EL PAIS. *Noruega, un mundo eléctrico ideal*. <https://motor.elpais.com/coches-electricos/noruega-un-mundo-electrico-ideal/>
- [4] CITCEA-UPC. *Electrical Infrastructure Design Methodology of Dynamic and Static Charging for Heavy and Light Duty Electric Vehicles*, p.1-6
- [5] OMOSONYA, HAFEEZ ALBOLADE (2019). *Wireless Charging for Small Electric Vessels*, p.19
- [6] A. AHMAD, M. S. ALAM (March 2018). *A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles*, p. 38-59.
- [7] VOLKSWAGENAG (2018). *Towards a Zero Impact eHighway*. p. 15-18
- [8] ARBOLEYA, P.; MAYET, C.; MOHAMED, B.; AGUADO, J.A.; DE LA TORRE, S. (2020). *A Review of Railway Feeding Infrastructures: Mathematical Models for Planning and Operation*. *eTransportation*, p. 5
- [9] MAREEV, I.; UWE SAUER. D (December 2018). *Energy Consumption and Life Cycle Costs of Overhead Catenary Heavy-Duty Trucks for Long-Haul Transportation*, p. 3-6
- [10] KHRULENKO, A. (August 2020). *How Norwegian traffic data reflect weekdays, weekends, holidays, vacations and COVID-19*, p. 1-3
- [11] MELUZZI, F.; DANESE, A.; SUMPER, A (June 2021). *Electrification of E18 highway: Renewables Integration Analysis*. p. 5 -17.
- [12] OPEN STREET MAP (August 2022). <https://www.openstreetmap.org/#map=5/51.500/-0.100>
- [13] NVE (August 2018). *The Norwegian power system: Grid connection and licensing*. p. 1
- [14] ENERGY FACTS NORWAY (February 2021). *Electricity production*. p. 1

- [15] ENTSOE (January 2019). *ENTSO-E Transmission System Map*. [Imagen mapa]
- [16] EENERGY FACTS NORWAY (April 2019). *Grid levels: Transmission and distribution grid*. p. 1
- [17] LANGHELLE, O., BOHNE, R., NØRBECH, T., (2018). *Electric roads in Norway?* p.6
- [18] NOBIL. *Nuevo módulo de estadísticas*. (2022). [<https://info.nobil.no/statistikk>] p.1
- [19] Olsson, O., (January 2013) *Slide-in electric road system, inductive project report*. p.65
- [20] STATENS VEGVESEN. [<https://www.vegvesen.no/trafikkdata/start/om-api>] (February 2022).
- [21] GOOGLE. [<https://www.google.es/maps/>] (August 2022).
- [22] STATISTA (2020), *Market share of plug in hybrid and battery electric LCVs in Norway*. [Gráfico]
- [23] ANDREW, R. (July 2022), *Norway EV sales and related data*. [Gráfico]
- [24] EL CONFIDENCIAL, (Septiembre 2021)*Noruega, la avanzadilla de Europa: así podría ser la futura España de los coches eléctricos*. p.1.
- [25] RSTUDIO CLOUD. [https://rstudio.cloud/content/yours?sort=name_asc] [Herramienta de cálculo]
- [26] PUIG, I. (September 2021) *Linear Models Seminar*. [[https://linearModelsSeminar%20\(6\).html#warm-up-1-wind-turbines](https://linearModelsSeminar%20(6).html#warm-up-1-wind-turbines)]
- [27] MATS ZACKRISSON (June 2021), *Life cycle assessment of electric vehicle batteries and new technologies*. p.18-28.
- [28] BMW (Septiembre 2020). *El ciclo de batería del coche eléctrico*. p. 3
- [29] CANALS, L., PUEYO, C. (2020). *Greenhouse gas emissions comparison between new versus second life batteries. Digital Proceedings of the 15th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*: p.1–9.
- [30] UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. *Environmental Impacts of Solar Power*. (March 2013)[https://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energychoices/renewableenergy/environmental-impacts-solar-power.html]
- [31] ZHANG, Z. DINGA, N. (August 2019). *Life cycle environmental assessment of charging infrastructure for electric vehicles in China*. p.1-6.
- [32] AGATIE, C. (July 2022). *First Details Emerge About the Future Tesla Supercharger V4*. [<https://www.autoevolution.com/news/first-details-emerge-about-the-future-tesla-supercharger-v4-193548.html>]

[33] MEYER, E. (June 2022). *How Much Does It Cost To Install A Level 3 Charging Station?*.
[<https://www.evspeedy.com/install-level-3-charging-station/>]

[34] ALVAREZ, S. (January 2022). *Tesla Semi Megachargers are very sleek—and surprisingly massive* [<https://www.teslarati.com/tesla-semi-megacharger-size-shockingly-large-photos/>]

[35] DEMUTH, C. (December 2017). *Is Tesla's Mega Charging Network Economically Viable?*
[<https://seekingalpha.com/article/4129286-is-teslas-mega-charging-network-economically-viable>].

