

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

PROYECTO DE FIN DE GRADO

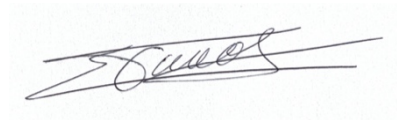
ELECTRIFICACIÓN DE LA LÍNEA DE AUTOBÚS A3247 INTERMODAL DE AUTOBUSES DE BILBAO-AEROPUERTO DE BILBAO, MEDIANTE UN SISTEMA DE CARGA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA ESTÁTICA Y DINÁMICA

Autor: Eduardo Castaños Cortina

Director: Mohamed Bensetti

Madrid

2021



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Electrificación de la línea de autobús A3247

Intermodal de autobuses de Bilbao-Aeropuerto de Bilbao mediante un sistema de carga
por inducción electromagnética estática y dinámica

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2020/21 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro,
ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Eduardo Castaños Cortina

Fecha: 06/ 09/ 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

I supervised the project of the Eduardo Castaños Cortina during the formation at
Centralesupélec



Fdo.: Mohamed BENSETTI

Fecha: 09/09/2021

Agradecimientos

Este trabajo ha sido un largo camino de momentos de búsqueda, pensamiento, trabajo y mucho agobio y sin duda alguna otro hubiese sido el final si no hubiese recibido el apoyo de ciertas personas y por lo tanto no puedo guardarme lo agradecido que estoy. Sin duda alguna, este trabajo también ha sido fruto de muchas alegrías, momentos de satisfacción y sentimiento de progreso y aprendizaje cuando alcanzaba los objetivos.

Agradezco principalmente a mis padres por haberme ayudado y levantado en los momentos de máxima desesperación.

Agradezco a Mohamed Bensetti por haberme introducido a los sistemas de carga por inducción, los cuales me resultaron muy interesantes y dieron fruto a la idea del proyecto. Gracias también por acompañarme y ayudarme todas las semanas.

Agradezco también a Teresa y a mi hermana Julia, por darme fuerzas y amor, gracias a ellas he mantenido la energía e ilusión a lo largo del proyecto.

Finalmente agradecer a todos mis amigos por estar aquí, por hacer posible el desconectar y sentirse en una nube, alegrándonos con sucesos y recuerdos.

Quiero agradecer también a ambas universidades, Universidad Pontificia Comillas y CentraleSupélec, Paris-Saclay por haberme brindado una excelente formación y los medios que me han permitido realizar este proyecto.

Agradezco la colaboración de las empresas Grupo Acha, MAN, greenlof, y Heliox-Energy por haberme ayudado y compartido información de primera mano que sin duda han dado un salto de calidad a mi proyecto.

Y finalmente, agradecer a Dios por toda esta experiencia.

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

PROYECTO DE FIN DE GRADO

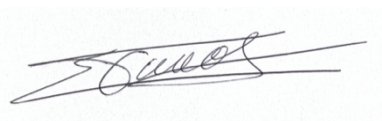
ELECTRIFICACIÓN DE LA LÍNEA DE AUTOBÚS A3247 INTERMODAL DE AUTOBUSES DE BILBAO-AEROPUERTO DE BILBAO, MEDIANTE UN SISTEMA DE CARGA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA ESTÁTICA Y DINÁMICA

Autor: Eduardo Castaños Cortina

Director: Mohamed Bensetti

Madrid

2021



ELECTRIFICACIÓN DE LA LÍNEA DE AUTOBÚS A3247 INTERMODAL DE AUTOBUSES DE BILBAO-AEROPUERTO DE BILBAO, MEDIANTE UN SISTEMA DE CARGA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA ESTÁTICA Y DINÁMICA

Autor: Castaños Cortina, Eduardo

Director: Mohamed Bensetti

Entidades Colaboradoras: CentraleSupélec Paris-Saclay y Universidad Pontificia

Comillas – ICAI

Resumen del proyecto

En este proyecto valoramos los sistemas de carga por inducción electromagnética para los vehículos eléctricos como posible solución a las distintas dificultades que encuentran estos para integrarse en nuestra sociedad como cómo son sus elevados costes, su pobre autonomía y la baja infraestructura de recarga que encuentran hoy en día. Realizamos entonces un estudio técnico económico de estos sistemas de recarga aplicado a la electrificación de la línea de autobuses A3247 que va de la ciudad de Bilbao a su aeropuerto. Valoramos los distintos escenarios de infraestructura de recarga por inducción electromagnética estática o dinámica y de flota de autobuses que nos permiten el buen funcionamiento de esta línea eléctrica. El proyecto se ha dividido en tres casos: únicamente carga estática, únicamente dinámica y el caso híbrido con ambos sistemas de carga. Comparamos cuál sería el coste de inversión del sistema frente a la frecuencia de servicio que podemos ofrecer. Para estimar el consumo del autobús en el trayecto se ha desarrollado un Simulador en MATLAB Simulink el cual utiliza datos reales recogidos en el trayecto con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Una optimización multi-objetivos con el método de ponderación es llevada a cabo para el primer y tercer caso así como un frente de Pareto presentando el abanico de soluciones óptimas. Un algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) Binario ha sido desarrollado para el cálculo de la distribución óptima de los sistemas dinámicos. Todos los códigos se han desarrollado en MATLAB.

Palabras Clave: Vehículos eléctricos, Sistemas de recarga por inducción electromagnética estática y dinámica, Wireless Power Transfer, Simulador autobús eléctrico, Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)

1. Introducción

Actualmente corre una gran preocupación por la transición hacia las energías sostenibles debido al impacto que la industria y vida humana están teniendo sobre el ecosistema de la Tierra, destacando el cambio climático debido a las emisiones contaminantes. El sector automovilístico es uno de los principales responsables de las emisiones, con más de un 30% de las emisiones de CO₂ en la UE. La UE se ha comprometido a disminuir estas emisiones un 60% por debajo de los niveles de 1990 para 2050 [1]. Los vehículos

eléctricos encabezan esta transición hacia la propulsión verde. Sin embargo, esta presenta tres principales inconvenientes: elevados precios, pobre autonomía y una escasa infraestructura de recarga de las baterías eléctricas. Estas desventajas provocan inseguridad en los potenciales compradores e impiden que termine de instaurarse en el mercado.

Una solución innovadora son los sistemas de recarga por inducción electromagnética. Estos permiten recarga el vehículo ya sea en parado o en movimiento. Una amplia red de estos sistemas podría acabar con las tres desventajas. Al cargar en movimiento o en paradas de oportunidad como los semáforos, la batería se recargaría constantemente y no habría problema de autonomía ni problema buscando puntos de recarga con aglomeraciones. Además, este sistema podría permitir una disminución en la talla de las baterías y por lo tanto una reducción significativa del coste del vehículo inicial.

En una menor escala, y en el inicio de sus desarrollo, estos sistemas prometen para vehículos que recorren constantemente el mismo trayecto como son los autobuses. Ya que instalando sistemas de recarga en puntos clave del trayecto se podrá mantener la autonomía y garantizar el servicio. De este modo, en este proyecto realizamos un estudio de aplicación de estos sistemas de recarga a la línea de autobuses A3247 de Bilbao. Estudiando la viabilidad técnico económica de la electrificación la flota de autobuses de esta línea (pasar de diésel a baterías eléctrico). Con el objetivo de colaborar en la transición hacia los vehículos de propulsión eléctrica. Por un lado ofreciendo una estudio de proyecto real a la empresa Grupo Acha gestiona la línea, en el que puedan referenciarse ellos y otras empresas del sector a la hora de electrificar su flota. Y por otro lado ofrecer un proyecto ejemplo que ayude a avanzar en el desarrollo de estos sistemas de recarga.

Realizamos entonces un estudio técnico económico de la electrificación de la flota del Grupo Acha con sistemas de recarga por inducción. El proyecto se compone de tres partes. En la primera estudiamos la electrificación con el único uso de los sistemas de recarga estática en las paradas, en la segunda únicamente con sistemas de recarga dinámica y por último el caso híbrido en la que ambas se complementan. Dentro de cada caso comparamos escenarios en función del coste total de inversión que suponen con la frecuencia de servicio garantizada, buscando el óptimo que minimice ambos valores.

2. Sistema global: Variables del trayecto y consumo del autobús

El sistema del trayecto se compone de 3 paradas principales, una abajo en la intermodal y dos arriba en el aeropuerto (llegadas y salidas). El trayecto de subida y bajada es el mismo. En el proyecto estudiamos distintos escenarios que definen el sistema. Los distintos escenarios se definen haciendo variar las características de las infraestructuras de recarga estática en cada parada (en número y potencia) y variando el tiempo que los autobuses permanecen en estas paradas. Otros parámetros como el número de autobuses en la flota o las bobinas receptoras que tiene cada autobús permiten aumentar la variedad de los escenarios estudiados. A su vez en los casos con recarga dinámica estudiamos cual es la distribución óptima de estos a lo largo del trayecto.



Ilustración 6. Trayecto de subida de la línea A3247 representado en Google Earth . Datos colectados con Ski Tracks

Para todo el estudio es fundamental tener en cuenta el consumo del autobús a lo largo del trayecto. Para obtener con precisión este valor se ha realizado un simulador de autobús eléctrico en MATLAB Simulink que calcula el consumo con los valores reales de velocidad tiempo y pendiente del autobús a lo largo del trayecto recolectado con una aplicación GPS. EL modelo se ha validado con el Altoona test “Advanced design bus” (ADB) del Penn State College of Engineering.

Tres condiciones fundamentales se imponen para garantizar el buen funcionamiento de la línea. Los autobuses no pueden solaparse, llegar uno a una parada donde todavía hay otro. La potencia de recarga en ningún momento puede superar los 150kW por naturaleza de la pila. La batería del autobús en ningún momento de la jornada puede descender del 10% de su capacidad. Finalmente, para la instalación de los sistemas de recarga dinámica se impone la condición de que como máximo pueden haber 4 tramos separados donde haya que instalar infraestructura.

Para cada escenario, el coste de inversión y la frecuencia de servicio es calculada.

3. Resolución y resultados

En las tres partes, todos los escenarios son definidos por los parámetros que refieren a la parte estática del problema.

Para encontrar el escenario óptimo en el primer caso, un código desarrollado en Matlab a traviesa todos los escenarios. Cada uno los pasa por las condiciones del sistema y en caso de ser válido, calcula su coste y la frecuencia de servicio que garantiza. Finalmente con los escenarios válidos hacemos una optimización multi-objetivo con el método de ponderación que trata de buscar los escenarios que minimizan tanto el coste de inversión como el tiempo entre cada autobús (frecuencia del servicio). Con esta optimización

calculamos un frente de Pareto con los distintos escenarios considerados óptimos. Una solución propuesta como óptima para el primer caso es:

Ilustración 22. Propuesta de solución óptima Caso 1: Sistemas de recarga por inducción estática

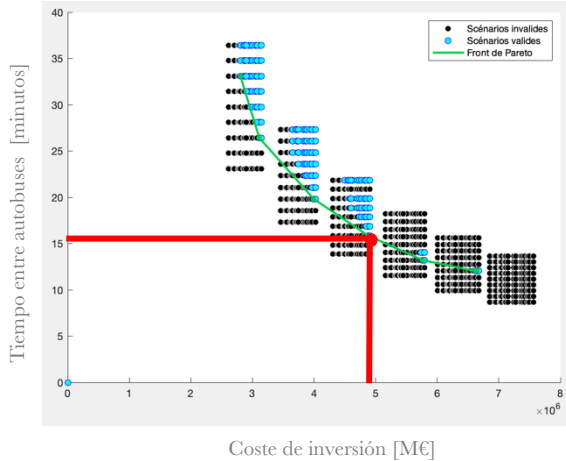
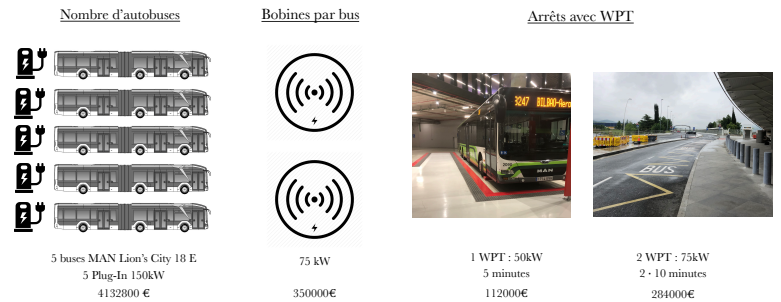


Ilustración 23. Desglose de la solución propuesta Caso 1



En la imagen de la derecha observamos el desglose de la solución, con un coste total de 4132800EUR y una frecuencia de servicio de 15,85 minutos.

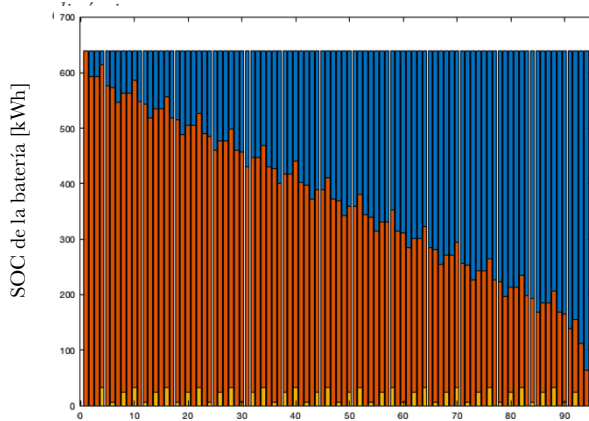
Para el caso dinámico, al no carga en las paradas, reducimos el tiempo de parada a el minimo de 5 minutos para mejorar la frecuencia. El trayecto se divide en tramos y se busca la colocación óptima de los sistemas de recarga dinámica en dichos tramos. Se desarrolla un algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) para recorrer el extenso espacio de posibles soluciones. Establecemos la precisión del problema a tramos de 2,5km con la que obtenemos un resultado fiable y de calidad.

Mostramos a continuación la solución óptima obtenida para el segundo caso.

Tabla 6. Resultado óptimo Caso 2 encontrado por el algoritmo

Longitud de tramo [m]	Numero de partículas/pájaros	Dimensiones del espacio=Num. tramos	Iteraciones de búsqueda=Num. Movimientos de las partículas	Coste total de la infraestructura de recarga [€]	Recarga por ciclo [kWh]	Posición de los tramos	Tiempo total de recarga por ciclo [min]	Distancia total de la infraestructura [m]
2500	100	13	15	4614748,47	62,06	[1,2;8,9;13,14]	27.58	6490,5

Ilustración 29. Evolución del SOC de la batería a lo largo de una jornada de servicio con los sistemas de recarga

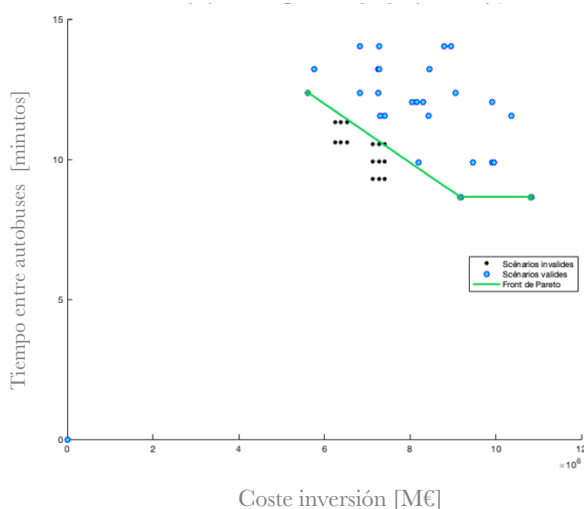


Numero de veces de recolecta de datos a lo largo de la jornada de servicio en el código

La solución indica colocar los sistemas de recarga en el primer tramo, en el tramo intermedio y en el último. Este resultado tiene sentido al ser los tramos correspondientes a la ciudad y a las cercanías del aeropuerto donde la velocidad es menos y por tanto el tiempo de carga por kilómetro es mayor. En total se instalarían 6,490km de esta infraestructura por un coste de 4614748,47EUR. La frecuencia del servicio vendrá definida directamente por el número de autobuses en la flota. Con 7 autobuses, el coste total de inversión sería 10818348,47€ con una frecuencia de 9,9 minutos.

Finalmente, la resolución del tercer caso consiste en enviar escenarios estáticos, que no cumplen las condiciones con los sistemas de recarga estática, al algoritmo, y con este calcular una distribución de infraestructura dinámica que nos permite cumplir las condiciones del sistema. Presentamos una búsqueda de 42 escenarios.

Ilustración 32. Resultados y frente de Pareto Caso 3. Frecuencia del



En azul los escenarios válidos y en verde el frente de Pareto de la optimización.

Proponemos 2 escenarios óptimos, uno con 12,38 minutos de frecuencia con un coste de 5624350EUR y otro que garantiza un frecuencia de 8,66 minutos por un coste de inversión de 9169450,8EUR. Por ejemplo, este segundo escenario está compuesto por 8 autobuses en la flota. Dotada de una infraestructura de recarga estática en la parada de la intermodal de 75kW, y de recarga dinámica 2,66km, 2,5km al salir de la intermodal en la ciudad y 160 metros en la llegada al aeropuerto.

5. Conclusiones

Los resultados del proyecto ofrecen una gran variedad de posibilidades a través de las cuales la empresa Grupo Acha o la Diputación podrían acceder a pasar de la flota actual de autobuses diésel a una flota con autobuses eléctricos. Esta transición supondría un gran avance como ciudad en el ámbito del servicio público, cumpliendo con ODS establecidos por la ONU como objetivos de la humanidad, reduciendo las emisiones mejorando la calidad del aire de la ciudad y sirviendo como ejemplo a otras ciudades e instituciones públicas.

Hemos observado que las soluciones con carga estática son hasta un 50% más económicas que la solución con carga dinámica, sin embargo, presentan un límite en la frecuencia en los 12 minutos. La infraestructura de recarga dinámica permite reducir la frecuencia de servicio hasta 8,66 minutos con 8 autobuses y 6,5km de recarga. Este segundo sistema de recarga aun requiriendo una alta inversión, ofrecería también la posibilidad de recarga a otros usuarios con sus vehículos privados lo que supondría una facilidad no solo para la línea si no también para todos los públicos. Esta ventaja podría permitir al inversor cobrar comisiones por utilizar la infraestructura y recuperar parte de la inversión o incluso generar ingresos.

El caso híbrido permite superar los límites de frecuencia del caso 1 que encontraba por falta de autonomía. Conseguimos escenarios con mejores frecuencias que en el primer caso por un precio menor que en el segundo caso. Esta complementación de tecnologías permitiría gozar de la practicidad y economía de la tecnología de recarga por inducción estática y de las facilidades públicas que ofrece la infraestructura de recarga por inducción dinámica.

6. Referencias

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

Paul-Antoine Gori. Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique. Energie électrique. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. NNT 2019SACLC063. tel-02413595

Caillierez, "Etude et mise en oeuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicules en mouvement," Université PARIS-SACLAY, Thèse de doctorat, 2016.

The Optimal System Design of the Online Electric Vehicle Utilizing Wireless Power Transmission Technology. Young Dae Ko and Young Jae Jang, Member, IEEE

PSO Binario con control de velocidad Aplicación al reconocimiento de Rostros. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA 10 de octubre de 2012.

ELECTRIFICATION OF THE A3247 BUS LINE BETWEEN BILBAO INTERMODAL AND BILBAO AIRPORT BY MEANS OF A STATIC AND DYNAMIC ELECTROMAGNETIC INDUCTION CHARGING SYSTEM.

Author: Castaños Cortina, Eduardo

Superviso: Mohamed Bensetti

Collaborating Entities: CentraleSupélec Paris-Saclay y Universidad Pontificia Comillas – ICAI

Abstract

In this project we evaluate the electromagnetic induction charging systems for electric vehicles as a possible solution to the various difficulties that these vehicles encounter to integrate into our society, such as their high costs, their poor autonomy and the low recharging infrastructure they encounter today. We then carried out a technical economic study of these charging systems applied to the electrification of the A3247 bus line that runs from the city of Bilbao to its airport. We evaluated the different scenarios of static or dynamic electromagnetic induction recharging infrastructure and bus fleet that allow the proper operation of this electric line. The project has been divided into three cases: static charging only, dynamic charging only and the hybrid case with both charging systems. We compared what would be the investment cost of the system versus the frequency of service that we can offer. To estimate the consumption of the bus on the route, a MATLAB Simulink simulator has been developed which uses real data collected on the route with a Global Positioning System (GPS). A multi-objective optimization with the weighting method is carried out for the first and third cases as well as a Pareto front presenting the range of optimal solutions. A Binary Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has been developed for the computation of the optimal distribution of the dynamical systems. All codes have been developed in MATLAB.

Palabras Clave: Electric vehicles, Static and dynamic electromagnetic induction recharging systems, Wireless Power Transfer, Electric bus simulator, Particle Swarm Optimization (PSO)

1. Introduction

There is currently great concern about the transition to sustainable energies due to the impact that industry and human life are having on the Earth's ecosystem, highlighting climate change due to polluting emissions. The automotive sector is one of the main contributors to emissions, accounting for more than 30% of CO₂ emissions in the EU. The EU has committed to reduce these emissions by 60% below 1990 levels by 2050 [1]. Electric vehicles are leading this transition to green propulsion. However, it has three main drawbacks: high prices, poor range and poor infrastructure for recharging electric

batteries. These disadvantages cause insecurity among potential buyers and prevent their market penetration.

An innovative solution is electromagnetic induction charging systems. These allow the vehicle to be recharged while stationary or on the move. A wide network of these systems could do away with the three disadvantages. When charging on the move or at opportunity stops such as traffic lights, the battery would be constantly recharged and there would be no problem of autonomy or problem looking for recharging points with crowds. In addition, this system could allow a reduction in the size of the batteries and therefore a significant reduction in the cost of the initial vehicle.

On a smaller scale, and at the beginning of their development, these systems hold promise for vehicles that constantly travel the same route, such as buses. By installing recharging systems at key points along the route, it will be possible to maintain autonomy and guarantee service. Thus, in this project we carried out a study of the application of these recharging systems to the A3247 bus line in Bilbao. Studying the technical and economic feasibility of the electrification of the bus fleet of this line (from diesel to electric batteries). With the aim of collaborating in the transition to electric propulsion vehicles. On the one hand, offering a real project study to the company Grupo Acha, which would manage the line, in which they and other companies in the sector can refer to when electrifying their fleet. And on the other hand, offering an example project that helps to advance in the development of these recharging systems.

We then carried out a technical and economic study of the electrification of the Acha Group's fleet with induction recharging systems. The project consists of three parts. In the first one we studied electrification with the only use of static recharging systems at stops, in the second one only with dynamic recharging systems and finally the hybrid case in which both complement each other. Within each case we compare scenarios based on the total investment cost and the guaranteed service frequency, looking for the optimum that minimizes both values.

2. Overall system: Trip variables and bus consumption

The route system consists of 3 main stops, one downstairs at the intermodal and two upstairs at the airport (arrivals and departures). The upstream and downstream route is the same. In the project we studied different scenarios that define the system. The different scenarios are defined by varying the characteristics of the static recharging infrastructures at each stop (in number and power) and by varying the time the buses stay at these stops. Other parameters such as the number of buses in the fleet or the receptive coils that each bus has allow increasing the variety of the scenarios studied. In turn, in the cases with dynamic recharging, we study the optimal distribution of the buses along the route.



Figure 6. Route of line A3247 represented in Google Earth. Data collected with Ski Tracks[®]

For the whole study it is essential to take into account the consumption of the bus along the route. To accurately obtain this value, an electric bus simulator has been developed in MATLAB Simulink that calculates the consumption with the real values of speed, time and slope of the bus along the route collected with a GPS application. The model has been validated with the Altoona test "Advanced design bus" (ADB) of the Penn State College of Engineering.

Three fundamental conditions are imposed to ensure the smooth running of the line. Buses cannot overlap, one arriving at a stop where there is still another. The recharging power cannot exceed 150kW at any time due to the nature of the battery. At no time during the day can the bus battery drop below 10% of its capacity. Finally, for the installation of dynamic recharging systems, the condition is imposed that there can be a maximum of 4 separate sections where infrastructure must be installed.

For each scenario, the investment cost and the frequency of service is calculated.

3. Case resolution and results

In all three parts, all scenarios are defined by the parameters that refer to the static part of the problem.

To find the optimal scenario in the first case, a code developed in Matlab goes through all the scenarios. Each one passes them through the system conditions and if valid, calculates its cost and the service frequency it guarantees. Finally with the valid scenarios we do a multi-objective optimization with the weighting method that tries to find the scenarios that minimize both the investment cost and the time between each bus (service frequency). With this optimization we calculate a Pareto front with the different scenarios considered optimal. A solution proposed as optimal for the first case is:

Figure 22. Proposed optimal solution Case 1: Static induction recharging systems

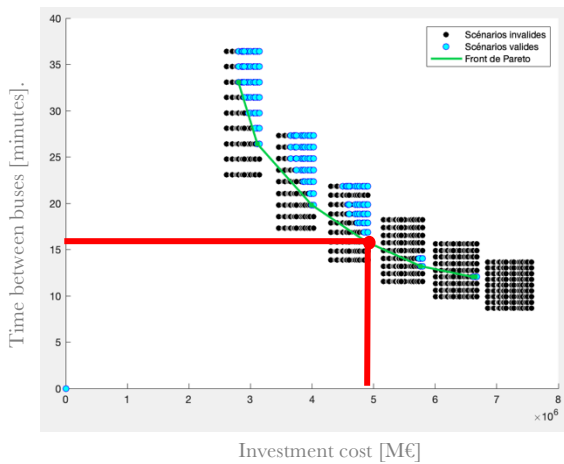
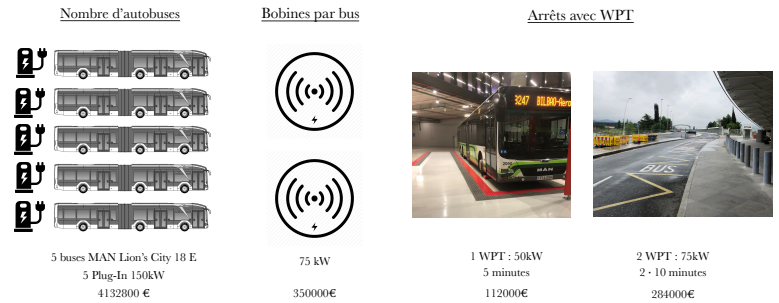


Figure 23. Breakdown of the proposed solution Case 1



The image on the right shows the breakdown of the solution, with a total cost of 4132800EUR and a service frequency of 15.85 minutes.

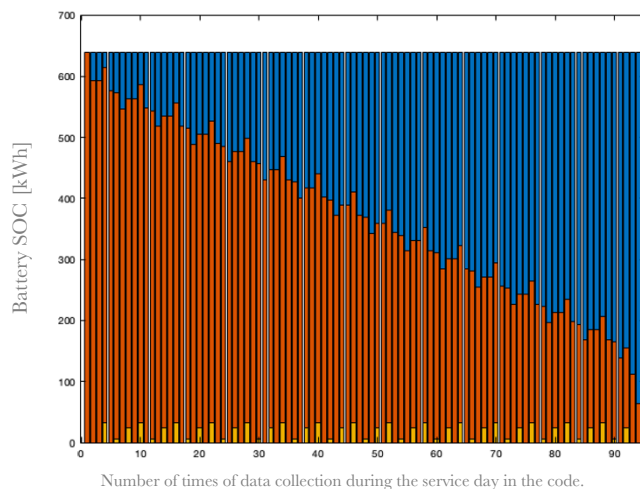
For the dynamic case, as there is no load at the stops, we reduce the stopping time to a minimum of 5 minutes to improve the frequency. The route is divided into sections and the optimal placement of the dynamic recharging systems on these sections is sought. A Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is developed to traverse the large space of possible solutions. We set the accuracy of the problem to 2.5km stretches with which we obtain a reliable and quality result.

We show below the optimal solution obtained for the second case.

Table 6. Optimal result Case 2 found by the algorithm

Section length [m]	Number of particles/birds	Space dimensions=No. of sections	Search iterations=Num. particle movements	Total cost of recharging infrastructure [€]	Recharge per cycle [kWh]	Position of the sections	Total recharge time per cycle [min]	Total distance of the infrastructure [m]
2500	100	13	15	4614748,47	62,06	[1,2;8,9;13,14]	27.58	6490,5

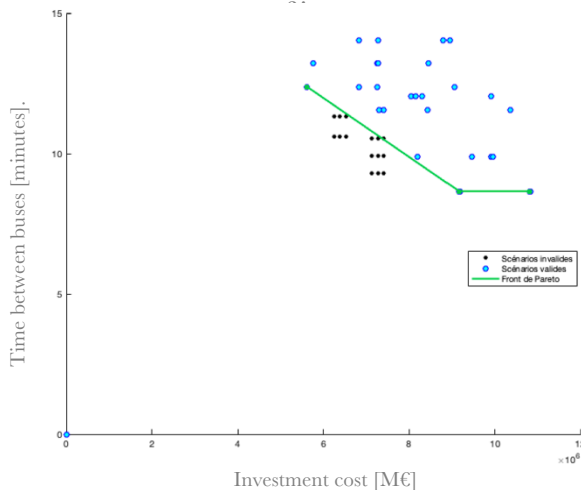
Figure 29. Evolution of battery SOC over the course of a service day with dynamic recharging systems.



The solution indicates placing the recharging systems in the first section, in the intermediate section and in the last section. This result makes sense as the sections corresponding to the city and near the airport are the ones where the speed is lower and therefore the charging time per kilometer is longer. In total, 6.490km of this infrastructure would be installed at a cost of 4614748.47 €. The frequency of service will be directly defined by the number of buses in the fleet. With 7 buses, the total investment cost would be 10818348.47€ with a frequency of 9.9 minutes.

Finally, the resolution of the third case consists of sending static scenarios, which do not meet the conditions with static recharge systems, to the algorithm, and the algorithm returns a dynamic infrastructure distribution that allows it to meet the system conditions. We present a search of 42 scenarios.

*Figure 32. Results and Pareto front
Case 3. Frequency of services vs Cost*



In blue the valid scenarios and in green the Pareto front of the optimization.

We propose 2 optimal scenarios, one with a frequency of 12.38 minutes at a cost of 5624350EUR and another one that guarantees a frequency of 8.66 minutes for an investment cost of 9169450.8EUR. For example, this second scenario consists of 8 buses in the fleet. Equipped with a static recharging infrastructure at the intermodal stop of 75kW, and dynamic recharging 2.66km, 2.5km at the exit of the intermodal in the city and 160 meters at the arrival at the airport.

5. Conclusions

The results of the project offer a wide range of possibilities through which the company Grupo Acha or the Provincial Council could agree to move from the current fleet of diesel buses to a fleet of electric buses. This transition would represent a great advance as a city in the field of public service, complying with SDGs established by the UN as goals of humanity, reducing emissions, improving the air quality of the city and serving as an example to other cities and public institutions.

We have observed that solutions with static charging are up to 50% cheaper than the solution with dynamic charging, however, they present a limit in frequency in the 12 minutes. The dynamic charging infrastructure allows to reduce the service frequency up to 8.66 minutes with 8 buses and 6.5km of charging. This second recharging system, although requiring a high investment, would also offer the possibility of recharging to other users with their private vehicles, which would be a facility not only for the line but also for all the public. This advantage could allow the investor to charge commissions for using the infrastructure and recover part of the investment or even generate income. The hybrid case allows us to overcome the frequency limits of case 1 that we found due to lack of autonomy. We obtain scenarios with better frequencies than in the first case for a lower price than in the second case. This complementation of technologies would allow to enjoy the practicality and economy of the static induction charging technology and the public facilities offered by the dynamic induction charging infrastructure.

6. References

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emision-es-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

Paul-Antoine Gori. Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique. Energie électrique. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français.NNT 2019SACLC063. tel-02413595

Caillierez, "Etude et mise en oeuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicules en mouvement," Université PARIS-SACLAY, Thèse de doctorat, 2016.

The Optimal System Design of the Online Electric Vehicle Utilizing Wireless Power Transmission Technology. Young Dae Ko and Young Jae Jang, Member, IEEE

PSO Binario con control de velocidad Aplicación al reconocimiento de Rostros. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA 10 de octubre de 2012.

1 Tabla de contenido

1	INTRODUCCION.....	2
1.1	CONTEXTO Y PLANTEAMIENTO	2
1.2	COLABORACIÓN DE EMPRESAS	4
1.3	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	5
1.4	METODOLOGÍA.....	5
1.5	RESOURCES.....	6
1.6	CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS ODS	7
2	ESTADO DEL ARTE.....	9
3	SISTEMA: CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS	14
3.1	PRESENTACIÓN DEL SISTEMA.....	14
3.2	FUNCIONAMIENTO DE LA LÍNEA PRE COVID-19	15
3.3	RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	17
3.3.1	<i>DATOS DEL TRAYECTO.....</i>	<i>17</i>
3.3.2	<i>Características y coste del autobús eléctrico candidato.....</i>	<i>17</i>
3.3.3	<i>Costes de los sistemas de recarga y de su instalación: estáticos y dinámicos en función de la potencia.....</i>	<i>18</i>
3.3.4	<i>Consumo del autobús en un ciclo de trayecto</i>	<i>20</i>
3.4	MODELO DE CONSUMO DEL AUTOBÚS ELÉCTRICO	22
3.4.1	<i>Descripción.....</i>	<i>22</i>
3.4.2	<i>Validación del modelo</i>	<i>23</i>
3.4.3	<i>Consumo del autobús en el trayecto de la línea A3247.....</i>	<i>25</i>
3.5	SISTEMA GLOBAL ESTUDIADO: PARÁMETROS Y CONDICIONES	28
3.5.1	<i>Descripción.....</i>	<i>28</i>
3.5.2	<i>Parámetros del sistema global</i>	<i>30</i>
3.5.3	<i>Condiciones del sistema global</i>	<i>31</i>
3.6	SALIDAS DEL SISTEMA: COSTES DE INVERSIÓN Y FRECUENCIA DE SERVICIO	35
4	RESOLUCIÓN DE LOS CASOS.....	37
4.1	CASO 1. RECARGA POR INDUCCIÓN ESTÁTICA: CÓDIGO DE RESOLUCIÓN Y CALCULO DE LOS ESCENARIOS ÓPTIMOS	37
4.1.1	<i>METODOLOGIA CASO 1.....</i>	<i>37</i>
4.1.2	<i>Resultados y conclusiones del Caso 1</i>	<i>37</i>
4.1.3	<i>Posible solución optima.....</i>	<i>41</i>
4.2	CASO 2. RECARGA POR INDUCCIÓN DINÁMICA.....	43
4.2.1	<i>Sistema dinámico: características y parámetros.....</i>	<i>43</i>
4.2.2	<i>Metodología Caso 2</i>	<i>45</i>
4.2.3	<i>Condiciones del sistema Caso2.....</i>	<i>49</i>

4.2.4	<i>Algoritmo Optimización por Enjambre de Partículas PSO Binario</i>	<i>52</i>
4.2.5	<i>Resultados y conclusiones Caso 2.....</i>	<i>55</i>
4.3	CASO 3. RECARGA POR SISTEMAS DE INDUCCIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA...	62
4.3.1	<i>Metodología del caso híbrido.....</i>	<i>62</i>
4.3.2	<i>Rango de escenarios estudiados en el caso híbrido</i>	<i>63</i>
4.3.3	<i>Resultados Caso 3.....</i>	<i>65</i>
5	COSTES DEL PROYECTO, FUTUROS GASTOS E INGRESOS	69
6	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	72
7	BIBLIOGRAFÍA	75
8	ANEXOS.....	77

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Empresas colaboradoras.....	5
Ilustración 2. Principio de los sistemas de carga sin contacto por inducción de la fuente a la carga.....	11
Ilustración 3. Trayecto de subida de la línea A3247 representado en Google Earth®.	
Datos colectados con Ski Tracks®	15
Ilustración 4. Parada en el aeropuerto	15
Ilustración 5. Dársena en la estación de autobuses	15
Ilustración 6. Servicio de la línea A3247 previo al Covid-19	16
Ilustración 7. Costes en € de la infraestructuras de recarga por unidad	19
Ilustración 8. Distribución normal del consumo de un autobus diesel en [l/100km]	20
Ilustración 9. Ejemplo de extracto de datos recolectados con la aplicación Phyphox y una imagen tomada durante la recolecta	21
Ilustración 10. Diagrama del cuerpo libre de un autobús en movimiento	22
Ilustración 11. Ciclo de test "Advanced design bus"	24
Ilustración 12. Comparación Penn State vs Simulación: Altoona Test 9 ciclos ADB ...	25
Ilustración 13. Altitud a lo largo del ciclo de la línea A3247.....	26
Ilustración 14. Velocidad a lo largo del ciclo de la línea A3247	27
Ilustración 15. Consumo energético a lo largo del ciclo de la línea A3247.....	27
Ilustración 16. Representación esquemática del sistema y procedimiento hasta la optimización las soluciones.....	29
Ilustración 17. Resultados Caso 1: Sistemas de recarga por inducción estática.....	38
Ilustración 18. Resultados Caso1 con los sistemas homologados WPT según la norma SAE J2954	40
Ilustración 19. Propuesta de solución óptima Caso 1: Sistemas de recarga por inducción estática	41
Ilustración 20. Desglose de la solución propuesta Caso1	42
Ilustración 21. Velocidad del autobus a lo largo del ciclo en función del tiempo.	46

Ilustración 22. Tiempos que tarde el autobus en recorrer el trayecto distribuido en 13 tramos de 2,5km	47
Ilustración 23. Ilustración 8. Tiempos que tarde el autobus en recorrer el trayecto distribuido en 60 tramos de 500m	48
Ilustración 24. Clasificación de las técnicas de optimización [32].	53
Ilustración 25. Movimiento de una partícula en el espacio de soluciones.....	54
Ilustración 26. Evolución de la SOC de la batería con carga dinámica a lo largo de un día de servicio	57
Ilustración 27. Ilustración 25. Evolución de la SOC de la batería sin recarga a lo largo de un día de servicio	58
Ilustración 28. Mapa del trayecto con los tramos de infraestructura de carga dinámica en color	59
Ilustración 29. Resultados y frente de Pareto Caso 3. Frecuencia del servicios vs Coste de la inversión	65

Lista de Tablas

Tabla 1. Diferente tecnologías de recarga de los vehículos eléctricos	10
Tabla 2. Características de los cargadores WPT según la norma SAE J2954 [17]	12
Tabla 3. Características del autobus actual y del autobus eléctrico candidato MAN Lion's City	18
Tabla 4. Parámetros de las ecuaciones de la dinámica del autobus	23
Tabla 5. Resultados y valores de rendimiento principales del autobus en el trayecto de la línea A3247	27
<i>Tabla 6. Parámetros constantes en todos los escenarios</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7. Parámetros variables en los escenarios y los rangos valorados</i>	<i>30</i>
Tabla 8. Ejemplo de escenario inválido por solapamiento logístico de autobuses (Caso 1)	39
Tabla 9. Ejemplo de escenario válido con los sistemas WPT homologados según SAE J2954	40
Tabla 10. Caso 1: Solución propuesta como óptima. Características y salidas	41
<i>Tabla 11. Parámetros constantes Caso 2</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 12. Dinámica de los escenarios estudiados</i>	<i>45</i>
Tabla 13. Resultado óptimo Caso 2 encontrado por el algoritmo	56
Tabla 14. Parámetros variables escenarios Caso Mixto	64
Tabla 15. Solución propuesta 1 con infraestructura de recarga híbrida	66
Tabla 16. Tabla 15. Solución propuesta 2 con infraestructura de recarga híbrida	67
Tabla 17. Gastos de mantenimiento e ingresos del servicio	70

Lista de Anexos

Anexo A. Modelo de autobus eléctrico en MATLAB Simulink	77
Anexo B. Código para la lectura del trayecto real de la línea A3247 completa.....	79
Anexo C. Código para el cálculo de todos los escenarios y optimización multi-objetivo del Caso 1. Calculo e impresión del frente de Pareto.....	84
Anexo D. Función coste para el Caso 1.	92
Anexo E. Código del algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) Binario con la variación de la Universidad de La Plata. Caso 2.	93
Anexo F. Función de coste para la resolución de Caso 2 con el algoritmo PSO Binario.	102
Anexo G. Código de definición de la parte estática de los escenarios para el caso 3. Llamada al algoritmo PSO Binario y resolución final de la optimización Multi-Objetivos y calculo del frente de Pareto con las soluciones óptimas	112
Anexo H. Algoritmo por Optimización de Enjambre (PSO) Binario Caso 3. Recepción del escenario con código Anexo 7. Y optimización de tramos de recarga dinámica con Función Coste de Anexo 9.	120
Anexo I. Función de Coste del Caso 3. Validación de casos y calculo del coste para la optimización de tramos con el algoritmo PSO Binario.....	128

1 INTRODUCCION

1.1 CONTEXTO Y PLANTEAMIENTO

Desde ya principios del siglo anterior, el incesante ritmo del desarrollo industrial y con este los altísimos niveles de explotación de los recursos naturales y de producción, llevaron a los países desarrollados y a las comisiones internacionales a la preocupación por las consecuencias que estas tendrían [1]. A parte de la futura escasez de los recursos, se centraron las preocupaciones en el ya observable cambio climático que estamos provocando. Este se debe entre otros a la contaminación de suelos y aguas y a los cambios de temperatura debido al efecto invernadero que provocan los combustibles con los que producimos la energía [2]. Por lo tanto, en todos los sectores de la industria se empezaron a buscar medidas para poder seguir desarrollándose, respetando y velando por el futuro durable de nuestro ecosistema. En uno de los sectores principales, como es el automovilístico, se están buscando nuevas fuentes energéticas para la propulsión, entre otras como el gas natural o el hidrógeno, los coches propulsados gracias a baterías eléctricas ya muestran un notable crecimiento con más de un 4,7% de los vehículos vendidos en España en 2020 o un 11,3% en Francia [3]. Estos coches permiten utilizar la electricidad como combustible, dejando en dependencia de las productoras de electricidad las emisiones, las cuales pueden ser de bajas emisiones como las renovables. De este modo al menos aseguramos una descentralización de la contaminación local (partículas y ruido), mejorando la calidad de vida de los ciudadanos en las ciudades. Entre estas conveniencias, se confía también que los vehículos colaboren gracias a sus baterías al almacenamiento energético y con la tecnología ‘vehicle to grid’ favorezcan la integración de las energías renovables [4]. Sin embargo, estos vehículos encuentran ciertos obstáculos en su integración en nuestra sociedad como son principalmente sus elevados precios su pobre autonomía y la escasa infraestructura de recarga que encontramos actualmente que da inseguridad a los potenciales compradores.

Nos hemos interesado entonces en las nuevas tecnologías de este sector que se están investigando para sobrepasar las citadas complicaciones. Entre ellas destacan los

sistemas de recarga por inducción electromagnética los cuales nos han parecido de gran interés. Estos sistemas permitirían instalar infraestructuras de recarga más seguras y discretas que los plug-in tradicionales, también ofrecen una solución a la autonomía de los vehículos gracias a la recarga de oportunidad estática y dinámica por inducción que pueden realizarse sin descender del vehículo e incluso en movimiento [6][7][8]. De este modo estos sistemas podrían permitir una reducción de la talla de las baterías, responsable principal del coste de estos vehículos, y por tanto un coste más atractivo para el comprador. Realizamos entonces en este proyecto un estudio técnico económico de los sistemas de carga por inducción aplicado a la línea de autobuses A3247 que va desde la estación de autobuses de Bilbao hasta el aeropuerto [9]. Estudiamos los distintos escenarios que permiten la electrificación de esta línea es decir pasar de una flota de autobuses de propulsión diésel a una flota con autobuses eléctricos. Ofreciendo distintos escenarios considerados óptimos que comparan el coste de inversión tanto en autobuses eléctricos como en la infraestructura de recarga contra la frecuencia del servicio que podría ofrecer la línea eléctrica.

Para llevarlo a cabo hemos dividido el proyecto en 3 partes una primera parte estudiamos los posibles escenarios con el uso único de los sistemas de carga por inducción estática, en un segundo lugar valoramos el escenario con el uso único de los sistemas de carga por inducción dinámica, y finalmente valoraremos la infraestructura híbrida de estos dos sistemas.

Para ello hemos recolectado información propia de la empresa de la línea: Grupo Acha [10], intercambiando con el propietario de la empresa, el gerente y los técnicos de la línea así como su proveedor de autobuses tanto de diésel como eléctrico, MAN SE [11], intercambiando con uno de los contactos directos entre las dos empresas. Finalmente, he contactado también con las entidades greenloft [12] y heliox-energy [13], empresas del sector de las infraestructuras de recarga eléctrica, que nos han ayudado con información sobre estos sistemas. Hemos desarrollado un simulador de autobús eléctrico en Matlab Simulink para estimar el consumo que tendría un autobús eléctrico en el propio trayecto, utilizando los datos reales de velocidad y pendiente que el bus sigue en su itinerario recolectados con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), posteriormente tratados y procesados con excell y Matlab.

En el caso 1ero (únicamente recarga estática), para el cálculo de los distintos escenarios y la optimización de estos hemos desarrollado un código en Matlab con el cual

presentamos los resultados de coste y frecuencia de servicio para los escenarios así como el frente de Pareto con los distintos escenarios óptimos. Como resultado hemos obtenido la viabilidad de la electrificación de la línea con los sistemas de carga por inducción estática. Como posible escenario óptimo ofrecemos un servicio con una frecuencia de 15 minutos, la frecuencia que tenía la línea diesel antes del Covid-19, con una inversión de 4878800 euros. Obtenemos también un muy elevado coste de hasta 7530200 euros para alcanzar la frecuencia de 10 minutos, por lo tanto vemos interés en estudiar los sistemas de recarga dinámica desarrollada en la siguiente parte de nuestro proyecto que nos permitirá ofrecer una solución con mejor frecuencia

Para el 2º caso, únicamente nos preocupamos por los tramos del trayecto en los que es óptimo instalar las bobinas de recarga dinámica, que deben permitirnos satisfacer la necesidad de autonomía del autobús en su jornada al mínimo coste de inversión. Para ellos, he desarrollado un código que define el escenario y se encargará de comprobar que las condiciones de funcionamiento se cumplen, y un algoritmo de Optimización por enjambre de partículas (PSO) Binario encargado de buscar la distribución óptima de los tramos de recarga. Ambos en Matlab.

Finalmente, para el tercer caso, basándonos en el código Matlab del primer caso, definimos primero los distintos escenarios con lo que refiere a la carga estática, los cuales definirán los tiempos de parada y la frecuencia total de servicio. En cada uno de estos escenarios, antes de comprobar la condición de autonomía, llamamos al algoritmo PSO, que para cada escenario nos busca la distribución de carga dinámica de mínimo coste que nos permite satisfacer la condición de autonomía, esta puede ser nula si no es necesaria. La distribución de ambos sistemas de carga define el coste total de la infraestructura a instalar.

1.2 COLABORACIÓN DE EMPRESAS

En este trabajo han colaborado conmigo 4 empresas distintas del sector automovilístico y sobre todo del sector de autobuses. Estas empresas son las siguientes:

- ♣ Grupo acha qué es la empresa que gestiona la línea de autobuses A3247 la cual le fue atribuida por el Consejo provincial de Bilbao.
- ♣ MAN SE : fabricante de los autobuses actuales de la línea y fabricante del autobús eléctrico candidato utilizado como modelo en el proyecto.

- ♣ Greenloft empresa que trabaja en instalaciones eléctricas y por tanto con sistemas de recarga de vehículos eléctricos.
- ♣ Heliox-energy empresa holandesa que trabaja también con sistemas de recarga de vehículos eléctricos.



Ilustración 1. Empresas colaboradoras

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo del proyecto es ofrecer un abanico de posibles escenarios válidos, con carga estática y/o dinámica que garanticen el buen funcionamiento de esta línea con autobuses eléctricos como sustitución de los diésel, ofreciendo para cada escenario una comparativa de la inversión necesaria frente a la frecuencia de servicio conseguido que permita a la firma considerar el proyecto y elegir entre las distintas alternativas. De este modo avanzar por un camino de desarrollo de las tecnologías de energías sostenibles como son los vehículos eléctricos, solventando varias de sus debilidades con este sistema de recarga innovador. Ofreciendo un ejemplo de proyecto en el que otros puedan inspirarse e incluso hacer uso de los códigos y algoritmos, estos desarrollados de manera genérica, para desarrollar proyectos similares que nos permitan evolucionar hacia un futuro sostenible.

1.4 METODOLOGÍA

Todos los datos necesarios serán obtenidos con la ayuda de las distintas empresas y aplicaciones en persona o vía email, y publicaciones. Una vez colectada la información necesaria, el sistema con sus parámetros y variables será definido. El consumo del autobús eléctrico a lo largo del trayecto real de la línea será calculado gracias a un simulador que será desarrollado en MATLAB Simulink®. Con la información sobre el trayecto, las instalaciones y el consumo, se desarrollará un código en MATLAB para cada parte del proyecto, en los que se estudiarán distintos escenarios y las soluciones óptimas. Para los

tres casos una optimización multiobjetivo será llevada a cabo, con el objetivo de minimizar el coste total de inversión y minimizar el tiempo entre cada autobús (frecuencia de servicio). Para las dos últimas partes que incluyen el estudio de los tramos de recarga por inducción dinámica, un algoritmo de Optimización por enjambre de partículas (PSO) ha sido desarrollado para la optimización debido al inmenso espacio de posibles soluciones y la no derivabilidad de la función. Para el caso solo dinámica, una única solución óptima será presentada. En el primer y último casos, un frente de Pareto ilustrando un abanico de soluciones óptimas será presentado, dando a la firma Grupo Acha la opción de elegir en función de sus prioridades. Un escenario considerado óptimo será propuesto para cada caso.

1.5 RESOURCES

Los recursos necesarios para realizar este proyecto son fundamentalmente digitales. Un ordenador portátil MacBook Pro Model A1502 EMC 2678, será la herramienta principal. Por un lado para la información se utilizarán plataformas de publicaciones científicas como IEEE, ELSEVIER, sciencedirect etc. A las cuales se tendrá acceso gratuito gracias a la cuenta universitaria. Por otro lado las empresas facilitarán otra parte de la información, se hará uso de un teléfono para las primeras llamadas de contacto con las empresas. La información se intercambiará ya sea via email o físicamente, por lo que se necesitará un pendrive un vehículo para desplazarse hasta la empresa en el caso de Grupo Acha. Los datos de velocidad, tiempo, distancia, pendiente y potencia en la batería, del desempeño del autobús a lo largo del trayecto necesarios para los cálculos tanto en el simulador del autobús eléctrico como en los códigos para los cálculos de carga dinámica fueron recogidos con la ayuda de la aplicación Phyphox[®], que utiliza el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Se hará uso de las aplicaciones SkiTracks[®] y Google Earth[®] para una visión clara del trayecto en mapa real. Los programas fundamentales para el desarrollo del proyecto serán MATLAB[®], Excell y Word. Una buena conexión WIFI será necesaria en todo momento. Una gran variedad de medios de comunicación serán utilizados, principalmente Gmail[®], Whastapp y Microsoft Teams[®].

1.6 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible deben ser céntricos en las miras de nuestros proyectos. Estos objetivos marcan la evolución de nuestra sociedad hacia unas condiciones de vida mejores. Por ello, es importante que los proyectos visen a colaborar y progresar estas líneas.

En este proyecto contribuimos en una variedad de ellos en mayor o menor grado.

Principalmente contribuimos a los siguientes objetivos:

(7) **Energía Asequible y no contaminante:** La transferencia de los vehículos de combustibles hidrocarburos como son la gasolina y el petróleo, a los vehículos de propulsión eléctrica será un gran avance hacia la energía verde y no contaminante. Se reducirá la contaminación local por partículas en las ciudades y autopistas. Se reducirán las emisiones. El uso de baterías en los vehículos, con la tecnología en vía de desarrollo “vehicle to grid” podrá resultar en un medio de almacenamiento de las energías renovables que permitan la homogenización de la energía obtenida con estas contribuyendo al aplanamiento de las horas de producción pico con las valle. De este modo, estamos contribuyendo en la electrificación de la energía, en integración de las energías renovables y por tanto a la disminución de las energías contaminantes.

(9) **Agua Industria, Innovación e Infraestructura:** Acuerdo a la meta 9.4, en este proyecto utilizamos la tecnología puntera y de máxima eficacia para avanzar hacia la sostenibilidad energética. No solo estudiamos la implantación de una flota de autobuses eléctricos si no que lo hacemos con el uso de una infraestructura de las tecnologías más recientes e innovadoras del sector como son los sistemas de recarga por inducción electromagnética estática y dinámica. Favoreciendo las condiciones ambientales en la ciudad de Bilbao. A pesar de que nuestro proyecto no se ha llevado a cabo en una ciudad en desarrollo, nuestro estudio y herramientas desarrolladas podrían ser utilizadas para que un proyecto similar se realice en cualquier lugar.

(11) **Ciudades y Comunidades sostenibles:** En la misma línea que en el objetivo (9), Hemos desarrollado el proyecto basado en una línea de transporte público de la ciudad de Bilbao (11.2). Estudiamos una posibilidad de transición hacia el transporte público eléctrico. A su vez, con los sistemas de recarga dinámicos ofrecemos una infraestructura que podrá ser utilizada por el resto de usuarios de la vía con sus vehículos

privados, lo que supone una infraestructura de recarga eficiente, dinámica y discreta en la ciudad que incentivará la compra de vehículos eléctricos de los ciudadanos. De este modo colaboramos a la transición del transporte público hacia el uso de energía sostenible. En esta transición colaboramos a reducir el impacto ambiental per capita de las ciudades (11.6), e incentivamos a aumentar el número de ciudades que hace un uso eficiente de los recursos y mitiga el cambio climático (11.b).

De esta misma manera, ayudando al desarrollo de tecnologías de uso energético sostenible y no contaminante, contribuimos también a los objetivos (3) **Salud y Bienestar**, al reducir la contaminación local de partículas en ciudades, y (13) **Acción por el clima**, al reducir las emisiones y colaborar en la explotación de las energías renovables, luchando contra el cambio climático. Por las razones citadas colaboramos en cierto modo a la (14) **Vida submarina** y (15) **Vida de ecosistemas terrestres**.

2 ESTADO DEL ARTE

Desde hace ya tiempo que surgió en la industria automovilística la incesante preocupación por encontrar alternativas a la propulsión contaminante de los carburantes. Entre ellas destacan el gas natural, las celdas de hidrógeno y las baterías eléctricas.

Todas estas tecnologías presentan características favorables. Sin embargo las más prometedoras son las 2 últimas puesto que aunque el gas natural parece contribuir a la reducción de emisiones de gases contaminantes, se ha demostrado que la extracción y almacenamiento de este gas tiene un alto riesgo de fugas de metano, pudiendo tener impactos ambientales perjudiciales para el cambio climático y contaminación del agua [26]. Además, las baterías eléctricas se mantienen seis veces más eficientes.

Por su parte las celdas de hidrógeno tienen una densidad energética mayor a las baterías eléctricas. Sin embargo, estas tienen todavía muchas barreras que superar, como la producción a gran escala y la obtención y distribución del hidrógeno con la demanda energética que esto presenta. Además, el hidrógeno resulta ser altamente inflamable lo que supone un gran riesgo para su uso comercial [4]. A pesar de que no dudamos en que algún día el hidrógeno estará entre los medios de propulsión principales, nos hemos interesado en este proyecto en los vehículos eléctricos. Hemos elegido estos vehículos porque aunque ya tengan gran influencia y sean prometedores, encuentran todavía ciertos problemas importantes que les limitan en su integración.

Los principales obstáculos que encuentran estos vehículos son sus elevados precios su pobre autonomía y la escasa infraestructura de recarga que encontramos actualmente y los elevados tiempos de recarga que da inseguridad a los potenciales compradores.

Para mejorar las condiciones y sobrepasar estas limitaciones se están estudiando y desarrollando tecnologías innovadoras.

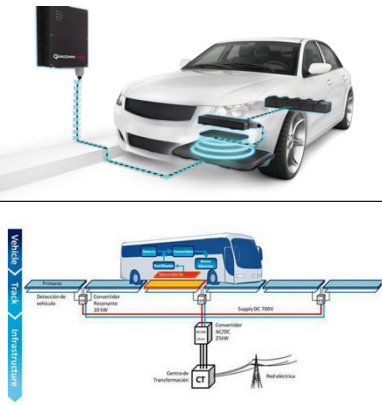
Por un lado baterías más grandes y ligeras se están desarrollando para proporcionar una autonomía admisible al vehículo, sin embargo estas suponen un coste muy elevado y todavía están en desarrollo.

Por otro lado se apuesta por sistemas de carga que permitan proporcionar energía a las baterías en un tiempo reducido para que la experiencia de conducción y recarga sea más llevadera evitando largas esperas para las recargas [28].

Entre estos destacamos las 4 tecnologías de las siguiente tabla.

Tabla 1. Diferente tecnologías de recarga de los vehículos eléctricos

Opción tecnológica	Descripción		Estado de desarrollo	Potencial
Carga por conducción (Comercial)	El usuario conecta manualmente el VE o el VHR a una estación de carga mediante un cable De potencias bajas 1-22kW a potencias de hasta 150 kW y 300kW		Las infraestructuras de recarga ya funcionan comercialmente con esta opción	La solución más sencilla y de menor coste. Es la solución más creíble comercialmente en este momento. Carga lenta, hasta Ultra rápida(300 kW) no disponible para todos los vehículos. Mayor potencia=mayor desgaste de la batería.
Acoplamiento del vehículo y la carga - Pantógrafos	Un sistema automático sujeta el vehículo y un brazo robótico se acopla a él para busca.		Este perfeccionamiento de la carga conductiva aún está en desarrollo. Se está probando en algunos proyectos, sobre todo en Japón y por la empresa Modulowatt	Permite la recarga sin descender del vehículo. Los costes de esta opción son más elevados que los de la carga conductiva. Además, requiere espacios dedicados más grandes (tamaño del dispositivo, movimiento del brazo, etc.). Por último, los vehículos tendrían que adaptarse en cuanto a la posición de la base de carga. Estas desventajas deberían limitar su uso a casos específicos. Alto potencial para vehículos con trayecto fijo como los autobuses. Puede proporcionar potencias muy elevadas de hasta 300 kW para recargas completas en cuestión de minutos.

Carga inducción por	La batería se carga por inducción electromagnética. En estático o en dinámico.		Esta en desarrollo primitivo, se ha probado en muy pocos casos desde el punto de vista comercial (barcos eléctricos en La Rochelle) y en algunos proyectos (RENAULT con Qualcomm et Vedecom projet FABRIC)	Permite la recarga sin descender del vehículo. En paradas de oportunidad (estático) o incluso en ruta (dinámico). Pese a la distancia consigue mantener un rendimiento de 90% con potencias de hasta 100kW. Sus elevados costes deberían limitar su difusión en segmentos de mercado muy específicos (transporte público) a medio plazo.
Sustitución de la batería	La batería descargada se sustituye por otra cargada mediante un brazo robótico		Desarrollado por la empresa Better Place. Varios proyectos existentes pero aún no comercializados a pesar de la fuerte comunicación de la empresa.	Este sistema supondría un tiempo prácticamente nulo de recarga, similar al caso de los carburantes. Este sistema requiere la posesión de un gran stock de baterías y altos costes de infraestructura. Además, queda pendiente la cuestión de la compatibilidad del modelo de negocio asociado a la propiedad o al alquiler de la batería con el intercambio de la misma. Esto debería limitar su difusión a flotas específicas (taxi).

En este proyecto nos hemos interesado por los sistemas de recarga por inducción estática y dinámica.

El principio de los sistemas de carga por inducción es el siguiente:

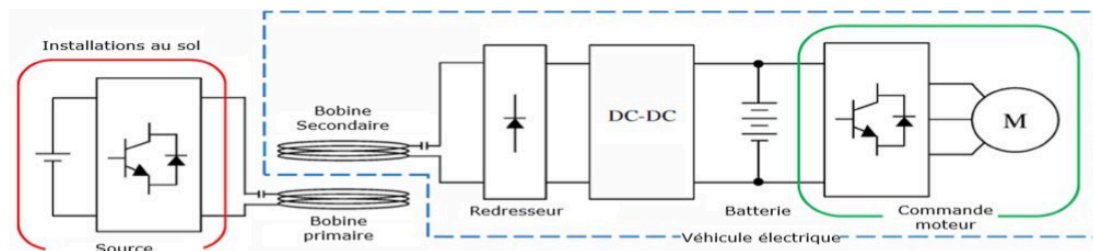


Ilustración 2. Principio de los sistemas de carga sin contacto por inducción de la fuente a la carga

El sistema de carga inductiva funciona a partir de la fuente de energía de corriente continua que pasa por el bus del inversor haciendo corriente alterna y luego llega a las bobinas en las que por la ley de Lenz Faraday induce un campo electromagnético en la bobina secundaria que provoca una corriente en esta segunda bobina [16]. Ambas bobinas tienen condensadores que compensan la potencia reactiva y permiten que el sistema funcione correctamente en resonancia. En el sistema secundario integrado en el vehículo eléctrico, la señal se rectifica mediante un rectificador y se adapta antes de entrar en la batería. Actualmente existen 4 niveles de potencia de los sistemas de carga por inducción homologados según la norma SAE J2954 [17], cuyas principales características se muestran a continuación.

Tabla 2. Características de los cargadores WPT según la norma SAE J2954 [17]

4 niveaux 3.7kW, 7.7kW, 11kW et 22kW	3 classes Z1(100-150mm), Z2(140-210mm), Z3(170-250mm)	Rendement énergétique minimum 85% alignées, 80% désalignement. Tol:75mm/100mm
Plage fréquences Interoperabilité: 81,38-90kHz Nominale 85kHz	Exposition champ magnétique max (ICNIRP 2010) • RMS: 27 μ T 21,4 A/m 83V/m • Peak: 38,2 μ T 30,4 A/m	

El sistema de carga estática ya se usa a nivel comercial en domicilios, empresas como WiTricity han pasado ya lo estándares de seguridad y calidad de SAE J2954.

En cuanto a la carga por inducción dinámica, varios proyectos se han desarrollado todavía en estado de prueba.

La empresa automovilística francesa Renault llevo acabo el proyecto FABRIC donde alcanzaron una eficiencia de 80% con una potencia de 20 kW a una frecuencia de 85kHz y 20 cm de separación entre bobinas (frecuencia de resonancia que permite que este sistema funcione con mayor eficiencia y mayor espacio entre ambas bobinas).

Otro proyecto fue desarrollado en 2010 por el instituto Coreando de Ciencia y Tecnología, llamado el “OLEV bus” o Vehículo Eléctrico en Línea [31]. Consiste en una línea de autobús público que funcionaba mediante carga dinámica. Derivo en la fundación en 2011 de la empresa “OLEV Technologies” en Massachusetts, la cual ha

creado ya 3 generaciones de estos vehículos con potencias entre 3kW y 17kW y rendimientos ente 71% y 80% [29]. Finalmente, ELECTREON ha desarrollado proyectos con carga dinámica en Tel-Aviv (Israel), Gotland (Suecia), Lombardía (Italia), con autobuses y camiones eléctricos. Esta empresa también tiene un centro de entrenamiento de estos vehículos en Alemania [30].

Finalmente, podemos observar que la idea de carga por inducción electromagnética lleva tiempo en la cabeza de los ingenieros, sin embargo, su aplicación en el mundo de los vehículos sigue en el principio de su desarrollo.

El alto interés que presentan estos sistemas debido a sus ventajas que satisfacen gran parte de los inconvenientes que encuentran los vehículos eléctricos como son: capacidad para reducir el tamaño de las baterías, capacidad para aumentar la autonomía, puede ser utilizado por varios vehículos al mismo tiempo (dinámico), una infraestructura de recarga discreta y segura, junto a su estado de investigación y desarrollo nos ha llevado a realizar este proyecto con el objetivo de promoverlo, con la esperanza de que facilite la integración de los vehículos eléctricos en la sociedad. Ofrecemos un caso específico, que presenta a la empresa vasca Grupo Acha la posibilidad de instalar este sistema y avanzar en la transición hacia el transporte público o privado de autobuses eléctricos y hacia el transporte propulsado con energía renovable. De la misma manera, el proyecto servirá de ejemplo a otras empresas que podrían incluso servirse de las herramientas de cálculo y optimización que hemos desarrollado para estudiar su caso específico y valorar las distintas alternativas que tendrían utilizando este sistema de recarga. Colaborando de esta manera, como ingeniero, con el fin de que la tecnología de los vehículos eléctricos pueda superar sus barreras y evolucionar con el objetivo de mejorar el mundo hacia los objetivos de desarrollo sostenible.

3 SISTEMA: CARATERÍSTICAS Y PARÁMETROS

3.1 PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

El sistema que estudiamos es una línea de autobús que va desde la estación de autobuses de Bilbao hasta el aeropuerto de esta misma ciudad. En la base, es decir en la estación de autobuses la compañía Grupo Acha tiene reservada para esta línea una dársena. En el aeropuerto tienen dos dársenas para esta línea. El trayecto es de aproximadamente 15 km ida (y 15km vuelta) con una primera parte en la ciudad donde la velocidad se mantiene por debajo de los 50 km/h y una segunda parte con la salida a través de un túnel a carreteras interurbanas en las cuales el autobús alcanzará velocidades cercanas a los 80 km/h, el trayecto de subida son aproximadamente 27 minutos y el de bajada 25 minutos. Los autobuses diésel consumían una media de 37,4l/100km. Esta información fue proporcionada por la empresa Grupo Acha en dos documentos Excell:

1. “Datos frecuencia Octubre 2019.xls”: almacena la hora real a la que los autobuses pasan por las paradas y las horas de salida y llegada de estos a las cocheras durante el mes de Octubre de 2019 (mes considerado estándar).
2. “Consumo 2075-2019.xls”: almacena la cantidad de carburante repuesto y los kilómetros recorrido por cada bus en el momento de la reposición a lo largo de 2019.

La información de estos documentos fue tratada para extraer los valores indicados. Esta configuración nos va a permitir definir los parámetros fijos de nuestro sistema que condicionarán la viabilidad de los escenarios.

Variables fijas:

Paradas disponibles en la estación de autobuses: 1

Paradas disponibles en el aeropuerto: 2

Tiempo de subida: 27 minutos

Tiempo de bajada: 25 minutos



Ilustración 3. Trayecto de subida de la línea A3247 representado en Google Earth®. Datos colectados con Ski Tracks®

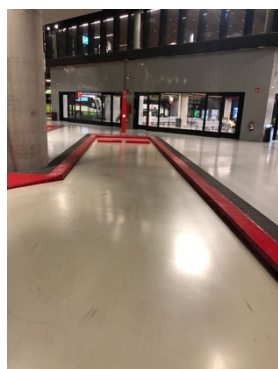


Ilustración 5. Dársena en la estación de autobuses



Ilustración 4. Parada en el aeropuerto

3.2 FUNCIONAMIENTO DE LA LÍNEA PRE COVID-19

Para hacernos una idea, la línea a 3247 antes de la pandemia funcionaba con 5 autobuses diésel dando una frecuencia de 15 minutos. El servicio de subida de la intermodal al aeropuerto comenzaba a las 5h15 con la última salida a las 22h00. Desde el aeropuerto, el servicio de bajada empezaba a las 6h15 con el último descenso a la 24h00. Podemos observarlo en la ilustración 5 [14]. Hemos tomado como referencia, a partir del documento "Datos frecuencia Octubre 2019.xls", un tiempo máximo de

servicio que un autobús puede llegar a hacer en una jornada: 1102 minutos de servicio, recorriendo aproximadamente 457km. Una distancia muy elevada para la autonomía de los autobuses eléctricos lo que justifica el interés de este proyecto.

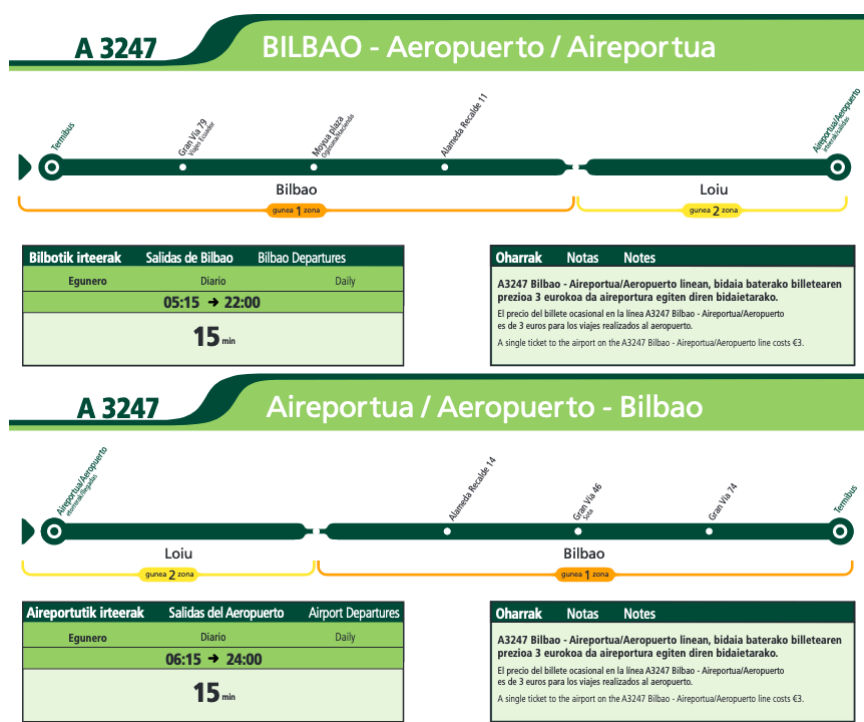


Ilustración 6. Servicio de la línea A3247 previo al Covid-19

Para plantear distintos escenarios, vamos a jugar con las características de la línea. Estas características definirán mayoritariamente el escenario estático (tiempos de parada, recarga estática, frecuencia del servicio etc.). Sin embargo, en la parte dinámica solamente debemos estudiar en que tramos es necesario y conveniente instalar el sistema de recarga. En el caso mixto, la necesidad de instalar tramos de recarga dinámica estará altamente condicionada por el escenario estático definido por estas variables. Las variables que vamos a considerar son:

1. Número de paradas con cargadores WPT (« Wireless Power Transfer »).
2. Número de autobuses.
3. Número de bobinas en el autobús (el autobús puede tener 2 bobinas permitiendo la alimentación a la batería con el doble de potencia, estas deberán ser alimentadas a su vez con 2 bobinas emisoras).
4. Potencia de los cargadores WPT (estática et dinámica)

Finalmente, para el caso dinámico,

5. Tramos con sistemas de carga dinámica instalada (2º parte)

3.3 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Antes de empezar con los cálculos es imprescindible tener todos los datos necesarios de manera precisa y ordenada. Los datos necesitados son:

- 1) Datos del trayecto: paradas, tiempos, velocidades y pendientes.
- 2) Características del autobús eléctrico candidato
- 3) Costes:
 - a) Autobús
 - b) Sistemas de recarga: estáticos y dinámicos en función de la potencia
 - c) Instalación de los sistemas
- 4) Consumo del autobús en un ciclo real de nuestro trayecto

3.3.1 DATOS DEL TRAYECTO

La información general fue proporcionada por la empresa Grupo Acha, o calculada a partir de los datos proporcionados por ella.

Paradas disponibles en la estación de autobuses: 1

Paradas disponibles en el aeropuerto: 2

Tiempo de subida: 27 minutos

Tiempo de bajada: 25 minutos

3.3.2 CARACTERÍSTICAS Y COSTE DEL AUTOBÚS ELÉCTRICO CANDIDATO

Se decidió el autobús elegido como prototipo para nuestros cálculos y modelo el llamado Lion's City 18 E fabricado por la empresa MAN SE. Se eligió este autobús por su similitud con las características de los autobuses diésel actuales en cuanto a capacidad de personal y potencia.

Tabla 3. Características del autobus actual y del autobus eléctrico candidato MAN Lion's City

	Actual MAN Lion's City L Diesel	MAN Lion's City 18E	Source
Poids max [kg]	25686	29900	[19]
Nb. passagers	111	120	[19]
Puissance Nominal [kW]	265	320 Max: 540	[19]
Autonomie [km]	-	200-270	[19]
Capacité batterie [kWh]	-	640	[19]
Puissance charge max [kW]	-	150	[19]
Coût [€]	323000	750000-800000	Contact at MAN

También, su elevada autonomía le hacía buen candidato ya que el servicio de esta línea la requiere como indicado previamente. Hablando con un comerciante de MAN decidimos que era una buena opción.

La autonomía expresa es la de consumo con máxima carga, 270 km en condiciones favorables y 200 km en condiciones desfavorables. Si lo comparamos una vez más con los 457 km recorridos en un día de servicio, podemos ver la necesidad de implementar estos sistemas de carga de oportunidad.

3.3.3 COSTES DE LOS SISTEMAS DE RECARGA Y DE SU INSTALACIÓN: ESTÁTICOS Y DINÁMICOS EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA

En cuanto a los sistemas de carga Plug-In, la empresa greenloft® proporcionó el coste del cargador y de su instalación para un cargador de 150kW de la empresa Wallbox®. Para el coste de unidades adicionales encontramos en distintos estudios una aproximación como la siguiente^{[3][4][5]}

Plug-in:

$$C_{Plug-In} = (75600€ + 52000€) + (N_b - 1) \cdot 63800 €$$

$C_{Plug-In}$ Es el coste total de los cargadores Plug-In instalados.

N_b Es el número de autobuses y por tanto el número de cargadores total necesarios.

En cuanto a los sistemas de recarga por inducción, encontramos la información en disintos informes.

Sistemas carga por inducción estática [4][6]:

$$C_{systarr} = (C_s + P_{is} \cdot C_{Pcs}) = (52000€ + P_i \cdot 600€)$$

$C_{systarr}$ Es el coste de un sistema de recarga estático y de su instalación
Tiene el coste fijo de 52000€ y un coste que varía con la potencia instalada de 600€/kW.

Instalación de las bobinas en el autobús [2]

$$C_{syst.bobineb} = 35000€$$

$C_{syst.bobineb}$ Es el coste de instalación de una bobina del sistema receptor en el autobús.

Sistema de carga por inducción dinámica [6][7]

$$C_{syst.dyn} = km \cdot (C_{\frac{d}{km}} + P_d \cdot C_{\frac{Pd}{km}}) = km \cdot (636000€ + P_d \cdot 1000€)$$

$C_{syst.dyn}$ es el coste total de 1 kilómetro de sistemas de recarga, siendo $C_{\frac{d}{km}}$ el coste fijo de instalación y $C_{\frac{Pd}{km}}$ el coste variable en función de la potencia P_d

	Fournisseur	Puissance en kW	Coûts en €
Plug-In	Wallbox	150	127600
Statique	-	50-75	1 chargeur-1bobine: 82000-97000
Dynamique	-	50-75	1km: 686000-711000

Ilustración 7. Costes en € de las infraestructuras de recarga por unidad

3.3.4 CONSUMO DEL AUTOBÚS EN UN CICLO DE TRAYECTO

El valor del consumo máximo que puede tener un autobús en un ciclo de trayecto es fundamental para determinar la validez de los distintos escenarios estudiados.

La empresa MAN nos proporciona el consumo medio de los autobuses diésel por día a lo largo del mes de octubre de 2019, con estos datos podríamos calcular el consumo medio del autobús por 100 kilómetros recorridos que como hemos indicado previamente es de 37,4l/100km como podemos observar en la distribución normal calculada a partir de los datos.

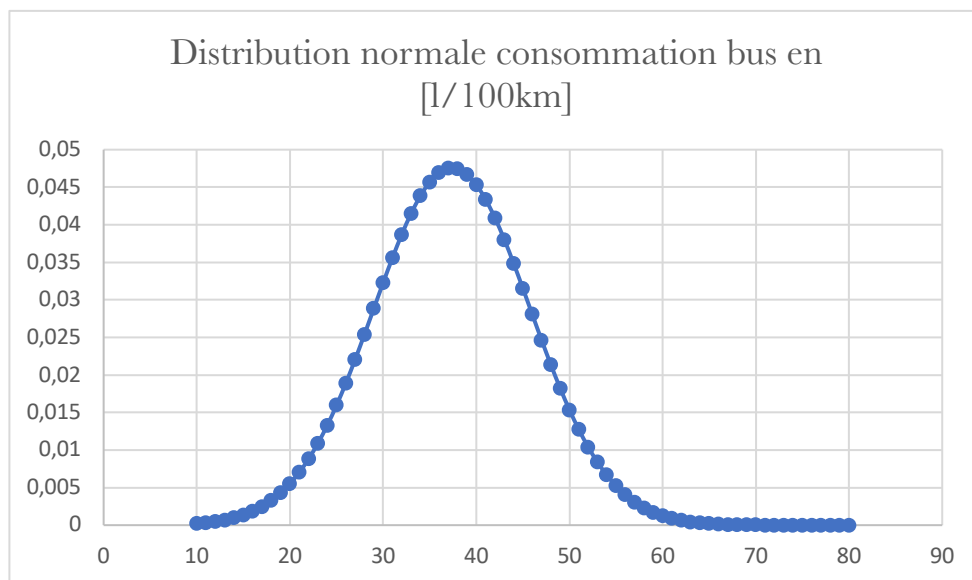


Ilustración 8. Distribución normal del consumo de un autobus diesel en [l/100km]

Sin embargo, la conversión de este valor a kWh no nos es de gran ayuda para nuestro sistema puesto que las características de los autobuses son distintas y sobre todo porque el autobús diésel no cuenta con la recarga energética por regeneración en las frenadas.

Sí podemos entender en la figura que el consumo puede variar de manera considerable dependiendo de las condiciones.

Al ser el consumo del autobús un dato primordial en nuestros cálculos, ya que se utilizará en los 3 casos, decidimos realizar un modelo de simulación con la ayuda de la herramienta MATLAB Simulink®. En este modelo que describiremos a continuación nos basamos en la dinámica para calcular la energía de propulsión requerida a lo largo del trayecto real. Introducimos en el modelo las características del autobús en cuestión Lion's City 18E.

Por otro lado, introducimos los datos precisos de velocidad, altitud e inclinación instantáneas del autobús a lo largo del trayecto. Con esta información, nuestro modelo calcula la potencia instantánea necesitada por la batería en cada instante consiguen con la integración obtener la energía total consumida por el autobús en el trayecto.

Para obtener los datos de velocidad, altitud e inclinación instantáneos realicé el trayecto completo de ida y vuelta en el autobús un día en condiciones normales de tráfico y meteorología y con la ayuda de las aplicaciones GPS: SkiTracks®, con la cual a través de Google earth® obtenemos el mapa mostrado en la Figura 1 y con Phyphox® la cual recolecta los datos con mayor frecuencia y buena precisión por lo que los datos obtenidos con ella son los que utilizamos para los cálculos posteriores del proyecto.

Ilustración 9. Ejemplo de extracto de datos recolectados con la aplicación Phyphox y una imagen tomada durante la recolecta



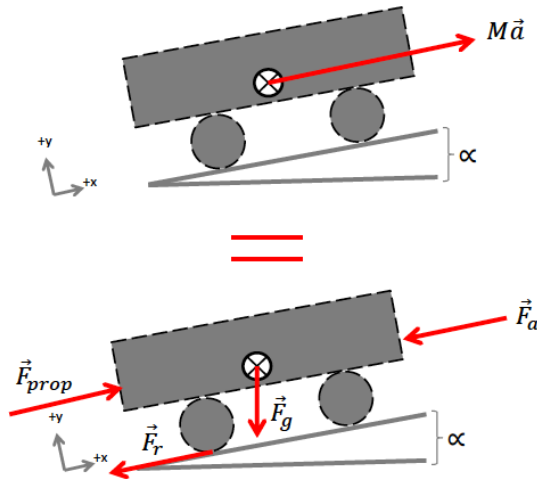
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Time (s)	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Altitude WGS84 (m)	Speed (m/s)	Direction (°)	Distance (km)	Horizontal Accuracy (m)	Vertical Accuracy (m)	Satellites	Slope(sin)
2	0	43,260719	-2,950275	27,29043961	76,58160949	0	-1	0	65	65	0	-0,049101606
3	1,543475	43,260719	-2,950275	27,29043961	76,58160949	0	-1	0,002387429	65	65	0	-0,049101606
4	3,312469	43,260711	-2,950303	25,45970154	74,75092269	0	-1	0,039672117	65	65	0	-0,089591762
5	7,74272	43,260772	-2,950756	24,20267296	73,49388805	0	-1	0,053702744	65	65	0	0,059291861
6	8,200883	43,260824	-2,950598	24,53987808	73,83077486	0,7733942	-1	0,059389952	48	48	0	0
7	9,200884	43,260874	-2,950582	24,53987808	73,83054716	0,6184933	-1	0,061459447	48	48	0	0
8	10,200889	43,260889	-2,950567	24,53987808	73,83047203	0,1159692	-1	0,065879618	32	32	0	0
9	11,200889	43,260924	-2,950542	24,53987808	73,83030309	0,2199742	-1	0,066137869	32	32	0	-0,072610253
10	12,20089	43,260923	-2,950545	24,42390366	73,71433458	0,563152	-1	0,067735087	32	32	0	0,008081794
11	13,20099	43,260909	-2,950547	24,44819031	73,73868494	0,563152	-1	0,070740194	32	32	0	0,000552758
12	14,20099	43,260883	-2,950538	24,45644379	73,74704824	0,0173821	-1	0,085671636	32	32	0	0
13	15,201001	43,260759	-2,950467	31,75672493	81,04783331	0,2432019	-1	0,085671636	32,00483309	32,00483309	0	0
14	16,201001	43,260759	-2,950467	31,75672493	81,04783331	0	-1	0,085671636	24,00362482	24,00362482	0	0

3.4 MODELO DE CONSUMO DEL AUTOBÚS ELÉCTRICO

3.4.1 DESCRIPCION

Para desarrollar el simulador del autobús eléctrico nos basamos en su funcionamiento dinámico, hemos tomado como referencia los modelos presentados en [25][26].

Ilustración 10. Diagrama del cuerpo libre de un autobús en movimiento



Las diferentes fuerzas que actúan sobre el sistema del autobús son :

Fuerza aerodinámica $F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2$

Fuerza gravitatoria $F_{gr} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$

Fuerza de rozamiento $F_r = C_r(v(t)) \cdot m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \mid C_r(v(t)) = 0,006 + 4,5 \cdot 10^{-7} \cdot v(t)^2$

Fuerza total $F_{tot} = 1.1 \cdot m \cdot a$

Fuerza de propulsión $F_{prop} = F_{tot} + F_r + F_{gr} + F_{aer}$

En el caso de la fuerza total, vemos que la masa se multiplica por 1.1, esto se ha hecho para tener en cuenta la inercia provocada por los elementos giratorios del vehículo [26]. Una vez obtenida la fuerza de propulsión, calculamos la potencia de propulsión requerida en la rueda:

$$P_{prop} = F_{prop} \cdot v(t)$$

Esta potencia será demandada a la batería o regenerada en caso de aceleración o frenada respectivamente, según las siguientes ecuaciones. Así calculamos la potencia instantánea en la batería a lo largo del trayecto.

$$\text{Si } P_{prop} \geq 0 : P_{batterie} = \frac{P_{prop}}{\eta_T \cdot \eta_M} [W] \quad \text{consommation}$$

$$\text{Si } P_{prop} < 0 : P_{batterie} = -P_{prop} \cdot \eta_{reg} \cdot \eta_M [W] \quad \text{régénération}$$

Tabla 4. Parámetros de las ecuaciones de la dinámica del autobus

Símbolo	Parámetro
ρ	Densidad del aire [kg/m ³]
A	Area frontal del vehículo [m ²]
C_d	Coeficiente de drag
v	Velocidad [m/s]
g	Constante de gravedad
Cr	Coeficiente de rozamiento con el suelo
m	Masa del vehículo [kg]
a	Acceleración [m/s ²]
η_T	Rendimiento de la transmisión
η_M	Rendimiento del motor
η_{reg}	Rendimiento de la regeneración por frenada

Una representación del modelo de MATLAB Simulink se encuentra en el Anexo A.

3.4.2 VALIDACION DEL MODELO

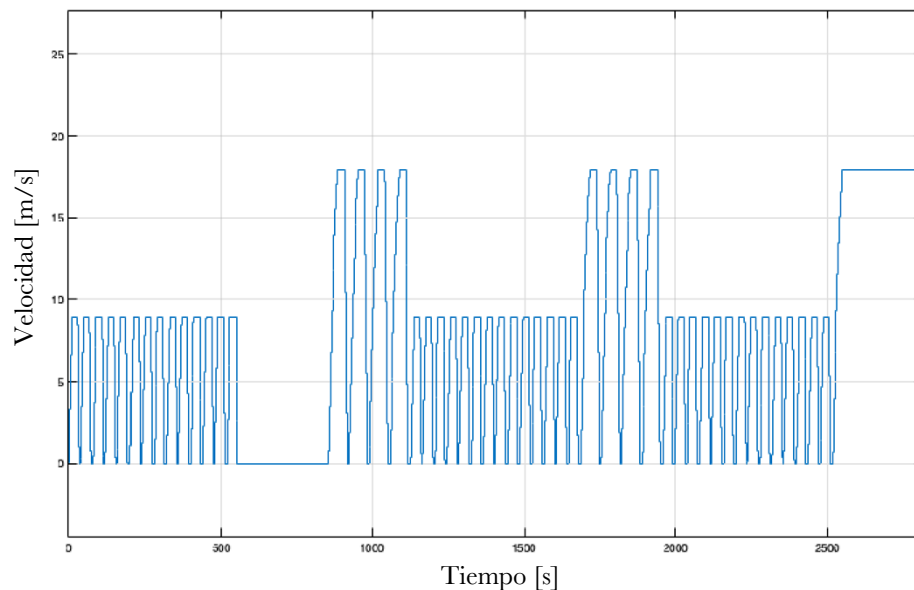
La validación del modelo se ha llevado a cabo a través del Altoona test “Advanced design bus” (ADB) del Penn State College of Engineering [27]. Este test es una prueba estandarizada que se realiza en autobuses de propulsión tanto térmica como eléctrica. Permite determinar los rendimientos de los autobuses en referencia a un mismo circuito y así poder compararlos adecuadamente. Este test, se utiliza también para validar los simuladores como podemos ver en [25][26].

Este test se compone de tres partes o ciclos: Central Business District (CBD) cycle, Arterial (ART) cycle, Commuter cycle, con velocidades máximas de 32,18km/h en el CBD,

64,61km/h en el ART y 88,5km/h en el Commuter. Un ciclo entero se compone así: CBD, ART, CBD, ART, Commuter. Pueden observar el ciclo en la figura 19.

La prueba consiste en repetir el ciclo hasta que el autobús quede sin autonomía, en el caso de los eléctricos cuando la batería se acaba.

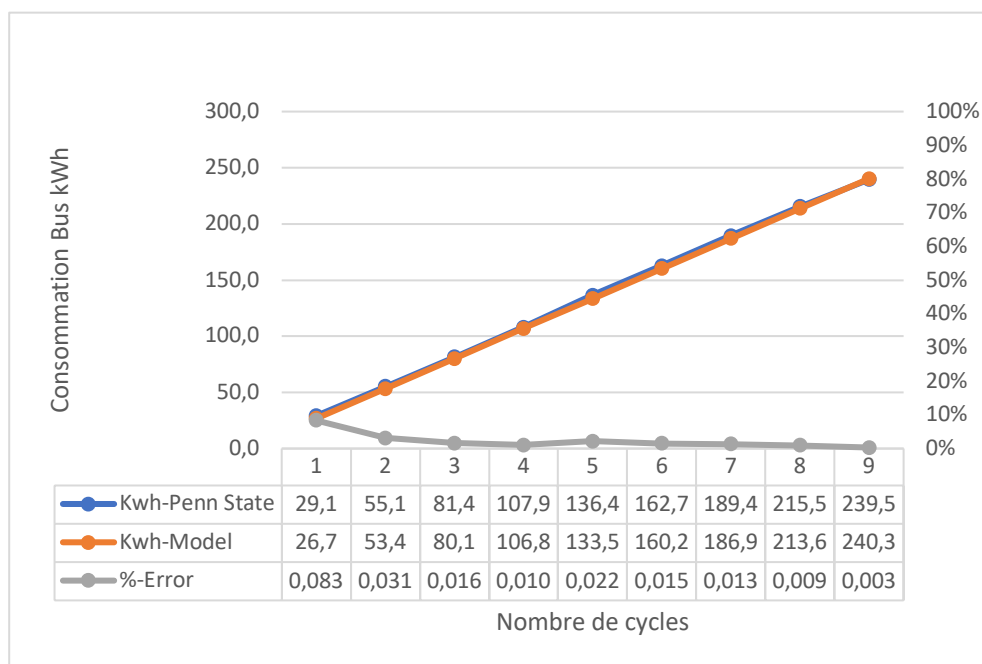
Ilustración 11. Ciclo de test "Advanced design bus"



El ciclo se realiza con un altitud constante, es decir con pendiente nula. Para realizar el test de validación del simulador, hemos cogido las características del autobús BYD K9, al haber realizado este el test en 2013-2014 y tener la información respectiva accesible en internet. Al tener este autobús una velocidad máxima de 64km/h, limitamos en la velocidad del test con 17,77m/s como observamos en la ilustración 10. El BYD K9 realizó 9 ciclos completos hasta terminar su autonomía. Los resultados del test se encuentran en la página web del Penn State College of Engineering [27].

Introducimos las características de este autobús en nuestro modelo, para simular el

Ilustración 12. Comparación Penn State vs Simulación: Altoona Test 9 ciclos ADB



el comportamiento que este tendría en el circuito y lo comparamos con los datos reales que se recolectaron en el test real. Obtenemos los resultados de la figura 11.

La Figura 11 muestra los resultados de consumo al final de cada ciclo para los 9 ciclos. Observamos que tanto el modelo como el autobús real consumieron alrededor de 240kWh, con un error de 0,33%, por lo que podemos dar por validado nuestro modelo.

3.4.3 CONSUMO DEL AUTOBÚS EN EL TRAYECTO DE LA LÍNEA A3247

Como indicado previamente, los datos de velocidad del autobús e inclinación de la carretera en cada instante fueron recogidos con la aplicación Phyphox.

Utilizamos las características de nuestro autobús prototipo MAN Lion's City 18E los datos se obtuvieron a través de un contacto con la empresa y en su catálogo. En nuestro modelo utilizamos la masa máxima permitida debido a que en nuestros cálculos posteriores de los escenarios tenemos que asegurar que la infraestructura de recarga garantice la autonomía del autobús, incluidos los días de máximo consumo. Los datos de nuestro modelo son entonces los siguientes:

Fig 13. Características del model MAN Lion's City 18E		
Paramètres	Valeur	
ρ	1,225	[kg/m ³]
A	8,466	[m ²] [19]
C_d	0,8	[20]
g	9,81	[m/s ²]
Cr1	4,5E(-7)	[20]
Cr0	0,006	[20]
Masa máxima técnica	29900	[kg] [19]
η_T	0,95	[20]
η_M	0,88	[20]
η_{reg}	0,4	[19]

Introduciendo el ciclo completo, ida y vuelta con una parada de 10 minutos en el intermedio, obtenemos los siguientes resultados.

Ilustración 13. Altitud a lo largo del ciclo de la línea A3247

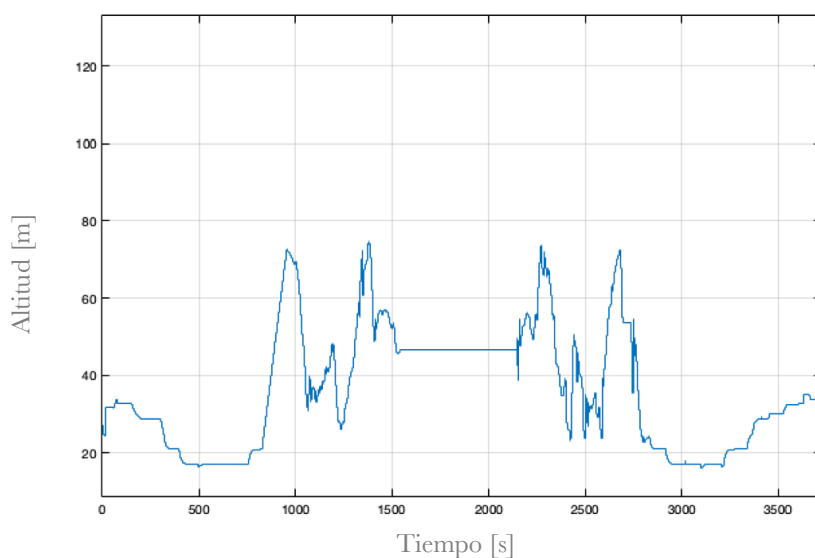


Ilustración 14. Velocidad a lo largo del ciclo de la línea A3247

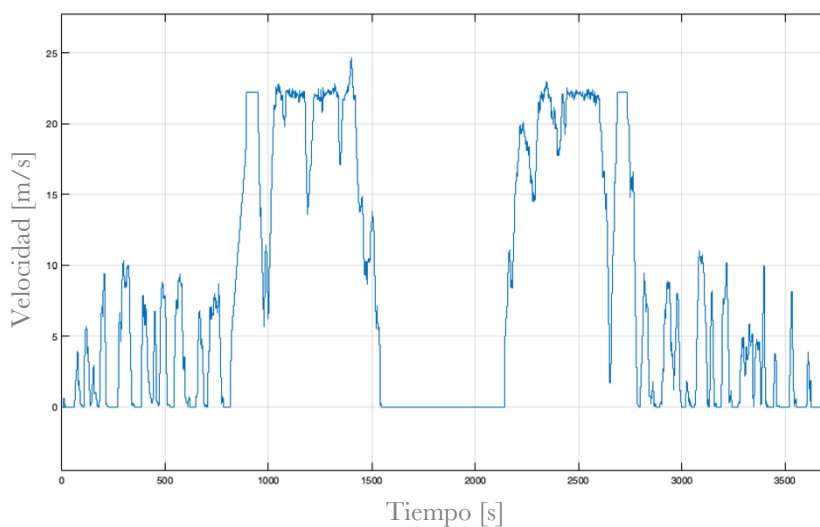
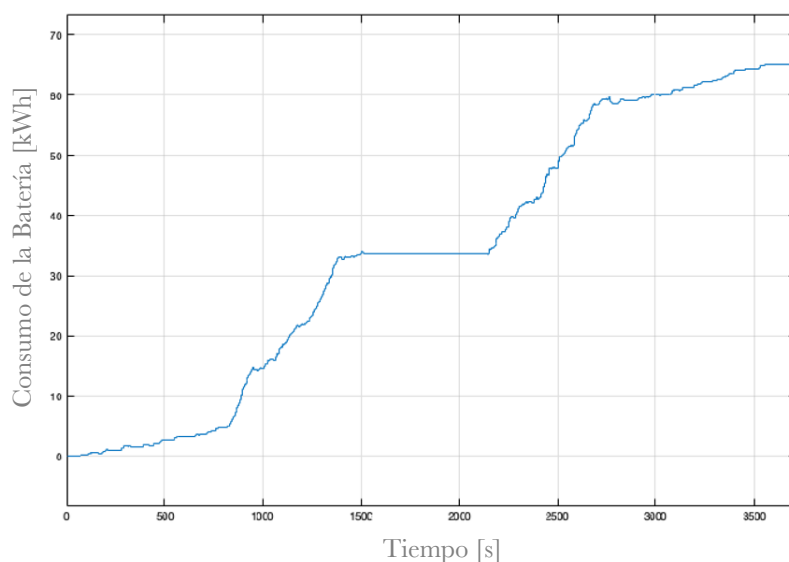


Ilustración 15. Consumo energético a lo largo del ciclo de la línea A3247



Introduciendo estos datos en nuestro simulador, calculamos los valores que determinan el rendimiento de los autobuses a lo largo del trayecto de la línea. Obtenemos la siguiente información relevante,

Tabla 5. Resultados y valores de rendimiento principales del autobús en el trayecto de la línea A3247

Cycle	Aller/montée	Retour/descente	Total
Temps [s]	1543	1484	3027,35 + arrêts
Distance [km]	15,39	15,1	30,49
Vitesse moyenne [km/h]	35,9	36,63	36,27
Consommation max [kWh]	34,67	32,57	67,24 290,2km

15 cycles: 1008,6kWh
200km : 90,77 kWh

Como indicado anteriormente, utilizamos el peso máximo permitido del autobús para hacer nuestros cálculos considerando los peores escenarios de consumo que proporcionarán fiabilidad a nuestros resultados. Obtenemos como resultado un consumo de 67,24kWh en los 30,49 km totales del ciclo, lo que nos daría una autonomía de 290,2km. Nótese que este valor es similar a los 270km de autonomía que indica MAN en su catálogo con peso máximo y condiciones favorables.

Como nuestra recolecta de datos se hizo también en días de buen tiempo y tráfico medio, consideramos nuestro caso de condiciones favorables. Al tener que asegurar el peor de los casos, tomamos la relación 270-200km de MAN (MAN indica una autonomía mínima de 200km en el peor escenario) y estimamos un consumo de 90,77kWh para cubrir el peor de los casos. Este valor será el que utilizaremos en nuestros cálculos.

3.5 SISTEMA GLOBAL ESTUDIADO: PARÁMETROS Y CONDICIONES

3.5.1 DESCRIPCION

Para conseguir nuestro objetivo de presentar un abanico de escenarios óptimos entre los cuales el interesado pueda elegir en caso de querer electrificar la línea, hacemos variar una serie de características del sistema que nos permiten abarcar una gran variedad de escenarios. Los escenarios se definen en dos pasos principales, por un lado definimos la parte estática del sistema/logística de la línea y posteriormente en caso necesario introduciremos a los escenarios la infraestructura de recarga dinámica. Cuando hablamos de la parte estática de la línea, nos referimos a lo que refiere las paradas, el tiempo que los autobuses se detendrán en cada una de estas y el sistema de recarga que instalaremos en cada una.

Para estudiar este sistema y finalmente presentar los escenarios óptimos de toda la infraestructura que permita electrificar la línea, el trabajo ha sido dividido en 3 partes o casos.

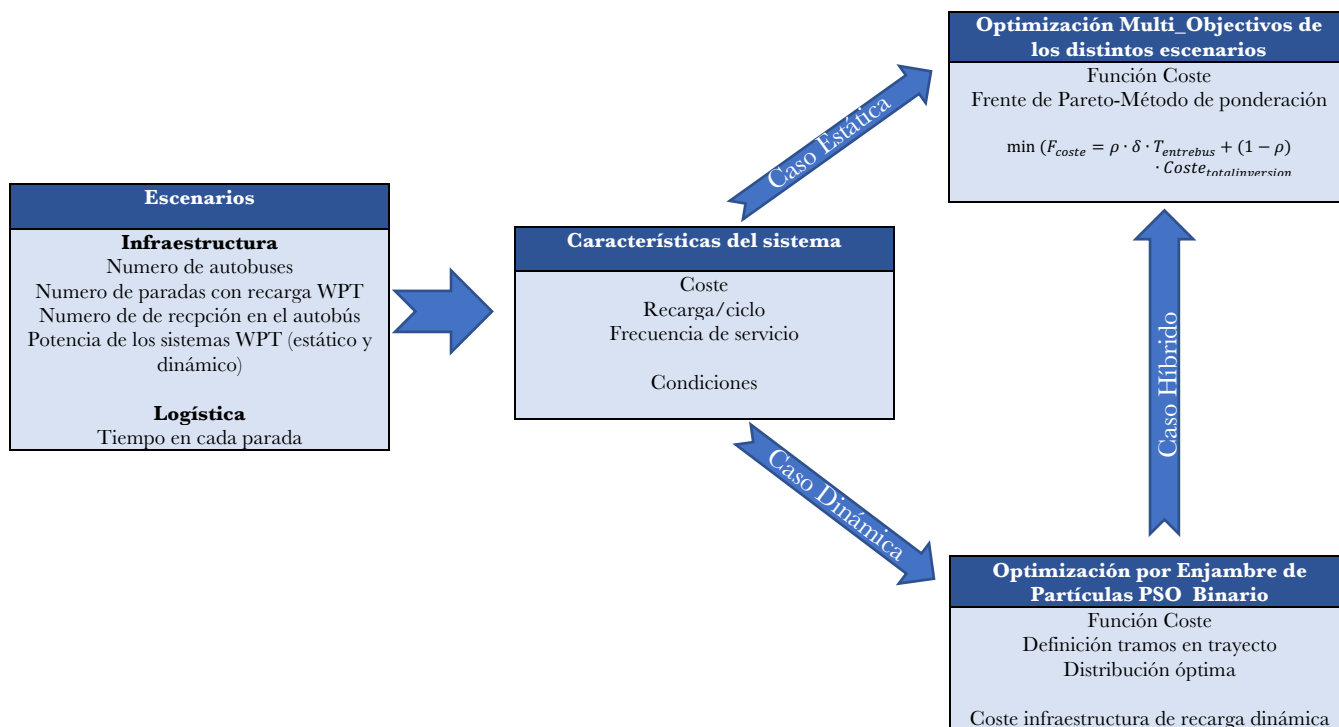
- ♣ Caso 1. Caso Estática: Únicamente se tendrán en cuenta los sistemas de recarga por inducción en estático (en las paradas).
- ♣ Caso 2. Caso Dinámica: Únicamente se tendrán en cuenta los sistemas de recarga por inducción dinámica, es decir instalados en la carretera donde el autobús circula.

- ♣ Caso 3. Caso híbrido: Ambas tecnologías se tendrán en cuenta para buscar su complementariedad.

La figura 17 representa cual es la lógica desde la definición de los escenarios hasta el calculo de las soluciones óptimas.

Los escenarios están definidos por un lado por la cantidad de autobuses y por la infraestructura de recarga que definen el coste, y por otro lado por la logística empleada, es decir el tiempo de parada en cada estación que determina la frecuencia del servicio conseguida

Ilustración 16. Representación esquemática del sistema y procedimiento hasta la optimización las soluciones



Una vez definido un escenario, este debe cumplir con las condiciones del sistema o quedará descartado. Posteriormente se calcula el coste y la frecuencia que garantizaría ese escenario. En el caso estático, una vez valorados todos los escenarios, entre los escenarios válidos realizamos un cálculo de optimización a través del método de ponderación obteniendo finalmente el Frente de Pareto de las soluciones “óptimas” en el caso estática. En el caso dinámico accedemos a realizar una optimización con el algoritmo

PSO Binario que nos dará la distribución óptima de los sistemas de recarga para cumplir con la autonomía necesaria de los autobuses al menor coste de inversión.

3.5.2 PARAMETROS DEL SISTEMA GLOBAL

Hay parámetros que se mantienen constantes a lo largo de todos los escenarios

Tabla 6. Parámetros constantes en todos los escenarios

Tiempo de subida (Intermodal a aeropuerto)	$T_m = 27$ minutos
Tiempo de bajada (Aeropuerto a intermodal)	$T_d = 24,77$ minutos
Numero de paradas en la intermodal	1
Número de paradas en el aeropuerto (llegadas y salidas)	2
Consumo máximo del autobus en el ciclo	90,77kWh
Capacidad de la batería	640kWh
Tiempo de servicio por día de cada autobus	1102 minutos

Tabla 7. Parámetros variables en los escenarios y los rangos valorados

Tiempo de parada en el aeropuerto*	$T_a = 5, 10, 15, 20$ minutos
Tiempo de parada en la intermodal	$T_i = 5, 10, 15$ minutos
Número de autobuses	$N_b = 3 : 8$
Número de bobinas receptivas en un autobús	$N_{Bb} = 1$ ou 2
Número de bobinas en cada parada dotada de sistemas WPT	= Número de bobinas receptivas en un autobús
Número de paradas con sistemas WPT estáticos en la intermodal	0 ou 1
Número de paradas con sistemas WPT estáticos en el aeropuerto	0, 1, 2

Potencias de los sist. WPT estáticos en la intermodal	$P_{isi} = 50\ 75\text{kW}$
Potencia de los sist. WPT estáticos en el aeropuerto	$P_{isa} = 50\ 75\text{kW}$
Longitud de los tramos con sistemas de recarga WPT dinámicos	Valoraremos tramos de 2 km a 5km
Número de tramos en el trayecto valorados	=Longitud del trayecto/Longitud tramos Aprox=30km/Longitud tramos
Potencia de los sistemas WPT dinámicos	$P_{dyn} = 75\text{kW}$

*Importante entender lo siguiente: en el aeropuerto hay 2 paradas disponibles, una parada en “llegadas” y otra en “salidas” de los aviones, donde el autobús deja a los pasajeros en el aeropuerto y donde los recoge respectivamente. Entre ambas paradas hay aproximadamente 2,5 minutos de conducción. El parámetro “Tiempo de parada en el aeropuerto” es el tiempo de estacionamiento en cada una de esas paradas, es decir si “Tiempo de parada en el aeropuerto”=10, el tiempo total de estacionamiento en el aeropuerto será de 20 minutos a parte de los 2,5 minutos de traslado. En la práctica los conductores se comunican y se desplazan de una a la otra en función de donde estén el resto de autobuses, pudiendo estar 5 en “salidas” y “15 en llegadas” según convenga. Por lo tanto en las condiciones del sistema consideramos que son dos estaciones paralelas y no una sola en la que el autobús esta 20 minutos por ejemplo. Consideramos que el autobús estará la mitad del tiempo en la parada “llegada” y la otra mita en “salidas”, aunque en funcionamiento real los conductores se irán adaptando a las circunstancias.

3.5.3 CONDICIONES DEL SISTEMA GLOBAL

El sistema debe cumplir con 3 condiciones principales. Cuando tratemos el caso dinámico una cuarta será añadida.

1. Condición de logística : Evitar solapamiento de los autobuses

$$(T_{px} + M_s) \leq N_{px} \cdot T_{entreb}$$

Donde :

T_{px} es el tiempo de estacionamiento en una parada (intermodal o aeropuerto)

M_s es un tiempo de 1 minuto que añadimos para dar un poco de flexibilidad a los conductores.

N_{px} es el número de paradas disponibles en la estación (1 en intermodal, 2 en aeropuerto)

T_{entreb} es el tiempo que hay entre cada autobus en el ‘circuito’ que es igual al tiempo total que tarda un autobús en completar un ciclo entre el número de autobuses:

$$T_{entreb} = \frac{1}{N_b} \cdot T_{cycle}$$

Esta condición asegura que no se solapen los autobuses en el “circuito”, es decir que no llegue uno cuando otro esta cargando.

2. Condición de autonomía y recarga:

$$\left(\frac{C_{max}}{cicle} - \frac{Recharge}{cycle} \right) \cdot N_{cycles} + (Aller\ retour\ depot *) \leq (0,9 \cdot Cap_b)$$

$\frac{C_{max}}{cicle}$ es el consumo máximo del autobús en un ciclo: 90,77kWh.

$\frac{Recharge}{cycle}$ es la recarga energética suministrada por los sistemas de recarga por inducción estática por cada ciclo

N_{cycles} es el número de ciclo que realiza el autobús en un día

$Aller\ retour\ depot *$ es el consumo del autobús en su ida y vuelta al depósito nocturno, considerado igual que el consumo máximo de un ciclo (estimación dada por la empresa Grupo Acha).

Esta condición asegura la autonomía del autobús a lo largo de un día de servicio con la infraestructura de recarga del escenario. La ecuación de la condición mostrada es una simplificación de la condición que hemos utilizado en la validación de los casos. En el código aseguramos que no solo la carga total a lo largo del día – consumo se mantenga por encima del 10% de la capacidad total, sino que aseguramos que en ninguno de los tramos entre dos sistemas de carga esta batería descienda del 10%. Así evitamos el caso en el que en un tramos la batería descienda de este limite o incluso se agote, pero que con

una supuesta recarga remonte por encima de ese 10% engañando a la condición total simplificada. A continuación mostramos un extracto del código del caso solo estática que muestra como esta condición se ha garantizado. Se tienen en cuenta también la ida y vuelta a las cocheras al principio y final del servicio. La condición para los casos dinámico y mixto es más compleja pero sigue el mismo principio: en ningún momento de toda la jornada la batería debe alcanzar un valor por debajo del 10%.

Condición en caso 1 estática en el scrit “SistemasyVariables2pruebas”

%Consascens: es el consumo de la intermodal al aeropuerto y el consumo de la intermodal a las cocheras. La empresa Grupo Acha nos recomendó hacer esta aproximación. No teníamos acceso al trayecto intermodal-cochera para recolectar los datos.

%Consdescens: es el consumo en el descenso del aeropuerto a la intermodal. Por la misma razón también tomado como el consumo del aeropuerto a las cocheras.

% Rstcycleca: es la recarga en las paradas del aeropuerto.

% Rstcycleci: es la recarga en la parada de la intermodal.

capbatinst=CAPbat; %capbatinst es donde actualizamos el SOC de la batería. CAPbat=640kWh batería llena.

```
cond2c=1;
if mei==1
    capbatinst=capbatinst-(Consascens); %Consascens es
    el consumo en subida de la cochera hasta el inicio del ciclo en el
    aeropuerto. Incluye consumo de sistemas auxiliares (2500W constantes)

    if capbatinst<0.1*CAPbat;
        cond2c=0;

    end
    for i=1:Nc1 %Iteramos por número de ciclos que
    el autobus va a realizar en una jornada de servicio.

        capbatinst=capbatinst+Rstcycleca-Consaeroaux;
        %Rstcycleca : es el la recarga realizada en el aeropuerto, calculada
        con los valores del escenario correspondiente.

        if capbatinst>640
            capbatinst=640;
        end
        capbatinst=capbatinst-(Consdescens);
        %Consdescens es el consumo en la bajada del aeropuerto a la intermodal.

        if capbatinst<0.1*CAPbat;
```

```

cond2c=0;

end
capbatinst=capbatinst+Rstcycleci-Consintermaux;
if capbatinst>640
    capbatinst=640;
end
capbatinst=capbatinst-(Consascens);
capbatinst;
cond2c;
if capbatinst<0.1*CAPbat;
    cond2c=0;

end
end
capbatinst=capbatinst+Rstcycleca-Consaeroaux;
if capbatinst>640
    capbatinst=640;
end
capbatinst=capbatinst-(Consdescens);
if capbatinst<0.1*CAPbat;
    cond2c=0;
end
capbatinst=capbatinst+Rstcycleci-Consintermaux;
if capbatinst>640
    capbatinst=640;
end
capbatinst=capbatinst-(Consascens); %Consascens es
el consumo de la intermodal de vuelta a la cochera al finalizar el
servicio

if capbatinst<0.1*CAPbat;
    cond2c=0;
end
end
%Si con2c=1: tendremos que la condición es garantizada.

```

3. Condición de potencia máxima soportada por la batería :

$$P_{sr} \cdot N_{Bb} \leq 150kW$$

P_{sr} es la potencia del sistema de recarga

N_{Bb} es el número de bobinas instaladas en el autobús, en la parada se instala el mismo número de bobinas

Esta simple condición simplemente asegura que la potencia de recarga recibida por la batería no supere los 150kW, al ser este el máximo para el buen funcionamiento y larga duración de vida de la batería.

3.6 SALIDAS DEL SISTEMA: COSTES DE INVERSIÓN Y FRECUENCIA DE SERVICIO

Como outputs tenemos el coste total de inversión y la frecuencia del servicio garantizada.

Gracias a los datos de coste presentados en la página 8 del informe, calculamos fácilmente los coste total de inversión:

$$C_{totalinvest} = C_{Bus} + C_{Plug-In} + C_{syst.bobineb} + C_{systarr} + C_{dinámica}$$

Coste total de los autobuses:

$$C_{Bus} = N_b \cdot Coût_{bus} = N_b \cdot 750000€$$

Coûts des systèmes de recharge

Installation en bus :

$$C_{syst.bobineb} = N_b \cdot N_{Bb} \cdot Coût_{systbobine/b} = N_b \cdot N_{Bb} \cdot 35000 €$$

Plug-In nocturne (150kW) :

$$C_{Plug-In} = (75600€ + 52000€) + (N_b - 1) \cdot 63800€$$

WPT statique et installation à l'arrêt (en fonction de la puissance de l'arrêt):

$$C_{systarr} = N_p \cdot (C_s + P_{is} \cdot C_{PCS}) = 52000€ + N_{Bb} \cdot P_{is} \cdot 600€$$

Sistema de carga por inducción dinámica^{[6][7]}

$$C_{syst.dyn} = km \cdot (C_{\frac{d}{km}} + P_d \cdot C_{\frac{Pd}{km}}) = km \cdot (636000€ + P_d \cdot 1000€)$$

El otro output del sistema es la frecuencia del servicio, llamamos frecuencia al tiempo que hay entre un autobús y otro, que se calcula:

$$fréquence_{service} = \frac{1}{N_b} \cdot T_{cycle} \text{ [minutes]}$$

Le temps que prends un bus à compléter le cycle est : $T_{cycle} = T_m + T_a + T_d + T_i$

Para valorar todos los posibles escenarios que planteamos, verificar su validez y calcular sus outputs realizamos varios códigos de programación con la ayuda de la herramienta MATLAB para cada caso.

4 RESOLUCIÓN DE LOS CASOS

4.1 CASO 1. RECARGA POR INDUCCIÓN ESTÁTICA: CÓDIGO DE RESOLUCIÓN Y CALCULO DE LOS ESCENARIOS ÓPTIMOS

4.1.1 METODOLOGIA CASO 1

El código completo se presenta en el Anexo C.

El código itera a través de todos los escenarios principales definidos por la cantidad de autobuses y la infraestructura de recarga. Una vez dentro de cada escenario itera entre los posibles tiempos de estacionamiento de las 2 paradas definiendo así todos los posibles escenarios.

Todos los escenarios y sus parámetros son almacenados en la tabla SCEN.

Los escenarios pasan a través de las condiciones y son separados en válidos si cumplen con las 3 condiciones en SCENval o inválidos en SCENinval en el caso contrario.

Posteriormente, los escenarios válidos contenidos en SCENval, son optimizados a través a una función coste ponderada obteniendo así el frente de Pareto de la optimización multi-objetivos que desea minimizar costes y minimizar el tiempo entre autobuses garantizando el mejor servicio.

La función coste a minimizar es:

$$F_{\text{coût}} = \rho \cdot \delta \cdot T_{\text{entrebus}} + (1 - \rho) \cdot \text{Coût}_{\text{totalinvest}}$$

donde,

δ es una constante de relación permitiendo comparar el tiempo T_{entrebus} en minutos con el coste total de inversión $\text{Coût}_{\text{totalinvest}}$ tiene un valor de : 160000€/minuto.

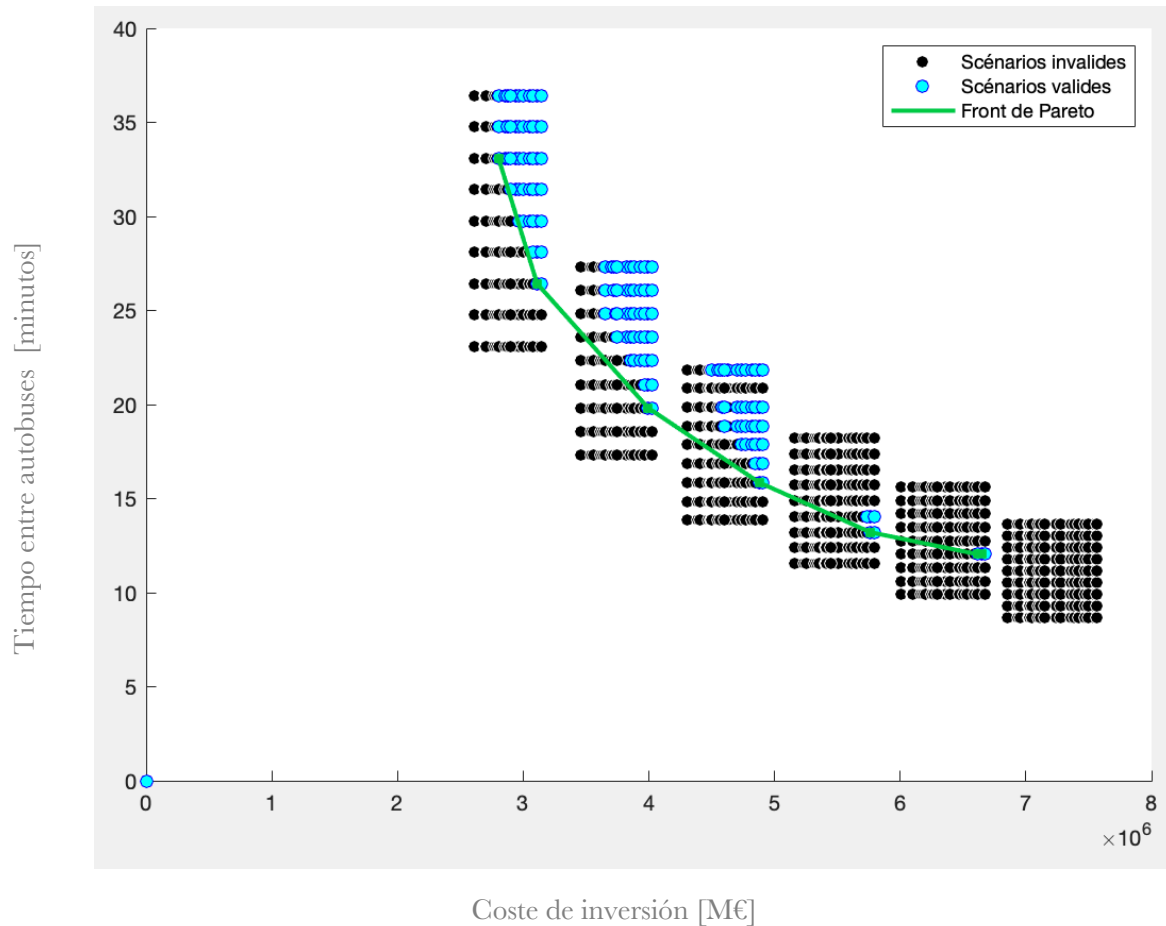
ρ varia entre [0 et 1]: [0:0.05:1], nos permite obtener el Frente de Pareto.

Al haber cribado anteriormente la validez de los escenarios, todos cumplen las condiciones y son candidatos para minimizar la función coste.

4.1.2 RESULTADOS Y CONCLUSIONES DEL CASO 1

Se valoran en nuestro sistema 3457 escenarios, de los cuales 273 son válidos y 3185 son inválidos. Podemos variar el número de escenarios simplemente cambiando el rango de valores de las variables. Mostraremos un par de ejemplos posteriormente.

Ilustración 17. Resultados Caso 1: Sistemas de recarga por inducción estática



En un primer lugar, se observan 6 bloques principales, estos corresponden al número de autobuses del sistema de 3 autobuses en la izquierda a 8 en la derecha, al suponer ellos y los cargadores Plug-In de 150kW un 84,7% del peso en el coste en algunos casos.

Dentro de cada bloque podemos observar las columnas de la izquierda todas inválidas lo cual corresponde a los caso en los que hay alguna de las estaciones sin sistema de recarga, lo cual matiza su necesidad. También, las dos filas de abajo son inválidas para todo número de autobuses. Estas filas representan los casos con poco tiempo de recarga en parada, una vez más observamos la necesidad de recarga para el funcionamiento de sistema.

Vemos que es un frente de Pareto inusual al tener restricciones tanto por arriba como por abajo. Esto lo podemos observar en el caso de 5 autobuses, donde la segunda fila empezando desde arriba se invalida, esto se debe a que con este número de autobuses, ya hay ciertos tiempos de parada (elevados) que hacen que los autobuses se solapen y por lo tanto son inválidas.

Un escenario perteneciente a esa línea:

Tabla 8. Ejemplo de escenario inválido por solapamiento logístico de autobuses (Caso 1)

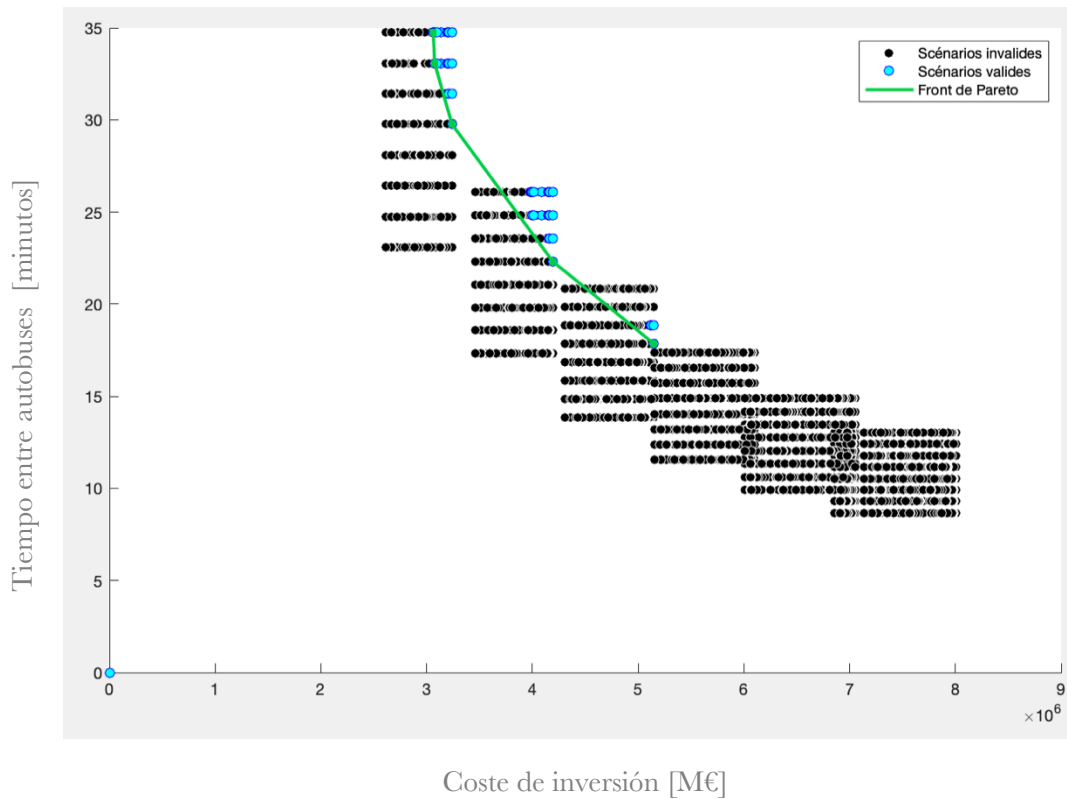
Scenario	Ni	Na	Buses	BobinesB	Pi	Pa	Tarreti	Tarreta	Cond1	Cond 2	Cond 3	Val	Coût	Fréquence
2109	1	2	5	2	75	75	5	42,5	0	1	1	0	4908800	19,85

Vemos que la condición 1, la de logística es la que ha dado error, Cond1=0.

A medida que aumenta el número de autobuses, aumenta la invalidez por las filas de arriba, las de menor frecuencia, debido al solapamiento recién descrito. Observamos que para el caso con 7 autobuses muy pocos escenarios son válidos y en el octavo caso ninguno es válido. En este último caso, tenemos el límite inferior por falta de recarga y el límite superior por solapamiento que anulan todos los casos.

Haciendo un paréntesis he considerado interesante valorar como hubiesen sido los escenarios con los sistemas de recarga homologados por la SAE J2954 de potencia 3.7kW, 7.7kW, 11kW y 22kW. Para encontrar casos satisfactorios, extendemos el rango de bobina por autobús hasta 4, que al tratarse de bajas potencias cumplen con la condición de máxima potencia de recarga a la batería.

Ilustración 18. Resultados Caso1 con los sistemas homologados WPT según la norma SAE J2954



Podemos observar rápidamente que la viabilidad es muy escasa, 57 de 18433 escenarios valorados, claro esta que las potencias bajas era absurdo considerarlas. Únicamente una frecuencia aceptable de 17min y 51 segundos es alcanzable con una inversión de 5147200€

Tabla 9. Ejemplo de escenario válido con los sistemas WPT homologados según SAE J2954

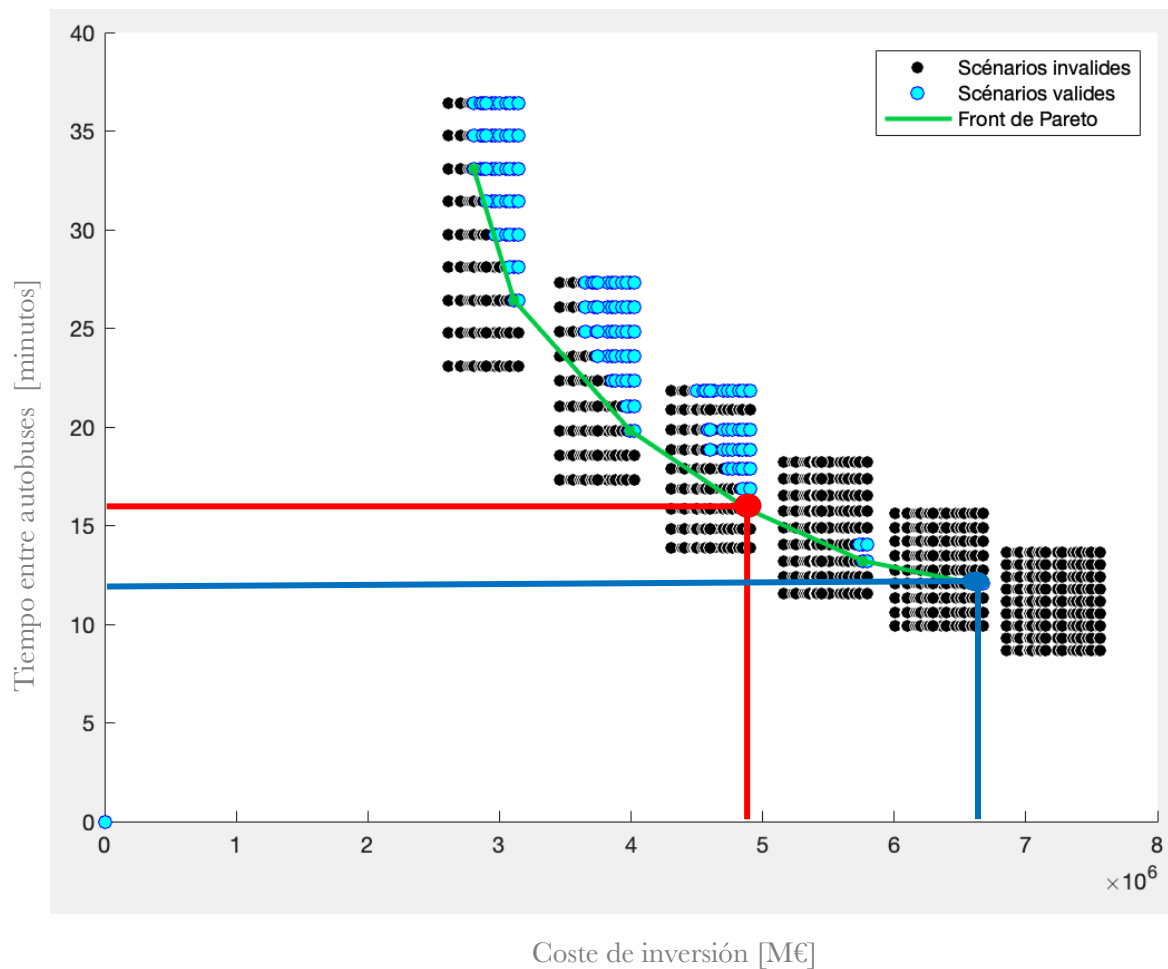
Scenari	Ni	Na	Buses	BobinesB	Pi	Pa	Tarreti	Tarreta	Cond1	Cond2	Cond3	Val	Coût	Fréquence
16892	1	2	5	4	22	22	5	32,5	1	1	1	1	5147200	17,854

Este resultado muestra un mayor coste para la misma frecuencia que en el caso estudiado en la ilustración 18. Además muestra que si deseamos descender de esta frecuencia a niveles entre 10-15 minutos tenemos la necesidad de utilizar potencias de carga más elevadas.

4.1.3 POSIBLE SOLUCION OPTIMA

Presentamos a continuación una solución propuesta como óptima.

Ilustración 19. Propuesta de solución óptima Caso 1: Sistemas de recarga por inducción estática



Observamos en rojo la solución propuesta como óptima.

Tabla 10. Caso1: Solución propuesta como óptima. Características y salidas.

Scenari	Ni	Na	Buses	BobinesB	Pi	Pa	Tarreti	Tarreta	Cond1	Cond 2	Cond 3	Val	Coût	Fréquence
2091	1	2	5	2	50	75	5	22,5	1	1	1	1	4878800	15,854

Cette solution donne un service avec 5 autobuses avec une fréquence de 15 minutes et 51 secondes. Un service similaire à celui donner par la flotte diesel avant le covid, 5 buses avec 15 minutes de fréquence.

Ilustración 20. Desglose de la solución propuesta Caso1

<u>Nombre d'autobuses</u>	<u>Bobines par bus</u>	<u>Arrêts avec WPT</u>	
    	 		
5 buses MAN Lion's City 18 E	75 kW	1 WPT : 50kW	2 WPT : 75kW
5 Plug-In 150kW		5 minutes	2 · 10 minutes
4132800 €	350000€	112000€	284000€

Vemos, por otro lado, que si queremos bajar a frecuencias de 12 minutos tendríamos que hacer una inversión de 6616400€ con 7 autobuses en servicio, una inversión considerablemente superior.

También podemos ver que por debajo de esta frecuencia no tenemos casos válidos, debido a la solapación de los buses en el "circuito" y por supuesto a la insuficiente recarga. Por lo tanto, para mejorar la frecuencia, necesitaremos un sistema que nos permita recargar más en menos tiempo, menos tiempo en las paradas. Aumentar la potencia no sería posible porque la capacidad máxima de carga de 150kW estaría saturada, por lo que una buena solución podría ser cargar mientras los autobuses están en marcha sin tener que hacer largas paradas. Esto será posible gracias a los sistemas de carga dinámica por inducción vamos a estudiar a continuación. Estudiaremos primero como podremos satisfacer las condiciones del servicio y que frecuencia de servicio podemos conseguir utilizando únicamente la infraestructura de recarga dinámica. Finalmente estudiaremos el caso híbrido en el que complementamos ambas tecnologías proponiendo nuevas posibilidades de electrificación.

4.2 CASO 2. RECARGA POR INDUCCIÓN DINÁMICA

4.2.1 SISTEMA DINAMICO: CARACTERÍSTICAS Y PARAMETROS

En esta parte, consideramos el acondicionamiento del sistema utilizando únicamente los sistemas de recarga por inducción dinámicos. Estudiamos en que tramos del trayecto es necesario instalar bobinas de recarga para satisfacer la autonomía necesaria de los autobuses.

Para que quede claro, el número de tramos es elección nuestra, la distancia total del ciclo ida y vuelta es de aproximadamente 30 km en total. Si establecemos las divisiones de tramos cada 1 km, es decir la decisión es si en cada uno de esos kilómetros, el kilómetro entero, debe haber o no sistema de recarga instalado, el número de tramos será $30\text{km}/1\text{km}$ es decir 30 tramos. En la resolución del proyecto veremos que hemos tomado longitudes de tramo elevadas puesto que con tramos pequeños el espacio de posibles soluciones aumenta a la velocidad de 2^n , siendo n el número de tramos.

En este caso en las paradas omitiremos las bobinas de recarga en estático, el autobús únicamente se cargará en movimiento y por la noche en las cocheras con los cargadores Plug-In.

Se entiende, por lo tanto, que la decisión de la repartición de las bobinas a lo largo de la carretera no influye de ningún modo a la frecuencia del servicio del autobús. De este modo, hemos decidido estudiar el escenario en el que los tiempos de parada son reducidos al mínimo de tiempo que permita a los pasajeros montarse y cargar o bajarse y descargar sus maletas. Este tiempo ha sido establecido en 5 minutos por parada.

El sistema queda definido por los siguientes parámetros:

Tabla 11. Parámetros constantes Caso 2

Tiempo de subida	$T_m = 27$ minutes
Tiempo de bajada	$T_d = 24,77$ minutes
Numero de paradas en la intermodal	1
Numero de paradas en el aeropuerto	2
Consumo máximo del autobus por ciclo	90,77kWh
Capacidad de la batería	640kWh
Tiempo de servicio por día de cada autobus	1102 minutes
Tiempo de parada en el aeropuerto	$T_a = 5$ minutos (2 paradas : 10 minutos +2,5 del trasbordo)
Tiempo de parada en la intermodal	$T_i = 5$ minutos
Número de autobuses posibles	$N_b = 6 : 8$
Numero de bobinas de recepción en el autobus	$N_{Bb} = 2$
Longitud mínima de tramo	2500 metros
Máximo número de tramos de recarga	4 tramos
Potencia del sistema de carga dinámico	75 kW
Rendimiento de la transferencia de energía por inducción dinámica	90%
Numero de paradas con sistemas de carga WPT	Ninguna

Se puede deducir por lo tanto que las condiciones en las que funcionarán los autobuses serán:

Tabla 12. Dinámica de los escenarios estudiados

Tiempo en completar un ciclo de subida y bajada	$T_{cycle} = 69,27$ minutos
Tiempo entre cada bus (Frecuencia del servicio)	6 autobuses : $T_{entreb} = 11,55$ minutos 7 autobuses : $T_{entreb} = 9,9$ minutos 8 autobuses : $T_{entreb} = 8,66$ minutos
Numero de ciclos por autobuses en 1 jornada	15 ciclos y medio

Para todos los casos, el número de tramos necesarios y la disposición óptima de los tramos será idéntica puesto que esta no depende del número de autobuses en servicio, única variable que planteamos en este caso 2 (únicamente recarga dinámica).

La solución por lo tanto vendrá definida por la necesidad de recarga que tiene un autobús a lo largo de la jornada de servicio. La alocaión de los tramos óptima tratará de satisfacer esta necesidad o condición de autonomía al coste de inversión más bajo.

4.2.2 METODOLOGIA CASO 2

El objetivo es conseguir una colocación optima de los sistemas de carga dinámicos que satisfagan todas las condiciones por el menor coste inversión posible. El consumo del autobús a lo largo del trayecto será calculado por cada sección del trayecto (en el trayecto cambiamos de una sección a otra en función de si estamos sobre sistemas de carga o no; por ejemplo si los primeros 15 km del trayecto tienen carga y los 15km de después no, solo habrá 2 secciones en el trayecto) integrando los valores de potencia instantánea obtenidos con el simulador del autobús eléctrico en MATLAB Simulink en este preciso trayecto. Así mismo, la recarga de batería conseguida en cada sección con recarga será calculada con la Potencia establecida de los sistemas de recarga multiplicada por el tiempo transcurrido en cada tramo y por la eficiencia del 90 % de la transferencia energética. De este modo para validar la condición de autonomía, hemos calculado:

El consumo del autobús por secciones:

$$\text{Consumo} = \int_{\text{inicio de seccion}}^{\text{fin de seccion}} P_{\text{instantanea}} * dt$$

La recarga del autobús por tramos:

$$\text{Recarga} = P_{\text{dyn}} * 0.9 * (\text{Tiempo}(\text{distanciafinaltramo}) - \text{Tiempo}(\text{distanciainicialtramo}))$$

También tenemos en cuenta el consumo de los sistemas auxiliares (luces, aire acondicionado, radio etc.) del autobús considerados con una potencia de 2500W constantes durante todo el servicio, recomendado por la empresa MAN.

Entendemos entonces que los tramos más atractivos en los cuales instalar los sistemas de recarga dinámica, es en aquellos sobre los que el autobús conduce durante más tiempo. Veamos entonces en la siguiente ilustración la velocidad en función de la distancia y 2 ilustraciones para ver el tiempo que el autobús permanece en los distintos tramos del trayecto.

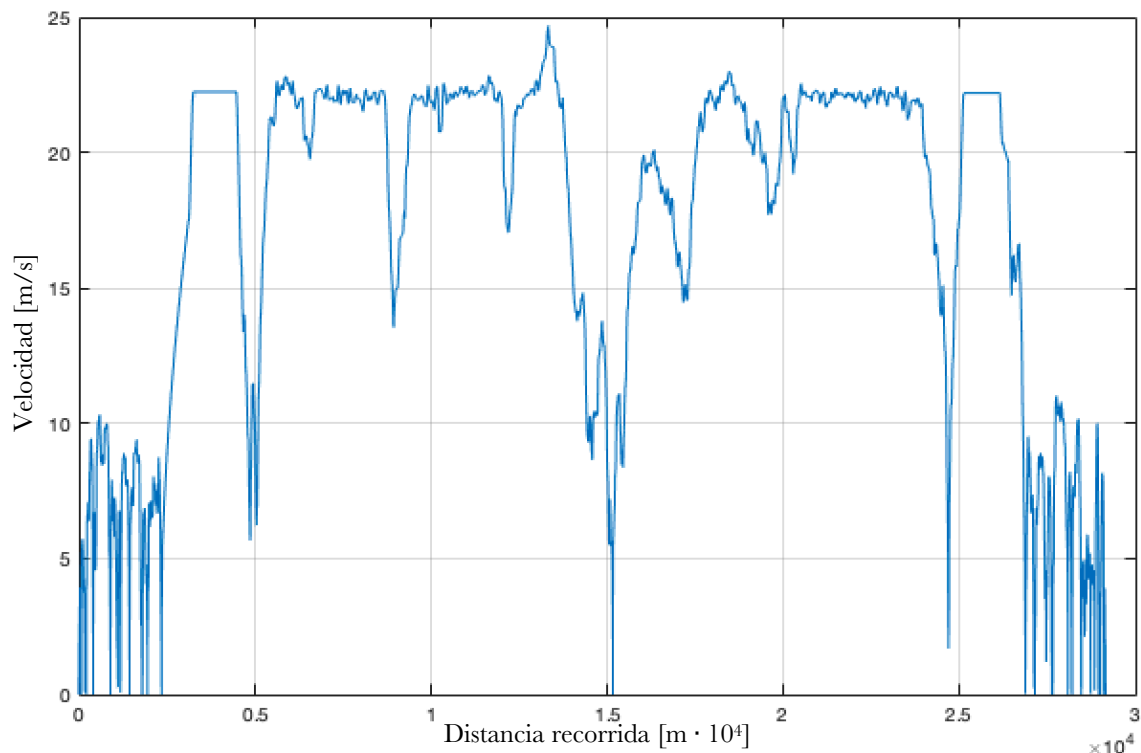


Ilustración 21. Velocidad del autobus a lo largo del ciclo en función de la distancia.

En la ilustración 7, observamos claramente dos zonas donde la velocidad se mantiene con valores mucho menores que en el resto. Se trata de los tramos del ciclo en la ciudad. En estos tramos el autobús permanece por debajo de los 10 m/s o 36 km/h. También observamos como a medio ciclo, cuando el autobús llega al aeropuerto, este ralentiza puesto que los límites de velocidad en las vías de acceso y salida del aeropuerto son más restrictivos. Es en estos tramos donde a menor distancia de instalación y por lo tanto a menor coste, conseguimos más tiempo de recarga. Estos tramos son los que a primera vista parecen ser adecuados para la solución. En las siguientes ilustraciones, podemos observar con mayor claridad la distribución del tiempo en el ciclo. En un caso con divisiones de tramos cada 2,5km y en el segundo caso con divisiones cada 500 metros.

Ilustración 22. Tiempos que tarde el autobus en recorrer el trayecto distribuido en 13 tramos de 2,5km

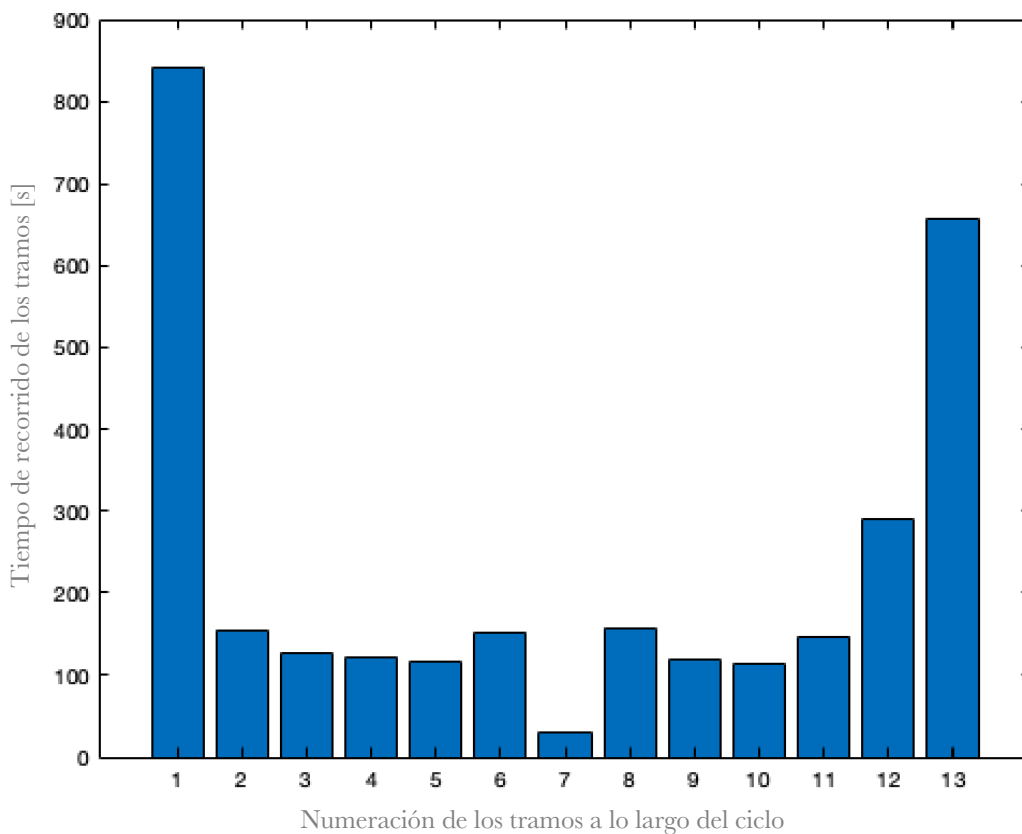
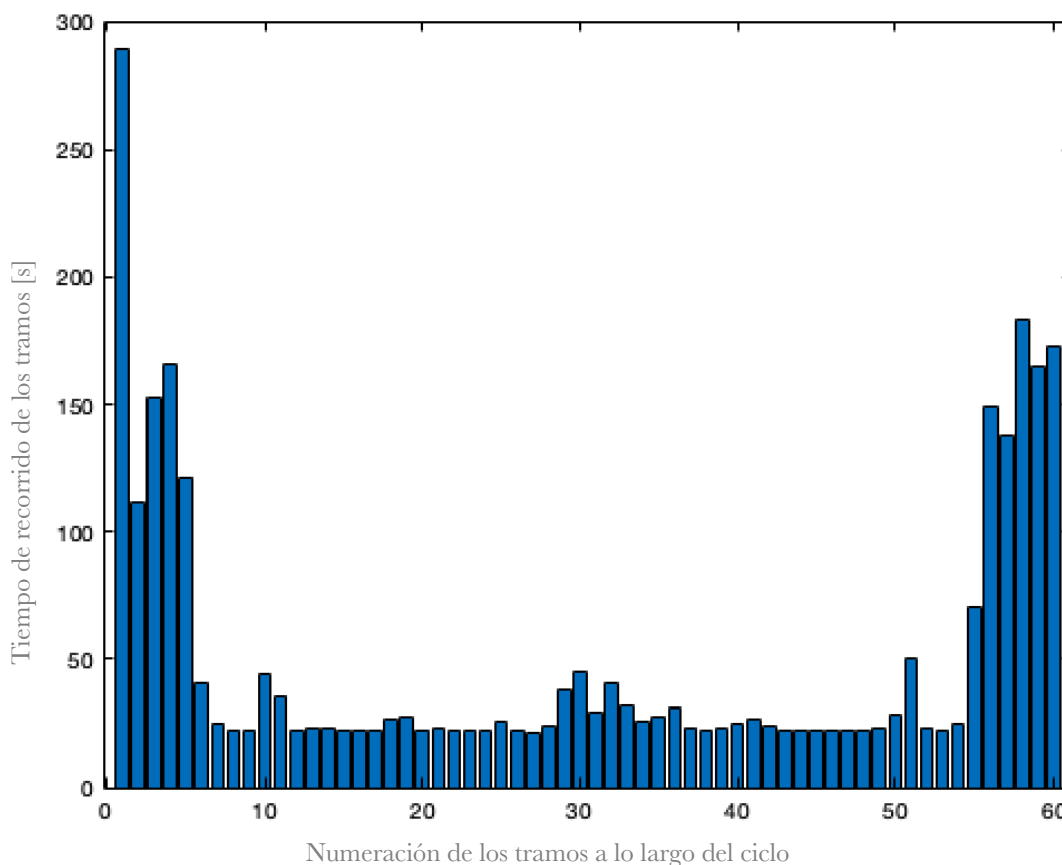


Ilustración 23. Ilustración 8. Tiempos que tarde el autobus en recorrer el trayecto distribuido en 60 tramos de 500m



Podemos observar que con gran diferencia que en la ciudad están los tramos más preferibles para la recarga dinámica.

Para llevar acabo este objetivo, hemos definido en un primer lugar el sistema en MATLAB, en el script: “cost_function_pso.m” en Anexo F. El sistema se ha definido con la información indicada en las tablas anteriores. Para completar el sistema, tendremos que definir donde colocaremos las bobinas de recarga en el trayecto. Con este fin, hemos desarrollado un algoritmo de *Optimización por Enjambre de Partículas PSO Binario*. Primero el algoritmo original fue desarrollado y después una variación propuesta por un estudio de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina fue probado y dio mejores resultados en eficiencia y calidad, por lo que es el que hemos utilizado[31] [32]. Este algoritmo esta desarrollado en el script “PSO_Binario_Tesina” y será explicado brevemente en el apartado “**Algoritmo Optimización por Enjambre de Partículas PSO Binario**” y cuyo código se encuentra en el Anexo E.

Este algoritmo envía al código del sistema un vector en el que se define con código binario 1 o 0, 1 si en un tramo tendríamos sistemas de recarga y 0 en caso contrario. Con esta información, el código del sistema estudia si satisface las necesidades del sistema y calcula el coste que esa infraestructura de recarga supondría. En caso de que una distribución no satisfaga las necesidades del sistema, esta será devuelta al algoritmo con un coste exagerado para que la entienda como indeseable. Este coste es enviado de vuelta al algoritmo, finalmente el algoritmo con estos valores, al terminar su búsqueda por el espacio de soluciones entregará una solución que cumpla con las condiciones y que presente el menor coste. Esta será la distribución óptima del sistema de recarga y por lo tanto nuestra solución.

Para llevar acabo esta optimización, se ha utilizado con precisión la información real recolectada en el autobús a lo largo del trayecto con la aplicación GPS PhyPhox así como los cálculos de potencia instantánea y consumo obtenidos con el simulador del autobús eléctrico desarrollado en MATLAB Simulink.

4.2.3 CONDICIONES DEL SISTEMA CASO2

Se mantienen las condiciones del sistema explicadas al principio del proyecto.

1. Asegurar el no solapamiento de los autobuses.
2. Asegurar la autonomía del autobús a lo largo de toda la jornada de servicio.
3. Evitar cargas con potencia mayor a los 150kW (máximo permite batería).

En este caso 2, hemos adaptado la segunda condición para aumentar la seguridad, asegurándonos de que a lo largo de la jornada, el autobús en ningún de los tramos sin recarga baje del 10% de su capacidad. Esta condición ha requerido un detallado trabajo de codificación en el script “cost_function_pso.m” y manipulación de la información de la velocidad y consumo del autobus a lo largo del trayecto realizada en el archivo de lectura “PuissEnergconstrack.m” en el Anexo B. En todo momento, también aseguramos que si la batería esta en plenamente cargada, los sistemas de recarga no sigan alimentandola y excediendo su capacidad.

Extracto del código de la condición 2:

```

SOC=SOC-(Consascens); %antes de llegar al circuito
if SOC<0.1*CAPbat;
cond2=0;
end

recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[640 recharged SOC]; % Almacenamos la evolución
de los valores de SOC (State of Charge) de la bateria
SOCdesglose=[SOCdesglose SOCdesgloseactuliz];

for i=1:Nc1 %Empezamos Ciclos una vez en el circuito

    if i==2
        SOCdesglose1=SOCdesglose;
    end
    casilla0=1;
    casillau=casilla0;
    if cond2==0
        break
    end

    for t=1:(ntrm) %Empezamos tramos dentro de cada ciclo,

        casillau=Dist_time_matrix_interpl(tramos(t,1), 3);

        if casilla0==casillau
            consumobat=0; % Antes del primer tramo
        else
            consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
        end

        SOC=SOC-consumobat-
Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
        recharged=0;
        SOCdesgloseactuliz=[640 recharged SOC];
        SOCdesglose=[SOCdesglose SOCdesgloseactuliz];
        if SOC<0.1*CAPbat
            cond2=0;
            break;
        end
        casilla0=casillau;

        casillau=Dist_time_matrix_interpl(tramos(t,2), 3); %Empezamos el
tramo

        if casilla0==casillau
            consumobat=0; % Antes del primer tramo
        else
            consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
        end

        recharged=Pdyn1*NBb*1000*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,
1)-Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));

```



```

    tcargaporciclo=tcargaporciclo+(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
    Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1))/60;
    consaux=(Paux*(1/3600000))*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
    Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    SOC=SOC-consumobat-consaux+recharged;

    if SOC>640
        cargasobranante=SOC-640;
        cargatramosolodyn(t)=recharged-cargasobranante;
        SOC=640;
    else
        cargatramosolodyn(t)=recharged;
    end
    SOCdesgloseactuliz=[640 recharged SOC];
    SOCdesglose=[SOCdesglose SOCdesgloseactuliz];

    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end

    casilla0=casillau;
end

if casillau~=Dist_time_matrix_interpl(end,3)
    casillau=Dist_time_matrix_interpl(end, 3);
    if casilla0==casillau
        consumobat=0;
    else
        consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
        Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
    end
    SOC=SOC-consumobat-
    Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
    Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    recharged=0;
    SOCdesgloseactuliz=[640 recharged SOC];
    SOCdesglose=[SOCdesglose SOCdesgloseactuliz];

    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end
    casilla0=casillau;

end
end

SOC=SOC-Consaeroaux;
SOC=SOC-(Consdescens);
recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[640 recharged SOC];
SOCdesglose=[SOCdesglose SOCdesgloseactuliz];
if SOC<0.1*CAPbat;
    cond2=0;
end

SOC=SOC-Consintermaux;

```

```
SOC=SOC-(Consascens);  
recharged=0;  
SOCdesgloseactuliz=[640 recharged SOC];  
SOCdesglose=[SOCdesglose SOCdesgloseactuliz];  
if SOC<0.1*CAPbat;  
    cond2=0;  
end
```

Finalmente, una cuarta condición asegurando el número máximo de tramos ha sido añadida. Esta condición asegura que a la hora de llevar acabo el proyecto, los sistemas de recarga se instalen en tramo continuados y no todos separados, para agrupar y facilitar la construcción y reducir costes.

4. Numero máximo de tramos a lo largo del ciclo: 4 tramos.

Con las características del sistema que hemos establecido, las condiciones 1 y 3 se cumplirán para todos los caso, por lo que en el script “cost_function_pso.m” se inicializan con el valor 1 directamente. Las condiciones 2 y 4 se pueden ver desarrollado detalladamente en el Anexo F. correspondiente a este script.

4.2.4 ALGORITMO OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTICULAS PSO BINARIO

En esta memoria no entraremos en detalle en la explicación del algoritmo, este ha sido tratado con mucho detalle y la explicación de toda la lógica que lleva detrás excedería los límites del interés principal de este proyecto. Una buena explicación y clasificación del algoritmo puede ser encontrada en [32].

La elección de este algoritmo se debe a que es adecuado para optimizar funciones con un espacio de soluciones muy amplio como es el nuestro. Nosotros trabajamos con un espacio de soluciones de dimensiones igual a $2^{(\text{num. de tramos})}$. Por ejemplo si cogemos tramos de 1km de longitud, nuestro espacio ya tendrá más de 10^9 dimensiones en las que tomar valor ente 1 o 0, básicamente un hipercubo de 10^9 dimensiones. También este algoritmo era apropiado puesto que no requiere continuidad ni derivabilidad de la función a minimizar como sí lo hace los métodos tradicionales de minimización.

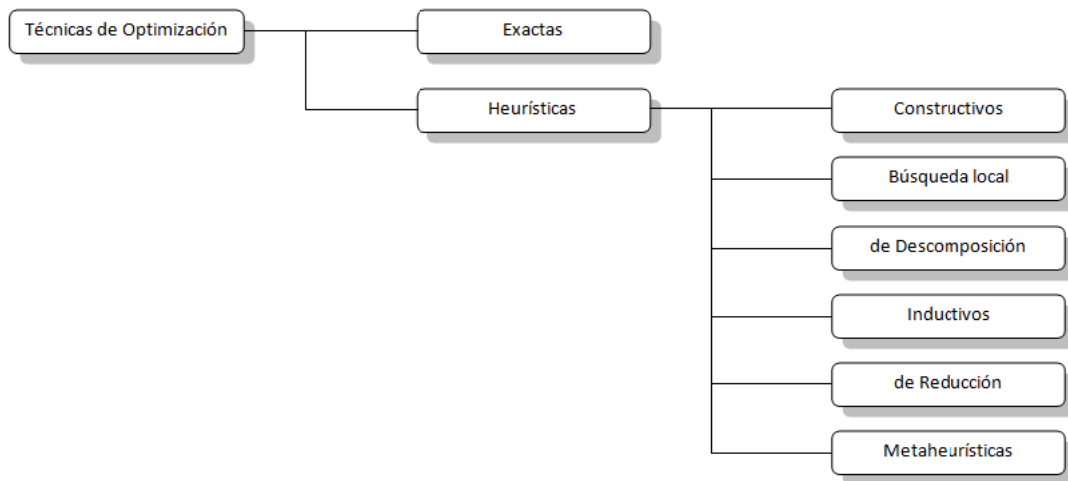


Ilustración 24. Clasificación de las técnicas de optimización [32].

El algoritmo PSO pertenece a la clase Heurística Metaheurística y dentro de estas técnica pertenece al grupo basado en el comportamiento de la “población”. Fue introducido por primera vez por Eberhart y Kennedy [Eberhart and Kennedy, 1995]. Este método de optimización se inspira en el comportamiento social de las bandadas de pájaros y de los bancos de peces. Personalmente lo asemejo con el viaje de los estorninos. En simples palabras, este algoritmo hace una búsqueda iterada (numero de iteraciones ajustable) rastreando el espacio de soluciones con N partículas o ‘pájaros’(numero a ajustar por el usuario). Los pájaros pertenecen a grupos que se asignan al inicio del algoritmo, el numero de pajaros por grupo es también ajustable. Cada pájaro tiene memoria del valor/coste de la mejor posición en la que ha estado (cada posición es una posible distribución de los sistemas de carga en los tramos) y también de la mejor posición que se ha encontrado entre los pájaros de su grupo excluyéndose a si mismo.

En cada iteración la memoria de los pájaros es actualizada con los nuevos valores, y con esta memoria, estos ajustan su velocidad, la cual hemos ajustado con parámetros para que se influencie más o menos por los distintos factores: velocidad previa, mejor posición encontrada, mejor posición encontrada por las partículas de su grupo para que la búsqueda se más o local o más esparcida . Con esta velocidad, los pájaros obtienen nuevas posiciones en el espacio de búsqueda, posiciones que evalúan en esta iteración. Podemos hacernos una idea con siguiente imagen:

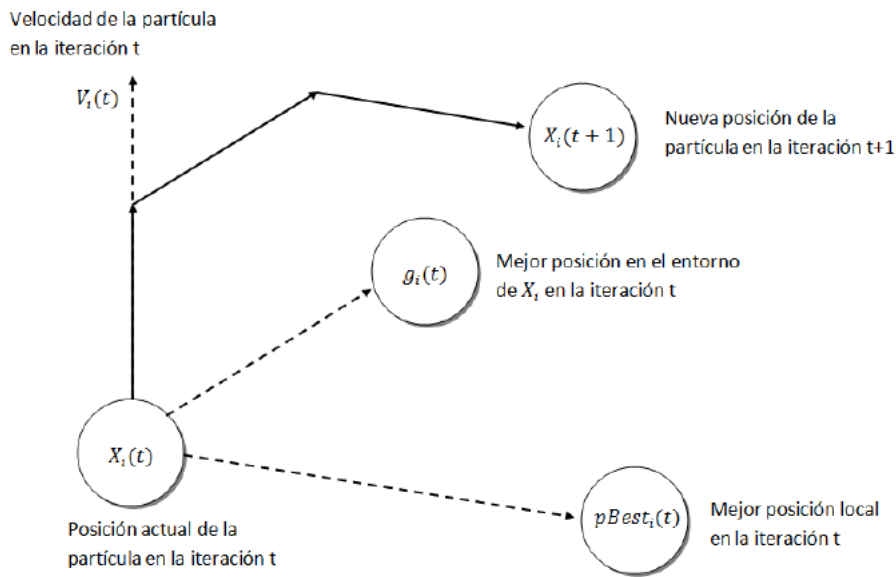


Ilustración 25. Movimiento de una partícula en el espacio de soluciones

En nuestro caso, tratamos un espacio de soluciones binario, es decir una posición esta definida por “número de tramos” dimensiones y las coordenadas en cada dimensión es 0 o 1. Para adaptarnos a este espacio, existen adaptaciones llamadas PSO Binario, que con el uso de la función sigmoide y la las velocidades de cada partícula, asignan a cada partícula su nueva posición binaria. Las partículas van recorriendo el espacio con las iteraciones, mientras que el algoritmo guarda la mejor posición encontrada hasta el momento. Finalmente se establece una lógica para parar, suele ser por ejemplo que llevan muchas iteraciones sin mejorar la solución global, o simplemente que se han hecho las iteraciones máximas indicadas por el usuario. Nosotros hemos utilizado la segunda. Todo esta explicado en detalle en [32].

Finalmente, el algoritmo nos presenta la mejor solución obtenida que será un vector con n dimensiones correspondientes a los n tramos con valores de 0 y 1 indicando donde han de colocarse los tramos. También nos indicará el coste de inversión de dicha solución así como otras características que hayamos decidido almacenar. Encontrarán el algoritmo desarrollado con detalle en el Anexo E.

4.2.5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES CASO 2

Cabe recordar el sistema estudiado. Se trata de un trayecto con la siguiente dinámica: El autobús sale de la cochera nocturna y se dirige a una de las paradas de inicio del ciclo intermodal o aeropuerto. Estas paradas no están dispuestas de sistemas de carga estática en este Caso 2. El autobús tiene un tiempo de parada establecido de 5 minutos en estas paradas para recoger o dejar a los pasajeros. A continuación el autobús emprende su servicio, de idas y vueltas, completando un máximo de 15 ciclos a lo largo del día.

Al ser su autonomía lejos de suficiente, hemos estudiado donde instalar infraestructura de recarga con los sistemas innovadores de recarga por inducción dinámica a lo largo del trayecto para que la electrificación de la línea sea posible.

Consideramos el trayecto completo: una ida y vuelta entera, que consituye 15km de ida y 15km de vuelta, es decir un total de 30 km.

En la resolución de este caso, hemos tenido que limitar las dimensiones del estudio. Es decir el número de tramos en los que dividimos el trayecto y estudiamos si deben o no tener bobinas de recarga.

El numero de tramos en los que separamos el trayecto viene se defino por (Distancia del trayecto: 30km/distancia de tramo). Si por ejemplo estudiamos el poner o no sistemas de carga en tramos de 1km, tendríamos 30 tramos. Esta cantidad de tramos nos daría un espacio de posibles soluciones de 2^{30} puntos= $1.0737 \cdot 10^9$. Este espacio de soluciones, supondría una enorme cantidad de tiempo y dificultad incluso con el algoritmo. Al haber tantas posibles opciones, el algoritmo tardaría mucho en recorrer una parte significativa de este (pensar que cada punto tiene que pasar por el código del sistema y sus condiciones en el script “cost_function_pso.m”) y todavía, al ser Metaheurístico no tendríamos seguridad de que la respuesta optima hay sido obtenida. Por lo tanto hemos decidido reducir el espacio de búsqueda estudiando el trayecto dividido en tramos de 2,5km. De esta manera, trabajamos con 13 tramos (12+1 al separar el tramo intermedio en 2 en la distancia de la parada del aeropuerto). En estas condiciones hay $2^{13} = 8192$ puntos en el espacio de soluciones por el que el algoritmo volará con sus estorninos en las siguientes condiciones:

El algoritmo ha trabajado en las siguientes condiciones y ha encontrado el siguiente resultado óptimo.

Tabla 13. Resultado óptimo Caso 2 encontrado por el algoritmo

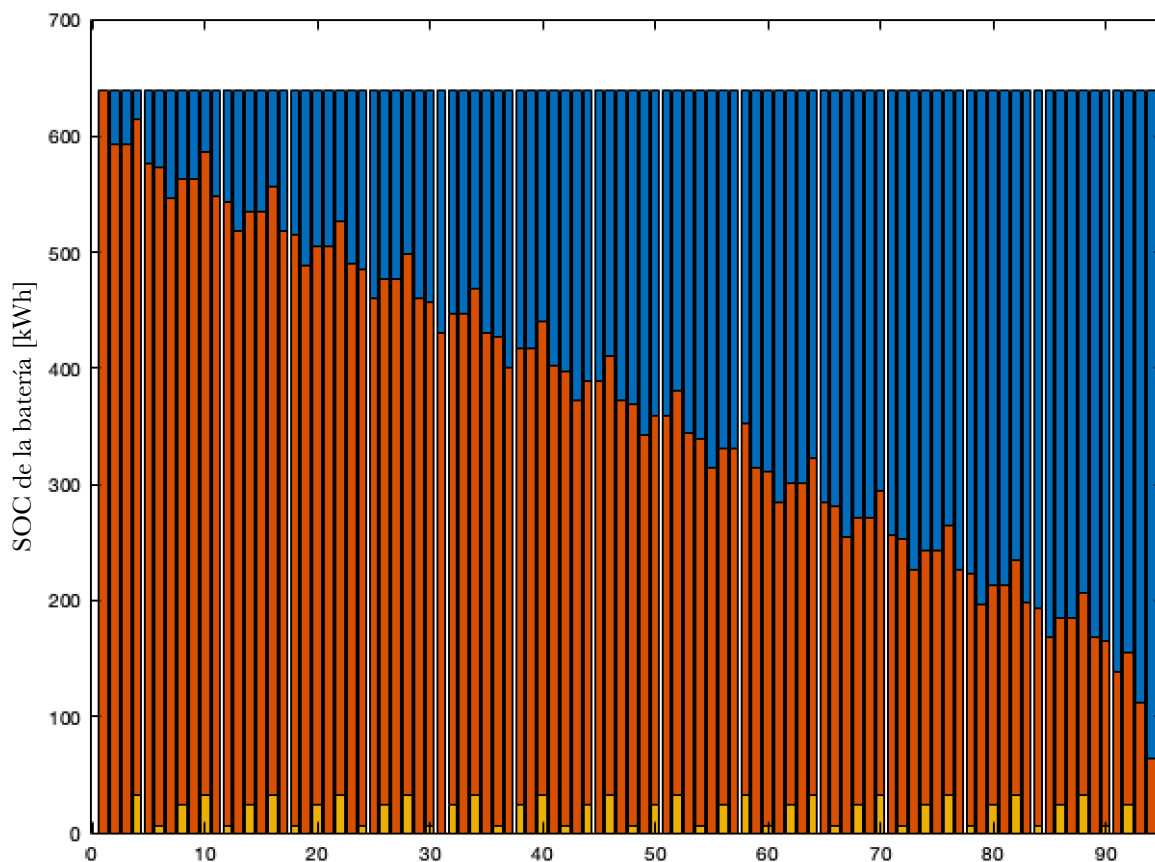
Longitud de tramo [m]	Numero de partículas/pájaros	Dimensiones del espacio=Num. tramos	Iteraciones de búsqueda=Num. Movimientos de las partículas	Coste total de la infraestructura de recarga [€]	Recarga por ciclo [kWh]	Posición de los tramos	Tiempo total de recarga por ciclo [s]	Distancia total de la infraestructura [m]	Condición 2	Condición 4
2500	100	13	15	4614748,47	62,06	[1,2;8,9;13,14]	1655 27,6 min	6490,5	1	1

Nos fijamos ahora en la posición de los tramos: [1,2;8,9;13,14]. Esto en el código quiere decir el tramo que empieza en 1 y acaba donde empieza 2 etc. Es decir esta solución propone instalar sistemas de recarga en 3 tramos separados por lo tanto 3 secciones: el primer, octavo y último tramo del trayecto. Si miramos un segundo la figura 20

“Tiempos que tarde el autobús en recorrer el trayecto distribuido en 13 tramos de 2,5km” veremos que encaja perfectamente con lo esperado. Estos tres tramos son aquellos que el autobús tarda más tiempo en recorrer.

A continuación se muestra una ilustración, que representa en azul la capacidad máxima de la batería 640kWh, en naranja el State Of Charge (SOC) o estado de carga de la batería a lo largo del ciclo, y en amarillo las contribuciones del sistema de recarga a la batería.

Ilustración 26. Evolución de la SOC de la batería con carga dinámica a lo largo de un día de servicio

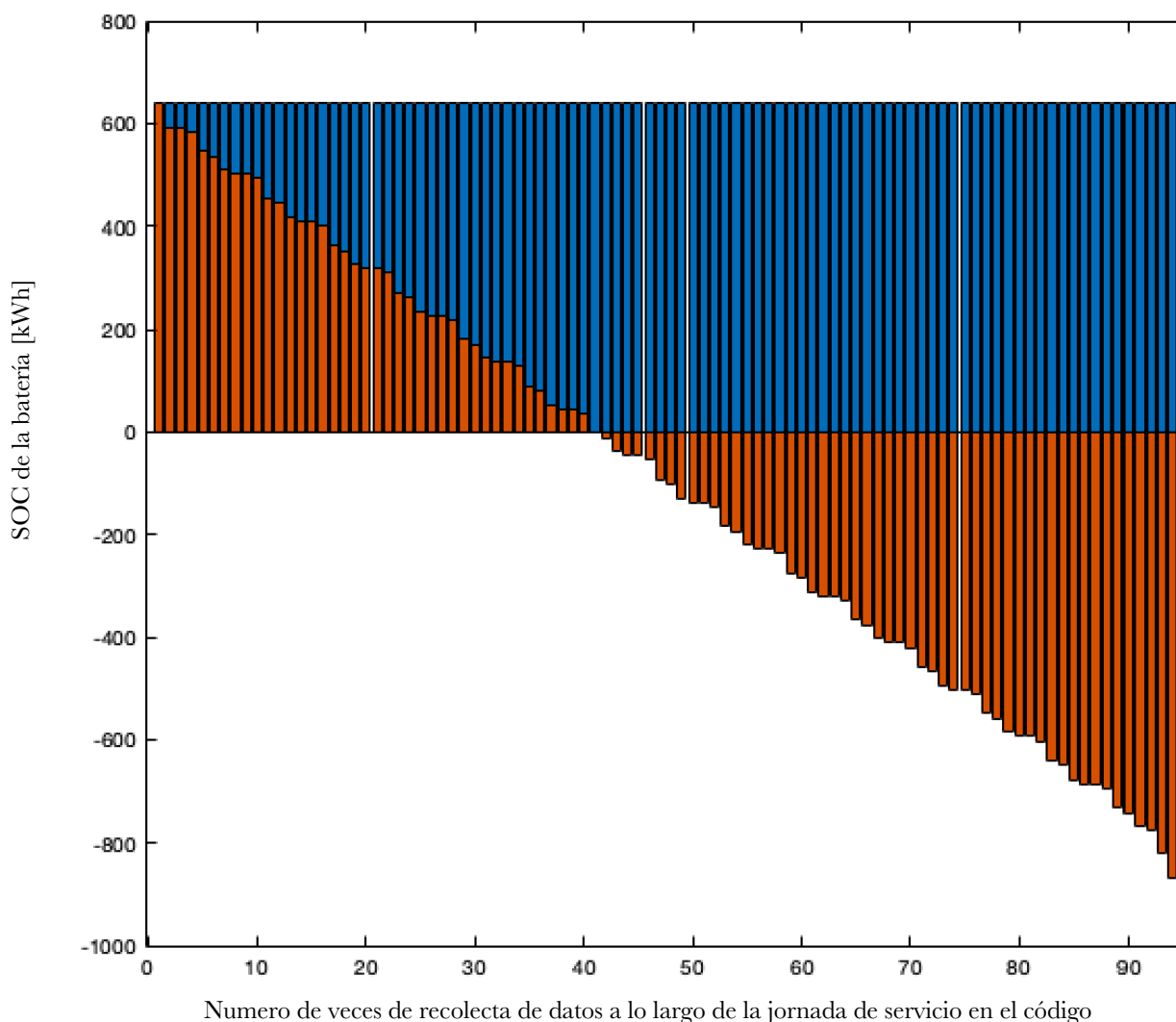


Numero de veces de recolecta de datos a lo largo de la jornada de servicio en el código

Podemos observar a la derecha del todo, al final del día cuando el autobús llega a cochera para pasar la noche, el SOC de la batería esta justo por encima de 64 kWh, es decir cumple la condición del 10% de la capacidad de la batería, sin alcanzar un valor menor en toda la jornada. Además la cumple sin mucha reserva de sobra por lo que podemos ver que la optimización es satisfactoria aunque solo hayamos tomado 13 tramos como variables.

Para resaltar la necesidad de esta recarga dinámica, mostramos en la ilustración siguiente cual hubiese sido la evolución del SOC a lo largo del servicio sin estos sistemas.

Ilustración 27. Ilustración 25. Evolución de la SOC de la batería sin recarga a lo largo de un día de servicio



Observamos como no más tarde del medio día, los autobuses quedarían sin batería.

En conclusión el resultado óptimo propuesto en este segundo caso resultaría en una infraestructura de 6,49 kilómetros; los primeros 2,5km saliendo de la intermodal en verde el mapa de la ilustración siguiente, el tramo nada más salir del aeropuerto también en verde, tras haber recorrido ya 15 kilómetros y 628 metros antes de la llegada a este, hasta el kilómetro 17,5 del ciclo en rojo, y finalmente los últimos 2,12 kilómetros antes de llegar de vuelta a la intermodal.

Ilustración 28. Mapa del trayecto con los tramos de infraestructura de carga dinámica en color



En definitiva tenemos 2 tramos en ciudad, y 1 al salir del aeropuerto. Esta localización, al tener los 2 tramos de ciudad contiguos facilitaría las obras en la instalación de las infraestructuras gracias a la cercanía la una a la otra y gracias al fácil acceso que brinda la ciudad a las fuentes de electricidad, también el mantenimiento resultaría más sencillo. De forma similar el tramo saliente del aeropuerto, podrá aprovecharse de la red eléctrica cercana a este.

Por estas razones, se cree que los costes de inversión serían menores que los indicados en este trabajo que rondan los 4614748,47 EUR.

$$C_{syst.dyn} = km \cdot \left(\frac{C_d}{km} + P_d \cdot \frac{C_{Pd}}{km} \right) = km \cdot (636000\text{€} + P_d \cdot 1000\text{€}) = 4614748,47 \text{ €}$$

Recordamos los costes de autobuses, bobinas receptoras y sus respectivos cargadores Plug-In Nocturnos en cocheras:

Coste de los cargadores Plug-in:

$$C_{plugin} = (75600 + 52000) + (N_{bus} - 1) \cdot 63800\text{€}$$

Coste de acomodación de las bobinas receptoras en los autobuses:

$$C_{srb} = N_{bus} \cdot N_{Bobina/bus} \cdot 35000€$$

Coste de los autobuses:

$$C_{totb} = N_{bus} \cdot 750000€$$

Para terminar, en función del número de autobuses elegido, el coste de inversión del proyecto de electrificación completo junto a la frecuencia conseguida es:

5 autobuses: 4614748,47 EUR + 4436000 = **9050748,47€** | $T_{entrebuses} = 13,85$ minutos

6 autobuses : 4614748,47 EUR + 5319800 = **9934548,47€** | $T_{entrebuses} = 11,55$ minutos

7 autobuses : 4614748,47 EUR + 6203600 = **10818348,47€** | $T_{entrebuses} = 9,9$ minutos

8 autobuses : 4614748,47 EUR + 7087400 = **11702148,47€** | $T_{entrebuses} = 8,66$ minutos

No se muestran los escenarios de 3 y 4 autobuses puesto que no resultan de interés al ya estar completamente cubiertos por los escenarios estudiados en estática, la frecuencia que pueden ofrecer las flotas con esos autobuses es demasiado elevadas (mucho tiempo entre cada autobús) y no satisfacen el interés de la empresa de volver en un futuro a los 5 autobuses pre-Covid 19 o incluso realizar una expansión a 8 autobuses.

Podemos observar como hemos conseguido nuestro objetivo de ofrecer escenarios con mejor la frecuencia de servicio, bajando de los 12 minutos que conseguíamos en los casos de solo sistemas de carga estática con 7 autobuses y 6616400€. Claro está que los costes de la infraestructura son considerablemente más elevados, sin embargo, la infraestructura de solo dinámica presenta características muy positivas que podrían justificar su instalación y atraer sobre todo a instituciones públicas para llevar a cabo el proyecto. Colocar las bobinas de recarga por inducción en la ciudad trae consigo más conveniencias. En la ciudad es donde más densidad de tráfico hay y donde los vehículos tanto de transporte público como privado más lento se desplazan. Esta infraestructura estaría disponible para todo usuario de la vía, además de poder ser utilizada por todo vehículo que se encuentre sobre ella al mismo tiempo (y tenga bobinas de recepción implementadas en el coche). Resulta entonces una solución candidata para acabar con la necesidad de autonomía de los coches que recorren diariamente la ciudad, acabar con las

previstas aglomeraciones en las electrolineras y con sus largos tiempos de espera (al cargar en movimiento). Cabe destacar que una infraestructura de recarga extensa permitiría desarrollar vehículos de uso exclusivo en la ciudad mucho más económicos al poder reducir el tamaño de las baterías al poder estar continuamente cargando, mientras el usuario se desplaza.

Muy importante para el inversor tener en cuenta que aunque el coste inicial sea elevado, esta infraestructura sirve a otros usuarios daría gran remuneración al cobrar un comisión por las recargas energéticas que los vehículos realicen a través de tu infraestructura. De este modo, la inversión podría ser recuperada rápidamente.

Esto resulta un incentivo y una opción de proyecto para un futuro desarrollo de red de infraestructura de recarga dinámica por inducción en la ciudad que permitiría un gran salto en la transición hacia los vehículos eléctricos.

Finalmente, estudiamos el caso mixto, en el que utilizaremos ambas tecnologías para buscar escenarios óptimos aprovechando las ventajas que ambas ofrecen.

4.3 CASO 3. RECARGA POR SISTEMAS DE INDUCCIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA

Este caso es una combinación de los dos anteriores, por lo que lo llamamos el caso híbrido. El interés de este caso es hacer viables escenarios más interesantes que en los casos individuales gracias a su complementación. Plantearemos distintos escenarios en lo que respecta a la parte estática como hicimos en el caso 1. Claramente, los escenarios que solo con estática ya satisfacen las condiciones y son funcionales no necesitan de infraestructura dinámica. Por lo tanto, el interés principal de este caso es conseguir que con la complementación de los sistemas, aquellos escenarios que no satisfacían las condiciones de funcionamiento por falta de autonomía con solo carga estática, encuentren ahora una alocaión óptima de los sistemas de carga dinámica en el ciclo que les permita garantizar el servicio de la línea.

4.3.1 METODOLOGIA DEL CASO HIBRIDO

La metodología utilizada en este caso, es muy similar a la del caso 2. En vez de un solo escenario estático, se definen varios escenarios para cada uno de los cuales se calculará la distribución por tramos óptima de la infraestructura de recarga dinámica.

En este caso, hemos desarrollado como en el caso 1 un script llamado “MIXED_COMPLET_SYSTEM.m” que define los escenarios estáticos y comprueba su cumplimiento de las condiciones 1 y 3: No solapamiento y no superación de la potencia de recarga máxima de 150kW. Una vez definido el escenario estático, el cual ya determina la frecuencia que va a tener el servicio, se llama a la función del algoritmo PSO Binario enviándole las características de este escenario. El algoritmo PSO Binario ha sido acomodado para este caso en el script: “PSO_Binario_Tesina_COMPLET_MIXED.m”. El algoritmo funciona exactamente igual que en el caso 2. Llama a la función coste al que se le envía esta vez no solo la distribución de los tramos de carga dinámica si no también el escenario estático (en el caso 2 el escenario estático estaba definido directamente en la función coste ya que era único). La función coste adaptada se ha llamado “cost_function_pso_MIXED.m”.

Esta función de coste es responsable de comprobar que se cumplan las condiciones 2 y 4: Autonomía a lo largo del día y número máximo de secciones separadas con infraestructura de recarga dinámica.

Al igual que en el caso anterior, la condición 2 es estudiada para asegurar batería suficiente en cada tramo, sin que baje del 10% en ningún momento. Claramente, una adaptación en el código ha sido necesaria para que en cada parada, en la intermodal o aeropuerto, se sume la recarga correspondiente en su preciso momento.

Además, calcula el coste correspondiente a la carga dinámica y la devuelve al algoritmo como en el caso 2. El algoritmo encuentra para cada escenario estático enviado por “MIXED_COMPLET_SYSTEM.m”, la distribución de la recarga dinámica óptima, y se la envía de vuelta a este. Finalmente, en “MIXED_COMPLET_SYSTEM.m”, el coste total de las infraestructuras de recarga del escenario. Finalmente, todos los escenarios estudiados son representados en un frente de Pareto como en el caso 1, donde comparamos de nuevo la frecuencia del servicio obtenida y el coste de inversión de dicha infraestructura.

4.3.2 RANGO DE ESCENARIOS ESTUDIADOS EN EL CASO HÍBRIDO

Retomando la tabla de escenarios estáticos estudiado en el caso 1 y imitamos el rango a los escenarios de interés. Es decir aquellos que no conseguían satisfacer las condiciones solo con el sistema de recarga estático: escenarios que no satisfacían la condición 2 de autonomía. Otros escenarios no satisfacían la condición de solapamiento pero eso no depende del sistema dinámico, esos escenarios son simplemente inválidos por la lógica del funcionamiento del servicio.

Por otro lado, algunos escenarios con 3 o 4 autobuses eran inválidos. Sin embargo, ya se ha explicado que este número de autobuses no son de nuestro interés por dos motivos: condiciones de servicio mejores son alcanzadas con un mayor número de autobuses por un precio moderadamente más elevado, y la empresa Grupo Acha tiene interés de volver en un futuro a una flota de 5 autobuses como en la época pre-Covid19 o incluso aumentar la flota hasta 8 autobuses para satisfacer la demanda completa.

Nos centramos entonces en esos dos criterios. Satisfacer la autonomía y estudiar flotas de entre 5 y 8 autobuses. Como en el caso estático simple ya hemos encontrado una solución

satisfactoria con 5 autobuses, reducimos nuestro rango de estudio entre 6 y 8 autobuses en este caso.

Por otro lado, hemos tenido que reducir el número de escenarios a estudiar debido al largo tiempo que requiere el algoritmo para encontrar la distribución de infraestructura de recarga dinámica óptima.

El tiempo en paradas se limita a los que causan invalidez por autonomía en el caso de solos estático, es decir los casos de poco tiempo en parada: 5 o 10 minutos.

El número de bobinas en el autobús se establece como 2 al ser necesario para sacar rendimiento a la vía con carga dinámica.

En cada estación el numero de paradas con sistemas de carga WPT estática se reducen a todas o ninguna.

Y finalmente la potencia de carga es 75 kW en todos los casos.

Destacar que si en un futuro, ya sea la empresa Grupo Acha u otra institución esta interesada en estudiar otros escenarios u otros rangos, sería completamente posible puesto que todos los códigos han sido redactados para aplicación genérica asique simplemente habría que introducir esos nuevos valores en el sistema para que el mismo los estudie. Esto tanto para el estático, dinámico y mixto. Con las propiedades de cualquier autobús. También, se puede introducir un archivo con valores de un trayecto completamente distinto y los códigos lo procesarán al instante puesto que la lectura también se ha desarrollado de forma genérica.

En conclusión, el rango de los parámetros variables de los escenarios a estudiar en este caso mixto son:

Tabla 14. Parámetros variables escenarios Caso Mixto	
Tiempo de parada en el aeropuerto	$T_a = 5, 10, \text{minutes}$
Tiempo de parada en la intermodal	$T_i = 5, 10 \text{ minutes}$
Numero de autobuses	$N_b = 6: 8$
Numero de bobinas receptivas por autobus	$N_{Bb} = 2$

Numero de bobinas en cada parada con sistemas de carga WPT	= Numero de bobinas receptoras por autobus
Numero de paradas con sistemas WPT en la intermodal	0 o 1
Numero de paradas con sistemas WPT en el aeropuerto	0 1 2
Potencia de los sistemas WPT en la intermodal	$P_{isi} = 75\text{kW}$
Potencia de los sistemas WPT en el aeropuerto	$P_{isa} = 75\text{kW}$

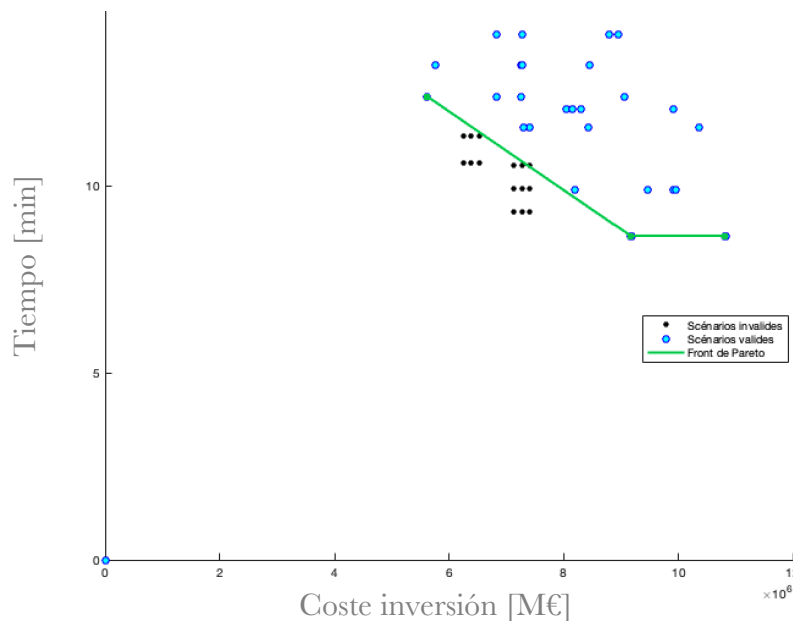
En total, con estos parámetros tenemos un total de $2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 48$ escenarios

* Se podrían hacer búsquedas en los rangos que se desee y el numero de escenarios que se desee. El algoritmo para hacer una búsqueda satisfactoria necesita tiempo, una búsqueda de 384 escenarios por ejemplo podría tardar 19 horas en realizarse.

4.3.3 RESULTADOS CASO 3

Tras hacer funcionar los códigos y el algoritmo, presentados en los Anexos G, H e I, obtenemos similar que en el caso uno, una distribución de los escenarios en el espacio: Frecuencia de servicio vs Coste de inversión. E

Ilustración 29. Resultados y frente de Pareto Caso 3. Frecuencia del servicios vs Coste de la inversión



En negro vemos los escenarios inválidos, esots son invalidos por solapamiento de los autobuses.

En azul los escenarios válidos y en verde el frente de Pareto de las soluciones óptimas.

Entre esas soluciones, destacan 2 escenarios con mejores resultados. Estos escenarios presentan las siguientes características:

Escenario 1:

Tabla 15. Solución propuesta 1 con infraestructura de recarga híbrida

Scenario	Ni	Na	Buses	BonbinesB	Pi	Pa	Tarreti	Tarreta	cond1	cond2	cond3	val
28	1	0	6	2	75	75	10	12,5	1	1	1	1

Coût	Tentrebus	cond4	totaldistcargadyn	cargadyncyclectot	Coûtdyn	Coûtstat	posiciontramosl
5624350.8	12.38	1	162.7	1.0976 [kWh]	115750.8	5508600	[7,8]

Una frecuencia de servicio de 12,38 minutos a un coste de 5624350,8EUR=550860EUR infraestructura estática y autobuses +115750,8 infraestructura de recarga dinámica. Conseguid con una infraestructura de recarga estática en la parada de la intermodal con una potencia de 75kW y un tiempo de para de 10 minutos en estas. La parada del aeropuerto Na=0 no tendrá sistema de recarga estático, y por lo tanto el tiempo de parada en esta será el mínimo de 5 minutos (5 en salidas+5 en llegas +2,5 de transito: Tarreta=12,5 minutos). 6 autobus componen la flota de este escenario.

Por la parte dinámica, un pequeño tramo de 162,7 metros será instalado justo antes de la llegada al aeropuerto tramo 7. Este tramo aparece puesto que el tramo intermedio de 2,5km se corta en el aeropuerto dividiéndose en 2 tramos que suman 2,5 km. Es un tramo muy pequeño de recarga, pero resulta suficiente para cumplir con todas las condiciones.

Comparando con los resultados del caso 1, observamos que con solo recarga estática podíamos descender a un mínimo de 12 minutos por una inversión de 6616400EUR y 7 autobuses lo que supone un gasto adicional en conductores diario. Por lo que conseguimos una frecuencia similar con una inversión un 15% inferior. Además, este tramo de recarga dinámica podría ser utilizado por el abundante número de taxis u otros vehículos eléctricos que acceden al aeropuerto.

Escenario 2:

Tabla 16. Tabla 15. Solución propuesta 2 con infraestructura de recarga híbrida

Scenario	Ni	Na	Buses	BonbinesB	Pi	Pa	Tarreti	Tarreta	cond1	cond2	cond3	val
34	1	0	8	2	75	75	5	12,5	1	1	1	1

Coût	Tentrebus	cond4	totaldistcargadyn	cargadyncyclectot	Coûtdyn	Coûtstat	posiciontramosl
9169450.8	8.658	1	2662.8	32.6	1893250.8	7276200	[1,2;7,8]

En este segundo caso, proponemos un escenario que garantiza una frecuencia de 8,66 minutos por un coste de inversión de 9169450,8EUR=7276200EUR infraestructura estática y autobuses +1893250.8EUR la infraestructura dinámica. Este escenario tiene otra vez 1 bobina en la intermodal y ninguna en el aeropuerto. Sin embargo, esta vez el tiempo de parada en la intermodal será solo de 5 minutos para aumentar la frecuencia del servicio. 8 autobuses componen la flota. Esto supone una mayor necesidad de recarga con infraestructura dinámica. Se instalarían por lo tanto 2,663km de infraestructura dinámica en 2 tramos distintos. El tramo de llegada al aeropuerto como en el caso anterior, y los 2,5km de salida de la intermodal. Este segundo tramo es coherente puesto que se trata de los 2,5km que hay desde la intermodal hasta el puente que sale de la ciudad de Bilbao hacia la autopista como se mostró en la ilustración en verde. Esta disposición contribuiría una vez más a una red de recarga en la ciudad abierta al resto de vehículo al ser los tramos de recarga dinámica utilizables simultáneamente por todos los vehículos que se encuentren en ellos y claramente dispongan de bobinas receptivas.

Comparando con el escenario obtenido en el caso 2 con 8 autobuses que nos ofrecía la misma frecuencia, ahorramos en este caso 2532697,2 EUR en los costes de inversión, es decir este escenario costaría un 21,6% menos que en el caso 2.

Concluimos por lo tanto que este último caso híbrido nos ofrece escenarios que permiten superar los límites encontrados en el Caso 1 alcanzando frecuencias de servicio óptimas como son 12,38 o 8,66 minutos por un coste menor que los escenarios propuestos en el caso 2.

Recordamos que la decisión del escenario óptimo reside en la diputación y es ella quien considerará un escenario u otro optimo en función de sus prioridades. Por lo tanto un escenario como una red más ampliada de recarga dinámica aunque suponga un mayor

coste podría ser la escogida. Es por ello que hemos ofrecido un amplio rango de soluciones. Otros muchos escenarios podrían valorarse con los códigos si deseado.

5 Costes del proyecto, futuros gastos e ingresos

Este proyecto se centra en la electrificación de una línea precisa de autobuses de Bilbao, la línea A3247. Esta línea esta gestionada por la empresa privada Grupo Acha. Sin embargo, esta empresa no es propietaria. La gestión de línea sale a concurso para su gestión. En esta situación, Grupo Acha cobra un precio estipulado por kilómetro realizado, y con ese precio esta tiene que cubrir gastos.

A su vez, los autobuses que comprar la empresa tienen una estimación de duración de uso de 10 años. A lo largo de estos años la diputación de Vizcaya reembolsa de cierto modo a la empresa los gastos que supusieron los autobuses.

Finalmente, el dinero pagado por los pasajeros a la hora del viaje es recaudado por diputación.

Por lo tanto la distribución del dinero y la duración del poder de gestión de la empresa dificulta el saber quien debería realizar las inversiones para las infraestructuras, quien sería el encargado del mantenimiento y quien sería el beneficiario del pago por otros agentes al usar la infraestructura instalada.

Sobre todo, las línea de autobuses públicos en son deficitarias y no generan ganancias. Por lo tanto los proyectos que traten de mejorar estos servicios son principalmente subvencionados por las instituciones públicas, en este caso diputación. Es sector público a la ahora de realizar un proyecto de este tipo, se guía más por Objetivos de Desarrollo Sostenible y calidad de vida de los ciudadanos más que buscar beneficio económico. Por último, en lo que refiere este sector, las ciudades tarde o temprano se van a ver necesitadas por legislación y objetivos nacionales de transitar hacia el transporte sostenible como es el eléctrico.

Por ello no hemos entrado en el estudio de la recuperación de la inversión a largo plazo puesto que no tiene verdadero interés en un proyecto del sector público como este, y no entraría en la decisión de llevar o no acabo el proyecto. Por lo tanto resulto conveniente limitarnos a calcular los costes de inversión del proyecto.

Proporcionamos en caso de interés una tabla con datos sobre gastos del servicio, mantenimiento e ingresos:

Tabla 17. Gastos de mantenimiento e ingresos del servicio

	1 Autobus	Conductor	Sistemas de carga estática	Sistemas de carga dinámica	Pasajero
Coste de Mantenimiento	2000€/año	-	70€/mes/cargador [33]	80000€/km/año*	-
Coste de funcionamiento	$(15 \frac{\text{ciclos}}{\text{día}} \cdot 62 \frac{\text{kWh}}{\text{ciclo}} + 576 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}) \cdot 365 \cdot 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 82453 \frac{\text{€}}{\text{año}}$	$37 \frac{\text{€}}{\text{hora}} \cdot (1102 \frac{\text{minutos}}{\text{bus-día}} \cdot \frac{1}{60}) \cdot 365 = 248042 \frac{\text{€}}{\text{bus-año}}$	-	-	-
Ingresos	-	-	¿Abierto al uso de otros usuarios?	¿Abierto al uso de otros usuarios?	$1069000 \frac{\text{pasajeros}}{\text{año}} \cdot (0,45 \cdot 3 \text{€} + 0,55 \cdot 1,14 \text{€}) = 2113413 \frac{\text{€}}{\text{año}}$

*A falta de encontrar estimaciones de este valor, hemos tomado como coste de mantenimiento, el coste de mantenimiento de un kilómetro de carretera medio al año [34].

Para el coste de la energía hemos tomado el cote actual (08/2021) medio. Estando relativamente elevado esta época comparado con años anteriores.

El coste del conductor/hora ha sido indicado por la empresa Grupo Acha, y el número de 1069000 pasajeros/año, es el obtenido por la línea en 2019 (pre-Covid) con 5 autobuses en funcionamiento. Comentar que la empresa nos ha dicho que por su experiencia en el mundo del transporte público, cuanto mayor servicio haya, más autobuses que proporcionen una mayor frecuencia, más pasajeros utilizan el servicio. Además, en el caso de esta línea, la alternativa para acceder al aeropuerto es el transporte privado o taxis. La experiencia de acceder en estos últimos es indeseable, puesto que cada vez esta más controlado donde se aparca en el aeropuerto, el coste de dejar el coche ahí es elevado, hay mucho taxi que no permite hacer la parada correctamente y además se hace frecuente uso de grúas para retirar su coche si estas adecuadamente estacionado. En consecuencia, los ciudadanos optan cada vez más por la opción del autobús, y cuanto mejor servicio haya, más pasajeros se obtendrán. Mostramos así el gran interés que hay en encontrar escenarios que proporcionen un servicio con buena frecuencia. Recordamos que debido a la alta demanda que había en 2019 de la línea, la empresa Grupo Acha estaba cerca de aumentar la flota a 8 autobuses para reducir la frecuencia de servicio de 15 minutos a 10 minutos. La pandemia interrumpió esa ampliación, sin embargo podría volver a plantearse en cuanto volvamos a la normalidad.

También, el porcentaje de los pasajeros que pagan con el bono transporte “Barik” 55% por 1,14€ el viaje y el otro 45% que pagan con viaje ocasional por 3€ (gente visitante) también ha sido indicado por la empresa.

Finalmente, en ingresos de los sistemas de carga estática y dinámica lo hemos dejado en cuestión, puesto que la infraestructura instala para el funcionamiento de la línea, podría ser utilizada por otros usuarios de la vía que tengan opción de carga por inducción. Estos usuarios al recarga la batería de sus vehículos en estas infraestructuras pagarían una comisión al inversor para alcanzar el reembolso. El sistema de recarga estático estará la mayor parte del tiempo ocupado por autobuses de la línea, sin embargo, la infraestructura de carga dinámica permite que otros usuarios la utilicen constantemente, todos los coches que circulen por encima podrían estar cargando al mismo tiempo. Esto resulta de interés comunitario de los usuarios de vehículos eléctricos y al mismo tiempo puede ser una fuente de ingresos para aquel que financie el proyecto.

6 Conclusiones y perspectivas

Los resultados del proyecto ofrecen una gran variedad de posibilidades a través de las cuales la empresa Grupo Acha o la Diputación podrían acceder a pasar de la flota actual de autobuses diésel a una flota con autobuses eléctricos. Esta transición supondría un gran avance como ciudad en el ámbito del servicio público, cumpliendo con ODS establecidos por la ONU como objetivos de la humanidad, reduciendo las emisiones mejorando la calidad del aire de la ciudad y sirviendo como ejemplo a otras ciudades e instituciones públicas.

Hemos observado que las soluciones con carga estática son hasta un 50% más económicas que la solución con carga dinámica, sin embargo, presentan un límite en la frecuencia en los 12 minutos. La infraestructura de recarga dinámica permite reducir la frecuencia de servicio hasta 8,66 minutos con 8 autobuses y 6,5km de recarga. Por su lado, el caso híbrido permitir reducir las frecuencias de servicio del caso estático con un coste total menor al caso de solo dinámica. De este modo obtenemos unos escenarios más equilibrados que los de los 2 primeros casos. Cabe destacar, que los escenarios con sistema de recarga dinámica aun requiriendo una alta inversión, ofrecería también la posibilidad de recarga a otros usuarios con sus vehículos privados lo que supondría una facilidad no solo para la línea si no también para todos los públicos. Esta ventaja podría permitir al inversor cobrar comisiones por utilizar la infraestructura y recuperar parte de la inversión o incluso generar beneficios.

En el Caso 3, concluimos que frecuencias más bajas que no eran alcanzables con solo los sistemas de recarga estática son conseguidos con una infraestructura de recarga híbrida y por un coste más económico que en el caso de solo recarga dinámica. Por ejemplo podemos garantizar un servicio con una frecuencia de 8,66 minutos por un coste de inversión de 9169450,8 EUR frente a los 11702148EUR necesarios en el caso 2. A su vez, al incluir esta solución ambas tecnologías resulta de un mayor interés al permitir, al resto de usuarios de la vía hacer uso de la infraestructura dinámica en una situación futura en la que exista la interoperabilidad de la tecnología con cualquier vehículo eléctrico público o privado. Además, como explicaremos en el apartado de futuros gastos e ingresos, el posible uso por el resto de vehículos de los sistemas de recarga dinámica permite al inversor tener una fuente de cobro y reembolso.

Como explicado en el apartado de futuros gastos e ingresos, esta inversión de la línea A3247 de transporte público sería realizada por la diputación de Vizcaya., es decir una inversión pública. Por lo tanto, las soluciones propuestas en los 3 casos de este proyecto, presentan una oportunidad para que las instituciones públicas avancen en sus compromisos de sostenibilidad y destaquen como ejemplo con esta tecnología innovadora. No solo consistiría en la electrificación de la línea sino que con la infraestructura de recarga dinámica estarían llevando acabo un proyecto de electrificación en toda la ciudad aportando una red de recarga innovadora y práctica.

Con perspectiva, otras líneas ya se de autobuses u otros vehículos podrían ser estudiadas con las herramientas desarrolladas en este proyecto. El simulador del autobús eléctrico, los códigos y el algoritmo se han desarrollado meticulosamente para tener en cuenta todas las características del sistema. Además, se han desarrollado de manera genérica de tal forma que si introducimos los datos de velocidad y pendiente en el tiempo de un vehículo a lo largo de su trayecto, podemos ya realizar todo el estudio simplemente asignando los valores adecuados y deseados a la variables. El algoritmo puede ser ajustado según el tipo de búsqueda que queramos hacer en función del espacio de soluciones. Confiamos por lo tanto en que este proyecto pueda facilitar el desarrollo de futuros proyectos del sector.

Por otro lado, consideramos que sería interesante añadir en el proyecto la opción de disminuir el tamaño de la batería aumentando la infraestructura de carga. Esta reducción permitiría reducir el coste de los autobuses y por tanto del sistema global ya que el coste de las baterías es un 40% del coste del autobús, como nos fue indicado por la empresa MAN.

Finalmente, consideraríamos interesante estudiar la interoperabilidad de otros vehículos de la vía con estos sistemas. Para que como indicado previamente cualquier usuario pueda aprovecharse de estas infraestructuras de recarga, sobre todo para el caso dinámico y ver que impacto tendría una ampliación de la red de esta infraestructura en la ciudad, realizando un estudio técnico económico de la situación.

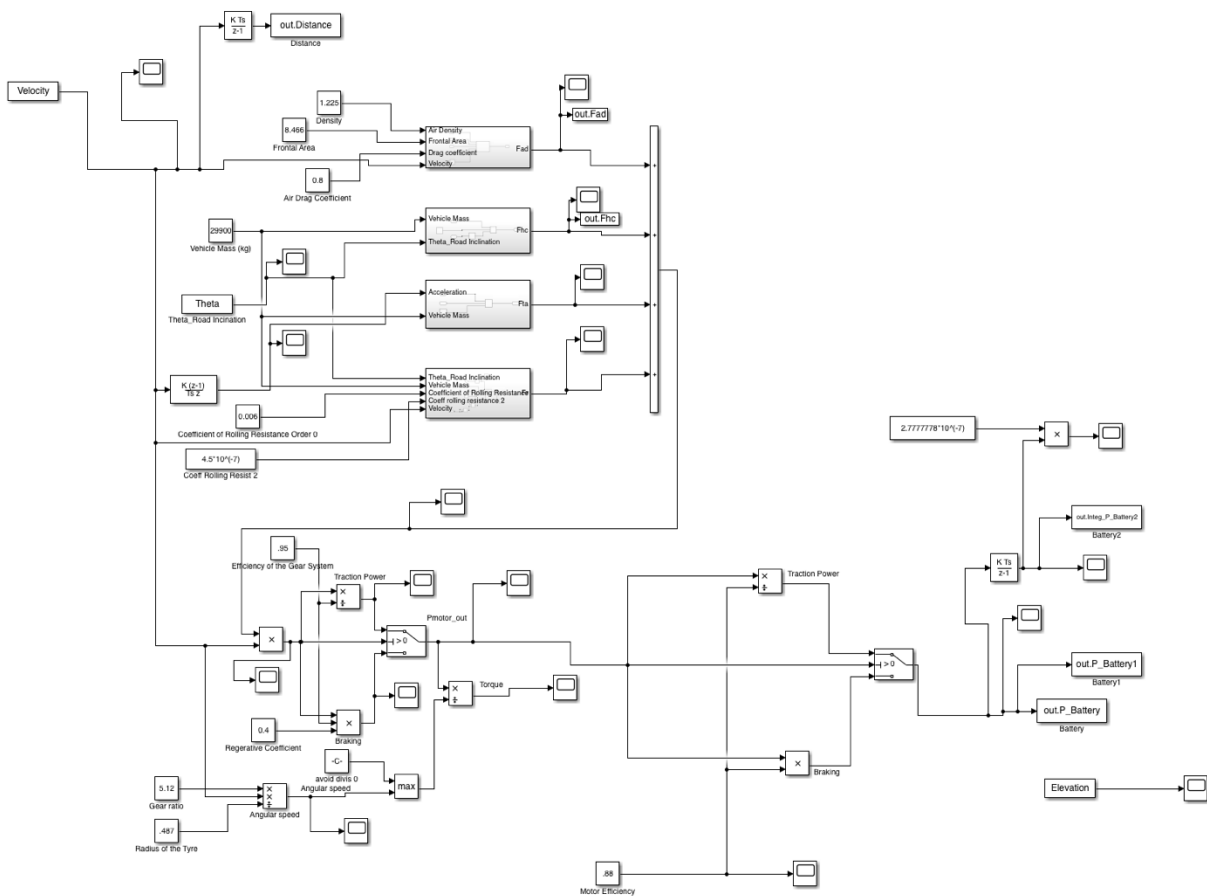
7 Bibliografía

- [1] Emisiones de gases de efecto invernadero: hay que ir más lejos. Comisión europea. Marco sobre clima y energía para 2030.
- [2] Le climat. Comprendre le climat mondial. L'effet de serre. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/comprendre-le-climat-mondial/leffet-de-serre-et-autres-mecanismes>
- [3] Europa lidera la carrera de los vehículos eléctricos. Mónica Mena Roa. 19 feb. 2021.
- [4] El vehículo eléctrico, una solución medioambiental sostenible y eficiente. Rodrigo Vázquez Casillas. 2018.
- [5] Un estudio de castrol revela los “puntos de inflexión” para impulsar la compra generalizada de vehículos eléctricos.
- [6] Paul-Antoine Gori. Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique. Energie électrique. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français.NNT 2019SACLC063. tel-02413595
- [7] Status of The Technology for Electrical Road Focusing on Wireless Charging. Halmstad 2020-06-14.
- [8] State-of-the-Art: Wireless charging technologies and mass transit Potential. Wolfson School of Mechanical, Electric & Manufacturing Engineering, Loughborough University, Leicestershire, U.K. 2020.
- [9] <https://web.bizkaia.eus/es/web/bizkaibus/detalle-delinea?linea=A3247&nombreLinea=Bilbao-Aireportua%2FAeropuerto>
- [10] <https://grupoacha.com/>
- [11] <https://www.corporate.man.eu/en/index.html>
- [12] <http://www.greenloft.es/>
- [13] <https://www.heliox-energy.com/>
- [14] <https://web.bizkaia.eus/documents/2455483/0/A3247+ida-vuelta+para+WEB.pdf>
- [15] Principe de recharge sans contact par induction de la source à la charge.
- [16] Caillierez, “Etude et mise en oeuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicules en mouvement,” Université PARIS-SACLAY, Thèse de doctorat, 2016.
- [17] SAE J2954, “Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology” *SAE Int.*, 2017.
- [18] <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- [19] ® MAN_eMobility_Broschuere_sp_scre. Catalogue.
- [20] Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Model for Comparing Plugin versus Wireless Charging for an Electric Bus System.
- [21] Nelder, Chris & Rogers, Emily. (2020). Reducing EV Charging Infrastructure Costs. 10.13140/RG.2.2.26490.03525.
- [22] Greenloft contact.
- [23] Xiaotong Sun, Zhibin Chen, Yafeng Yin, Integrated planning of static and dynamic charging infrastructure for electric vehicles, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 83, 2020.

- [24] Economic Viability and Environmental Impact of In-Motion Wireless Power Transfer. Braden J. Limb, Zachary D. Asher, Thomas H. Bradley, Evan Sproul, David A. Trinko, Benjamin Crabb, Regan Zane, and Jason C. Quinn
- [25] Electricity consumption and battery lifespan estimation for transit electric buses: drivetrain simulations and electrochemical modelling. Ana María Franca B. Eng, University of Victoria, 2015
- [26] Desarrollo de un modelo de configuración eléctrica de autobús urbano con baterías. Felipe Calderón Peralvo. 2020.
- [27] <https://www.altoonaabustest.psu.edu/bus-list.aspx>
- [28] Etude technico-économique pour la mise en oeuvre nationale de l'électro-mobilité au Luxembourg. 19 décembre 2011
- [29] https://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico_en_I%CC%81ndia
- [30] <https://www.electreon.com/technology>
- [31] The Optimal System Design of the Online Electric Vehicle Utilizing Wireless Power Transmission Technology. Young Dae Ko and Young Jae Jang, Member, IEEE
- [32] PSO Binario con control de velocidad Aplicación al reconocimiento de Rostros. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA 10 de octubre de 2012.
- [33] <https://etecnic.es/wp-content/uploads/2020/01/vehiculos-electricos-gtms-energen.pdf>
- [34] https://www.niusdiario.es/economia/consumo/mantenimiento-kilometro-autovia-coste-80000-euros-ano-peaje-gobierno-plan-recuperacion-comparativa-paises-europa_18_3133995341.html

8 Anexos

Anexo A. Modelo de autobus eléctrico en MATLAB Simulink



Código de validación del Modelo :

```
CBD = readtable('Central.csv');
ARTER = readtable('Arterial.csv');
COMM = readtable('Commuter.csv');
iddlerperiod=[0 0];
for i=1:294
    iddlerperiod(i,1)=i;
    iddlerperiod(i,2)=0;
end
IDDL=array2table(iddlerperiod);
IDDL.Properties.VariableNames(1:2) = {'Time_seconds_', 'Speed_mph_'};
ADB1=[CBD ; IDDL; ARTER; CBD; ARTER; CBD; COMM];

ADB=ADB1;
for i=1:8
    ADB=[ADB; ADB1];
end

veloc_adb=table2array(ADB(:,2));
time_adb=table2array(ADB(:,1));
length_ADB=length(veloc_adb);
for i=1:length_ADB
    veloc_adb(i)=veloc_adb(i)*0.447038888888208;
    if veloc_adb(i)>17.8816;
        veloc_adb(i)=17.8816;
    end
end
for j=1:length_ADB
    time_adb(j)=j-1;
end

ADB_TEST.time=time_adb;
ADB_TEST.signals.values=veloc_adb;
ADB_TEST.signals.dimensions=1;

A=out.P_Battery;

P_Batt_values=out.P_Battery1.signals.values;
P_Batt_times=out.P_Battery1.time;
Distance_values=out.Distance.signals.values;
Distance_times=out.Distance.time;
Total_Bat_array=out.Integ_P_Battery2.signals.values;
Total_Bat_consum=Total_Bat_array(length_ADB+1);
P_aux_consum=2500*length_ADB;

Consumed_Energy_kwh=(Total_Bat_consum+P_aux_consum)*(2.77778*10^(-7))
```

Anexo B. Código para la lectura del trayecto real de la línea A3247 completa

```
%function [CONSMAXc]=Consmax_function(Tcyclec)
%Track_asc = readtable('trackdesc.csv');
Track_cycle=readtable('TrackCYCLE.xls');
iddleperiod=[0 0];
for i=1:294 % 294: Lo único que no esta automatizado para cualquier
archivo de datoa
    iddleperiod(i,1)=i;
    iddleperiod(i,2)=0;
end
IDDLE=array2table(iddleperiod);
IDDLE.Properties.VariableNames(1:2) = {'Time_seconds_', 'Speed_mph_'};

Td2=Track_cycle;
Td2=Td2(1:3631,1:14); %1539 para el ascenso solo
Timecycle=table2array(Td2(:,1));
%Timecycle2=Timecycle;
varaux=Timecycle;
type_t=class(Timecycle(1));
Timecycle=Timecycle(:,1);
Tfinal=length(Timecycle);
Timecycle=Timecycle';
%Timecycle3=[1:1:1542];

Velocityval=table2array(Td2(:,6));%en m/s

%Tunel entre las 10:38:38 y las 10:39:35

Elevationval=table2array(Td2(:,4));
Distanceval=table2array(Td2(:,8));
Slope=table2array(Td2(:,14)); %in radians

Accelerationval=[];
%for i=2:Ldatetimet1
%    Datetimet1cons(i)=Datetimet1cons(i-1)+D(i-1);
%    Accelerationval(i-1)=(Velocityval(i)-Velocityval(i-1))/Dsec(i-1);
%end

%Elevationval=str2double(Elevationval);
%Velocityval=str2double(Velocityval);
%Slope=str2double(Slope);

%Timecycle=cellfun(@str2num, Timecycle);
%Timecycle=str2double(Timecycle);
Timecycletype=class(Timecycle);

Velocity.time=[Timecycle];
Velocity.signals.values=[Velocityval];
Velocity.signals.dimensions=1;

Theta.time=[Timecycle];
```

```
Theta.signals.values=[Slope];
Theta.signals.dimensions=1;

Elevation.time=[Timecycle];
Elevation.signals.values=[Elevationval];
Elevation.signals.dimensions=1;

%Distance.time=[Timecycle];
%Distance.signals.values=[Distanceval];
%Distance.signals.dimensions=1;

%function V=velocity(Datetimeticons)
%for i=1:Ldatetimet1
%    if Veltab(i,1)==
%end
%A=out.P_Battery;

%% Velocity2
Velocity2_values=out.Velocity2.signals.values;
Velocity2_times=out.Velocity2.time;

P_Batt_values=out.P_Battery1.signals.values;
P_Batt_times=out.P_Battery1.time;
Distance_values=out.Distance.signals.values;
Distance_times=out.Distance.time;
Distance_todo=out.Distance;

Distance_values_ex=unique(Distance_values,'sorted');
lengthdistex=length(Distance_values_ex);
lengthdist=length(Distance_values);
Distance_times_ex=[];
t=1;
%Quitamos el tramo de parada de velocidad 0 y distancia cte
for i=1:lengthdistex
    for j=1:lengthdist
        if Distance_values_ex(i)==Distance_values(j);
            Distance_times_ex(i)=Distance_times(j);

            %t=t+1
            break
        end
    end
end

end
Distance_times_ex=Distance_times_ex';
Distance_times_ex2=Distance_times_ex;

%% Reconstruccion de la señal tiempo para las distintas distancias.
Tiempo sin la parada intermedia. Tiempo por tramo no tiempo de reloj
transcurrido con paradas
for i=1:lengthdistex
    % Irrelevante    if Distance_times_ex(i)>9
    %                Distance_times_ex(i)=Distance_times_ex(i)-59;
    %    end
    %    if Distance_times_ex(i)>1545 %Unicamente quitamos la parada
    %        Distance_times_ex(i)=Distance_times_ex(i)-(2145-1545);
    %    end
    % Irrelevante    if Distance_times_ex(i)>3618
    %                Distance_times_ex(i)=Distance_times_ex(i)-(2145.1-1540.78);
```

```
% end
end
%%

%Distance_times_ex=unique(Distance_values_ex,'sorted');
lengthdist=length(Distance_values_ex);
totaldist1=Distance_values_ex(lengthdist);
totaldist=fix(totaldist1);%Dist total es 29153
longitudtramo= 2500; %VARIABLE A AJUSTAR
meddist=1.51628e4; %Esto es siempre
if totaldist1/longitudtramo - fix(totaldist1/longitudtramo)>0
    numtramos=fix(totaldist1/longitudtramo)+1;
else
    numtramos=fix(totaldist1/longitudtramo);
end

Dist_interpol_met=(0:longitudtramo:totaldist);
Dist_interpol_met=[Dist_interpol_met totaldist1];%De todas todas
tienes que añadirlo totaldist1 no entero
Dist_interpol_met=Dist_interpol_met';

for a=1:length(Dist_interpol_met)
    if Dist_interpol_met(a)<meddist && Dist_interpol_met(a+1)>meddist
        traslblock=Dist_interpol_met((a+1):end);
        Dist_interpol_met(a+1)=meddist;
        Dist_interpol_met((a+2):(end+1))=traslblock;
    end
end

Time_interpol_met=interp1(Distance_values_ex, Distance_times_ex
,Dist_interpol_met, 'makima');
Time_interpol_met=Time_interpol_met;
Dist_time_matrix_interp=[Dist_interpol_met
Time_interpol_met];%Importante: Matrix con las distancias y el tiempo
de conduccion entre esas distancias

%%Potencia en funcion de la distancia
PBatt_met=interp1(P_Batt_times, P_Batt_values ,Distance_times_ex2,
'makima');%Distance_times_ex2 son los tiempos de las distancias
√nicas, tiempos en el ciclo de esas distancias
%La linea de encima son las potencias correspondientes a las
distancias
%"√nicas" sacados de los tiempos del ciclo con parada. Si eliminamos
las
%paradas, el tiempo es Distance_time_ex y la potencia es
PBatt_interpol_met

PBatt_interpol_met=interp1(Distance_values_ex, PBatt_met
,Dist_interpol_met, 'makima');
PBatt_interpol_met;
PBatt_matrix=[Distance_times_ex PBatt_met];%Cuidado con esta linea
importante, cambio de vector de potencias contado las paradas a sin
paradas.
PBatt_matrix_interp=[Time_interpol_met PBatt_interpol_met];
%PBatt_matrix_interp(1,:)=[];
PBatt_matrix_comp=[PBatt_matrix; PBatt_matrix_interp];
Sort_PBatt_matrix_comp=sortrows(PBatt_matrix_comp,1);%IMPORTANTE:
Matriz con el tiempo y los valores instantaneos de la potencia en la
bateria en cada instante. Incluye los tiempos de la interpolacion en
las distancias de cada tramo.
```

```
Sort_PBatt_matrix_comp(1,:)=[];%coordenadas (0,0) estaba repetida.
Sort_PBatt_matrix_comp(end,:)=[];%coordenadas (3028,0) estaba
repetida.
cargadeprueba=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(66:70,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(66:70,2));

Dist_time_matrix_interp;
Sort_PBatt_matrix_comp;
DistindexinPbatt=[];
%Esta ultima columna nos dice cual es el indice en la matriz
%Sort_PBatt_matrix_comp que corresponde al tiempo de cada tramo Dist.

for j=1:length(Dist_time_matrix_interp(:,1))
    for h=1:length(Sort_PBatt_matrix_comp(:,1))
        if Dist_time_matrix_interp(j,2)==Sort_PBatt_matrix_comp(h,1)
            DistindexinPbatt(j)=h;
        end
    end
end
DistindexinPbatt=DistindexinPbatt';
Dist_time_matrix_interp1=[Dist_time_matrix_interp DistindexinPbatt];
%% Gráfico de la velocidad en función de la distancia
% Velocity2_met=interp1(Velocity2_times, Velocity2_values
,Distance_times_ex2, 'makima');
% Velocity_matrix=[Distance_values_ex Velocity2_met];
% figure()
% plot(Distance_values_ex, Velocity2_met);
% grid on
%% Gráfico del tiempo en función de la distancia
% figure()
% plot(Distance_values_ex, Distance_times_ex);
% grid on
%
% %%
% Dist_interpol_met_dif=[];
% Time_interpol_met_dif=[];
% for i=1:(length(Dist_interpol_met)-1)
%     Dist_interpol_met_dif(i)=Dist_interpol_met(i+1)-
Dist_interpol_met(i);
%     Time_interpol_met_dif(i)=Time_interpol_met(i+1)-
Time_interpol_met(i);
% end
%
% figure()
% bar(1:(length(Dist_time_matrix_interp(:,1))-1),
Time_interpol_met_dif);
%Dist_time_matrix_interp=[Dist_interpol_met Time_interpol_met];
%%

%P_Batt_values_ex=unique(P_Batt_values,'sorted');
%lengthPBattex=length(P_Batt_values_ex);
%lengthPBatt=length(P_Batt_values);
%for i=1:lengthPBattex
%    for j=1:lengthPBatt
%        if P_Batt_values_ex(i)==P_Batt_values(j);
%            Distance_times_ex2(i)=P_Batt_times(j);

%t=t+1
%    break
```



```
%      end
%      end

%end

%F=griddedInterpolant(P_Batt_times,P_Batt_values);
%fun = @(t) F(t);
%plot(P_Batt_times, fun(P_Batt_times));
%q =integral(fun, P_Batt_times(1), P_Batt_times(end))

%TotalBat_consum=trapz(P_Batt_times, P_Batt_values);
%Curve_PBat=cumtrapz(P_Batt_times, P_Batt_values);
%subplot(1,2,1);
%plot(P_Batt_times, P_Batt_values);
%subplot(1,2,2);
%plot(P_Batt_times, Curve_PBat);
Total_Bat_array=out.Integ_P_Battery2.signals.values;
Pos_cons_fin=length(Total_Bat_array);
Total_Bat_consum=Total_Bat_array((Pos_cons_fin));
P_aux_consum=2500*Tcyclec*60;%(Timecycle(Tfinal));%!!!!Hecho en
function Consmax: AvéADIR TIEMPO DE PARADA EN LA INTERMODAL!!!
%P_aux_consum=2500*1465;
Consumed_Energy_kwh=(Total_Bat_consum+P_aux_consum)*(2.77778*10^(-7));
%/(3.6*10^6);
%plot(Distance_values, Total_Bat_array); %En funcion de la distancia

CONSMAXc=Consumed_Energy_kwh*270/200
%end
```

Anexo C. Código para el cálculo de todos los escenarios y optimización multi-objetivo del Caso 1. Calculo e impresión del frente de Pareto

%Systeme

```
%%
%Introduction des variables de logistique de la ligne
%Tas=[5:5:15]; %Temps arret aeroport en "salidas" minlutes
Tas=[5:5:20]; %Pour tunning
Tal=Tas; %=[1:60]; % Temps arret aeroport en "llegadas"
%Ta=Tas+Tal+2.5; %minlutos. 2.5 Trasbordo de Tas a Tal minlutes
%Ti=[5:5:20]; % Temps arret intermodal Base Bilbao minlutes
Ti=[5:5:15];%Pour tunning
Ms=1; %Temps de security© entre chaque bus minlutes
Tam=27; % Temps de "ascenso" moyen/estim© de Base Bilbao √t
l'aeroporto en minlutes
Tdm=24.77; % Temps de "descenso" moyen/estim© de l'aeroporto √t la
Base de Bilbao
%Tcyclem=Tam+Tas+Tal+Tdm+Ti;%Temps du cycle (moyen/estim©)
Ndi=1; %Nombre d'arrets disponibles pour √t l'Intermodal;
Nda=2; %Nombre d'arrets disponibles √t l'Aeroporto: "salidas" et
"llegadas";
%Tentreb=Frequence_Function();

%Information sur le trajet/ligne
CONSMAXc1=88.101; %88.06 segun simulink %Sin Pauxiliar% kWh 67,24 *
1.35=90,77; 1,15:77,32 ; 1.35=270/200;

%Introduction variables des buses
Nb=[3:8]; %Nombre de bus
NBb=[1:2]; %Numero de Bobines par bus
CAPbat=640; %Capacity© de la batterie en energie kWh;

%%%Introduction variables Infrastructure de Recharge
%%Statique
Nirs=[0 1]; %Nombre d'arrets disponibles pour √t l'Intermodal pour
recharge Statique;
Nars=[0 1 2];%Nombre d'arrets disponibles pour √t l'aeroporto pour
recharge Statique;
%Nptot=Npirs+Npars;
%De momento las pongo iguales a NBb?
%NBpas=[1:NBb]; %Nombre de Bobines pour recharge dans chaque arret
%NBpal=[1:NBb];
%NBpi=[1:NBb];
Pst=[50 75]; %Plage de puissances du systv©me statique kW;
%Pst=[3.7 7.7 11 22]; %SAE J2954
%Psta;
%Psti;

%%Dynamique
%LongT= kilometros del trayecto;
%Dkm=[0:LongT]; %Debut localisation de recharge dynamique
%km=[0:(LongT-Dkm)]; %Kilometrage installv© de recharge
Pdyn=[50 75]; %%Plage de puissances du systv©me dynamique kW
```

```
%%
%CONDITIONS/CONSTRAINTES SYSTv&ME

%Logistique: Eviter solapement pour chaqie
%(Ta+Ms)<=Npa*Tentreb;

%Recharge/ Autonomie suffisante
%(CONSMAXc-Chargec)*Ncycle+CONSallret<=0.9*CAPbat;

%Puissance maximale (kW)
%Pst*Nb<=150

%% SCv&NARIOS PARCOUR
% We define the different cases depending on the following variables
%Nombre d'arrets disponibles pour v† l'Intermodal pour recharge
Statique;
v1=length(Nirs);
%Nombre d'arrets disponibles pour v† l'aeroport pour recharge
Statique;
v2=length(Nars);
v3=length(Nb);
v4=length(NBb);
v5i=length(Pst);%Pst intermodal
v5a=length(Pst);%Pst aeroport
v6=length(Ti);
v7=length(Tas);

%Table des scenarios
SCEN=table;
SCEN= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0]);
SCEN.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov&t','Tentrebus'};
SCENval=table;
SCENval= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0]);
SCENval.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov&t','Tentrebus'};

SCENvalcharge=table;
SCENvalcharge=
table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0]);
SCENvalcharge.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','Chargecyc
le','Chargecyclei','Chargecyclea','cond1','cond2','cond3','val',
'Cov&t','Tentrebus'};

SCENinval=table;
SCENinval=
table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0], [0]);
SCENinval.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov&t','Tentrebus'};
SCENvalmin1=table;
SCENvalmin1=
table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0], [0]);
```

```

SCENvalmin1.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni', 'Na', 'Buses', 'BonbinesB', 'Pi', 'Pa', 'Tarreti', 'Tarreta', 'cond1', 'c
ond2', 'cond3', 'val', 'Cov@t', 'Tentrebus'};

numscen=1;
scencost=1;
%%Scv@narios definissant l'infrastructure et le cov@t d'investissement
for i=1:v1
    Nirsc=Nirs(i);
    for i=1:v2
        Narsc=Nars(i);
        %Nos centramos en los casos primero, (26/05/2021). Los for lo
haremos
        %al final
        for i=1:v3;
            Nbc=Nb(i);
            for i=1:v4
                NBbc=NBb(i);
                for i=1:v5i
                    Pstic=Pst(i);
                    for i=1:v5a
                        Pstac=Pst(i);
                        %Calcul du cov@t
                        %function [CTOT]=Cost_Function(Nb,NBb,km,Nirsc,Narsc,
Pstic,Pstac,Pdyn);
                        CTOTc=Cost_Function(Nirsc,Narsc, Nbc, NBbc, Pstic, Pstac);

                        %numscen=numscen+1;
                        %SCENC={numscen, Nirsc,Narsc, Nbc, NBbc, Pstic, Pstac, Tarretic,
Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTc, Tentrebusc};
                        minl=60;
                        SCENvalminlnew={scencost,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
                        scencost=scencost+1;
                        for i=1:v6
                            Tarretic=Ti(i);
                            for i=1:v7
                                numscen=numscen+1;
                                Tarretasc=Tas(i);
                                Tarretalc=Tarretasc;
                                Tarretac=Tarretasc+Tarretalc+2.5;
                                Tcyclec=Tam+Tarretac+Tdm+Tarretic;
                                %Consumos en kWh
                                Consascensl=33.93*270/200;
                                Consdescensl=31.33*270/200;
                                Consascensaux=Tam*60*2500/3600000;
                                Consaeroaux=Tarretac*60*2500/3600000;
                                Consdescensaux=Tdm*60*2500/3600000;;
                                Consintermaux=Tarretic*60*2500/3600000;
                                Consdescens=Consdescensl+Consdescensaux;
                                Consascens=Consascensl+Consascensaux;
                                Pauxconsum=Tcyclec*60*2500/3600000;
                                %AQUI VA A ESTAR EL ERROR (PAUXCONSUM)
                                CONSMAXc=Consascens+Consdescens+Pauxconsum;
                                CONSallret=Consascens+Consdescens;%Apr@s l'entreprise,
considerer aller retour comme 1 cycle de plus (une allv@ est comme un
trajet bilbao-av@roport)
                                %Chargec;
                                %Recargas en kWh

```

```

Rstcycleci=(Nirsc*Tarretic*60*Pstic*1000)*NBbc*(1/3600000);

Rstcycleca=(Narsc*Tarretasc*60*Pstac*1000)*NBbc*(1/3600000);
Rstcyclec=Rstcycleci+Rstcycleca;
%Rdyncyclec==>Interviene simulink posicion y velocidad

Tentrebusc=Tcyclec/Nbc;
Nc1=fix(1102/Tcyclec); %Parte entera baja Numero de cycles
par bus. 1102 c'est le temps de service estimv© d'un bus, dans le cas
de maximum service;
if (1102/Tcyclec)-Nc1>0.5
    Ncyclec=Nc1+0.5;
    mei=1;
else
    Ncyclec=Nc1;
    mei=0;
end

%% Conditions du systv@me

if (Tarretac+Ms)<=Nda*Tentrebusc &&
(Tarretic+Ms)<=Ndi*Tentrebusc
    cond1c=1;
else
    cond1c=0;
end

%4 posibilidades de circuito dependiendo de la estaci√n
de
%origen y fin de la jornada.
%Para asegurar que la baterv#a se mantenga por encima del
umbral
%establecido del 10% de su capacidad cogemos la jornada de
%mximo consumo que puede tener un autobus dependiendo del
caso ciclos cerrados o cilo y medio al final

%CIRCUITS=table;
%CIRTCUITS=["int" "int"; "aer" "aer"; "int" "aer"; "aer"
"int"];

capbatinst=CAPbat;
cond2c=1;
if mei==1
    capbatinst=capbatinst-(Consascens);
    if capbatinst<0.1*CAPbat;
        cond2c=0;

    end
    for i=1:Nc1
        capbatinst=capbatinst+Rstcycleca-Consaeroaux;
        if capbatinst>640
            capbatinst=640;
        end
        capbatinst=capbatinst-(Consdescens);
        if capbatinst<0.1*CAPbat;
            cond2c=0;

        end
    end
    capbatinst=capbatinst+Rstcycleci-Consintermaux;

```

88

Eduardo Castaños Cortina

```

%%Valuable solutions:
%%
%tiledlayout(1,2)
% nexttile
Valuablesolutions=table2array(SCENval(:,14:15));

scen=length(Valuablesolutions(:,1));
costscen=Valuablesolutions(:,1);
tentrebusscen=Valuablesolutions(:,2);
fpareto=table;
fpareto= table(1,[0],[0]);
fpareto.Properties.VariableNames = {'Scenario', 'Cov/at',
'Tentrebus'};
PAR= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0]);
PAR.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni', 'Na', 'Buses', 'BonbinesB', 'Pi', 'Pa', 'Tarreti', 'Tarreta', 'cond1', 'c
ond2', 'cond3', 'val', 'Cov/at', 'Tentrebus'};
scenp=1;
minl=10^10;
%Optimisation Calcul Front de Pareto
for i=0:0.05:1
minl=10^10;
scenp=1;
for j=2:scen

    scenp=scenp+1;
    fcout=i*160000*tentrebusscen(j)+(1-i)*costscen(j);

    if fcout<minl
        minl=fcout;
        costscennew=costscen(j);
        tentrebusscennew=tentrebusscen(j);
        fparetovalnew={scenp,costscen(j),tentrebusscen(j)};
        sceneleg=scenp;

    end

end

fpareto=[fpareto; fparetovalnew];
PAR=[PAR; SCENval(sceneleg,:)];
end

Invaluablesolutions=table2array(SCENinval(:,14:15));
s1=scatter(Invaluablesolutions(:,1),Invaluablesolutions(:,2));
LineWidth = 0.6;
s1.MarkerEdgeColor = 'w';
s1.MarkerFaceColor = 'k';
%title('Scv@narios invalides');
hold on
s2=scatter(Valuablesolutions(:,1),Valuablesolutions(:,2));
LineWidth = 0.6;
s2.MarkerEdgeColor='b';
s2.MarkerFaceColor = 'c';

```



```
%title('Scv@narios valides');
hold on
% nexttile

%minvaluablesolutions=table2array(SCENvalmin1(:,14:15));
%s=scatter(minvaluablesolutions(:,1),minvaluablesolutions(:,2));
%LineWidth = 0.6;
%s.MarkerEdgeColor = 'g';
%s.MarkerFaceColor = 'g';
%hold on

fparetoarray=table2array(fpareto(:,2:3));
finpareto=length(fparetoarray(:,1));

s3=plot(fparetoarray(2:finpareto,1),fparetoarray(2:finpareto,2),'color
',[0 0.8 0.3] , 'linewidth',2);
%legend('Front de Pareto solutions valides');
hold on

s4=plot(fparetoarray(2:finpareto,1),fparetoarray(2:finpareto,2),'s','M
arkerSize',5, 'MarkerFaceColor','g') ;
LineWidth = 0.6;
s4.MarkerEdgeColor= [0 0.8 0.3];
s4.MarkerFaceColor = [0 0.8 0.3];
%title('Scv@narios valides');
%hold off
legend([s1 s2 s3], 'Scv@narios invalides', 'Scv@narios valides',
'Front de Pareto');
```

Anexo D. Función coste para el Caso 1.

```
function [CTOT,culo]=Cost_Function(Nirsc,Narsc, Nb, NBb, Pstic,
Pstac);

Ctotb=0;
Cplugin=0;
Csrbs=0;
Csarret=0;
Csarreti=0;
Csarreta=0;

%%Coût Autibus
Ctotb=Nb*750000; %EUR
%Nb*400000;

%%Coût Systèmes de Recharge:
%Coût Plug-In
Cplugin=(75600+52000)+(Nb-1)*63800;

%Partie Bus
Csrbs=Nb*NBb*35000; %Csb c'est le coût d'avoir le système de bobine
dans le bus;

%% Statique
%CBS dépend de la puissance Pst if... Pst=x CBS=y;Nirsc
%Le numero de bobines dans le sol de l'arrêt est le même que le
numero de
%bobines dans le bus
Csarreti=Nirsc*(52000+NBb*Pstic*600);
Csarreta=Narsc*(52000+NBb*Pstac*600);

Csarret=Csarreti+Csarreta;

%% Dinamica calculada a parte en la resolucion del algoritmo PSO
Binario

%% Total Cost
CTOT=Ctotb+Cplugin+Csrbs+Csarret;
culo=236;

end
```

*Anexo E. Código del algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)
Binario con la variación de la Universidad de La Plata. Caso 2.*

```
%En este caso no se trata de una función

%%
*****
**
%%
*****
**
%% ***
***
%% *** Algorithm "Convergent PSO"
***
%% ***
***
%%
*****
**
%%
*****
**
%
%

% clear all
% close
% clc

%rand('state',sum(100*clock));          % Random initialization
%rng(0,'twister')
%for i=1:2; % If we want to run it several times
rng('shuffle')
%%
*****
**
%% *** Algorithm parameters
%%
*****
*

% Article parameters
w = 1;          % Inertia factor 0.9
%Para muy grandes dimensiones se recomienda coeficientes pequeños.
%Para dimensiones grandes, un coeficiente c2 (de grupo) de valor
mediano
%(ej:1) y c1 pequeños
c1 = 0.25;      % Para muy grandes dimensiones se recomienda coeficientes
pequeños Trend coefficients 1.5
c2 = 0.25 ;     % 2.5
% los valores c1=0.3 y c2=0.6 funcionan adecuadamente
%(c1+c2<=4) supuestamente
wmax=1.2;
wmin=0.9;
```

```

npart = 1000;    % nb of particles
ndim=(length(Dist_time_matrix_interpl(:,1)))-1; %ndim = X;      %
problem dimension %30 en caso de que tramo=1000m al principio
ngene = 20;    % nb of generations
%%sc = 5;      % success coefficient
%%fc = 15;     % failure coefficient

% almacenbest=[]; % Inizializar al principio del dia (al abrir matlab)
% almacenbestsum=zeros(ndim,1); %Inizializar al principio del dia (al
abrir matlab)
% almacenbestval=[];
%
% SCENDyn=table;
% SCENDyn= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0]); % 11
componentes
% SCENDyn.Properties.VariableNames = {'disttramos',
'ndim','ngen','CTOTD','Carga/ciclo','posictram','tiempocarg/ci
clo','totaldistcarga','cond4','cond2'};
% %SCEND=[];
%%
*****
**
%% *** Algorithm initialization
%%
*****
**

%%rho_ini = 1;          % initial radius
%%nb_success = 0;       % number of success
%%nb_failure = 0;       % number of failure

pos = zeros(ndim, npart);    % particle positions
vit = zeros(ndim, npart);    % particle speeds
pbest = zeros(ndim, npart);  % particle personal best positions
val_pbest = zeros(1, npart); % particle personal best values
gtotbest = zeros(ndim, 1);    % global best known position
val_gtotbest = 0;             % global best known value
groupfriends=zeros(npart,1);
%%stock_rho = [rho_ini];     % Successive radius

stock_best = [];             % To store the best cost
stock_mean = [];             % To store the mean cost in the population

xmin = 0;    % Minimum variable value - to be adapted to
xmax = 1;    % Maximum variable value - the problem
%vmax = (xmax-xmin)/2;    % Maximum speed
%vmin=-vmax;
maxvit=0.5;%0.5;
minvit=-0.5;%0.5;
maxvit2=4;
minvit2=-4;

% Random initialization of positions and speeds

```

```
%pos = kron(ones(1, npart), xmin) + kron(ones(1, npart), (xmax-
xmin)).*rand(ndim,npart); %Suma de vector mas matriz, le suma el
vector a cada linea
pos=randi([0,1], ndim, npart);
pos_i=pos;
vit = -kron(ones(1, npart),maxvit) + 2*kron(ones(1,
npart), (maxvit)).*rand(ndim,npart);
vit2= -kron(ones(1, npart),maxvit2) + 2*kron(ones(1,
npart), (maxvit2)).*rand(ndim,npart);
pbest = pos;

%%
*****
**
%% *** Initialization
%%
*****
**
% Initialisation de val_best(:,i),gtotbest,val_gtotbest

%%rho_k=rho_ini;
%%CAMBIAR val_pbest=cost_function_pso(pbest);
%Inf;
%% Llamada a la cost_function
%cost_function_pso(gtotbest, Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp);

gtotbest=pbest(:,1);
stock_coord_best=gtotbest;
val_gtotbest=cost_function_pso(gtotbest, Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp);
best_pos_all_group=[];

ind_best=1;
ind_best_save=[ind_best];
for i=2:npart
    if cost_function_pso(pbest(:,i), Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp)<val_gtotbest
        val_gtotbest=cost_function_pso(pbest(:,i),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp);
        gtotbest=pbest(:,i);
    end
end
stock_best(1) = val_gtotbest;
stock_mean(1) = mean(stock_best) ;

%Initialization set of friend particles
l=0;
nb_partgrp=3;
if (npart/nb_partgrp-fix(npart/nb_partgrp))>0
    lmax=fix(npart/nb_partgrp);
else
    lmax=fix(npart/nb_partgrp)-1;
end
for l=0:lmax ;

    for m=1:npart;
        if m>(nb_partgrp*l) & m<=((l+1).*nb_partgrp);
```

```

        groupfriends(m)=(l+1);%primer grupo numerado con 1
    end
end
l=l+1; %el valor de l sigue la suma del for independiente a este
cambio
nbggroups=1;
val_best_all_group(1)=Inf;
best_pos_all_group(1:ndim,1)=zeros(ndim,1);
end

for m=1:(nbggroups);
    Ref=val_best_all_group(m);
    for t=1:npart
        if groupfriends(t)==m
            v=cost_function_pso(pbest(:,t),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp);
            if v<Ref;
                best_pos_all_group(1:ndim,m)=pbest(:,t);
                val_best_all_group(m)=v;
                Ref=v; %BIEN
            end
        end
    end
end

groupfriendbestpos=zeros(ndim,npart);

%%
*****
**
%% *** Optimization algorithm
%%
*****
**

for (nbiter = 1:ngene)

    % if(nb_success>sc)
    %     rho_k = 2*rho_k;
    %elseif(nb_failure>fc)
    %     rho_k = rho_k/2;
    %else
    %     rho_k = rho_k;
    %end
    %stock_rho = [stock_rho rho_k];

    w=wmax-((wmax-wmin)/ngene)*nbiter;
for m=1:npart

    gfriend=groupfriends(m);

    pos(:,m);
    vit(:,m);
    %rho_k;
    gfriend;

    % if(pos(:,m)==best_pos_all_group(:,gfriend))
        %vit(:,m) = w*vit(:,m) + (groupfriendbestpos(:,m)-

```

```

        %pos(:,m))+rho_k*(1-2*rand(ndim,1)); Para evitar
convergencia rv°pida
    %else
        %vit(:,m) = w*vit(:,m) + c1*rand(ndim,1).*(pbest(:,m)-
pos(:,m))+c2*rand(ndim,1).*(groupfriendbestpos(:,m)- pos(:,m));
    % end
    limit1low=0;
    limit1up=1;
    limit2low=0;
    limit2up=6;
    landa1=(limit1up-limit1low)/2;
    landa2=(limit2up-limit2low)/2;

    vit(:,m)=w*vit(:,m) + c1*rand(ndim,1).*(2*pbest(:,m)-
1)+c2*rand(ndim,1).*(2*groupfriendbestpos(:,m)-1);
    %vit(:,m) = w*vit(:,m) + c1*rand(ndim,1).*(pbest(:,m)-
pos(:,m))+c2*rand(ndim,1).*(groupfriendbestpos(:,m)- pos(:,m));

    for u=1:ndim
        if vit(u,m)>landa1
            vit(u,m)=landa1;
        else if vit(u,m)<=-landa1
            vit(u,m)=-landa1;
        else
            vit(u,m)=vit(u,m);
        end
    end
end
%m

%vit(:,m)=max(min(vit(:,m),maxvit),minvit);

vit2(:,m)=vit2(:,m)+vit(:,m);
for u=1:ndim
    if vit2(u,m)>landa2
        vit2(u,m)=landa2;
    else if vit2(u,m)<=-landa2
        vit2(u,m)=-landa2;
    else
        vit2(u,m)=vit2(u,m);
    end
end
end

%vit2(:,m)=max(min(vit2(:,m),maxvit2),minvit2);
%vit(:,m)=max(min(vit(:,m),vmax),vmin);

%% Función sigmoidal
%i refiere a la partícula y d a la dimensión
sig=zeros(ndim,npart);
for u=1:ndim
    sig_vit(u,m)=(1/(1+exp(-(vit2(u,m)))));
end
%% Posiciones normal
    %CAMBIAR
    %pos(:,m)=max(min(pos(:,m)+vit(:,m),xmax),xmin);

%% Posiciones en binario

```

```

for u=1:ndim

if randi([0 1])<sig_vit(u,m)
    pos(u,m)=1;
else
    pos(u,m)=0;
end
end
%pos(:,m)=max(min(pos(:,m),1),0);%quitar?

eval_pos=cost_function_pso(pos(:,m),Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp);
eval_bestpos= cost_function_pso(pbest(:,m),Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp);

%Mise √t jour des maximaux sur chaque particule
if eval_bestpos>eval_pos;
    eval_bestpos=eval_pos;
    pbest(:,m)=pos(:,m);
end

%Mise √t jour des maximaux globaux
if eval_bestpos<val_gtotbest;
    val_gtotbest=eval_bestpos;
    gtotbest=pbest(:,m);
    ind_best=m;
    ind_best_save=[ind_best_save ind_best];
end

end

%Associating to each group of friends the best position of the
particles of that
%group
for m=1:(nbggroups);
    Ref1=val_best_all_group(m);
    for t=1:npart
        if groupfriends(t)==m
            v=cost_function_pso(pbest(:,t),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp);
            if v<Ref1;
                best_pos_all_group(:,m)=pbest(:,t);
                val_best_all_group(m)=v;
                Ref1=v; %BIEN
            end
        end
    end
end

%Associating best position found by the friend particles of
particle m
%excluding itself
for m=1:npart;
    gfriend=groupfriends(m);
    Ref2=cost_function_pso(groupfriendbestpos(:,m),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp);
    for t=1:npart
        if groupfriends(t)==gfriend & not(m==t);

```



```

        if cost_function_pso(pbest(:,t),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp)<Ref2;
            groupfriendbestpos(:,m)= pbest(:,t);
            %Ref2=cost_function_pso(groupfriendbestpos(:,t));
%BIEN
            Ref2=cost_function_pso(groupfriendbestpos(:,m),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp);
        end
    end
end

%pos is actual pos of a particle
%eval_pos: evaluation in pos
%pbest:best position of a particle
%eval_bestpos:evaluation of pbest
%groupfriends(m): indicates to which group m belongs to, each
group
%contains nb_partgrp particles, intersection between group is
null, groups
%are gathered in orther 1-nb_partgrp, nb_partgrp-2*nb_partgrp,
...
%gfriend: groupfriends of actual m
%groupfriendbestpos: best position of the friend particles of p
,
%there are p groupfriendbestpos
%number of groups.
%nbgroup:number of groups.

stock_best(nbiter+1) = val_gtotbest;
stock_coord_best=[stock_coord_best gtotbest];
stock_mean(nbiter+1) = mean(stock_best);

%if(val_gtotbest<stock_best(nbiter));
%    nb_success = nb_success + 1;
%    nb_failure = 0;
% else if(val_gtotbest>=stock_best(nbiter))
%    nb_failure = nb_failure + 1;
%    nb_success = 0;
%    end
% end

end
gtotbest;
val_gtotbest;
[CTOTD, cargacycledyntot,posiciontramos, tcargaporciclo,
totaldistcargadyn, cond4, cond2,
SOCdesglose]=cost_function_pso(gtotbest, Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp);

%% Valores de gtotbest
% CTOTD
% cargacycledyntot
% posiciontramos
% tcargaporciclo
% totaldistcargadyn
% cond2

```

```
%%
*****
**
%% *** Results analysis
%%
*****
**

% almacenbest=[almacenbest gtotbest];
% almacenbestval=[almacenbestval val_gtotbest];
% almacenbestsum=almacenbestsum+gtotbest;
if length(posiciontramos(:,1))<2
    posiciontramos=[posiciontramos; [0 0]];
end
SCENDynnew={longitudtramo, npart, ndim, ngene, CTOTD, cargacycledyntot,
posiciontramos, tcargaporciclo, totaldistcargadyn, cond4, cond2};
SCENDyn=[SCENDyn; SCENDynnew];
%%
% figure()
% bar(1:length(almacenbestsum), almacenbestsum);
% bar(1:length(gtotbest), gtotbest);
%% SOC desglose
figure()
bar(SOCdesglose(:,3));
hold on
bar(SOCdesglose(:,2));
bar(SOCdesglose(:,1));
%%

figure(), hold on
result=stock_best(ngene+1)

plot(1:ngene+1, stock_best, '--')
plot(1:ngene+1, stock_mean)

%end
%

%%
% minval=10e8;
% bestofall=min(almacenbestval);
% for u=1:length(almacenbest(1,:))
%     actual=almacenbestval(u);
%     if actual<minval
%         minval=actual;
%         bestposofall=almacenbest(:,u);
%     end
% end
% if bestofall==minval
%     okbest=1;
% end
% [CTOTD, cargacycledyntot, posiciontramos, tcargaporciclo,
totaldistcargadyn, cond2]=cost_function_pso(bestposofall,
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp);
% CTOTD
```

```
% cargacycledyntot  
% posiciontramos  
% tcargaporciclo  
% totaldistcargadyn  
% cond2
```

Anexo F. Función de coste para la resolución de Caso 2 con el algoritmo PSO Binario.

```
function [CTOTD,cargacycledyntot,tramos, tcargaporciclo,
totaldistcargadyn,cond4, cond2, SOCdesglose]=cost_function_pso(tramos,
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp)

%Todas las variables estan definidas sea o no vºlido el caso. No
habrº
%error.
%Pasamos el consumo de baterº/a de julios a kWh y le aºñadimos el
270/200
%para cubrir casos de mºximo consumo
Sort_PBatt_matrix_comp(:,2)=Sort_PBatt_matrix_comp(:,2)*((1/3600000)*(
270/200));
%% Systeme
%tramos=gtotbest;
%Introduction des variables de logistique de la ligne
%Tas=[5:5:15]; %Temps arret aeroport en "salidas" minutes
Tas=[5]; %Pour tuning
Tal=Tas; %=[1:60]; % Temps arret aeroport en "llegadas"
%Ta=Tas+Tal+2.5; %minutos. 2.5 Trasbordo de Tas a Tal minutes
%Ti=[5:5:20]; % Temps arret intermodal Base Bilbao minutes
Ti=[5];%Pour tuning
Ms=1; %Temps de security entre chaque bus minutes
Tam=27; % Temps de "ascenso" moyen/estimº de Base Bilbao √t
l'aeroport en minutes
Tdm=24.77; % Temps de "descenso" moyen/estimº de l'aeroport √t la
Base de Bilbao
%Tcyclem=Tam+Tas+Tal+Tdm+Ti;%Temps du cycle (moyen/estimº)
Ndi=1; %Nombre d'arrets disponibles pour √t l'Intermodal;
Nda=2; %Nombre d'arrets disponibles √t l'Aeroport: "salidas" et
"llegadas";
%Tentreb=Frequence_Function();
Nbc=5; % Podemos modificar de 3 hasta 8;
Paux=2500;%*((1/3600000));%Wh/s
Tarretic=Ti(1);
Tarretasc=Tas(1);
Tarretalc=Tarretasc;
Tarretac=Tarretasc+Tarretalc+2.5;
Tcyclec=Tam+Tarretac+Tdm+Tarretic;
Consascensl=33.93*270/200;
    Consdescensl=31.33*270/200; %Descenso sin consumo de
sistemas auxiliares
    Consascensaux=Tam*60*Paux/3600000;
    Consaeroaux=Tarretac*60*Paux/3600000;
    Consdescensaux=Tdm*60*Paux/3600000;
    Consintermaux=Tarretic*60*Paux/3600000;
    Consdescens=Consascensl+Consdescensaux;
    Consascens=Consascensl+Consascensaux; %Descenso sin
consumo de sistemas auxiliares
    Pauxconsum=Tcyclec*60*Paux/3600000;
CONSMAXc=Consascensl+Consdescensl+Pauxconsum;
CONSallret=Consascens+Consdescens; %Aprºs l'entreprise, considerar
aller retour comme 1 cycle de plus (une allº est comme un trajet
bilbao-aºroport)
%Chargec;
Tentrebusc=Tcyclec/Nbc;
```

```

Nc1=fix(1102/Tcyclec); %Parte entera baja Numero de cycles
par bus. 1102 c'est le temps de service estim© d'un bus, dans le cas
de maximum service;
if (1102/Tcyclec)-Nc1>0.5
    Ncyclec=Nc1+0.5;
    mei=1;
else
    Ncyclec=Nc1;
    mei=0;
end

%Information sur le trajet/ligne
%CONSMAXc1=90.77; %88.06 segun simulink %Sin Pauxiliar% kWh 67,24 *
1.35=90,77; 1,15:77,32 ; 1.35=270/200;
% Consdescens=43.84;
% Consascens=46.93;
% Nc1=14;

%Introduction variables des buses
% Nb=[3:8]; %Nombre de bus
NBb=2; %Numero de Bobines par bus
CAPbat=640; %Capacity© de la batterie en energie kWh; 640

%%%Introduction variables Infrastructure de Recharge
%%Statique
Pst=0; %Plage de puissances du systv©me statique kW;
%Pst=[3.7 7.7 11 22]; %SAE J2954
%Psta;
%Psti;

%%Dynamique
%LongT= kilometros del trayecto;
%Dkm=[0:LongT]; %Debut localisation de recharge dynamique
%km=[0:(LongT-Dkm)]; %Kilometrage installv© de recharge
Pdyn=75;
Pdyn1=75*0.9;%%Rendimiento de 90% en la transmission. Plage de
puissances du systv©me dynamique kW
%Pdyn=Pdyn*1000*(1/3600000);
trammax=4;
ndimpos=length(tramos);
tramos=[];

SCEND=table;
SCEND= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0]);
SCEND.Properties.VariableNames =
{'Ni', 'Na', 'Buses', 'BonbinesB', 'Pi', 'Pa', 'Tarreti', 'Tarreta', 'cond1', '
cond2', 'cond3', 'cond4', 'val', 'Cov@t', 'Tentrebus'};
%El algoritmo se encarga de guardar el "punto" solucion y su coste

% Guardar cuanto se carga por tramo
cargatramosolodyn=[];

%% Condiciones
% Heredadas de la estv©tica

% %1. Condicion de no solapamiento: En el caso de dinv©mica siempre va
a ser

```

```
% %validada
% if (Tarretac+Ms)<=Nda*Tentrebusc && (Tarretic+Ms)<=Ndi*Tentrebusc
%         cond1=1;
%         else
%         cond1=0;
% end
cond1=1;
%4. Condicion de maximo numero de tramos
trm=0;
count=0;
tramos=[1 1];%[];% Por si no hay tramos;

for i=1:ndimpso
    if count==0 && tramos(i)==1
        trm=trm+1;
        count=1;
        tramos(trm,1)=i;
    end

    if count==1 && tramos(i)==0
        count=0;
        tramos(trm,2)=i;
    end

    if count==1 && i==ndimpso && tramos(i)==1 %por si llega hasta el
final el tramo
        tramos(trm,2)=(i+1);
    end

end

if trm>trammax
    cond4=0;
end
if trm<=trammax %No queremos m/ºs de 3 tramos
    cond4=1;
end

%3. Condicion de potencia m/ºxima de carga
% if Pstic*NBbc<=150 && Pstac*NBbc<=150 && Pdyn*NBbc*0.9<=150; %0.9
debido al rendimpoiento de transferencia
%         cond3=1;
%         else
%         cond3=0;
% end
%         %Todos los casos con 75kW
cond3=1;
%% Condicion de autonomia

%previa a c2.
% evitar estos calculos si el resto de condiciones no se cumplen

cond2=2;%Para saber que falla por 4.
ntrm=length(tramos(:,1));%trm;

%Recuento de carga
tcargaporciclo=0;
```

```
%Recuento de distancia:
totaldistcargadyn=0;

%Evoluciv≥n SOC
SOCdesglose=[];
%SOCdesglose1=[];
if cond1==1 && cond3==1 && cond4==1

SOC=CAPbat;

%Desarrollo de la condicion
casilla0=1;
casillau=casilla0;
ntrm=length(tramos(:,1));%trm;
niverter=0;
ninvertert=0;
intramo=0;
distram=0;
recharged=0;

%Ni siquiera despreciamos el consumo de los sistemas auxiliares en las
paradas de 5
%minutos

%Si el primer tramo es un tramo de carga hacemos excepci√n:
% if tramos(1,1)==1 && tramos(1,2)~=1
%     ntrm=ntrm+1;
% end

%% Condicion 2
cond2=1;

if mei==1

    recharged=0;
    SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
    SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
    SOC=SOC-(Consascens); %antes de llegar al circuito
    if SOC<0.1*CAPbat;
    cond2=0;
    end
    recharged=0;
    SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
    SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
for i=1:Nc1 %Ciclos una vez en el circuito

    if i==2
        SOCdesglose1=SOCdesglose;
    end
    casilla0=1;
    casillau=casilla0;
    if cond2==0
        break
    end
    tcargaporciclo=0;

    for t=1:(ntrm)
```

```
%para el caso en el que empiece con tramo/ un poco chapuza.

%   if trampos(1,1)==1 && trampos(1,2)~=1 && t>1
%   t=t-1;
%   end

casillau=Dist_time_matrix_interpl(trampos(t,1), 3);
%casilla0
%casillau
if casilla0==casillau
    consumobat=0; % Antes del primer tramo
else
    consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
end

SOC=SOC-consumobat-
Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
if SOC<0.1*CAPbat
    cond2=0;
    break;
end
casilla0=casillau;

casillau=Dist_time_matrix_interpl(trampos(t,2), 3); %Empezamos el
tramo

%   if distram>0
%       arriba=8;
%   end
%   if length(trampos(:,1))>1
%       arriba=9;
%   end

%   if distram>250
%       ninverter=distram/250;
%       if ninverter>fix(distram/250)
%           ninverter=ninverter+1;
%       end
%   else if distram>0 && distram<=250
%       ninverter=1;
%       ninvertertot=ninvertertot+ninverter;
%   end
%   end

if casilla0==casillau
    consumobat=0; % Antes del primer tramo
else
    consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
end

recharged=Pdyn1*NBb*1000*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,
1)-Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
```



```

    tcargaporciclo=tcargaporciclo+(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
    Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1))/60;
    consaux=(Paux*(1/3600000))*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
    Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    SOC=SOC-consumobat-consaux+recharged;

    if SOC>640
        cargasobranante=SOC-640;
        cargatramosolodyn(t)=recharged-cargasobranante;
        SOC=640;
    else
        cargatramosolodyn(t)=recharged;
    end
    SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
    SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];

    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end

    casilla0=casillau;
end

if casillau~=Dist_time_matrix_interpl(end,3)
    casillau=Dist_time_matrix_interpl(end, 3);
    if casilla0==casillau
        consumobat=0;
    else
        consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
        Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
    end
    SOC=SOC-consumobat-
    Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
    Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    recharged=0;
    SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
    SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];

    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end
    casilla0=casillau;

end
end

SOC=SOC-Consaeroaux;
SOC=SOC-(Consdescens);
recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
if SOC<0.1*CAPbat;
    cond2=0;
end

SOC=SOC-Consintermaux;

```

```

SOC=SOC-(Consascens);
recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
if SOC<0.1*CAPbat;
    cond2=0;
end

else

SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];

SOC=SOC-(Consdescens);

recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
for i=1:Ncl
    %     if i==2
    %         SOCdesglose1=SOCdesglose;
    %     end
    casilla0=1;
    casillau=casilla0;
    if cond2==0
        break
    end

    tcargaporciclo=0; %Cuantos tiempo esta cargando el bus en un
    ciclo. Cuidado: Solo se calculo bien en caso de que no se saturen los
    640kWh de la bateria

    for t=1:ntrm

        casillau=Dist_time_matrix_interpl(tramos(t,1), 3);
        %casilla0
        %casillau
        if casilla0==casillau
            consumobat=0;
        else
            consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
            Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
        end

        SOC=SOC-consumobat-
        Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
        Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
        recharged=0;
        SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
        SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];

        if SOC<0.1*CAPbat
            cond2=0;
            break;
        end

        casilla0=casillau;
        casillau=Dist_time_matrix_interpl(tramos(t,2), 3);
    end
end

```

```
%
%   if distram>250
%       ninverter=distram/250;
%       if ninverter>fix(distram/250)
%           ninverter=ninverter+1;
%       end
%       ninvertertota=ninvertertota+ninverter;
%
%   else if distram>0 && distram<=250
%       ninverter=1;
%       ninvertertota=ninvertertota+ninverter;
%   end
%   end
%   if casilla0==casillau
%       consumobat=0; % Antes del primer tramo
%   else
%       consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
%   end

recharged=Pdyn1*NBb*1000*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,
1)-Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
tcargaporciclo=tcargaporciclo+(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1))/60;
consaux=(Paux*(1/3600000))*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
SOC=SOC-consumobat-consaux+recharged;

if SOC>640
    cargasobranante=SOC-640;
    cargatramosolodyn(t)=recharged-cargasobranante;
    SOC=640;
else
    cargatramosolodyn(t)=recharged;
end
recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
if SOC<0.1*CAPbat
    cond2=0;
    break;
end

casilla0=casillau;
end
if casillau~=Dist_time_matrix_interpl(end,3)
    casillau=Dist_time_matrix_interpl(end, 3);
    if casilla0==casillau
        consumobat=0;
    else
        consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
    end
    SOC=SOC-consumobat-
Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    recharged=0;
    SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
    SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
end
```

```

    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end
    casilla0=casillau;

end
end

SOC=SOC-Consintermaux;
SOC=SOC-(Consascens);
recharged=0;
SOCdesgloseactuliz=[recharged SOC 640];
SOCdesglose=[SOCdesglose; SOCdesgloseactuliz];
if SOC<0.1*CAPbat;
    cond2=0;
end
end

%Deshacemos truco ntrm (Este apavto creo que era innecesario)
% if trampos(1,1)==1 && trampos(1,2)~=1
%     ntrm=ntrm-1;
% end
%% Finalizado el movimiento
if SOC>=0.1*CAPbat
    cond2=1;
end

else

    CTOTD=7e8;
end

%Desglose de SOC en 1 ciclo

%SOCdesglose=SOCdesglose1;

%Carga dinamica recibida por la bateria por cada ciclo de servicio
cargacycledyntot=0;
for i=1:length(cargatramosolodyn)
    cargacycledyntot=cargacycledyntot+cargatramosolodyn(i);
end

%Distancia total con sistema de carga
totaldistcargadyn=0;
for g=1:ntrm
    distram=Dist_time_matrix_interpl(trampos(g,2), 1) -
    Dist_time_matrix_interpl(trampos(g,1), 1);
    totaldistcargadyn=totaldistcargadyn+distram;
end

%% Cost
if cond1==1 && cond2==1 && cond3==1 && cond4==1

    Csr dyn=totaldistcargadyn/1000*(636000+Pd dyn*1000);
    %Csr dynotro=5000*ninvertert tot+60*totaldistcargadyn; no nos sirven
para

```

```
%potencias distintas
CTOTD=Csrdyn;
else
CTOTD=7e8;

end
end
%CTOTD

%devolver el numero de escenario tambien con sus propiedades para
tenerlo
%identificado

%
```

*Anexo G. Código de definición de la parte estática de los escenarios para el caso 3.
Llamada al algoritmo PSO Binario y resolución final de la optimización Multi-
Objetivos y calculo del frente de Pareto con las soluciones óptimas*

%Systeme

```
%%
%Introduction des variables de logistique de la ligne
%Tas=[5:5:15]; %Temps arret aeroport en "salidas" minlutes
Tas=[5:5:10];%5:10];%[5:5:20]; %Pour tunning
Tal=Tas; %=[1:60]; % Temps arret aeroport en "llegadas"
%Ta=Tas+Tal+2.5; %minlutos. 2.5 Trasbordo de Tas a Tal minlutes
%Ti=[5:5:20]; % Temps arret intermodal Base Bilbao minlutes
Ti=[5:5:10];%5:10];%[5:5:15];%Pour tunning
Ms=1; %Temps de security© entre chaque bus minlutes
Tam=27; % Temps de "ascenso" moyen/estim© de Base Bilbao √t
l'aeroport en minlutes
Tdm=24.77; % Temps de "descenso" moyen/estim© de l'aeroport √t la
Base de Bilbao
%Tcyclem=Tam+Tas+Tal+Tdm+Ti;%Temps du cycle (moyen/estim©)
Ndi=1; %Nombre d'arrets disponibles pour √t l'Intermodal;
Nda=2; %Nombre d'arrets disponibles √t l'Aeroport: "salidas" et
"llegadas";
%Tentreb=Frequence_Function();

%Information sur le trajet/ligne
%CONSMAXc1=88.101; %88.06 segun simulink %Sin Pauxiliar% kWh 67,24 *
1.35=90,77; 1,15:77,32 ; 1.35=270/200;

%Introduction variables des buses
Nb=[5:8]%:8]; %Nombre de bus
NBb=2; %Numero de Bobines par bus
CAPbat=640; %Capacity© de la batterie en energie kWh;

%%%%Introduction variables Infrastructure de Recharge
%%Statique
Nirs=[0 1];%[0 1]; %Nombre d'arrets disponibles pour √t l'Intermodal
pour recharge Statique;
Nars=[0 1 2];%[0 1 2];%Nombre d'arrets disponibles pour √t l'aeroport
pour recharge Statique;
%Nptot=Npirs+Npars;
%De momento las pongo iguales a NBb?
%NBpas=[1:NBb]; %Nombre de Bobines pour recharge dans chaque arret
%NBpal=[1:NBb];
%NBpi=[1:NBb];
Pst=[50 75]; %Plage de puissances du systv©me statique kW;
%Pst=[3.7 7.7 11 22]; %SAE J2954
%Psta;
%Psti;

%Dynamique
%LongT= kilometros del trayecto;
%Dkm=[0:LongT]; %Debut localisation de recharge dynamique
%km=[0:(LongT-Dkm)]; %Kilometrage installv© de recharge
Pdyn=75; %%Puissances du systv©me dynamique kW, travail uniquement
avec 75kW
```

```
SCENDynmxtot=[];

%%
%CONDITIONS/CONSTRAINTES SYSTvâME

%Logistique: Eviter solapement pour chaqie
%(Ta+Ms)<=Npa*Tentreb;

%Recharge/ Autonomie suffisante
%(CONSMAXc-Chargec)*Ncycle+CONSallret<=0.9*CAPbat;

%Puissance maximale (kW)
%Pst*NbB<=150

%% SCvâNARIOS PARCOUR
% We define the different cases depending on the following variables
%Nombre d'arrets disponibles pour v† l'Intermodal pour recharge
Statique;
v1=length(Nirs);
%Nombre d'arrets disponibles pour v† l'aeroporto pour recharge
Statique;
v2=length(Nars);
v3=length(Nb);
v4=length(NBb);
v5i=length(Pst);%Pst intermodal
v5a=length(Pst);%Pst aeroporto
v6=length(Ti);
v7=length(Tas);

%Variables de la parte dinamica
% ntrmdyn; %alamcena numero de tramos de carga dinv°mica en el ciclo
% tramdyn; %de trampos localizacion de los tramos. Su indice
% recargdyn; %recarga/ciclo por la parte dinamica
% totaldyndist; %distancia total con carga dinamica

%Table des scenarios
SCEN=table;
SCEN= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0], [0],[0],[0],[0],[0], [0], [0]);
%Hay 22 variables
SCEN.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov@t','Tentrebus',
'cond4','totaldistcargadyn','cargadyncyclectot','Cov@tdyn',
'Cov@tstat','posiciontramos1','posiciontramos2'};
SCENval=table;
SCENval= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0], [0],[0],[0],[0],[0], [0], [0]);
SCENval.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov@t','Tentrebus',
'cond4','totaldistcargadyn','cargadyncyclectot','Cov@tdyn',
'Cov@tstat','posiciontramos1','posiciontramos2'};

% SCENvalcharge=table;
```

```
% SCENvalcharge=
table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0], [0]);
% SCENvalcharge.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov@t','Tentrebus'};

SCENinval=table;
SCENinval=
table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0]);
SCENinval.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov@t','Tentrebus',
'cond4','totaldistcargadyn','cargadyncyclelectot','Cov@tdyn',
'Cov@tstat','posiciontramos1','posiciontramos2'};
SCENvalmin1=table;
SCENvalmin1=
table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0]);
SCENvalmin1.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov@t','Tentrebus',
'cond4','totaldistcargadyn','cargadyncyclelectot','Cov@tdyn',
'Cov@tstat','posiciontramos1','posiciontramos2'};
%%
SCENvalcharge=table;
SCENvalcharge=
table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0]);
SCENvalcharge.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov@t','Tentrebus',
'cond4','totaldistcargadyn','cargadyncyclelectot','Cov@tdyn',
'Cov@tstat','posiciontramos1','posiciontramos2'};
%%
numscen=1;
scencost=1;
%%Scv@narios definissant l'infrastructure et le cov@t d'investissement
for i=1:v1
    Nirsc=Nirs(i);
    for i=1:v2
        Narsc=Nars(i);
        %Nos centramos en los casos primero, (26/05/2021). Los for lo
haremos
        %al final
        for i=1:v3;
            Nbc=Nb(i);
            for i=1:v4
                NBbc=NBb(i);
                for i=1:v5i
                    Pstic=Pst(i);
                    for i=1:v5a
                        Pstac=Pst(i);
                        %Calcul du cov@t
                        CTOTc=Cost_Function(Nirsc,Narsc, Nbc, NBbc, Pstic, Pstac); %Solo
infraestructura estv@tica y autobuses

                        %numscen=numscen+1;
```



```
%SCENC={numscen, Nirsc,Narsc, Nbc, NBbc, Pstic, Pstac, Tarretic,
Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTc, Tentrebusc,cond4c,
CTOTD, CTOTAL};
minl=60;
SCENvalminlnew={scencost,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
scencost=scencost+1;
for i=1:v6
    Tarretic=Ti(i);
    for i=1:v7
        numscen=numscen+1;
        Tarretasc=Tas(i);
        Tarretalc=Tarretasc;
        Tarretac=Tarretasc+Tarretalc+2.5;
        Tcyclec=Tam+Tarretac+Tdm+Tarretic;
        %Consumos en kWh
        Consascensl=33.93*270/200;
        Consdescensl=31.33*270/200;
        Consascensaux=Tam*60*2500/3600000;
        Consaeroaux=Tarretac*60*2500/3600000;
        Consdescensaux=Tdm*60*2500/3600000;;
        Consintermaux=Tarretic*60*2500/3600000;
        Consdescens=Consdescensl+Consdescensaux;
        Consascens=Consascensl+Consascensaux;
        Pauxconsum=Tcyclec*60*2500/3600000;
        %AQUI VA A ESTAR EL ERROR (PAUXCONSUM)
        CONSMAXc=Consascens+Consdescens+Pauxconsum;
        CONSallret=Consascens+Consdescens;%Apr/@s l'entreprise,
considerer aller retour comme 1 cycle de plus (une all/@ est comme un
trajet bilbao-av@oport)
%Chargec;
        %Recargas en kWh

Rstcycleci=(Nirsc*Tarretic*60*Pstic*1000)*NBbc*(1/3600000);

Rstcycleca=(Narsc*Tarretasc*60*Pstac*1000)*NBbc*(1/3600000);
Rstcyclec=Rstcycleci+Rstcycleca;
%Rdyncyclec==>Interviene simulink posicion y velocidad

Tentrebusc=Tcyclec/Nbc;
Ncl=fix(1102/Tcyclec); %Parte entera baja Numero de cycles
par bus. 1102 c'est le temps de service estim/@ d'un bus, dans le cas
de maximum service;
if (1102/Tcyclec)-Ncl>0.5
    Ncyclec=Ncl+0.5
    mei=1;
else
    Ncyclec=Ncl
    mei=0;
end

%% Conditions du systv/@me

if (Tarretac+Ms)<=Nda*Tentrebusc &&
(Tarretic+Ms)<=Ndi*Tentrebusc
    cond1c=1;
else
    cond1c=0;
end

%Condicion "3"
```

```

if Pstic*NBbc<=150 && Pstac*NBbc<=150 && Pdyn*NBbc<=150;
    cond3c=1;
else
    cond3c=0;
end

% Condici√≥n "2" autonom√≥a: Mixta, entra en juego la carga
din√≥mica
%4 posibilidades de circuito dependiendo de la estaci√≥n
de
%origen y fin de la jornada.
%Para asegurar que la bater√≥a se mantenga por encima del
umbral
%establecido del 10% de su capacidad cogemos la jornada de
m√≥ximo consumo que puede tener un autobus dependiendo del
caso ciclos cerrados o cilo y medio al final

%CIRCUITS=table;
%CIRTCUITS=["int" "int"; "aer" "aer"; "int" "aer"; "aer"
"int"];
capbatinst=CAPbat;
cond2c=1;
%Envio a din√≥mica

if cond1c==1 && cond3c==1 %Enviamos al algortimo el
escenario est√≥tico para proceder a la resoluci√≥n mixta con los tramos
de carga din√≥mica
    %[CTOTD, gtotbest, valgtotbest, totaldistcargadynpso,
    %cargacyclectotpsol]=PSO_Binario_Tesina_COMPLET_MIXED(Tas,
    Ti, Ms, Nbc, NBcm, Nirscm, Narscm, Pstac, Pstic, Pdyn);

    [CTOTD, totaldistcargadyn, cargacyclectot, cond2c, cond4c,
    posiciontramos1, posiciontramos2,
    SCENdynmx]=PSO_Binario_Tesina_COMPLET_MIXED(Tarretasc, Tarretic, Ms,
    Nbc, NBbc, Nirsc, Narsc, Pstac, Pstic, Pdyn, Dist_time_matrix_interpl,
    Sort_PBatt_matrix_comp, longitudtramo );
    CTOTAL=CTOTc+CTOTD;
    %SCENdynmxtot=[SCENdynmxtot; SCENdynmx];

else %if cond1 or cond3 not satisfied
    cond2c=2;% Quiere decir no calculadas, no sabes su
valor
    cond4c=2; % Quiere decir no calculadas, no sabes su
valor
    valc=0;
    CTOTAL=CTOTc; %Escenario inicial est√≥tico no v√≥lido
no incluimos parte din√≥mica
    SCENinvalc={numscen, Nirsc, Narsc, Nbc, NBbc, Pstic,
    Pstac, Tarretic, Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTAL,
    Tentrebusc,cond4c,totaldistcargadyn, cargacyclectot, CTOTD, CTOTc,
    posiciontramos1, posiciontramos2};
    %No cambio el orden de las variables aunque quedase
m√≥s
    %ordenado porque los cv√≥lculos de la optimizaci√≥n de
Pareto
    %estan hecho con el orden anterior. Simplemente cambio
el
    %Coste est√≥tico por el TOTAL, para que el pareto se
base

```

```

    %en el escenario completo condinamico.
    SCENinval=[SCENinval; SCENinvalc];
end

%%
if cond1c==1 && cond2c==1 && cond3c==1 && cond4c==1
    valc=1;
    SCENvalc={numscen, Nirsc, Narsc, Nbc, NBbc, Pstic, Pstac,
    Tarretic, Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTAL,
    Tentrebusc,cond4c,totaldistcargadyn, cargacyclectot, CTOTD, CTOTc,
    posiciontramos1, posiciontramos2};
    SCENval=[SCENval; SCENvalc];
    %SCENHIBRID=[SCENvalc SCENdynmx(2:end,:)];
    %SCENdynmxtot=[SCENdynmxtot; SCENHIBRID];
    %SCENvalchargec contiene 22 variables
    SCENvalchargec= {numscen, Nirsc, Narsc, Nbc, NBbc, Pstic,
    Pstac, Tarretic, Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTAL,
    Tentrebusc,cond4c,totaldistcargadyn, cargacyclectot, CTOTD, CTOTc,
    posiciontramos1, posiciontramos2};
    SCENvalcharge=[SCENvalcharge; SCENvalchargec];

    if Tentrebusc<min1
        min1=Tentrebusc;
        min1pos=numscen;
        SCENvalmin1new={numscen, Nirsc, Narsc, Nbc, NBbc,
        Pstic, Pstac, Tarretic, Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTAL,
        Tentrebusc,cond4c,totaldistcargadyn, cargacyclectot, CTOTD, CTOTc,
        posiciontramos1, posiciontramos2};
    end
    else
        valc=0;
        SCENinvalc={numscen, Nirsc, Narsc, Nbc, NBbc, Pstic,
        Pstac, Tarretic, Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTAL,
        Tentrebusc,cond4c,totaldistcargadyn, cargacyclectot, CTOTD, CTOTc,
        posiciontramos1, posiciontramos2};
        SCENinval=[SCENinval; SCENinvalc];

    end

    SCENC={numscen, Nirsc, Narsc, Nbc, NBbc, Pstic, Pstac,
    Tarretic, Tarretac,cond1c, cond2c, cond3c, valc, CTOTAL,
    Tentrebusc,cond4c,totaldistcargadyn, cargacyclectot, CTOTD, CTOTc,
    posiciontramos1, posiciontramos2};

    SCEN=[SCEN; SCENC];

end
end
if min1<60
    SCENvalmin1=[SCENvalmin1; SCENvalmin1new]; %Luego estas no se
utilizan
end

end
end
end
end
end
end

```

```

end

%%Valuable solutions:
%%
%%tiledlayout(1,2)
% nexttile
Valuablesolutions=table2array(SCENval(:,14:15));

scen=length(Valuablesolutions(:,1));
costscen=Valuablesolutions(:,1);
tentrebusscen=Valuablesolutions(:,2);
fpareto=table;
fpareto= table(1,[0],[0]);
fpareto.Properties.VariableNames = {'Scenario', 'Cov@t',
'Tentrebus' };
PAR= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0]);
PAR.Properties.VariableNames = {'Scenario',
'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','c
ond2','cond3','val','Cov@t','Tentrebus','cond4','totaldistcargadyn',
'cargadyncyclelectot','Cov@tdyn','Cov@tstat','posiciontramos1',
'posiciontramos2'};
scenp=1;
minl=10^10;
%Optimisation Calcul Front de Pareto
for i=0:0.05:1
minl=10^10;
scenp=1;
for j=2:scen

scenp=scenp+1;
fcout=i*160000*tentrebusscen(j)+(1-i)*costscen(j);

if fcout<minl
minl=fcout;
costscennew=costscen(j);
tentrebusscennew=tentrebusscen(j);
fparetovalnew={scenp,costscen(j),tentrebusscen(j)};
sceneleg=scenp;

end

end

fpareto=[fpareto; fparetovalnew];
PAR=[PAR; SCENval(sceneleg,:)];
end
%% Plot of solutions

Invaluablesolutions=table2array(SCENinval(:,14:15));
s1=scatter(Invaluablesolutions(:,1),Invaluablesolutions(:,2));
LineWidth = 0.6;
s1.MarkerEdgeColor = 'w';
s1.MarkerFaceColor = 'k';
%title('Scv@narios invalides');
hold on
s2=scatter(Valuablesolutions(:,1),Valuablesolutions(:,2));

```

```
LineWidth = 0.6;
s2.MarkerEdgeColor='b';
s2.MarkerFaceColor = 'c';
%title('Scv@narios valides');
hold on
% nexttile

%minvaluablesolutions=table2array(SCENvalmin1(:,14:15));
%s=scatter(minvaluablesolutions(:,1),minvaluablesolutions(:,2));
%LineWidth = 0.6;
%s.MarkerEdgeColor = 'g';
%s.MarkerFaceColor = 'g';
%hold on

fparetoarray=table2array(fpareto(:,2:3));
finpareto=length(fparetoarray(:,1));

s3=plot(fparetoarray(2:finpareto,1),fparetoarray(2:finpareto,2),'color
',[0 0.8 0.3] , 'linewidth',2);
%legend('Front de Pareto solutions valides');
hold on

s4=plot(fparetoarray(2:finpareto,1),fparetoarray(2:finpareto,2),'s','M
arkerSize',5, 'MarkerFaceColor','g') ;
LineWidth = 0.6;
s4.MarkerEdgeColor= [0 0.8 0.3];
s4.MarkerFaceColor = [0 0.8 0.3];
%title('Scv@narios valides');
%hold off
legend([s1 s2 s3], 'Scv@narios invalides', 'Scv@narios valides',
'Front de Pareto');
```

Anexo H. Algoritmo por Optimización de Enjambre (PSO) Binario Caso 3. Recepción del escenario con código
Anexo 7. Y optimización de tramos de recarga dinámica con Función Coste de Anexo 9.

```
function [CTOTscen, totaldistcargadynpso, cargacyclectottpso, cond2,
cond4, posiciontramos1, posiciontramos2,
SCENDynmx]=PSO_Binario_Tesina_COMPLET_MIXED(Tas2, Ti2, Ms2, Nbc2,
NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2,
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, longitudtramo)

%%
*****
**
%%
*****
**
%% ***
***
%% *** Algorithm "Convergent PSO"
***
%% ***
***
%%
*****
**
%%
*****
**
%
%

% clear all
% close
% clc

% rand('state',sum(100*clock));          % Random initialization
rng('shuffle')
%almacen=0; Inizializar al principio del dia (al abrir matlab)
%almacenbestsum=0;Inizializar al principio del dia (al abrir matlab)
%%
*****
**
%% *** Algorithm parameters
%%
*****
**

%for i=1:10; % If we want to run it several times

% Article parameters
w = 1;          % Inertia factor 0.9
c1 = 0.5;       % Trend coefficients 1.9
c2 = 1;         % 2.1
%%(c1+c2<=4) supuestamente
wmax=1.2;
wmin=0.9;
```

```

npart = 100; % nb of particles
ndim=(length(Dist_time_matrix_interpl(:,1)))-1; % problem
dimension %30 en caso de que tramo=1000m al principio
ngene = 40; % nb of generations
%%sc = 5; % success coefficient
%%fc = 15; % failure coefficient

almacenbestmx=[]; % Inizializar al principio del dia (al abrir matlab)
almacenbestsummx=zeros(ndim,1); %Inizializar al principio del dia (al
abrir matlab)
almacenbestvalmx=[];

SCENDynmx=table;
SCENDynmx= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0]);
SCENDynmx.Properties.VariableNames = {'distttramos',
'npant', 'ndim', 'ngen', 'CTOTD', 'Carga/ciclo', 'posictram1', 'posictram2',
'tiempocarg/ciclo', 'totaldistcarga', 'cond4', 'cond2'};

%%
*****
**
%% *** Algorithm initialization
%%
*****
**
pos = zeros(ndim, npart); % particle positions
vit = zeros(ndim, npart); % particle speeds
pbest = zeros(ndim, npart); % particle personal best positions
val_pbest = zeros(1, npart); % particle personal best values
gtotbest = zeros(ndim, 1); % global best known position
val_gtotbest = 0; % global best known value
groupfriends=zeros(npart,1);
%%stock_rho = [rho_ini]; % Successive radius

stock_best = []; % To store the best cost
stock_mean = []; % To store the mean cost in the population

xmin = 0; % Minimum variable value - to be adapted to
xmax = 1; % Maximum variable value - the problem
%vmax = (xmax-xmin)/2; % Maximum speed
%vmin=-vmax;
maxvit=0.5;
minvit=-0.5;
maxvit2=4;
minvit2=-4;
% Random initialization of positions and speeds
%pos = kron(ones(1, npart), xmin) + kron(ones(1, npart), (xmax-
xmin)).*rand(ndim,npart); %Suma de vector mas matriz, le suma el
vector a cada linea
pos=randi([0,1], ndim, npart);
pos_i=pos;
vit = -kron(ones(1, npart), maxvit) + 2*kron(ones(1,
npart), (maxvit)).*rand(ndim,npart);
vit2= -kron(ones(1, npart), maxvit2) + 2*kron(ones(1,
npart), (maxvit2)).*rand(ndim,npart);
pbest = pos;

```

```
%% Constantes del sistema necesarias

CAPbat=640;
%%
*****
**
%% *** Initialization
%%
*****
**
% Initialisation de val_best(:,i),gtotbest,val_gtotbest

%%rho_k=rho_ini;
%%CAMBIAR val_pbest=cost_function_pso_MIXED(pbest);
%Inf;
% Llamada a la cost_function
%cost_function_pso_MIXED(gtotbest, Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2, Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2,
Pstac2, Pstic2, Pdyn2);

gtotbest=pbest(:,1);
stock_coord_best=gtotbest;
val_gtotbest=cost_function_pso_MIXED(gtotbest,
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2,
Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2);
best_pos_all_group=[];

ind_best=1;
ind_best_save=[ind_best];
for i=2:npart
    if cost_function_pso_MIXED(pbest(:,i), Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2, Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2,
Pstac2, Pstic2, Pdyn2)<val_gtotbest
        val_gtotbest=cost_function_pso_MIXED(pbest(:,i),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2,
Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2);
        gtotbest=pbest(:,i);
    end
end
stock_best(1) = val_gtotbest;
stock_mean(1) = mean(stock_best) ;

%Initialization set of friend particles
l=0;
nb_partgrp=5;
if (npart/nb_partgrp-fix(npart/nb_partgrp))>0
    lmax=fix(npart/nb_partgrp);
else
    lmax=fix(npart/nb_partgrp)-1;
end

for l=0:lmax ;

    for m=1:npart;
        if m>(nb_partgrp*l) & m<=((l+1).*nb_partgrp);
            groupfriends(m)=(l+1);%primer grupo numerado con 1
        end
    end
end
```



```

    l=l+1; %el valor de l sigue la suma del for independiente a este
cambio
    nbgroups=l;
    val_best_all_group(l)=Inf;
    best_pos_all_group(:,l)=zeros(ndim,1);
end

for m=1:(nbgroups);
    Ref=val_best_all_group(m);
    for t=1:npart
        if groupfriends(t)==m
            v=cost_function_pso_MIXED(pbest(:,t),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2,
Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2);
            if v<Ref;
                best_pos_all_group(:,m)=pbest(:,t);
                val_best_all_group(m)=v;
                Ref=v; %BIEN
            end
        end
    end
end

groupfriendbestpos=zeros(ndim,npart);

%%
*****
**
%% *** Optimization algorithm
%%
*****
**

for (nbiter = 1:ngene)

    % if(nb_success>sc)
    %     rho_k = 2*rho_k;
    %elseif(nb_failure>fc)
    %     rho_k = rho_k/2;
    %else
    %     rho_k = rho_k;
    %end
    %stock_rho = [stock_rho rho_k];

    w=wmax-((wmax-wmin)/ngene)*nbiter;
for m=1:npart

    gfriend=groupfriends(m);

    pos(:,m);
    vit(:,m);
    %rho_k;
    gfriend;

    % if(pos(:,m)==best_pos_all_group(:,gfriend))
        %vit(:,m) = w*vit(:,m) + (groupfriendbestpos(:,m)-
        %pos(:,m))+rho_k*(1-2*rand(ndim,1)); Para evitar
convergencia rvpida
    %else

```

```

        %vit(:,m) = w*vit(:,m) + c1*rand(ndim,1).*(pbest(:,m)-
pos(:,m))+c2*rand(ndim,1).*(groupfriendbestpos(:,m)- pos(:,m));
    % end
    limit1low=0;
    limit1up=1;
    limit2low=0;
    limit2up=6;
    landa1=(limit1up-limit1low)/2;
    landa2=(limit2up-limit2low)/2;

    %Mv@todo propuesto estudio Tesina
    vit(:,m)=w*vit(:,m) + c1*rand(ndim,1).*(2*pbest(:,m)-
1)+c2*rand(ndim,1).*(2*groupfriendbestpos(:,m)-1);

    %Mv@todo original
    %vit(:,m) = w*vit(:,m) + c1*rand(ndim,1).*(pbest(:,m)-
pos(:,m))+c2*rand(ndim,1).*(groupfriendbestpos(:,m)- pos(:,m));

maxvit=0.5;
minvit=-0.5;
maxvit2=3;
minvit2=-3;

    for u=1:ndim
        if vit(u,m)>landa1
            vit(u,m)=landa1;
        else if vit(u,m)<=-landa1
            vit(u,m)=-landa1;
        else
            vit(u,m)=vit(u,m);
        end
    end
end
%m

%vit(:,m)=max(min(vit(:,m),maxvit),minvit);

vit2(:,m)=vit2(:,m)+vit(:,m);
    for u=1:ndim
        if vit2(u,m)>landa2
            vit2(u,m)=landa2;
        else if vit2(u,m)<=-landa2
            vit2(u,m)=-landa2;
        else
            vit2(u,m)=vit2(u,m);
        end
    end
end

%vit2(:,m)=max(min(vit2(:,m),maxvit2),minvit2);

%vit(:,m)=max(min(vit(:,m),vmax),vmin);

%% Función sigmoide
%i refiere a la partícula y d a la dimensión

```

```

sig=zeros(ndim,npart);
for u=1:ndim
sig_vit(u,m)=(1/(1+exp(-(vit2(u,m)))));
end
%% Posiciones normal
    %CAMBIAR
    %pos(:,m)=max(min(pos(:,m)+vit(:,m),xmax),xmin);

%% Posiciones en binario
for u=1:ndim

if randi([0 1])<sig_vit(u,m)
    pos(u,m)=1;
else
    pos(u,m)=0;
end
end
pos(:,m)=max(min(pos(:,m),1),0);%quitar?

eval_pos=cost_function_pso_MIXED(pos(:,m),Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2, Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2,
Pstac2, Pstic2, Pdyn2);
eval_bestpos=
cost_function_pso_MIXED(pbest(:,m),Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2, Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2,
Pstac2, Pstic2, Pdyn2);

    %Mise √t jour des maximaux sur chaque particule
    if eval_bestpos>eval_pos;
        eval_bestpos=eval_pos;
        pbest(:,m)=pos(:,m);
    end

    %Mise √t jour des maximaux globaux
    if eval_bestpos<val_gtotbest;
        val_gtotbest=eval_bestpos;
        gtotbest=pbest(:,m);
        ind_best=m;
        ind_best_save=[ind_best_save ind_best];
    end

end

    %Associating to each group of friends the best position of the
particles of that
    %group
    for m=1:(nbggroups);
        Refl=val_best_all_group(m);
        for t=1:npart
            if groupfriends(t)==m
                v=cost_function_pso_MIXED(pbest(:,t),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2,
Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2);
                if v<Refl;
                    best_pos_all_group(:,m)=pbest(:,t);
                    val_best_all_group(m)=v;
                    Refl=v; %BIEN
                end
            end
        end
    end

```

```

end
end
end

%Associating best position found by the friend particles of
particle m
%excluding itself
for m=1:npart;
    gfriend=groupfriends(m);
    Ref2=cost_function_pso_MIXED(groupfriendbestpos(:,m),
    Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2,
    Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2);
    for t=1:npart
        if groupfriends(t)==gfriend & not(m==t);
            if cost_function_pso_MIXED(pbest(:,t),
            Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2,
            Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2)<Ref2;
                groupfriendbestpos(:,m)= pbest(:,t);

%Ref2=cost_function_pso_MIXED(groupfriendbestpos(:,t)); %BIEN

Ref2=cost_function_pso_MIXED(groupfriendbestpos(:,m),
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2,
Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2, Pstac2, Pstic2, Pdyn2);
            end
        end
    end
end

%pos is actual pos of a particle
%eval_pos: evaluation in pos
%pbest:best position of a particle
%eval_bestpos:evaluation of pbest
%groupfriends(m): indicates to which group m belongs to, each
group
%contains nb_partgrp particles, intersection between group is
null, groups
%are gathered in orther 1-nb_partgrp, nb_partgrp-2*nb_partgrp,
...
%gfriend: groupfriends of actual m
%groupfriendbestpos: best position of the friend particles of p
,
%there are p groupfriendbestpos
%number of groups.
%nbgroup:number of groups.

stock_best(nbiter+1) = val_gtotbest;
stock_coord_best=[stock_coord_best gtotbest];
stock_mean(nbiter+1) = mean(stock_best);

end
gtotbest;
val_gtotbest;
[CTOTD, totaldistcargadynpso, cargacyclectotpsso, CTOTscen,
posiciontramos1, posiciontramos2 , tcargaporciclo, cond4,
cond2]=cost_function_pso_MIXED(gtotbest, Dist_time_matrix_interpl,
Sort_PBatt_matrix_comp, Tas2, Ti2, Ms2, Nbc2, NBcm2, Nirscm2, Narscm2,
Pstac2, Pstic2, Pdyn2);

```

```
%[CTOTD, cargacycledyntot,posiciontramos, tcargaporciclo,
totaldistcargadyn, cond4, cond2];
%%
*****
**
%% *** Results analysis
%%
*****
**

%longitudtramo=5000; %actualizar cuando se cambien en PuissEnerg, ya
que aqui a la funcion no llega
almacenbestmx=[almacenbestmx gtotbest];
almacenbestvalmx=[almacenbestvalmx val_gtotbest];
almacenbestsummx=almacenbestsummx+gtotbest;
if length(posiciontramos1(:,1)<2)
    posiciontramos1=[posiciontramos1; [0 0]];
end
if length(posiciontramos2(:,1)<2)
    posiciontramos2=[posiciontramos2; [0 0]];
end
SCENdynnewmx={longitudtramo,
npart,ndim,ngene,CTOTD,cargacyclectotps,posiciontramos1,
posiciontramos2,tcargaporciclo,totaldistcargadynpso,cond4,cond2};
SCENdynmx=[SCENdynmx; SCENdynnewmx];

% figure()
% bar(1:length(almacenbestsummx), almacenbestsummx)
% bar(1:length(gtotbest), gtotbest);
% %
%
% figure(), hold on
% result=stock_best(ngene+1)
%
% plot(1:ngene+1,stock_best,'--')
% plot(1:ngene+1,stock_mean)
%end
end
```

Anexo I. Función de Coste del Caso 3. Validación de casos y calculo del coste para la optimización de tramos con el algoritmo PSO Binario.

Responsable de la validación de la condición de autonomía con las infraestructuras de recarga estáticas y dinámicas.

```
function [CTOTD, totaldistcargadyn, cargacyclectot,CTOTscen, trampos1,
trampos2, tcargaporciclo, cond4, cond2]=cost_function_pso(tramos,
Dist_time_matrix_interpl, Sort_PBatt_matrix_comp, Tas, Ti, Ms, Nbc,
NBbcm, Nirscm, Narscm, Pstac, Pstic, Pdyn1)

%Pasamos el consumo de baterí#a de julios a kWh y le a=ñadimos el
270/200
%para cubrir casos de mºximo consumo
Sort_PBatt_matrix_comp(:,2)=Sort_PBatt_matrix_comp(:,2)*((1/3600000)*(
270/200));
%% Systeme

%% Las variables van a venir definidas desde
"SistematVariables2pruebas" a traves del algoritmo PSO_Binario_Tesina
% %tramos=gtotbest;
% %Introduction des variables de logistique de la ligne

Tam=27; % Temps de "ascenso" moyen/estim© de Base Bilbao √t
l'aeroport en minutes
Tdm=24.77; % Temps de "descenso" moyen/estim© de l'aeroport √t la
Base de Bilbao
% %Tcyclec=Tam+Tas+Tal+Tdm+Ti;%Temps du cycle (moyen/estim©)
Ndi=1; %Nombre d'arrets disponibles pour √t l'Intermodal;
Nda=2; %Nombre d'arrets disponibles √t l'Aeroport: "salidas" et
"llegadas";
CAPbat=640;
meddist=1.51628e4;

Paux=2500;%(1/3600000));%Wh/s
Tarretic=Ti;
Tarretasc=Tas;
Tarretalc=Tarretasc;
Tarretac=Tarretasc+Tarretalc+2.5;
Tcyclec=Tam+Tarretac+Tdm+Tarretic;
Consascens1=33.93*270/200;
Consdescens1=31.33*270/200;
Consascensaux=Tam*60*Paux/3600000;
Consaeroaux=Tarretac*60*Paux/3600000;
Consdescensaux=Tdm*60*Paux/3600000;;
Consintermaux=Tarretic*60*Paux/3600000;
Consdescens=Consdescens1+Consdescensaux;
Consascens=Consascens1+Consascensaux;
Pauxconsum=Tcyclec*60*Paux/3600000;
CONSMAXc=Consascens+Consdescens+Pauxconsum;
CONSallret=Consascens+Consdescens;%Aprv@s l'entreprise, considerer
aller retour comme 1 cycle de plus (une ally© est comme un trajet
bilbao-av©roport)
%Chargec;
Rstcycleci=(Nirscm*Tarretic*60*Pstic*1000)*NBbcm*(1/3600000);
Rstcycleca=(Narscm*Tarretasc*60*Pstac*1000)*NBbcm*(1/3600000);
Rstcyclec=Rstcycleci+Rstcycleca;
Tentrebusc=Tcyclec/Nbc;
```

```

Nc1=fix(1102/Tcyclec); %Parte entera baja Numero de cycles
par bus. 1102 c'est le temps de service estim© d'un bus, dans le cas
de maximum service;
    if (1102/Tcyclec)-Nc1>0.5
        Ncyclec=Nc1+0.5;
        mei=1;
    else
        Ncyclec=Nc1;
        mei=0;
    end

%Information sur le trajet/ligne
%CONSMAXc1=90.77; %88.06 segun simulink %Sin Pauxiliar% kWh 67,24 *
1.35=90,77; 1,15:77,32 ; 1.35=270/200;
% Consdescens=43.84;
% Consascens=46.93;
% Nc1=14;

%%%Introduction variables Infrastructure de Recharge
%%Statique
Pst=0; %Plage de puissances du systv@me statique kW;
%Pst=[3.7 7.7 11 22]; %SAE J2954
%Psta;
%Psti;

%%Dynamique
%LongT= kilometros del trayecto;
Pdyn=Pdyn1*0.9;%%Rendimiento de 90% en la transmision. Plage de
puissances du systv@me dynamique kW
%Pdyn=Pdyn*1000*(1/3600000);
trammax=4;
ndimpso=length(tramos);
tramos=[];

%Utilidad?
SCEND=table;
SCEND= table(1,[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],[0],
[0]);
SCEND.Properties.VariableNames =
{'Ni','Na','Buses','BonbinesB','Pi','Pa','Tarreti','Tarreta','cond1','
cond2','cond3','cond4','val','Cov@t','Tentrebus'};

% %El algoritmo se encarga de guardar el "punto" solucion y su coste

% Guardar cuanto se carga por tramo
cargatramo1=[];
cargatramo2=[];

%% Condiciones
% Heredadas de la estv°tica

% %1. Condicion de no solapamiento: En el caso de dinv°mica siempre va
a ser
% %validada
% if (Tarretac+Ms)<=Nda*Tentrebusc && (Tarretic+Ms)<=Ndi*Tentrebusc
%         cond1=1;
%     else
%         cond1=0;

```

```
% end
cond1=1;
%4. Condicion de maximo numero de tramos
trm=0;
count=0;
tramos=[1 1];%[];% Por si no hay tramos;

for i=1:ndimpso
    if count==0 && tramos(i)==1
        trm=trm+1;
        count=1;
        tramos(trm,1)=i;
    end

    if count==1 && tramos(i)==0
        count=0;
        tramos(trm,2)=i;
    end

    if count==1 && i==ndimpso && tramos(i)==1 %por si llega hasta el
final el tramo
        tramos(trm,2)=(i+1);

    end

end
if trm>trammax
    cond4=0;

    end
if trm<=trammax %No queremos m/ºs de 3 tramos
    cond4=1;
end

cond3=1; %Potencia ya viene validad de el escenario est/ºtico
%% Condicion de autonomia

%previa a c2.
% evitar estos calculos si el resto de condiciones no se cumplen

cond2=0;
ntrm=length(tramos(:,1));%trm;

%Recuento de carga
tcargaporciclo=0; %Cuanto tiempo esta cargando el bus en un ciclo.
Cuidado: Solo se calculo bien en caso de que no se saturen los 640kWh
de la bateria

%Recuento de distancia
totaldistcargadyn=0;
Csr dyn=0;
ntrm1=0;
ntrm2=0;
if cond1==1 && cond3==1 && cond4==1
```



```
SOC=CAPbat;

%Desarrollo de la condicion
casilla0=1;
casillau=casilla0;
ntrm=length(tramos(:,1));%trm;
niverter=0;
ninvertert=0;
intramo=0;
distramo=0;

%Dividimos tramos en subida y en bajada
tramos1=tramos;
tramos2=tramos;
%posmeddist;

%Detectar tramo del medio
for o=1:length(Dist_time_matrix_interpl(:,1))
    if Dist_time_matrix_interpl(o,1)==meddist
        posmeddist=o;
    end
end
t2=[];
t1=[];
for p=1:ntrm
    if Dist_time_matrix_interpl(tramos(p,1), 1)<1.51628e4 &&
Dist_time_matrix_interpl(tramos(p,2), 1)>1.51628e4
        tramos1(p,2)=posmeddist; %posicion donde empieza el segundo tramo
y donde acaba el primero
        tramos2(p,1)=posmeddist;

        else if (Dist_time_matrix_interpl(tramos(p,1), 1)<1.51628e4) &&
(Dist_time_matrix_interpl(tramos(p,2), 1)<=1.51628e4)
            t2=[t2 p];
            %tramos2(p,:)=[]; %tramo en la subida del ciclo

            else if Dist_time_matrix_interpl(tramos(p,1), 1)>=1.51628e4 &&
Dist_time_matrix_interpl(tramos(p,2), 1)>1.51628e4
                t1=[t1 p];
                %tramos1(p,:)=[]; %tramo en la bajada del ciclo
            end
        end
    end
end
tramos2(t2(1:end),:)=[];
tramos1(t1(1:end),:)=[];

if length(tramos1(:,1))==0
    tramos1=[1 1];
end
if length(tramos2(:,1))==0 %Para evitar errores introducimos tramo de
0 metros (nulo)
    tramos2=[1 1];
end

ntrm1=length(tramos1(:,1));
```

```
ntrm2=length(tramos2(:,1));
ntrm=ntrm1+ntrm2;

%Ni siquiera despreciamos el consumo de los sistemas auxiliares en las
paradas de 5
%minutos

%% Condicion 2 Hacemos el circuito completo original
cond2=1;

SOC=SOC-(Consdscens); %antes de llegar al circuito (en la
intermodal)
if SOC<0.1*CAPbat;
cond2=0;
end

%If para no superar la carga mxima de la bateria. No cargar en dicho
caso.
% if SOC>640
% SOC=640
% end

for i=1:Nc1 %Ciclos una vez en el circuito

casilla0=1;
casillau=casilla0;
if cond2==0
break
end

%En la parada, dentro del ciclo.
SOC=SOC+Rstcycleci-Consintermaux;
if SOC>640
SOC=640;
end

%RAntes de cada ciclo a 0
tcargaporciclo=0;
totaldistcargadyn=0;

for t=1:(ntrm1)
%para el caso en el que empiece con tramo/ un poco chapuza.
% if tramos1(1,1)==1 && tramos1(1,2)~=1 && t>1
% t=t-1;
%
% end

casillau=Dist_time_matrix_interpl(tramos1(t,1), 3);
%casilla0
%casillau
if casilla0==casillau
consumobat=0; % Antes del primer tramo
else
consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
```

```

end

SOC=SOC-consumobat-
Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
if SOC<0.1*CAPbat
    cond2=0;
    break;
end
casilla0=casillau;

casillau=Dist_time_matrix_interpl(trampos1(t,2), 3);

if casilla0==casillau
    consumobat=0; % Antes del primer tramo
else
    consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
end

recharged=Pdyn*2*1000*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
tcargaporciclo=tcargaporciclo+(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1))/60;
consaux=(Paux*(1/3600000))*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
SOC=SOC-consumobat-consaux+recharged;
if SOC>640
    cargasobranter=SOC-640;
    cargatramo1(t)=recharged-cargasobranter;
    SOC=640;
else
    cargatramo1(t)=recharged;
end

if SOC<0.1*CAPbat
    cond2=0;
    break;
end
casilla0=casillau;
end

if casillau~=Dist_time_matrix_interpl(posmeddist,3)
    casillau=Dist_time_matrix_interpl(posmeddist, 3);
    if casilla0==casillau
        consumobat=0;
    else
        consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
    end
    SOC=SOC-consumobat-
Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));

    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end
end

```

```
casilla0=casillau;

% Parada en el aeropuerto
SOC=SOC+Rstcycleca-Consaeroaux;
if SOC>640
    SOC=640;
end
% Segunda parte del tramo, bajada

for t=1:(ntrm2)

    casillau=Dist_time_matrix_interpl(tramos2(t,1), 3);
    %casilla0
    %casillau
    if casilla0==casillau
        consumobat=0; % Antes del primer tramo
    else
        consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
    end

    SOC=SOC-consumobat-
Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end
    casilla0=casillau;

    casillau=Dist_time_matrix_interpl(tramos2(t,2), 3);

    if casilla0==casillau
        consumobat=0; % Antes del primer tramo
    else
        consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
    end

    recharged=Pdyn*2*1000*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    tcargaporciclo=tcargaporciclo+(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1))/60;
    consaux=(Paux*(1/3600000))*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    SOC=SOC-consumobat-consaux+recharged;

    if SOC>640
        cargasobranante=SOC-640;
        cargatramo2(t)=recharged-cargasobranante;
        SOC=640;
    else
        cargatramo2(t)=recharged;
    end

    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end
end
```

```

end

casilla0=casillau;
end

if casillau~=Dist_time_matrix_interpl(posmeddist,3)
    casillau=Dist_time_matrix_interpl(posmeddist, 3);
    if casilla0==casillau
        consumobat=0;
    else
        consumobat=trapz(Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,1),
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0:casillau,2));
    end
    SOC=SOC-consumobat-
Paux*(1/3600000)*(Sort_PBatt_matrix_comp(casillau,1)-
Sort_PBatt_matrix_comp(casilla0,1));
    if SOC<0.1*CAPbat
        cond2=0;
        break;
    end
    casilla0=casillau;

end
end
end

SOC=SOC+Rstcycleci-Consintermaux;
if SOC>640
    SOC=640;
end

SOC=SOC-(Consascens);

if SOC<0.1*CAPbat
    cond2=0;
end

%Deshacemos truco ntrm
% if trampos1(1,1)==1 && trampos1(1,2)~=1
%     ntrm1=ntrm1-1;
% end

%% Finalizado el movimiento
if SOC>=0.1*CAPbat
    cond2=1;
end

else

    CTOTD=7e8;

    CTOTscen=Csr dyn;
    cond2=2; %Condicion2 =2 en caso de no evaluaci√n. Necesitamos
ahorrar tiempo de cv°lculo.
end

```

```
%Formulaci3n b3sica de la condici3n
cargatramoltot=0;
cargatramo2tot=0;
for i=1:length(cargatramo1)
    cargatramoltot=cargatramoltot+cargatramo1(i);
end
for i=1:length(cargatramo2)
    cargatramo2tot=cargatramo2tot+cargatramo2(i);
end
cargacyclectot=cargatramoltot+cargatramo2tot;

% Calculamos la distancia de instalaci3n de recarga y su coste
for g=1:ntrm1
    distram=Dist_time_matrix_interpl(trampos1(g,2), 1) -
Dist_time_matrix_interpl(trampos1(g,1), 1);
    totaldistcargadyn=totaldistcargadyn+distram;
end
for g=1:ntrm2
    distram=Dist_time_matrix_interpl(trampos2(g,2), 1) -
Dist_time_matrix_interpl(trampos2(g,1), 1);
    totaldistcargadyn=totaldistcargadyn+distram;
end
Csrdyn=(totaldistcargadyn/1000)*(636000+Pdyn1*1000);

%% Esta es la condici3n 2 simplificada
% if (CONSMAXc-Rstcyclec-cargacyclectot)*Nc1+CONSallret<=0.9*CAPbat;
%     cond2=1;
% else
%     cond2=0;
% end
% %

%% Cost
if cond1==1 && cond2==1 && cond3==1 && cond4==1

    %Csrdynotro=5000*ninvertertrot+60*totaldistcargadyn; no nos sirven
para
    %potencias distintas
    CTOTD=Csrdyn; %Valor para el algoritmo
    CTOTscen=Csrdyn; %Valor para la ilustraci3n
else
    CTOTD=7e8; %Valor para el algoritmo
    CTOTscen=Csrdyn; %Valor para la ilustraci3n

end
%end
%CTOTD

%devolver el numero de escenario tambien con sus propiedades para
tenerlo
%identificado

end
```