



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Guies per a l'electrificació d'una línia d'autobús

Treball realitzat per:

Sara González Pagès

Dirigit per:

Miquel Estrada Romeu

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 30 de juny de 2020

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Resum

L'augment de la població que viu o treballa en zones urbanes en els últims anys i la major consciència ambiental han propiciat que la millora de la qualitat de vida a les ciutats sigui un dels principals objectius dels municipis. Especialment pel que fa la millora de la qualitat de l'aire i a la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

La transformació de la mobilitat urbana és de les solucions que més pot contribuir a la millora de la qualitat de vida dels ciutadans. Algunes accions que ja s'estan aplicant en moltes ciutats inclouen mesures per a la reducció del trànsit dins de les ciutats, o fomentar l'ús del transport públic, entre d'altres.

Així mateix, moltes ciutats estan començant a transformar les xarxes d'autobús perquè siguin servides amb vehicles elèctrics, reduint les emissions de gasos contaminants, de gasos d'efecte hivernacle i altres externalitats com el soroll.

Tot i això, la transformació de línies cap a models elèctrics implica canvis en l'operativa segons el mètode de recàrrega que s'utilitzi. Analitzar aquests canvis per trobar l'escenari que minimitzi els costos requereix estudis detallats per a cada situació.

En aquest treball es desenvolupen unes guies d'electrificació de línies d'autobús en les que es donen recomanacions sobre l'estratègia de recàrrega que cal implantar per a cada tipologia de línies per tal de minimitzar els costos totals de la línia.

L'objectiu d'aquestes guies és dotar als operadors o als municipis d'una eina que, amb molt poques dades d'entrada, caracteritzi la línia i doni una primera aproximació de la manera més eficient d'operar-la tenint en compte els costos de l'operador i també les externalitats. D'aquesta manera, es poden obtenir alguns resultats sense la necessitat de realitzar estudis complexos sobre el funcionament i els costos de cada línia.

Resumen

El aumento de la población que vive o trabaja en zonas urbanas en los últimos años y la mayor conciencia ambiental, han proporcionado que la mejora de la calidad de vida en las ciudades sea uno de los principales objetivos de los municipios. Especialmente en cuanto a la mejora de la calidad del aire y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La transformación de la movilidad urbana es de las soluciones que más puede contribuir a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. Algunas acciones que ya se están aplicando en muchas ciudades incluyen medidas para la reducción del tráfico dentro de las ciudades, o fomentar el uso del transporte público, entre otras.

Así mismo, muchas ciudades están empezando a transformar las redes de autobús para que se sirvan con vehículos eléctricos, reduciendo las emisiones de gases contaminantes, de gases de efecto invernadero y otras externalidades como el ruido.

Aun así, la transformación de líneas hacia modelos eléctricos implica cambios en la operativa según el método de recarga que se use. Analizando estos cambios para encontrar el escenario que minimice los costes requiere estudios detallados de cada situación.

En este trabajo se desarrollan unas guías de electrificación de líneas de autobús en las que se dan recomendaciones sobre la estrategia de recarga que hace falta implantar para cada tipología de líneas para minimizar los costes totales de la línea.

El objetivo de estas guías es dotar a los operadores o a los municipios de una herramienta que, con muy pocos datos de entrada, caracterice la línea y dé una primera aproximación de la manera más eficiente de operarla, teniendo en cuenta los costes del operador y también las externalidades. De esta manera, se pueden obtener algunos resultados sin la necesidad de realizar estudios complejos sobre el funcionamiento y los costes de cada línea.

Abstract

The increase in the recent years in the population living or working in urban areas and greater environmental awareness, have caused that improving the quality of life in cities to be one of the main objectives of municipalities. Especially in terms of improving air quality and reducing greenhouse emissions.

Urban mobility transformation is one of the solutions that can have a greater impact on improving the citizen's quality of life. Some actions that are already being implemented in many cities include measures to reduce traffic within city centres, or promoting public transport use, among others.

Likewise, many cities are beginning to transform bus networks so they can be served by electric vehicles, reducing the emission of pollutants, as well as greenhouse emissions and other externalities such as noise.

Even so, the transformation of bus lines to electrical models imply changes in the operative depending on the recharging method used. Analysing these changes to find the scenario that minimizes the costs requires detailed studies of each situation.

In this work, guidelines for the electrification of bus lines are developed. The guidelines include a recommendation on the recharging strategy that must be implemented for each type of bus line to minimize the total costs of the line.

The objective of these guides is to provide a tool to transport operators or municipalities, that with very little input data, characterizes the line and it gives a first approximation of the most efficient way to operate it, taking into account operator costs and also externalities. Some results can be obtained from the guides, without carrying out complex and detailed studies about the operation and the costs of each line.

Índex

1. Introducció i objectius.....	6
1.1. Introducció.....	6
1.2. Objectius.....	9
2. Estat de l'art.....	10
3. Marc teòric i model de costos.....	12
3.1. Marc teòric.....	12
3.1.1. Hipòtesis.....	12
3.1.2. Servei d'una línia d'autobús.....	13
3.1.3. Operativa elèctrica.....	14
3.1.4. Estratègies de recàrrega elèctrica.....	15
3.1.5. Costos.....	20
3.2. Model de càlcul dels costos.....	23
3.3. Anàlisi de sensibilitat. Resultats principals.....	24
4. Guies d'electrificació d'una línia d'autobús.....	28
4.1. Guies per a l'electrificació d'una línia d'autobús.....	28
4.2. Elaboració de les guies.....	43
4.3. Limitacions de les guies.....	49
5. Conclusions.....	51
6. Bibliografia.....	52
Annexos.....	54

1. Introducció i objectius

1.1. Introducció

El transport és una de les necessitats essencials de la societat i també de l'economia. Aquesta necessitat de desplaçar-se augmenta en zones urbanes altament poblades i els recursos necessaris augmenten com més gran o més densa és el continu urbà.

En els darrers anys s'ha produït un substancial augment de la població que viu en zones urbanes. Més concretament, entre el 1950 i el 2018, el percentatge de població europea que viu en ciutats s'ha incrementat en un 52% a un 74% i, segons les previsions de les Nacions Unides, el 2050 aquesta proporció augmentarà fins a un 84% (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019).

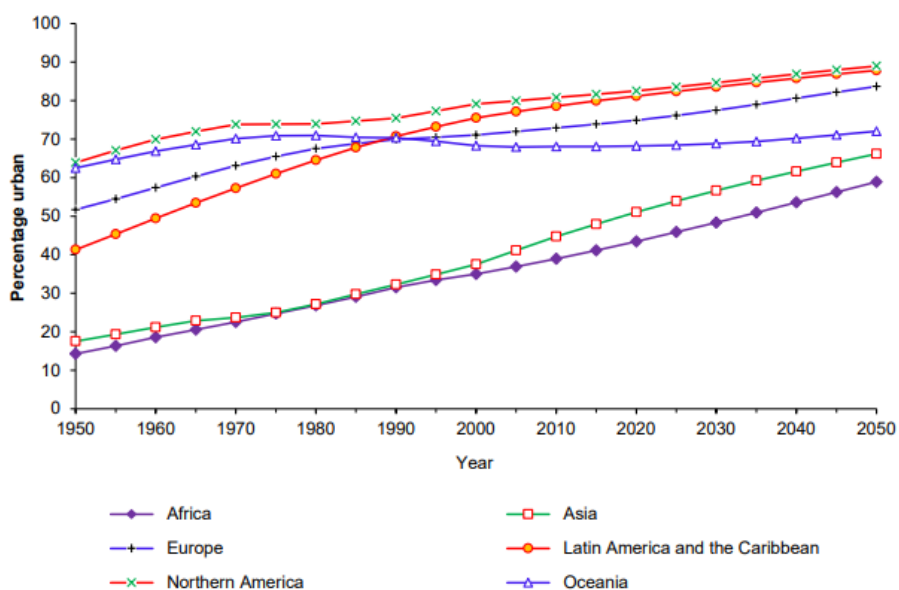


Figura 1. Evolució del percentatge de població vivint en ciutats (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019).

Aquest augment en la població que viu a les ciutats ha produït un augment en la demanda de transport a les ciutats, augmentant l'ús de tots els mitjans de transport i, alhora, introduint-ne de nous.

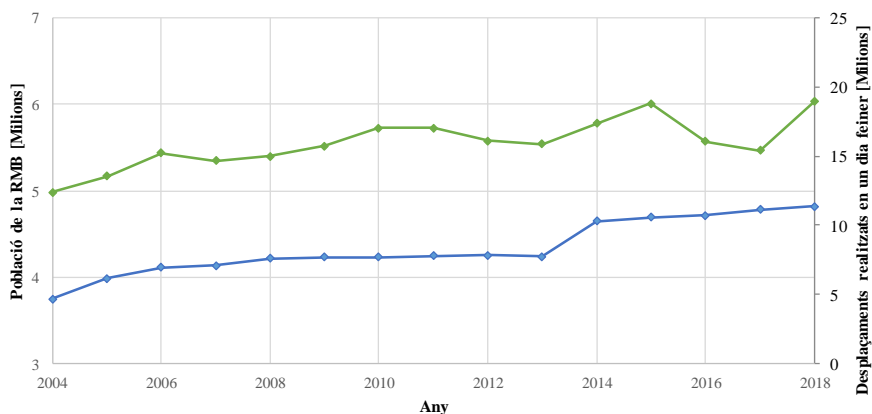


Figura 2. Evolució de la població i del nombre de viatges en dia feiner a la Regió Metropolitana de Barcelona (Autoritat del Transport Metropolità, 2019).

Un dels efectes més destacats de l'augment de les persones que viuen en ciutats és la qualitat de l'aire d'aquestes, ja que la contaminació atmosfèrica té una relació molt estreta amb la mida de la ciutat (Liu, Wu, Yu, & Ma, 2018). En les ciutats amb més població, són necessaris més recursos i, per tant, s'emeten més contaminants.

La contaminació atmosfèrica té molts efectes negatius per la població que s'hi exposa, com ara augmentar el risc de diverses malalties respiratòries com l'asma, entre d'altres. Es calcula que en l'àmbit mundial cada any moren prematurament 3,4 milions de persones a causa de la contaminació atmosfèrica (Ritchie & Roser, 2019).

Tenint en compte aquestes dades, la previsió de creixement de població en zones urbanes fa més necessària que mai la reducció en l'emissió de gasos contaminants, sobretot en les zones més denses. És per això que les administracions de tots els nivells estan creant polítiques i implementant mesures per millorar la qualitat de l'aire de les ciutats.

Les Nacions Unides van publicar al 2015 l'Agenda 2030, un document on es proposen 17 Objectius de Desenvolupament Sostenible per a millorar la vida de totes les persones (UN, 2015). Aquests objectius inclouen des de l'eliminació de la pobresa fins al canvi climàtic, la igualtat de la dona, entre altres. L'Objectiu de Desenvolupament Sostenible número 11. *Ciutats i comunitats sostenibles*, posa èmfasi en els reptes que tenen les ciutats per mantenir-se de manera pròspera sense exercir pressió sobre els recursos. Entre les fites marcades en l'ODS 11 es troben:

“11.2. D'aquí al 2030, proporcionar accés a sistemes de transport segurs, assequibles, accessibles i sostenibles per a tothom i millorar la seguretat viària, en particular mitjançant l'ampliació del transport públic, prestant especial atenció a les necessitats de les persones en situació de vulnerabilitat, les dones, els nens, les persones amb discapacitat i les persones d'edat.

11.6. D'aquí a 2030, reduir l'impacte ambiental negatiu per càpita de les ciutats, inclús prestant especial atenció a la qualitat de l'aire i la gestió dels residus municipals i d'altres tipus.”

D'altra banda, l'Objectiu de Desenvolupament Sostenible 3. *Salut i benestar*, recull la necessitat de reduir la contaminació de l'aire en una de les seves fites:

“3.9. Per a 2030, reduir substancialment el nombre de morts i malalties produïdes per productes químics perillosos i la contaminació de l'aire, l'aigua i el sòl.”

Altres administracions de tots els nivells (estatals, municipals,...) també han promogut polítiques per tal de reduir la contaminació atmosfèrica a les ciutats, fent especial èmfasi en l'efecte del vehicle privat sobre la mateixa.

Un exemple és la Zona de Baixes Emissions implantada a l'Àrea Metropolitana de Barcelona, que restringeix la circulació dels vehicles més contaminants a la zona urbana més densa per tal de reduir-ne la contaminació atmosfèrica.

Cal tenir en compte que el transport és una de les principals causes d'emissions de gasos contaminants a la ciutat, ja que consumeix una tercera part de tota l'energia final de la Unió Europea, que procedeix majoritàriament del petroli. Així mateix, del total de l'emissió de gasos d'efectes hivernacle a la Unió Europea, el transport és responsable de més del 25% (Agència Europea del Medio Ambiente, 2020). La transformació del transport a les ciutats cap a models

més sostenibles es fa més imperiosa si tenim en compte l'augment de demanda que previsiblement es produirà en els pròxims anys.

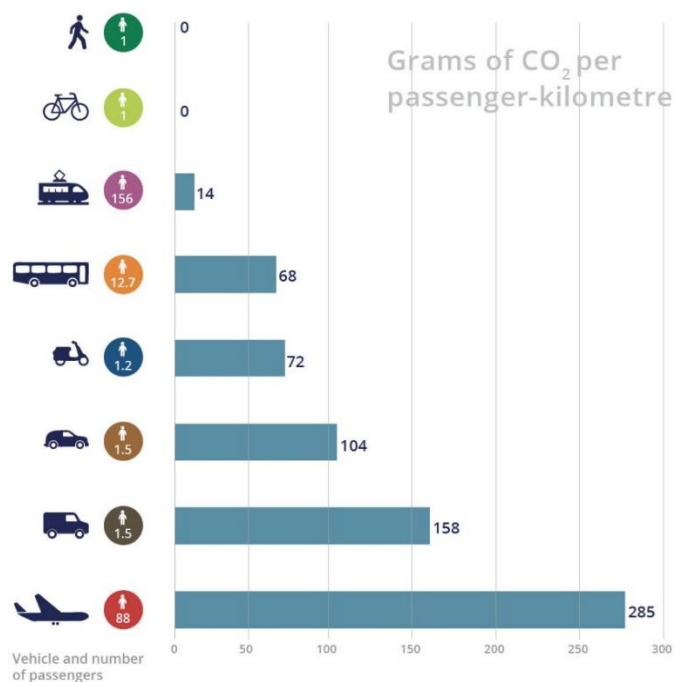


Figura 3. Grams de CO₂ per quilòmetre segons el mitjà de transport (Agència Europea del Medio Ambiente, 2019).

Així doncs, una de les estratègies més importants per a la reducció de les emissions contaminants dels sistemes de transport d'una ciutat és el canvi modal cap a mitjans de transport que no tinguin emissions com ara anar a peu o en bicicleta o que les seves emissions siguin molt reduïdes com el transport públic. En el següent gràfic es mostren les emissions de CO₂ per passatger i quilòmetre per diversos mitjans de transport.

Més enllà de fomentar un canvi modal en les ciutats, cal destacar la necessitat d'adaptar els sistemes de transport públic a la nova realitat de les ciutats. En aquest sentit és important, no només fomentar el seu ús i augmentar l'oferta per assumir l'augment de demanda previst, sinó magnificar els esforços en la reducció del seu impacte negatiu en les ciutats i els seus habitants.

Les externalitats negatives són els efectes negatius que percep la societat, independentment de l'ús que facin del servei. Si ens fixem en el transport públic per carretera podem trobar, principalment, les següents externalitats:

- **L'emissió de gasos d'efecte hivernacle.** Els vehicles de combustió interna emeten gasos d'efecte hivernacle com el diòxid de carboni (CO₂). Aquestes emissions provoquen i acceleren els efectes del canvi climàtic.
- **L'emissió de gasos contaminants.** Els vehicles amb motors de combustió interna emeten gasos nocius per la salut de la població que els respira, com ara els òxids nitrosos (NO_x) o la matèria particulada de més de 10 micres (PM₁₀). L'exposició a aquests gasos provoca malalties cardiovasculars i respiratòries.
- **L'obtenció de l'energia.** L'obtenció de l'energia que fan servir els vehicles també produeix algunes emissions, normalment de CO₂. Per als vehicles amb combustibles fòssils aquest concepte s'anomena *well-to-tank* i habitualment s'inclou en el càlcul

estàndard d'emissions. En canvi, els vehicles elèctrics utilitzen el concepte **mix elèctric**, utilitzat de manera genèrica per al càlcul d'externalitats de l'ús d'electricitat i sovint no s'inclou en les anàlisis.

- El **soroll**. El soroll ambiental provocat per la circulació dels vehicles és molest per les persones que hi conviuen i també pot contribuir al desenvolupament de malalties cardiovasculars en persones adultes, així com pot interferir en l'aprenentatge i el comportament dels infants.
- **L'ús de l'espai públic**. L'espai de les ciutats és un bé dels ciutadans. L'ocupació d'aquest espai es considera una externalitat, donat l'impacte en la societat amb qui s'interactua.
- La **congestió**. La congestió provoca un augment de temps en viatge de la resta de persones que utilitzen la infraestructura. Alhora, la congestió pot augmentar el valor d'altres externalitats com el soroll, l'ús de l'espai públic, les emissions o els accidents.
- Els **accidents**. Els accidents són una de les majors externalitats en el transport per carretera, però el seu efecte en el cas del transport públic, sobre tot urbà, és molt reduït.

Per tal de reduir les externalitats provocades pel transport públic, especialment, de les xarxes d'autobusos de les ciutats, cal transformar la flota que dona el servei, posant en funcionament vehicles que no presentin aquestes externalitats, com ara els vehicles elèctrics.

1.2. Objectius

L'objectiu d'aquest treball és determinar la millor manera d'operar una línia d'autobús servida amb vehicles elèctrics, depenent de les seves característiques. Més concretament, en aquest treball s'elaboren unes guies d'electrificació de línies d'autobús amb les que es pugui determinar la millor operativa amb què operar la línia.

Per elaborar les guies, s'analitzaran les solucions elèctriques que s'estan implantant en línies d'autobús actualment. Així mateix, es definirà teòricament el servei d'autobús i algunes estratègies d'operativa elèctrica, detallant també els costos del servei per a l'operador i per a la societat, és a dir, les externalitats. Alhora, es detallarà el model d'optimització de l'operativa i de càlcul de costos que s'utilitzarà.

Per a totes les variables que tenen algun efecte en l'operativa de les línies d'autobús, s'avaluarà el seu impacte en els costos i en escollir la manera més eficient d'operar la línia elèctrica. Finalment, s'elaboraran les guies d'electrificació per a línies d'autobús segons les característiques que s'han trobat més rellevants i s'analitzaran les recomanacions que es donen.

2. Estat de l'art

La reducció de l'emissió de gasos contaminants i d'efecte hivernacle de les xarxes d'autobús són una de les principals prioritats en la mobilitat urbana de moltes ciutats. Per aconseguir un transport públic més sostenible, molts municipis han començat a transformar la seva flota d'autobusos amb la incorporació de vehicles menys contaminants, com ara els vehicles de gas natural, els híbrids o els elèctrics.

La implementació d'autobusos elèctrics té una estreta relació amb la reducció de gasos contaminants i d'efecte hivernacle del servei. En els últims anys, aquesta relació ha estat estudiada de manera extensa en diversos estudis localitzats arreu del món. En aquests estudis s'ha observat que els autobusos elèctrics són els vehicles que presenten menys emissions de CO₂, només igualats per alguns biocombustibles de segona generació (Xylia, Laurent, Leduc, & Patrizio, 2018). Alhora, s'ha calculat que, si es té en compte tot el cicle de vida dels vehicles, els autobusos elèctrics redueix les emissions de CO₂ entre un 19 i un 35% respecte a un vehicle dièsel.

D'altra banda, cal destacar que els autobusos elèctrics no emeten gasos contaminants, de manera que la seva implementació milloraria en gran mesura la qualitat de l'aire de les ciutats. Alhora, la seva implementació també reduiria el soroll provocat pels autobusos convencionals, millorant la qualitat de vida dels ciutadans.

Tots els beneficis que s'han comentat fan que el nombre de vehicles elèctrics estigui augmentant molt ràpidament en els últims anys. El nombre d'autobusos elèctrics venuts el 2018 va ser de 92.000 unitats, augmentant un 25% l'actual flota i arribant a les 460.000 unitats en funcionament (IEA, 2019). Tot i això, la major part del mercat es troba a la Xina, ja que és l'únic país que ha aconseguit implementar una solució elèctrica robusta al sistema de transport públic. En canvi a la resta de països es poden trobar proves pilot, solucions puntuals o petites transformacions de la flota, però cap transformació de la xarxa global amb una metodologia robusta i comuna.

Els autobusos elèctrics s'alimenten de l'energia emmagatzemada en bateries. Habitualment la capacitat de les bateries que s'utilitzen no és la suficient per realitzar el servei sense recàrregues intermèdies. També cal destacar els inconvenients de les bateries amb una gran capacitat, que tenen un volum i un pes molt considerat i, si s'implementen, redueixen la capacitat del vehicle i n'augmenten el seu consum.

Tradicionalment s'han plantejat dues estratègies de recàrrega de les bateries, amb necessitats de capacitat de bateria i de velocitat de recàrrega completament diferents.

- La recàrrega d'oportunitat (*opportunity charging*), proposa realitzar el servei amb autobusos amb bateries de poca capacitat, i aprofitar el temps en el qual el vehicle està aturat al final o a l'inici de la línia per recarregar les bateries amb un carregador que tingui una velocitat de recàrrega elevada. Aquesta recàrrega es realitzaria col·locant el carregador a la via pública, en l'última o la primera parada de la línia i és possible.
- La recàrrega durant la nit (*overnight charging*), proposa utilitzar autobusos amb bateries de la màxima capacitat possible. Aquestes es carregarien durant la nit, quan els vehicles no estan en servei. Els vehicles realitzen la part del servei que puguin fins que no tinguin energia suficient i, en aquell moment tornarien a la cotxera i serien substituïts per altres vehicles. En aquest cas, en disposar de totes les hores en què els vehicles no estan en

servei, el carregador pot tenir velocitats de recàrrega menors. Aquesta recàrrega es realitza a la cotxera.

Adicionalment, hi ha alguns sistemes alternatius a aquestes dues estratègies de recàrrega com és el cas dels ultracapacitadors i de la recàrrega per inducció.

Els vehicles amb ultracapacitadors s'utilitzen majoritàriament en xarxes d'autobús xineses. Els ultracapacitadors tenen molt poca capacitat d'emmagatzematge d'energia, cosa que permet al vehicle una autonomia de tan sols entre 4 i 8 km. Per això, la majoria de parades de les rutes han de ser transformades en punts de càrrega. La recàrrega dels ultracapacitadors es realitza per pantògraf i amb molt pocs minuts es pot recarregar la bateria sencera, ja que els ultracapacitadors presenten una gran capacitat d'absorció d'energia durant la seva recàrrega.

Respecte a la recàrrega per inducció, s'ha determinat que per a certes línies, incorporar trams de carrils amb recàrrega per inducció, sobretot en parades, és un mètode de recàrrega tan eficient com la resta de les estratègies detallades. (Miles & Potter, 2014)

Independent de l'estratègia de recàrrega que es faci servir, totes les operacions de recàrrega afegeixen un cert temps de servei. Si es volen mantenir les característiques de la línia, és probable que el nombre de recursos necessaris, augmenti, sobretot en quant la flota mínima per realitzar el servei.

Cal destacar que el cost dels vehicles elèctrics i el cost de les bateries és molt superior al cost dels vehicles convencionals. Alhora, aquest cost s'incrementa per a les bateries amb major capacitat d'emmagatzematge d'energia. D'altra banda, augmentant la capacitat de la bateria es pot reduir el cost d'operació de la línia, amb el que és important trobar l'estratègia de recàrrega i la dimensió de la bateria que millor s'adapta en cada cas (Rogge, Wollny, & Sauer, 2015). Alguns estudis mostren que, amb una planificació curosa de l'operació de la línia, la transformació de vehicles convencionals a vehicles elèctrics pot aportar beneficis als operadors, alhora que es millora el servei que s'ofereix als usuaris. (Teoh, Khoo, Goh, & Chong, 2018).

En aquest projecte es definiran diverses estratègies de recàrrega a partir de les estratègies tradicionals (càrrega d'oportunitat i càrrega nocturna) de manera que es modifiquen per fer-les més eficients, utilitzant sobretot la diferència de necessitats de flota al llarg del dia. Amb aquestes estratègies de recàrrega s'estudiarà la relació entre les característiques de les línies i l'estratègia que minimitza els costos d'operació i les externalitats. Finalment, s'analitzarà la diferència dels costos totals de les línies respecte al servei amb vehicles dièsel.

3. Marc teòric i model de costos

A l'hora d'operar una línia d'autobús cal tenir en compte el marc teòric que regeix el seu funcionament i la seva formulació. D'aquesta manera es pot determinar quina és l'operativa que s'adapta millor a la línia a la que es vol donar servei.

En el marc teòric que es construeix a continuació, es defineix la formulació que regeix les línies d'autobús i es desenvolupa l'operativa d'una línia servida tant per vehicles elèctrics com per vehicles dièsel. D'aquesta manera es podrà optimitzar el funcionament de la línia en cada cas.

Alhora, el marc teòric és la base sobre la que s'ha construït el model de costos que s'utilitza en aquest projecte per determinar els diversos costos que té el servei d'una línia d'autobús per a diferents dades d'entrada.

3.1. Marc teòric

El marc teòric definit en aquest estudi té com a objectiu descriure de la forma més realista possible l'operativa d'una línia en una situació real. Per aquest motiu, es defineixen els elements necessaris per a analitzar línies servides amb qualsevol tipologia de vehicles.

Alhora, aquest marc ha de ser suficientment complert com per poder estimar el costos d'operació d'aquesta línia.

Donat que l'objecte de l'estudi és analitzar l'operativa de les línies elèctriques d'autobús i definir unes guies per a la seva electrificació, aquest marc teòric és suficientment específic com per analitzar el servei dels vehicles dièsel i dels elèctrics, detallant tres estratègies de recàrrega.

El marc teòric considera les variables i fórmules desenvolupades en (Estrada, Mención, Salicrú, & Badia, 2020), ja que construeixen una part del model de costos que s'utilitzarà.

3.1.1. Hipòtesis

Les línies d'autobús formen part d'un sistema complex i que conté molta variabilitat, ja que el seu funcionament depèn de l'entorn on estan ubicades, de l'orografia del terreny, de la distribució modal de la demanda... Per poder desenvolupar un marc amb unes condicions d'estudi més limitades, s'han adoptat les següents hipòtesis:

1. Els **vehicles** de la flota d'una línia són tots de la mateixa tipologia. És a dir, no es considera que una línia pugui estar servida per una tipologia de vehicle en les puntes de demanda i un altre en les hores valls. Això fa que algunes característiques tècniques dels vehicles, com ara la capacitat de la bateria, E siguin independents de l'hora del dia.
2. La **capacitat** de passatgers dels vehicles no es té en consideració. Els paràmetres del servei (tipologia de vehicle, temps de pas, etc.) són dades inicials que aporta l'operador i, per tant, se suposa que són els adequats.
3. Els vehicles tenen un **temps de servei** (diürn) i un temps de descans (nocturn). No es considera el cas que el mateix vehicle s'utilitzi durant 24h per fer servei diürn i nocturn.
4. Les **cotxeres** disposen d'espai suficient per instal·lar tants punts de càrrega com sigui necessari. Llavors, no es té en compte el cost de l'espai dels carregadors de la cotxera.

3.1.2. Servei d'una línia d'autobús

Es considera una línia d'autobús qualsevol segons es representa a la figura següent.

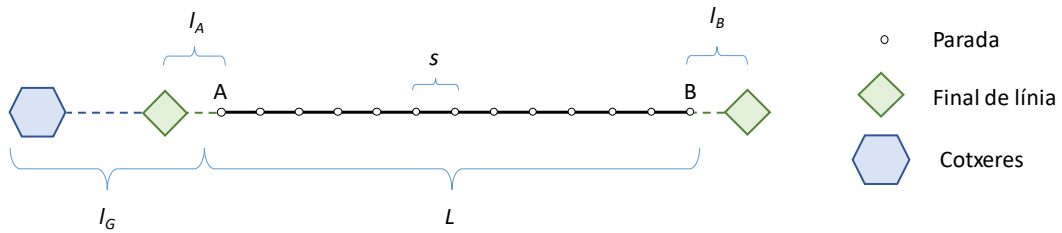


Figura 4. Representació del servei d'una línia d'autobús.

Els vehicles realitzen el servei en les dues direccions (A-B i B-A), sent la longitud total del cicle $2L$. Les parades estan situades a una distància s entre elles.

El servei d'una línia d'autobús és canviant durant el dia. Per tal d'incorporar les fluctuacions en els valors d'algunes variables al llarg del dia, el total d'hores de servei, h_{DAY} , es divideix en N intervals de manera que, en cada interval, les característiques del servei (demanda, velocitat, etc.) són homogènies. Aquests intervals poden de durada variable, h_i ($i=1, \dots, N$).

Les característiques que es tenen en compte per definir-los són: la demanda horària de passatgers λ_i i la velocitat de creuer dels autobusos, v_i . Aquesta és la velocitat que amb la que es recorreria el trajecte si no hi hagués parades, però tenint en compte aspectes com els semàfors o el trànsit.

L'operador defineix un temps de pas, H_i , que és constant per a cada període, adaptant el servei a la variació de demanda i a les condicions de trànsit per tal de mantenir el nivell del servei que es proveeix.

Fent servir les equacions de (Daganzo, 2010), es pot obtenir el nombre de vehicles necessaris, $M(i)$, per a operar cada interval del servei sota un temps de pas desitjat, així com la velocitat comercial (velocitat mitjana en tot el recorregut, tenint en compte les parades) que es donaria en cada cas.

$$v_c(i) = \frac{1}{\frac{1}{v_i} + \frac{1}{s}\tau + \frac{\lambda_i H_i}{2L}\tau'} \quad (1)$$

$$M(i) = \frac{2L}{H_i v_c} \quad (2)$$

On τ és el temps addicional per l'acceleració i el frenat del vehicle per parada i τ' és el temps addicional per passatger que puja o baixa a cada parada.

En el gràfic següent es mostra una possible evolució de la flota en un dia de servei, a tall d'exemple.

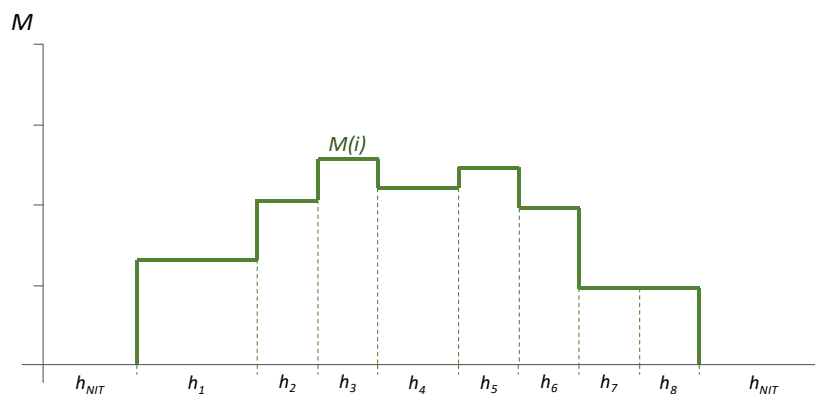


Figura 5. Evolució de la flota necessària al llarg d'un servei

La flota total necessària per operar el servei serà la flota mínima per donar servei en el període amb més necessitat de vehicles, M_T , és:

$$M_T = \max_{i=1 \dots N} M(i) \quad (3)$$

Aquests resultats s'han obtingut sense tenir en consideració operacions elèctriques i, per tant, coincideix amb l'operativa d'un servei operat amb vehicles de combustió interna. S'afegeix el superíndex 0 als càlculs que no tinguin en compte l'operativa elèctrica. En aquest cas, la flota necessària seria M^0_T .

Adicionalment, tenint en compte la particularitat del vehicles elèctrics, a la Figura 1 on es mostra l'esquema d'una línia, es representa també la distància entre la parada d'inici de la línia i la cotxera, l_G , i les distàncies entre les últimes parades de la línia per sentit i punts de recàrrega a la via pública, l_A i l_B .

3.1.3. Operativa elèctrica

Per tal de treballar en termes d'electrificació d'una línia d'autobús cal tenir en compte els paràmetres que defineixen el funcionament d'una línia electrificada. Aquestes característiques fan referència a l'operativa dels **autobusos amb bateries elèctriques (BEB)** i no s'inclouen les relatives a altres tipologies d'autobusos elèctrics com ara els que funcionen per inducció.

Cada tipologia de bateries té una quantitat màxima d'energia nominal E' que pot emmagatzemar, calculada en kWh. Per calcular quanta energia es consumeix en un desplaçament es fa servir el factor de consum energètic f_c , que relaciona la despesa energètica per quilòmetre recorregut de la manera següent:

$$\Delta E' = x * f_c \quad (4)$$

On x és la distància recorreguda i $\Delta E'$ és l'energia consumida.

L'estat de càrrega, SOC , és un indicador de la capacitat restant de la bateria, expressat com a percentatge:

$$SOC = \frac{\text{Capacitat restant de la bateria}}{\text{Capacitat màxima de la bateria}} \% \quad (5)$$

La mesura i el control d'aquest indicador és crucial per a una bona gestió de la recàrrega elèctrica.

Per tal d'assegurar que els vehicles no presentaran problemes d'energia durant la ruta, i també per maximitzar la vida útil de les bateries, el fabricant determina un estat de càrrega mínim que cal garantir durant tot el servei, SOC_{min} . Llavors, la capacitat efectiva de les bateries, E , es calcula de la següent manera:

$$E = E' * (1 - SOC_{min}) \quad (6)$$

En el moment de la recàrrega elèctrica té una influència cabdal la velocitat de recàrrega, S . Cada tipologia de carregador té una velocitat de càrrega particular.

En aquest treball es diferencien dues tipologies de carregador diferents:

- Els carregadors situats a la cotxera poden ser utilitzats per qualsevol vehicle de la xarxa i tenen una velocitat de càrrega lenta, S_N
- Els carregadors de final de la línia, situats a la via pública, són utilitzats tan sols pels vehicles que donen servei a la pròpia línia i tenen una velocitat de càrrega més ràpida, S_D .

3.1.4. Estratègies de recàrrega elèctrica

Actualment, els vehicles elèctrics que es fan servir per al servei d'una línia d'autobús no tenen una bateria amb suficient capacitat d'emmagatzematge d'energia que els permeti operar sense recarregar durant un servei sencer.

A continuació es recupera el gràfic de la Figura 6. Evolució de la flota i l'energia al llarg d'un servei, on s'exemplificava l'evolució per intervals de la flota necessària per donar el servei. Aquest càlcul de flota s'ha realitzat sense tenir en compte cap estratègia de recàrrega es a dir, com si es la línia es servís amb vehicles amb motors de combustió interna que no tinguessin la necessitat d'omplir el dipòsit enmig del servei, o com si la línia es servís amb vehicles elèctrics amb una bateria de suficient capacitat per no tenir la necessitat de recarregar durant tot el servei.

Donat que els vehicles dièsel, habitualment poden servir durant una jornada completa sense necessitat d'omplir el dipòsit, es considera que la flota calculada a l'equació (2), M^0 , és un límit inferior del nombre de vehicles elèctrics que caldrà que facin el servei de la línia per mantenir les mateixes característiques.

La Figura 6. Evolució de la flota i l'energia al llarg d'un servei, mostra l'evolució de la flota per a un cas genèric, s'utilitzin vehicles elèctrics o vehicles dièsel. A aquest gràfic s'afegeix el consum d'energia que tindrien els vehicles si es carreguessin únicament durant la nit, on B^0 és l'energia que li resta a la bateria al llarg del dia. Es mostra, com s'ha comentat, que el vehicle es queda sense energia abans de finalitzar el servei.

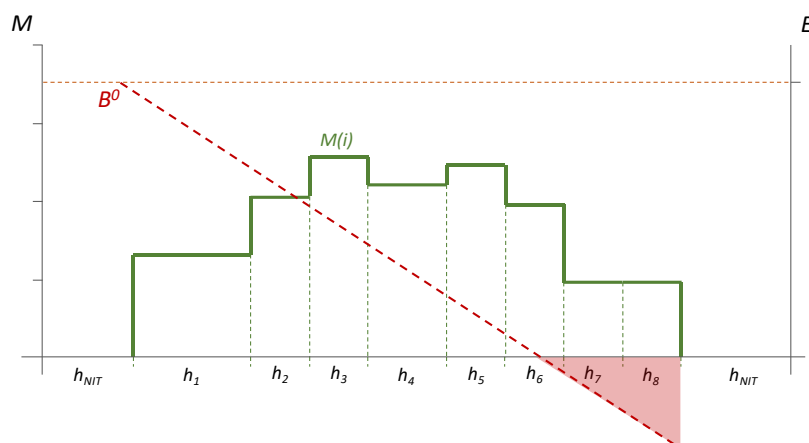


Figura 6. Evolució de la flota i l'energia al llarg d'un servei

El fet d'incloure operacions de recàrrega de bateries enmig del servei és una tasca complexa, ja que cal aturar els vehicles enmig de l'operativa de la línia, sense que el nivell del servei es vegi afectat. Amb l'objectiu de reduir el risc d'afectació a usuaris, s'estudien diverses estratègies per incorporar la recàrrega en el funcionament habitual de la línia, mantenint el nivell de servei i assegurant un nivell d'energia estable a les bateries.

Es consideren tres estratègies:

- Recàrrega diürna en cotxera
- Recàrrega a final de cicle
- Recàrrega a final d'interval

Totes elles consideren que es fa una recàrrega de les bateries a cotxera durant les hores que no es dona servei, h_{NIGHT} , de manera que tots els vehicles comencen la jornada amb la bateria recarregada completament.

Recàrrega diürna en cotxera

En aquesta estratègia de recàrrega, els vehicles que tenen poca bateria durant el servei són conduïts fins a la cotxera per ser recarregats. Aquestes operacions fan que la flota necessària per mantenir les característiques del servei augmenti.

Per tal de mitigar l'augment de flota, s'aprofita el canvi de demanda al llarg del servei, recarregant els vehicles que tornen a cotxera per una baixada de demanda encara que no tinguin un *SOC* baix. Així mateix, les bateries no es recarreguen completament, sinó que es calcula l'energia necessària que serà necessària per acabar el servei, reduint així el temps de recàrrega i, per tant, la flota necessària.

Aquesta estratègia la recàrrega es fa en la cotxera, però cal diferenciar-la de la recàrrega durant la nit. Els carregadors que es fan servir per a la recàrrega durant el dia a cotxera tenen una velocitat de recàrrega, S_D major als que es fan servir per a la recàrrega de les bateries fora hores de servei, S_N . El nombre de carregadors de les dues tipologies, $N_{ch,D}$ i $N_{ch,N}$ és independent i s'optimitza per separat.

La flota necessària per servir la línia d'estudi en el cas de tenir una estratègia de recàrrega en cotxera es calcula de la següent manera:

$$M^1_T = \sum_{i=1}^N [M^0_{IN}(i) - M_R(i)] \quad (7)$$

On $M^0_{IN}(i)$ és el nombre de vehicles que cal afegir al servei per cada interval degut als canvis en les característiques del servei, mentre que $M_R(i)$ és el nombre de vehicles que s'afegeixen al servei en l'interval i perquè ja han estat recarregats a cotxera.

A la figura següent, B^G mostra una representació de l'evolució de l'energia en les bateries en el cas de la recàrrega diürna en cotxera.

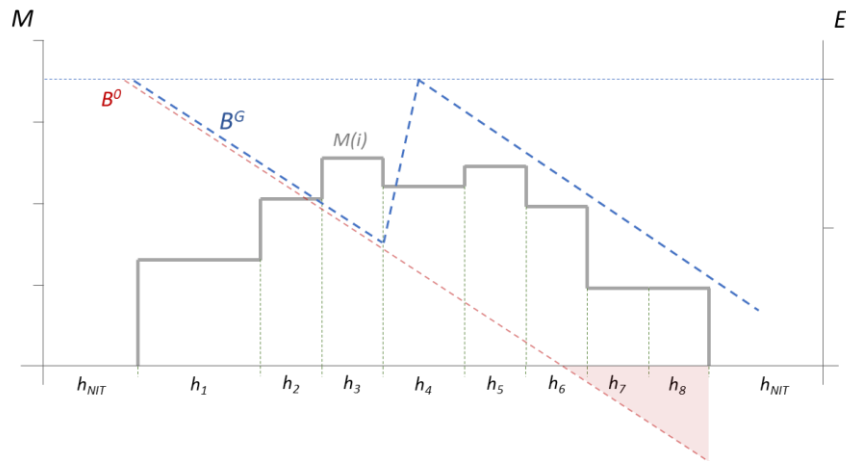


Figura 7. Evolució de la flota i l'energia en un servei amb recàrrega diürna en cotxera

Recàrrega a final de cicle

En aquesta estratègia tots els vehicles que estan circulant recarreguen la seva bateria com a mínim un cop durant el cicle, en la parada d'inici o final de la línia o bé en espais habilitats propers a l'inici i final de la línia. Si és necessari, es pot recarregar a l'inici i al final del cicle, reduint el temps de recàrrega necessari a cada punt de càrrega, però augmentant el temps de recorregut.

El fet de recarregar la bateria cada cicle permet que els vehicles puguin realitzar el servei sense haver de tornar a la cotxera. Tot i això, el temps de cicle dels vehicles s'allarga a causa del temps invertit a desplaçar-se fins als punts de recàrrega, així com per el propi temps de recàrrega.

Si es vol mantenir el temps de pas en tots els intervals, un augment de cicle provoca un augment de la flota necessària per realitzar el servei. La nova flota necessària, M^1_T , es calcula de la manera següent:

$$M^1_T = \max_{i=1 \dots N} M^0(i) \quad (8)$$

$$M^0(i) = \left[\frac{R_D(i)}{H_i} \right]^+ \quad (9)$$

On $R_D(i)$ és el temps de cicle i l'operador $[x]^+$ indica arrodoniment superior de la variable x .

Per a l'estratègia de recàrrega a final de cicle cal tenir en compte la disponibilitat de l'espai públic on es col·loquen els punts de recàrrega. Si el temps de recàrrega és major al temps de pas de la línia, cal afegir punts de recàrrega per tal que els vehicles no s'hagin d'esperar i puguin sortir de la recàrrega amb el temps de pas correcte entre ells. Degut a que l'espai públic disponible

normalment només permet col·locar els punts de recàrrega en sèrie, es contempla el temps necessari perquè els autobusos vagin canviant de punt de recàrrega cada cop que el primer queda lliure.

D'altra banda també es contemplen els casos en els que el servei no té una bona regularitat, afegint un paràmetre que augmenta el nombre de carregadors necessaris perquè la falta de regularitat no provoqui cues en els punts de recàrrega.

Finalment, es planteja la possibilitat que, en intervals on es necessita una major flota, els vehicles no recarreguin les bateries, reduint així el temps de cycle i reduint el nombre de vehicles necessaris per servir la línia, però mantenint un SOC més baix durant la resta del servei.

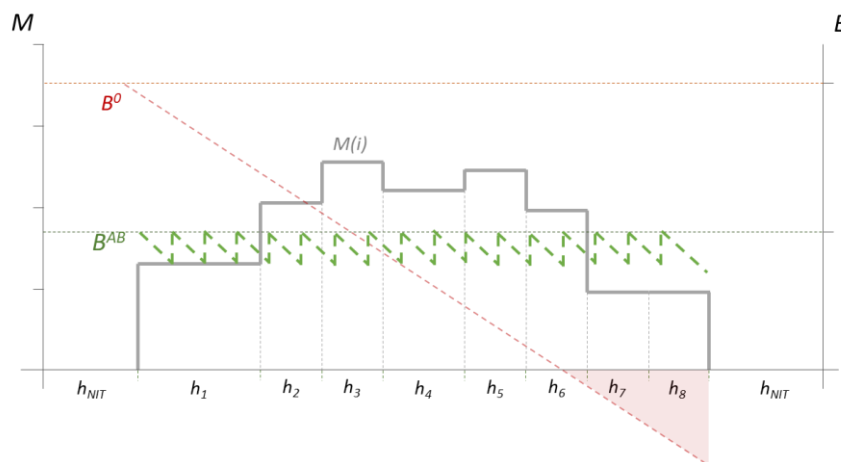


Figura 8. Evolució de la flota i l'energia al llarg d'un servei amb recàrrega a final de cicle (B_{AB}).

Recàrrega a final d'interval

Aquesta estratègia planteja l'ús de carregadors en llocs propers al final o a l'inici de la línia, però en comptes de recarregar les bateries al final de cada cicle es recarreguen a final de cada interval.

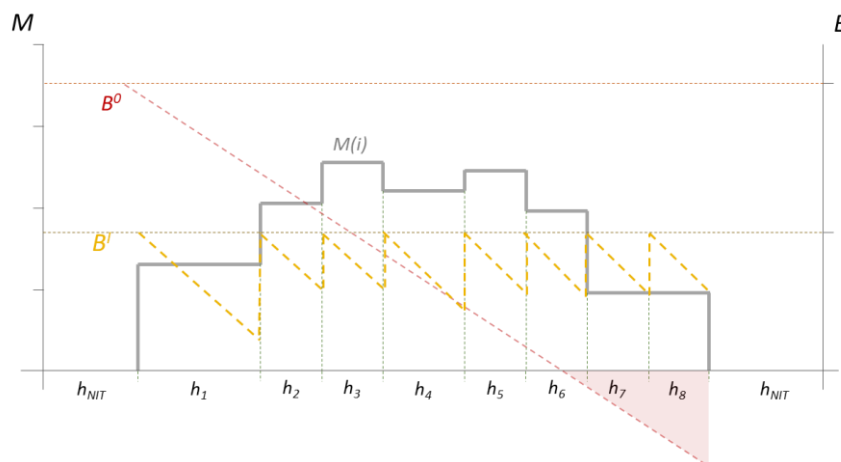


Figura 9. Evolució de la flota i l'energia al llarg d'un servei amb recàrrega a final d'interval (B_I).

En aquells intervals en què hi ha una **reducció de temps de pas** $H_{i-1} > H_i$, es produeix un augment de la flota necessària per realitzar el servei, $M^0(i-1) < M^0(i)$. En aquesta estratègia es proposa que els vehicles que han de ser introduïts en l'interval i , siguin introduïts en la parada més propera al punt de recàrrega. Així, es permet que els vehicles que han estat en servei fins al moment, $M^0(i-1)$, puguin tenir temps per recarregar les bateries.

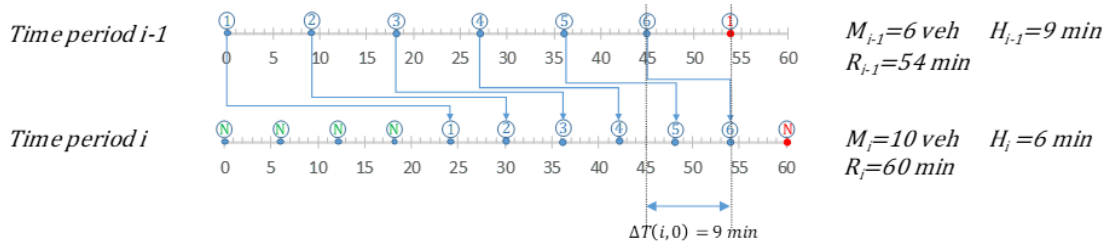


Figura 10. Exemple de les operacions de recàrrega a final d'interval (Estrada, Mensión, Salicrú, & Badia, 2020)

Degut a la reducció del temps de pas, és possible que alguns vehicles que ja estaven en servei en l'interval $i-1$ no disposin de temps suficient per realitzar la recàrrega. En aquest cas caldrà introduir alguns vehicles addicionals, ε_i , que permetran que tots els vehicles que ja estaven en servei puguin fer la recàrrega. Llavors, la nova flota necessària durant l'interval i serà:

$$M^1(i) = M^0(i) + \varepsilon_i \quad (10)$$

En aquells intervals en què hi ha un **augment del temps de pas** $H_{i-1} < H_i$, es produeix una reducció de la flota en servei, $M^0(i-1) > M^0(i)$, i una part dels vehicles en servei torna a la cotxera. En aquesta estratègia es proposa que alguns d'aquests vehicles realitzin un cicle addicional abans de ser enretirats del servei per tal de permetre que els vehicles que han de continuar circulant puguin recarregar la bateria.

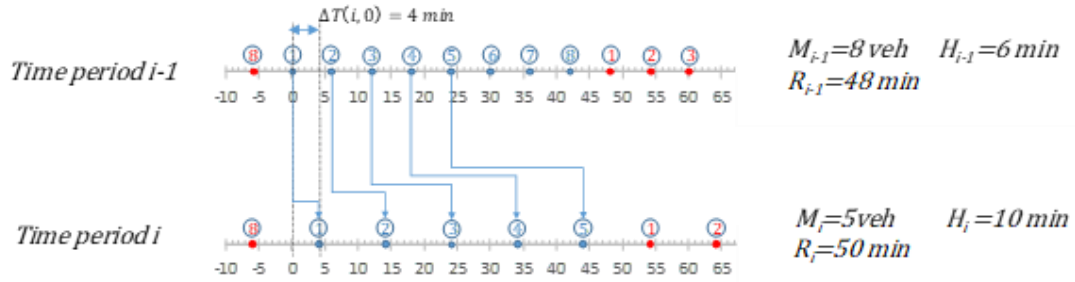


Figura 11. Exemple de les operacions de recàrrega a final d'interval (Estrada, Mensión, Salicrú, & Badia, 2020)

Després d'haver realitzat un cicle, els vehicles anirien a la cotxera i la flota circulant seria $M^0(i)$. En aquest cas no hi hauria un augment de flota.

$$M^1(i) = M^0(i) \quad (11)$$

Finalment, la flota necessària per cobrir el servei es podria calcular com:

$$M_T = \max_{i=1 \dots N} M^1(i) \quad (12)$$

3.1.5. Costos

El servei d'una línia d'autobús té un impacte en els diversos actors que hi prenen part. El càlcul de costos monetitza aquest impacte per poder optimitzar-lo i comparar-lo. Aquests costos estan presents de la mateixa manera en línies servides amb vehicles dièsel o amb vehicles elèctrics, proporcionant una eina per decidir quina tipologia de línia té un impacte menor.

En un servei d'autobús podem trobar, tres tipologies de costos:

- **Cost de l'usuari.** Es calcula tenint en compte el temps que inverteix l'usuari en fer un recorregut, incloent el temps que tarda en accedir a la parada, el temps que ha d'esperar al servei i el temps en el que està dins del vehicle.
- **Cost de l'operador.** Es calcula tenint en compte els recursos que cal aportar per assegurar el funcionament de la línia: el nombre de vehicles necessaris, el cost de manteniment, el cost de personal, etc.
- **Cost per la societat.** Aquest terme engloba els impactes negatius que té el servei per la població que hi interactua tot i que no el faci servir, també conegut com **externalitats negatives**. Inclouen impactes com la contaminació la congestió, el soroll o, l'ús d'espai públic, per exemple.

El cost de l'operador inclou les despeses necessàries per dur a terme el correcte funcionament de la línia, però no determina s'estudia si aquests costos els assumeix una empresa concreta, ni les aportacions de l'administració pública ni si els costos es veuen reduïts per la venda de títols de transport. Aquests aspectes formarien part de la gestió de l'operativa de la línia.

Aquest treball se centra en l'electrificació de serveis ja existents, mantenint les seves característiques inicials, com ara les parades, els temps de pas i la velocitat comercial. L'estudi que es fa d'electrificació de línies d'autobús no produeix canvis en els costos de l'usuari. És per això que es els costos del servei inclouran tan sols els costos de l'operador i les externalitats per veure'n l'evolució a l'electrificar una línia i les diferències entre les diverses estratègies de recàrrega.

El càlcul de costos és necessari per comparar les diverses estratègies de recàrrega amb les que es pot electrificar una línia, però també es compararan amb els costos que té operar la línia amb vehicles dièsel. A aquest cas se l'anomena **Cas 0**.

Costos de l'operador

Per calcular les despeses en que incorre un operador al donar servei a una línia d'autobús, es tenen en compte els costos d'operació que depenen del temps, els que depenen de la distància recorreguda i els costos de l'operativa elèctrica.

Entre els costos d'operació temporals, es troben aquells que estan relacionats amb el temps que els vehicles estan circulant, com per exemple, el sou dels conductors. Aquests costos es recullen en la variable c_{t1} . Alhora, també es tenen en compte els costos que depenen de les hores que l'operador té el vehicle, estigui o no circulant, com per exemple la depreciació dels vehicles. Aquests costos es recullen en la variable c_{t2} .

Per altra banda, la variable c_d té en compte els factors que depenen de la distància que recorren els vehicles, com el cost de l'energia o el cost del combustible que utilitzin.

En quant a l'operativa elèctrica, el cost de les bateries es calcula amb el factor c_b , que té en compte el cost de la capacitat nominal de les bateries i representa la depreciació de les mateixes per hora.

Finalment, s'afegeix el cost dels punts de recàrrega, Z_c , que té en compte si els carregadors es situen al carrer c_{CD} , o bé a la cotxera c_{CN} .

Així, el cost d'operació d'una línia d'autobús es pot calcular de la següent manera:

$$Z_{op} = c_{t1} * VEHS + c_{t2} * VEHD + c_d * VKM + E' * c_b * VEHD + Z_c \quad (13)$$

$$Z_c = c_{CO} * N_{ch,S} * \max_{i=1...N} \frac{2L}{d_c(i)} + c_{CG} * (N_{ch,D} + N_{ch,N}) \quad (14)$$

On $VEHS$ és el nombre total d'hores que la flota han estat en circulació, $VEHD$ és el nombre total d'hores que els vehicles estan disponibles (estiguin o no circulant) i VKM és la distància total que ha recorregut la flota al llarg del servei.

Les variables $N_{ch,D}$ i $N_{ch,N}$ representen el nombre de carregadors a la cotxera per a recarregar les bateries durant la jornada i la nit, respectivament. El terme $\frac{2L}{d_c(i)}$ és el nombre de carregadors necessaris a cada cicle, mentre $N_{ch,S}$ és el nombre de plataformes necessàries degut a la irregularitat dels autobusos.

En el cas que la línia fos operada per vehicles dièsel (**Cas 0**), el cost per a l'operador seria:

$$Z_{op} = c_{t1} * VHT + c_{t2} * VHD + c_d * VKT \quad (15)$$

En aquest cas, els costos relatius a l'operativa elèctrica serien nuls. Així mateix no s'ha considerat els costos relatius a la instal·lació de sortidors per omplir el dipòsit dels vehicles, ja que es considera que és la manera com s'ha operat fins al moment i, per tant els seus costos estan ja amortitzats.

Externalitats

S'anomenen externalitats els impactes socials negatius que provoca l'operativa de la línia i que no es poden incloure com a costos de l'operació tot i ser-ne una conseqüència directa. Les externalitats inclouen efectes sobre la salut de les persones, danys al medi ambient i molèsties a la societat on està situada la línia.

Per tal de valorar l'impacte negatiu de les externalitats, es monetitzen els seus efectes, tenint en compte aspectes com els costos derivats en seguretat social, el cost de revertir els danys a l'entorn o el cost que estaria disposada a assumir la societat per reduir les molèsties provocades per l'operativa de la línia, per exemple.

Les **externalitats** d'una línia d'autobús que s'han tingut en compte en aquest treball són les següents:

- **Emissions de gasos contaminants.** Els vehicles amb motors de combustió interna emeten gasos nocius per la salut de la població que els respira, com ara els òxids nitrosos (NOX) o la matèria particulada (PM). L'exposició a aquests gasos provoca malalties cardiovasculars i respiratòries. Un estudi de Greenpeace mostra que la pol·lució de l'aire

deguda a l'ús de combustibles fòssils causa cada any 4,5 milions de morts prematures a tot el planeta (Air Pollution & Climate Secretariat, 2020).

- **Emissions de gasos d'efecte hivernacle.** Els vehicles de combustió interna també emeten gasos d'efecte hivernacle com el diòxid de carboni (CO₂). Aquestes emissions provoquen i acceleren els efectes del canvi climàtic.
- **Obtenció de l'energia (mix elèctric).** L'obtenció de combustible fòssil, així com l'obtenció d'energia elèctrica també tenen impactes sobre l'entorn. En general, les mesures d'emissions de gasos contaminants i gasos d'efecte hivernacle per a vehicles de combustió interna inclouen els gasos emesos durant l'obtenció del combustible fòssil. En canvi, no es sol tenir en compte aquesta dada per als vehicles elèctrics.

Les emissions corresponents a la obtenció de l'energia elèctrica, també anomenades **mix elèctric**, varien depenent de la seva font d'origen. Si s'obté a partir d'energies renovables, el seu valor és pràcticament nul, però les emissions incrementen si l'energia elèctrica s'ha obtingut a partir de combustibles fòssils.

- **Ocupació de l'espai públic.** En zones urbanes, l'espai públic és un bé escàs. Utilitzar l'espai per a la càrrega dels vehicles es considera una externalitat, ja que té un impacte per la societat amb qui s'interactua.

Per tal de poder valorar i comparar l'impacte social negatiu de les diverses estratègies d'electrificació i del Cas 0 cal monetitzar el cost de les externalitats. Per fer-ho s'ha valorat el cost unitari dels gasos d'efecte hivernacle, dels gasos contaminants, i de l'ús de l'espai públic. Les externalitats de cada estratègia d'electrificació i del Cas 0 s'han calculat de la següent manera.

$$Z_{ext} = Z_{GC} + Z_{GH} + Z_{ME} + Z_{EP} \quad (16)$$

On Z_{GC} és el cost de les externalitats relacionades amb els gasos contaminants, Z_{GH} és el cost de les externalitats relacionades amb els gasos d'efecte hivernacle, Z_{ME} és el cost de les externalitats relacionades amb el mix elèctric i Z_{EP} és el cost de les externalitats relacionades amb l'ús d'espai públic.

Per a les estratègies de recàrrega, no existirà l'externalitat d'emissió de gasos contaminants ni efecte hivernacle, mentre que les externalitats de l'ús de l'espai públic només es donarà en les estratègies de recàrrega a final de cicle i a final d'interval. L'externalitat pel mix elèctric es donarà en les tres estratègies de recàrrega, però serà nul·la en el Cas 0.

Per últim, el cost total de donar el servei d'una línia d'autobús es calcula afegint el cost de les externalitats com un cost addicional al d'operació, ja que n'és una conseqüència directa.

$$Z_T = Z_{op} + Z_{ext} \quad (17)$$

3.2. Model de càlcul dels costos

D'acord al marc teòric definit, l'operador disposa de la base de càlcul que ens permet obtenir els costos totals associats a l'explotació d'una línia per a diferents estratègies de recàrrega elèctrica, incloent els costos per a l'operador i les externalitats. Aquest model de càlcul de costos s'utilitza per conèixer la influència que tenen les característiques d'una línia en els costos resultants de la seva operació.

A continuació es mostra una conceptualització del model de càlcul de costos que s'ha utilitzat.

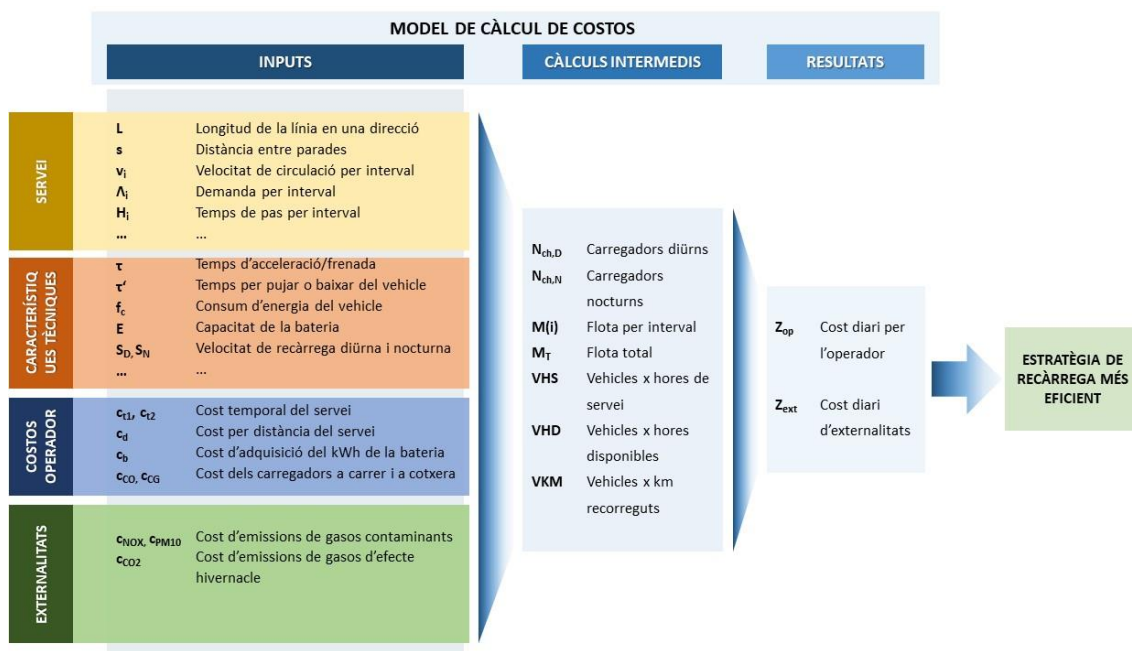


Figura 12. Estructura del model de càlcul de costos.

El model parteix de diverses **dades d'entrada**, que inclouen des de les característiques de la línia, fins a la monetització de les externalitats, passant per les dades tècniques dels vehicles i decisions sobre l'operativa, com l'hora d'inici del servei o el temps de pas al llarg del dia. En el diagrama es mostra una representació de les dades d'entrada necessàries. L'explicació detallada de totes elles es pot trobar a l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat del model**.

Un cop introduïdes les dades d'entrada i escollida l'**estratègia de recàrrega** que es farà servir, el model optimitza l'operativa de la línia i obté alguns **càlculs intermedis**. Aquest conjunt de valors caracteritzen l'operativa de la línia i s'utilitzaran directament per als càlculs de costos.

Finalment el model calcula els **costos diaris per a l'operador** i el **cost diari de les externalitats** del servei operat amb l'estratègia de recàrrega seleccionada, així com els costos diaris per a l'operador i els costos diaris de les externalitats en el cas que el servei es realitzés amb vehicles de dièsel, el que s'ha anomenat **Cas 0** en apartats anteriors.

Per últim, tenint en compte els costos calculats per el model, es pot extreure quina és l'estratègia de recàrrega elèctrica més eficient en cada cas, així com la diferència en els costos que té en relació amb el Cas 0, tant en costos de l'operador com en externalitats.

3.3. Anàlisi de sensibilitat. Resultats principals

L'objectiu de les guies d'electrificació és de proporcionar una eina d'ús senzill que proporcioni una aproximació de quina és la millor manera d'electrificar una línia d'autobús.

Tal com s'ha vist a l'apart anterior, el model de càlcul utilitza quantitat important de dades d'entrada. Per tal de conèixer quines de les dades d'entrada tenen un impacte més important en el model de costos s'ha realitzat una anàlisi de sensibilitat del model per cada una de les variables d'entrada. Aquest estudi es pot trobar a l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat**.

A l'anàlisi de sensibilitat es determinen els rangs de valors que té cada variable de manera habitual, així com un valor estàndard o mitjà. D'aquesta manera, per a l'anàlisi de sensibilitat, es varia el valor d'una de les variables dins del seu rang definit, mentre que la resta de dades d'entrada adopten el valor estàndard.

Adicionalment a l'anàlisi de sensibilitat, s'ha calculat l'elasticitat lineal del model en variar cada dada d'entrada per poder avaluar numèricament l'efecte de cada variable sobre els costos totals del servei.

Estratègia	Elasticitat dels costos per variable													
	I_{A, I_B}	L	s	Λ	H_i	v_i	I_G	E	f_c	V_D	V_N	τ'	T_{pos}	Δ
Diürn a cotxera		0,9592	0,2041	0,0327	1,0332	0,6225	0,0734	0,2042	0,2300	0,0013	0,0106	0,0863		
A final de cycle	0,0665	0,9506	0,1594	0,0219	1,1714	0,8395	0,0617	0,0390	0,1287	0,0136	0,0118	0,0192	0,0033	0,0026
A final d'interval	0,0410	0,9181	0,1723	0,0393	1,0637	0,6994	0,0523	0,0461	0,1161	0,0366	0,0050	0,0427	0,0136	
Cas 0		0,9613	0,1421	0,0221	1,1409	0,7228	0,0722					0,0169		

Taula 1. Elasticitat del cost total del servei per a cada dada d'entrada

Cal destacar que alguns dels valors de l'elasticitat que es mostren són el valor mitjà de l'elasticitat avaluat en diversos valors, ja que la variació dels costos no és lineal en l'anàlisi de sensibilitat d'algunes variables, com ara el temps de pas.

Fixant-nos en l'elasticitat, les tres variables que tenen un efecte més significatiu sobre el càlcul dels costos del model són la longitud de la línia, el temps de pas del servei i la velocitat de circulació. A continuació es mostra la seva anàlisi de sensibilitat.

Longitud de la línia en un sentit

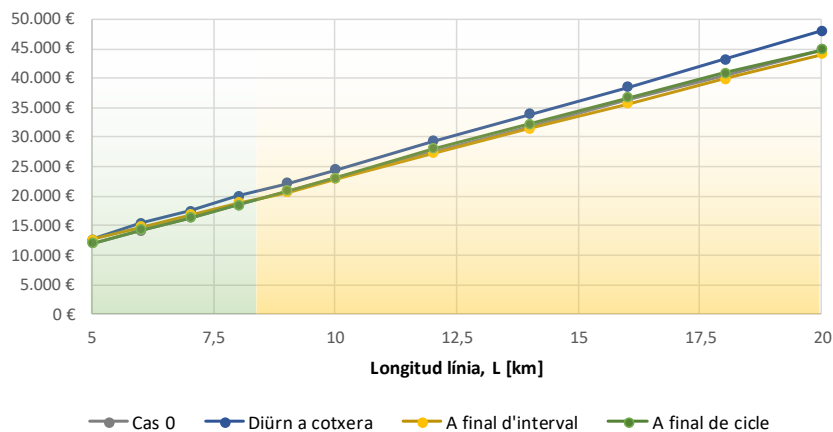


Figura 13. Anàlisi de sensibilitat de la longitud de línia, L.

Temps de pas

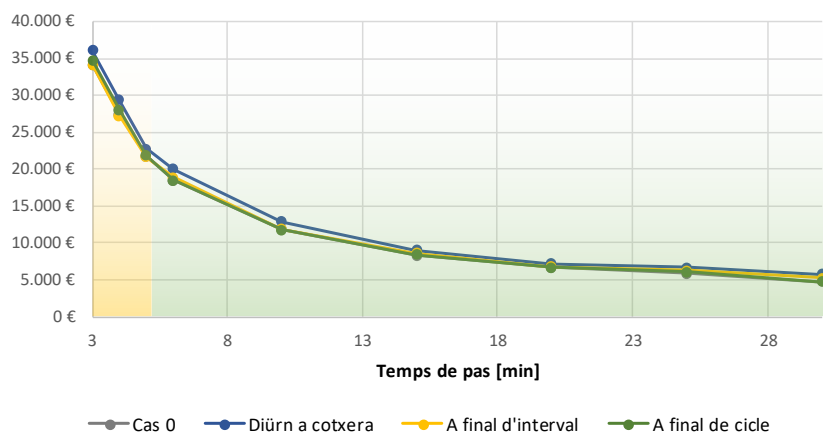


Figura 14. Anàlisi de sensibilitat del temps de pas, H_i .

Velocitat de circulació

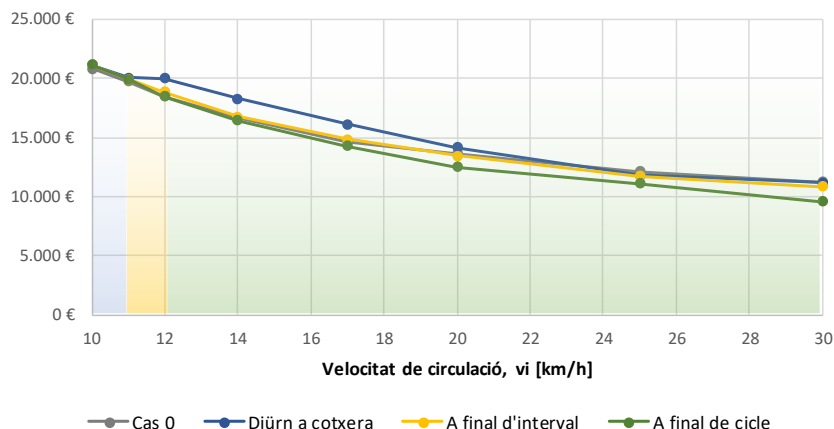


Figura 15. Anàlisi de sensibilitat de la velocitat de circulació, v_i .

L'anàlisi de sensibilitat d'aquestes variables mostra que, tot i que totes tres afecten en gran manera als costos diaris del servei, tan sols la longitud de la línia fa que variï l'estratègia de recàrrega més adequada. Tot i això, totes tres variables es consideren altament rellevants en el model de costos i s'inclouran a l'elaboració de la guia.

D'altra banda, hi ha diverses variables que, encara que no tinguin associada una elasticitat del model tan important, tenen un efecte clau a l'hora de determinar l'estratègia de recàrrega més eficient. Aquestes són el factor de consum i la distància entre l'inici o final de línia i la zona de càrrega a la via pública.

Factor de consum

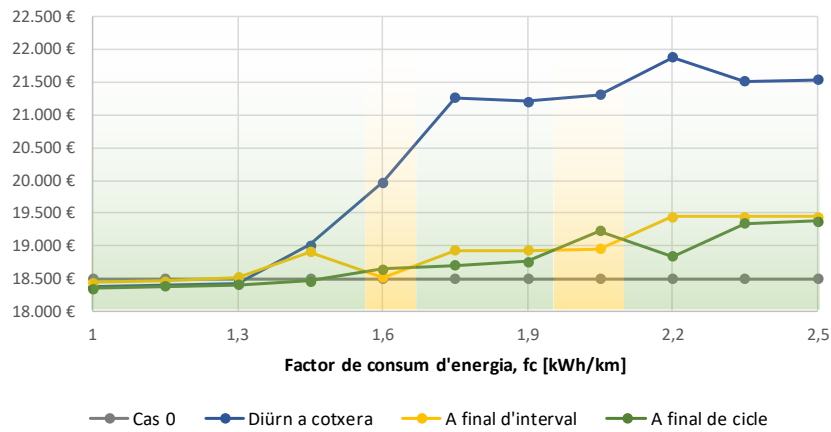


Figura 16. Anàlisi de sensibilitat del factor de consum d'energia, f_c .

Distància entre la línia i la zona de càrrega

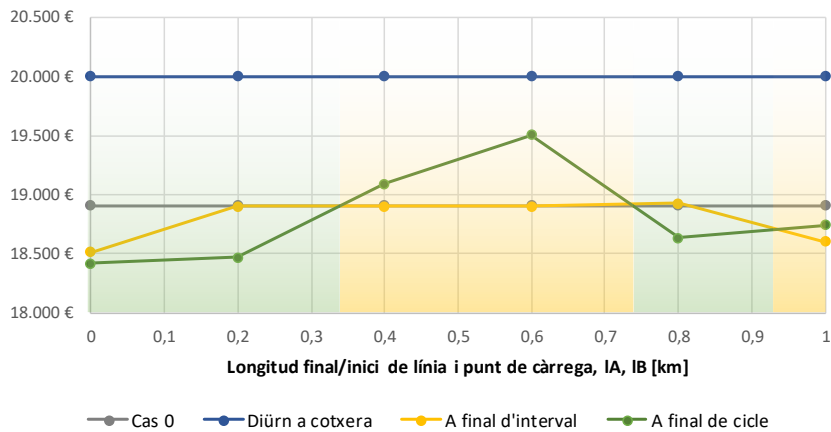


Figura 17. Anàlisi de sensibilitat de la distància entre la línia i la zona de càrrega, I_A, I_B .

A banda de les variables mencionades, cal destacar la importància de la capacitat màxima de la bateria i la velocitat de càrrega dels carregadors diürns, ja que poden variar completament l'estratègia més favorable i inclús fer que algunes estratègies deixin de ser viables.

Capacitat de la bateria

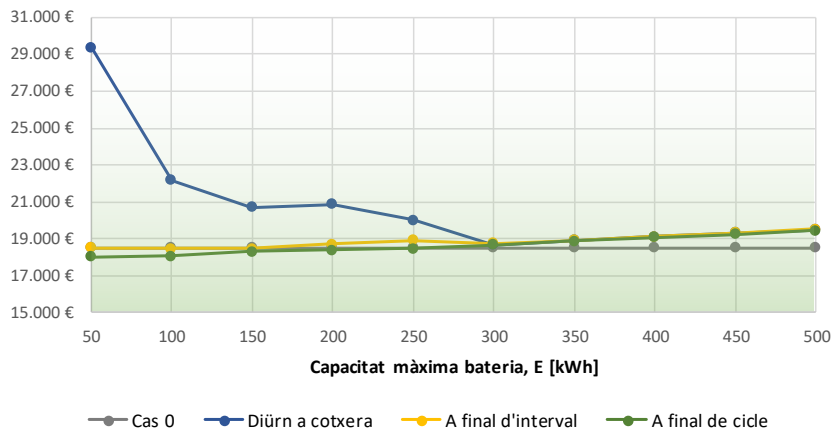


Figura 18. Anàlisi de sensibilitat de la capacitat de la bateria, E .

Velocitat càrrega ràpida

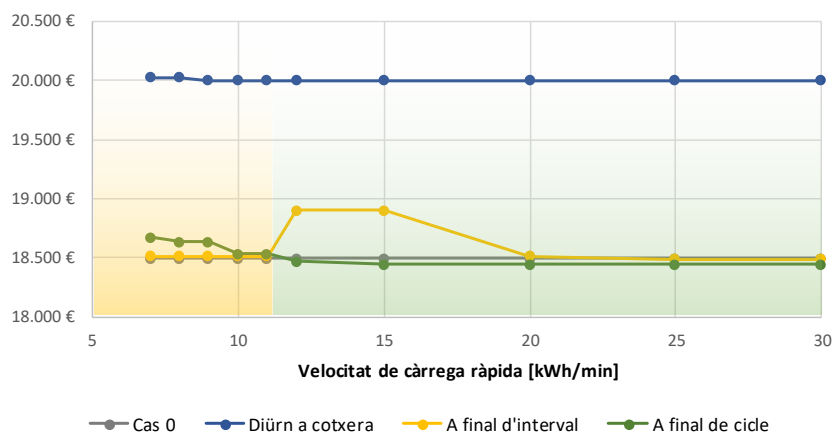


Figura 19. Anàlisi de sensibilitat de la velocitat de càrrega ràpida, S_D .

Tot i l'especial importància que tenen la capacitat de la bateria i la velocitat de càrrega en escollir la millor estratègia de recàrrega, aquestes dues variables depenen de les decisions de compra de l'operador. De manera contrària al que succeeix amb altres variables, el valor de la capacitat de la bateria i de la velocitat de càrrega és flexible i es pot variar a conveniència de l'operador. Així mateix, és una dada que, habitualment, no es coneix en el moment de planificar l'electrificació d'una línia.

Per això, la capacitat de la bateria i la velocitat de càrrega s'utilitzaran en l'elaboració de les guies d'electrificació, però no seran dades que es requereixin als operadors, sinó que formaran part de les recomanacions d'electrificació de les guies.

4. Guies d'electrificació d'una línia d'autobús

Les guies per a l'electrificació de línies d'autobús que es presenten a continuació es basen en l'anàlisi dels resultats del model de costos i dels seus canvis en funció de modificacions en les variables. En aquest sentit, s'han detectat les variables que tenen més influència en determinar l'estratègia de recàrrega més eficient.

Les guies fan una sèrie de preguntes, en les que es demana informació sobre algunes de les següents variables: la longitud de la línia (L), el temps de pas (H_i), la velocitat de circulació (v_i), el factor de consum (f_c) i la distància entre la línia i la zona de càrrega a la via pública ($I_{A,B}$).

Amb aquesta informació les guies ofereixen una recomanació sobre l'estratègia de recàrrega més adequada segons la capacitat de la bateria i la velocitat de recàrrega que s'implanti. Finalment, també s'ofereix una aproximació del cost diari total del servei, incloent el cost d'operació i les externalitats, així com el càlcul de l'estalvi comparat amb el Cas 0.

4.1. Guies per a l'electrificació d'una línia d'autobús

La guia realitza les següents preguntes per a obtenir les dades necessàries per valorar quina és l'estratègia de recàrrega més adient en cada cas. Les preguntes estan ordenades de manera que es demana la mínima informació necessària. Per això, les preguntes poden variar segons la resposta a la pregunta anterior.

1. Quina és la longitud de la línia en un sentit?
 - 1.A. Quin és el temps de pas mínim de la línia durant el servei?
 - 1.A.1. Quin factor de consum tindran els vehicles elèctrics durant el recorregut?
 - 1.A.1.a. Quina velocitat de circulació mitjana tenen els vehicles al llarg del servei?
 - 1.A.1.a.1. A quina distància de l'inici o del final de la línia es pot situar una zona de càrrega a la via pública?
 - 1.A.1.b. Quina velocitat de circulació mitjana tenen els vehicles al llarg del servei?
 - 1.A.1.b.1. A quina distància de l'inici o del final de la línia es pot situar una zona de càrrega a la via pública?
 - 1.B. Quin és el temps de pas mínim de la línia durant el servei?
 - 1.B.1. Quina velocitat de circulació mitjana tenen els vehicles al llarg del servei?
 - 1.B.1.a. Quin factor de consum tindran els vehicles elèctrics durant el recorregut?
 - 1.B.1.a.1. A quina distància de l'inici o del final de la línia es pot situar una zona de càrrega a la via pública?

A partir de la informació aportada, la línia que s'estudia es classifica en **17 escenaris** diferents. Els escenaris agrupen les línies que tenen un comportament semblant en quant a requeriments elèctrics. Per cada escenari es donen recomanacions a l'hora d'electrificar una línia d'autobús.

Aquestes recomanacions mostren quina és l'estratègia de recàrrega que minimitza els costos totals del servei, depenent de la capacitat de les bateries dels vehicles que s'adquireixin (E) i de la velocitat de recàrrega dels carregadors ràpids que s'implementin (S_D). Les guies també mostren els costos d'una línia representativa de cada escenari, així com la diferència de costos totals respecte al cas 0.

L'operativa de les estratègia de recàrrega que s'utilitzen es resumeix a continuació. Tot el detall es pot trobar a l'apartat **3.1. Marc teòric**.

Recàrrega diürna a cotxera. Quan els vehicles en servei es queden sense energia, tornen a la cotxera per ser recarregats. Un cop recarregats s'introdueixen de nou al servei. L'operativa de la línia s'optimitza per aprofitar les fluctuacions en el servei i reduir la flota necessària.

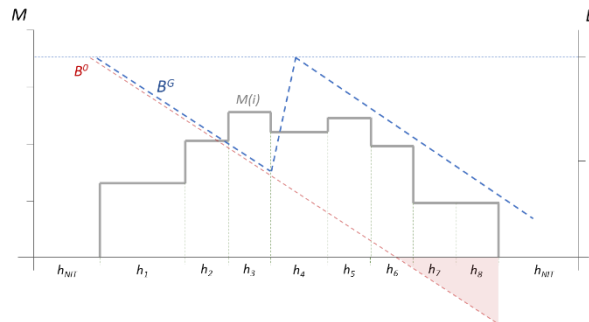


Figura 20. Variació de la bateria en la recàrrega diürna a cotxera.

Recàrrega a final de cicle. Els vehicles s'aturen a l'inici o el final de la línia de manera regular cada cop que acaben un cicle (el recorregut de la línia en els dos sentits). En aquesta estratègia s'aprofita aquest temps per recarregar la bateria, instal·lant punts de recàrrega a la primera o l'última parada de la línia o en zones properes.

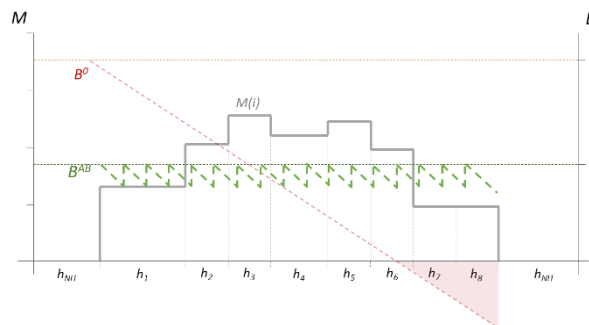


Figura 21. Variació de la bateria en la recàrrega a final de cicle.

Recàrrega a final d'interval. Els vehicles recarreguen les bateries a la mateixa zona que l'estratègia anterior, però no ho fan cada cicle, sinó quan canvien les necessitats de flota del servei.

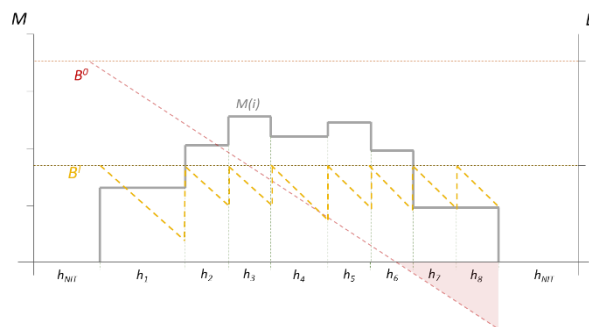


Figura 22. Variació de la bateria en la recàrrega a final d'interval.

El diagrama següent resumeix la classificació de les línies en diversos escenaris depenent de les dades que s'aportin.

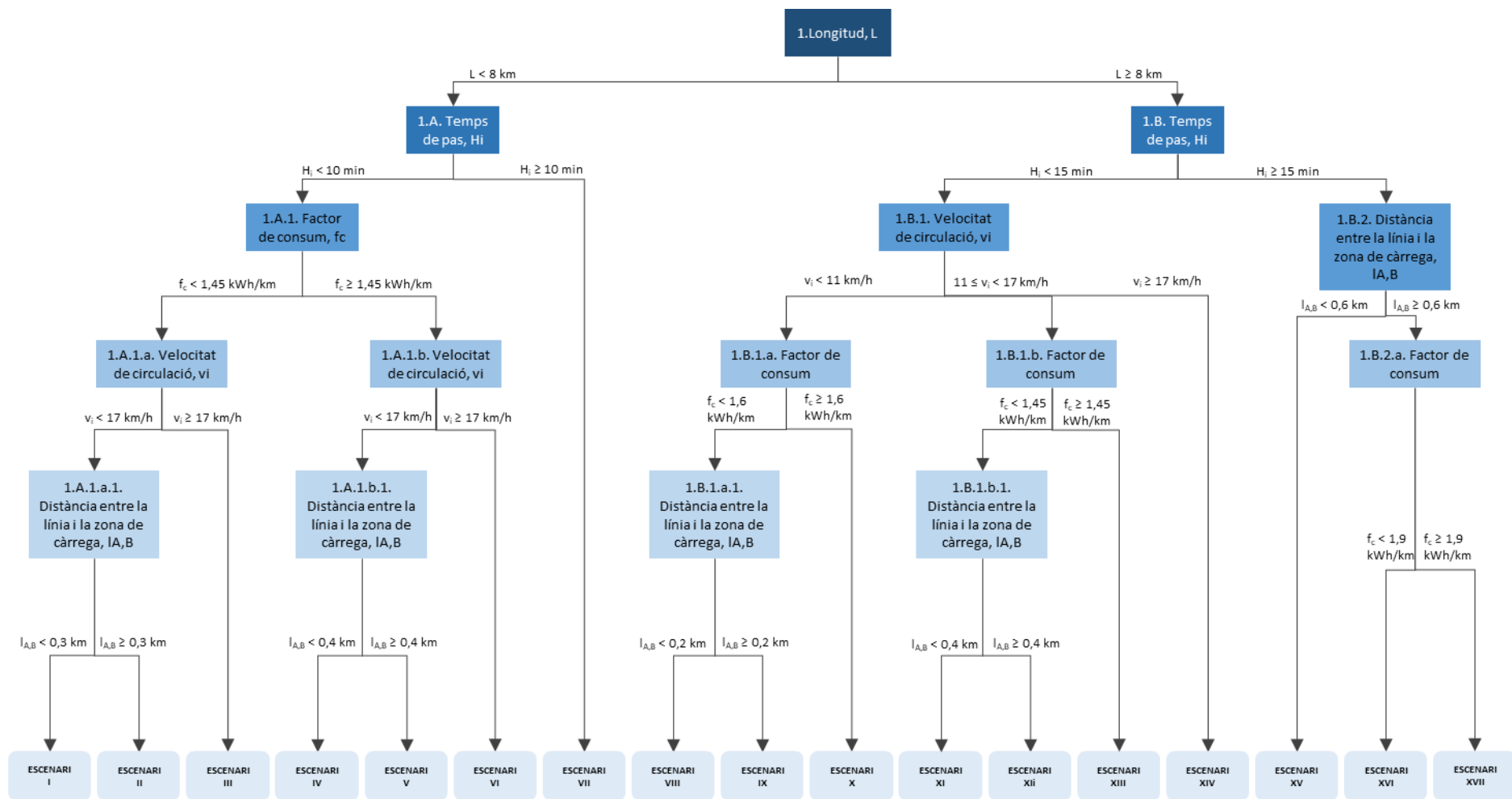


Figura 23. Diagrama de l'estructura lògica de les guies d'electrificació.

Un cop elaborades les guies, s'ha creat un aplicatiu per consultar-les de manera intuïtiva. En aquesta eina es demanen les dades necessàries per classificar les línies en els diversos escenaris. Segons la resposta a cada pregunta, l'aplicatiu mostra una pregunta següent diferent, recollint la mínima informació necessària.

Un cop obtingudes les dades necessàries per classificar la línia en qüestió en un escenari, es detallen les guies d'electrificació per a aquest cas concret, mostrant l'estratègia de recàrrega més adient segons diversos valors de la capacitat de la bateria (E) i la velocitat de recàrrega dels carregadors elèctrics ràpids (S_D).



Aquestes guies consten d'unes preguntes que, amb el menor nombre de dades possibles, busquen caracteritzar la línia i recomanar el mètode d'electrificació més adient en funció de les característiques de les bateries i la velocitat de recàrrega.

Tornar a l'inici

Preguntes	Dades
Quina es la Longitud de la línia? (Km entre capçaleres)	5
Quin es l'interval de pas? (minuts entre vehicles)	5
Quin es el factor de consum? (amb proves pilots o equivalències disponibles)	1,15
Quina es la velocitat de circulació? (km/h)	11
Per considerar escenaris de càrrega al carrer: A quina distància entre la línia i la zona de càrrega es podrien posar els carregador? (km)	0,4

Escenari II
1.A.1.a.1

Mostrar distribució de costos per a un cas similar

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kW/h/mi]	7	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	9	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	10	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	12	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	14	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	17	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	20	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	25	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	30	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn

Figura 24. Guies d'electrificació de les línies. Aplicatiu versió 1.

L'aplicatiu també permet consultar els costos que tindria una línia representativa de l'escenari. Addicionalment, també es permet consultar la diferència de costos amb el cas 0 per a la línia representativa de l'escenari.

A continuació es mostren les guies d'electrificació d'una línia d'autobús per cada escenari, detallant l'estratègia de recàrrega més adient per a diversos valors de la capacitat de la bateria (E) i la velocitat de recàrrega dels carregadors ràpids (S_D). A l'**Annex 2. Elaboració de les guies** es pot trobar, per cada escenari, el detall dels costos del servei per cada estratègia de recàrrega, així com la comparativa amb el Cas 0.

Escenari I

L'escenari I agrupa les línies curtes, amb un temps de pas reduït, un factor de consum mitjà o baix, una velocitat de circulació mitjana o baixa i una distància petita entre la línia i la zona de càrrega.

$$L < 8 \text{ km}; H_i < 10 \text{ min}; f_c < 1,45 \text{ kWh/km}; v_i < 17 \text{ km/h}; l_{A,B} < 0,3 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, SD [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12	Interval	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Interval	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Interval	Interval	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Interval	Interval	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Interval	Interval	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Interval	Interval	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 25. Estratègia de càrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari I.

Per aquesta tipologia de línies, l'estratègia de recàrrega més recomanable és la recàrrega a final de cicle, excepte en els casos en què la capacitat de la bateria és petita però la velocitat de recàrrega és elevada, en els que la recàrrega a final d'interval és la més competitiva.

Per valors mitjans de la capacitat de la bateria, els costos de les tres estratègies són molt semblants. És per això que, en el cas de les bateries de 200 kWh i per qüestions d'optimització de les estratègies, la recàrrega diürna a cotxera es torna més eficient de manera puntual.

Escenari II

Les línies de l'escenari II són línies curtes, amb un temps de pas reduït, un factor de consum mitjà o baix, una velocitat de circulació mitjana o baixa i una distància llarga entre la línia i la zona de càrrega.

$$L < 8 \text{ km}; H_i < 10 \text{ min}; f_c < 1,45 \text{ kWh/km}; v_i < 17 \text{ km/h}; l_{A,B} \geq 0,3 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, SD [kWh/min]	7	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	9	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	10	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	12	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	14	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	17	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	20	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	25	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	30	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn

Figura 26. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari II.

Per a aquesta tipologia de línies, l'estratègia de recàrrega més eficient depèn de la capacitat de la bateria que s'adquireixi, independentment de la velocitat de recàrrega dels carregadors ràpids.

Si la línia s'opera amb vehicles que tenen bateries de mitjana i alta capacitat, que poden emmagatzemar 200 kWh o més, la millor estratègia és la recàrrega diürna a cotxera. En canvi, si

les bateries que es fan servir tenen una capacitat entre 100 i 200 kWh, l'estratègia recomanada és la recàrrega a final d'interval.

Per capacitats de bateria menors a 100 kWh, és possible que els vehicles no tinguin prou energia per arribar al final de l'interval. En aquest cas, caldria utilitzar la recàrrega a final de cicle.

S'observa que les característiques de les línies de l'escenari I i de l'escenari II són molt semblants, només diferenciades per la distància entre l'inici i el final de la línia i la zona de càrrega de la via pública ($I_{A,B}$). Quan aquesta distància pren valors reduïts, l'estratègia de càrrega a final de cicle presenta moltes avantatges en costos respecte la resta d'estratègies.

Escenari III

En l'escenari III, hi ha representades les línies curtes, amb un temps de pas reduït, un factor de consum mitjà o baix i una velocitat de circulació alta.

$$L < 8 \text{ km}; H_i < 10 \text{ min}; f_c < 1,45 \text{ kWh/km}; v_i \geq 17 \text{ km/h}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 27. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari III.

L'estratègia de recàrrega recomanada per a aquesta tipologia de línies és la recàrrega a final de cicle. Aquesta estratègia de recàrrega és la que presenta costos menors per a qualsevol combinació de valors de la capacitat de la bateria (E) i de la velocitat de càrrega ràpida (S_D).

Així mateix, aquesta estratègia de recàrrega també és la més adient per a aquesta tipologia de línies sigui quina sigui la distància entre l'inici o el final de la línia i la zona de càrrega a la via pública ($I_{A,B}$).

Les línies curtes amb un factor de consum mitjà o baix consumeixen molt poca energia de la bateria cada cicle. Quan els vehicles arriben al final del cicle, necessiten molt poc temps per recarregar l'energia suficient per seguir amb el servei. L'alta velocitat de circulació en aquest escenari, fa que els vehicles tinguin temps suficient per recarregar les bateries a final de cicle, el que redueix la flota i el nombre de punts de càrrega necessaris.

Per tot això, l'estratègia de recàrrega a final de cicle és molt adequada en aquesta tipologia de línies. En canvi, la recàrrega a final d'interval, donat el reduït temps de pas, necessitaria augmentar la flota per poder recarregar les bateries. La recàrrega diürna a cotxera inclouria el desplaçament dels vehicles fins a la cotxera i, donat el reduït temps de pas, caldria augmentar la flota per substituir els vehicles que estan recarregant-se a la cotxera.

Escenari IV

En l'escenari IV s'agrupen les línies curtes amb un temps de pas reduït, un factor de consum alt, una velocitat de circulació mitjana o baixa i una distància petita entre la línia i la zona de càrrega.

$$L < 8 \text{ km}; H_i < 10 \text{ min}; f_c \geq 1,45 \text{ kWh/km}; v_i < 17 \text{ km/h}; l_{A,B} < 0,4 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 28. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari IV.

En aquest escenari, l'estratègia de recàrrega recomanada és la recàrrega a final de cicle excepte quan la velocitat de recàrrega ràpida és baixa, de menys de 8 kWh/min, i la línia està servida per vehicles amb bateries de gran capacitat, que poden emmagatzemar 300 kWh o més. En aquest cas, l'estratègia que presenta menors costos totals és la recàrrega diürna a cotxera.

Donada la similitud en els costos de la recàrrega a final de cicle i diürna a cotxera per a bateries de mitja o alta capacitat, la recàrrega diürna a cotxera és puntualment la més eficient per a bateries de 300 kWh de capacitat.

La poca distància entre el final o l'inici de la línia i la zona de càrrega a la via pública produeix una reducció de costos de l'estratègia de recàrrega a final de cicle que la fa més eficient davant la resta de les estratègies.

Escenari V

Les línies de l'escenari V, tenen una distància curta, un temps de pas reduït, un factor de consum alt, una velocitat de circulació mitjana o baixa i una distància llarga entre la línia i la zona de càrrega.

$$L < 8 \text{ km}; H_i < 10 \text{ min}; f_c \geq 1,45 \text{ kWh/km}; v_i < 17 \text{ km/h}; l_{A,B} \geq 0,4 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	9	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	10	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	12	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	14	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	17	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	20	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	25	Cicle	Interval	Interval	Interval	Cicle	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	30	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn

Figura 29. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari V.

En aquest escenari la capacitat de les bateries que es facin servir és fonamental per escollir l'estratègia de recàrrega que millor s'adapta.

Per a línies servides amb bateries d'alta capacitat, que puguin emmagatzemar, com a mínim, 300 kWh; l'estratègia més eficient és la recàrrega diürna a cotxera. En canvi, quan les bateries que s'utilitzen tenen una capacitat menor als 300 kWh, l'estratègia que presenta menors costos és la recàrrega a final d'interval.

Si les bateries que s'utilitzen tenen una capacitat molt limitada (menys de 100 kWh) és possible que els vehicles es quedin sense bateria abans d'arribar a final d'interval. En aquest cas caldria implantar una estratègia de recàrrega a final de cicle.

Tal com ha succeït en escenaris anteriors, per a bateries d'entre 150 kWh i 250 kWh, les estratègies de recàrrega a final de cicle o a final d'interval presenten costos similars. És per això que, puntualment, la recàrrega a final de cicle és més eficient que la recàrrega a final d'interval.

En aquest escenari, la velocitat de càrrega ràpida no té un efecte rellevant, ja que no és una variable decisiva a l'hora de calcular quina és l'estratègia que presenta costos menors.

Escenari VI

A l'escenari VI es recullen les línies curtes amb un temps de pas reduït, un factor de consum alt i una velocitat de circulació elevada.

$$L < 8 \text{ km}; H_i < 10 \text{ min}; f_c \geq 1,45 \text{ kWh/km}; v_i \geq 17 \text{ km/h}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn
	12	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 30. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari VI.

L'estratègia recomanada per aquesta tipologia de línies és la recàrrega a final de cicle. L'única excepció són les línies que estiguin servides amb bateries de molt alta capacitat (500 kWh o més) i en les que la velocitat de càrrega ràpida sigui baixa (menys de 12 kWh/min). En aquests casos, la recàrrega diürna a cotxera és l'estratègia que presenta menors costos.

En aquest escenari, la distància entre l'inici o el final d'una línia i la zona de càrrega a la via pública no s'inclou en les dades que les guies requereixen, ja que no és rellevant per determinar l'estratègia més adequada. Les altes velocitats d'aquesta tipologia de línies afavoreixen la recàrrega a final de cicle de tal manera que la distància que s'hagi de recórrer per arribar a la zona de càrrega no té una influència suficientment important en els costos per modificar l'elecció de l'estratègia de recàrrega.

Escenari VII

A l'escenari VII s'inclouen les línies curtes amb un temps de pas elevat.

$$L < 8 \text{ km}; H_i \geq 10 \text{ min}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 31. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari VII.

L'estratègia recomanada per a aquesta tipologia de línies és la recàrrega a final de cicle, per a qualsevol capacitat de les bateries i per a qualsevol velocitat de càrrega ràpida.

La reduïda distància i la baixa freqüència d'aquesta tipologia de línies fa que les seves necessitats energètiques siguin escasses i que el temps entre expedicions sigui suficient per a la recàrrega de les bateries a final de cicle, independentment de la resta de variables. És per això que, per aquest escenari no es demanen els valors de la velocitat de circulació, el factor de consum o la distància entre l'inici o final de la línia i la zona de càrrega a la via pública.

Escenari VIII

Les línies de l'escenari VII són llargues, amb un temps de pas reduït o mitjà, una velocitat de circulació baixa, un factor de consum baix i una distància petita entre la línia i la zona de càrrega.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i < 15 \text{ min}; v_i < 11 \text{ km/h}; f_c < 1,60 \text{ kWh/km}; l_{A,B} < 0,2 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Cicle	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	9	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	10	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	12	Interval	Interval	Interval	Diürn	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 32. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari VIII.

En aquest escenari, l'estratègia de recàrrega varia substancialment amb la capacitat de les bateries que es facin servir i també amb la velocitat de càrrega que tinguin els carregadors ràpids.

Per a bateries de capacitat mitjana o alta, que poden emmagatzemar com a mínim 200 kWh i velocitats de càrrega ràpida baixes, de menys de 12 kWh/min, l'estratègia més adequada és la recàrrega diürna a cotxera. Per a les mateixes bateries, que poden emmagatzemar com a mínim

200 kWh i velocitats de càrrega ràpida mitjanes o altes, de 12 kWh/min i superiors, l'estratègia més adequada és la recàrrega a final de cycle.

En canvi, si s'utilitzen bateries amb poca capacitat, que poden emmagatzemar menys de 200 kWh, els costos del servei amb l'estratègia de recàrrega a final de cycle o a final d'interval són molt semblants. Aquest fet, juntament amb la variabilitat dels costos a causa de l'optimització de l'operativa, fa que les dues estratègies s'alternin els costos mínims. En aquest cas ($E < 200$ kWh i per qualsevol $I_{A,B}$), per escollir entre la recàrrega a final de cycle o a final d'interval caldria realitzar una anàlisi més detallada de cada línia.

Escenari IX

En l'escenari IX es caracteritzen les línies llargues, amb un temps de pas reduït o mitjà, una velocitat de circulació baixa, un factor de consum baix i una distància mitjana o llarga entre la línia i la zona de càrrega.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i < 15 \text{ min}; v_i < 11 \text{ km/h}; f_c < 1,60 \text{ kWh/km}; I_{A,B} \geq 0,2 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	9	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	10	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	12	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	14	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	17	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	20	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	25	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	30	Interval	Interval	Cicle	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn

Figura 33. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari IX.

Per aquesta tipologia de línies, l'estratègia de recàrrega més adequada depèn de la capacitat de les bateries que es facin servir. Per a línies servides amb bateries de mitjana o alta capacitat, que poden emmagatzemar com a mínim 200 kWh, l'estratègia més adequada és la recàrrega diürna a cotxera. Si les línies estan servides amb bateries de capacitat reduïda, que poden emmagatzemar menys de 200 kWh, l'estratègia que presenta menor cost és la recàrrega a final d'interval.

La velocitat de càrrega ràpida no és rellevant a l'hora d'escollir l'estratègia de recàrrega més adient.

Escenari X

A l'escenari X s'inclouen les línies amb una longitud llarga, un temps de pas reduït, una velocitat de circulació baixa i un factor de consum elevat.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i < 15 \text{ min}; v_i < 11 \text{ km/h}; f_c \geq 1,60 \text{ kWh/km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, SD [kWh/min]	7	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	9	Interval	Cicle	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	10	Interval	Cicle	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	12	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	14	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	17	Interval	Interval	Interval	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	20	Interval	Interval	Interval	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	25	Interval	Interval	Interval	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	30	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn

Figura 34. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari X.

Durant les anàlisis prèvies a l'obtenció de l'escenari X, s'ha detectat molta variabilitat en les estratègies que minimitzen el cost en aquesta tipologia de línies. Tot i que s'ofereixen unes recomanacions, es suggereixen anàlisis addicionals per a les línies d'aquests escenaris.

Per aquesta tipologia de línies, l'estratègia més adequada depèn de la capacitat de la bateria. Per bateries de mitjana o alta capacitat, 300 kWh o més, la millor estratègia és la recàrrega a diürna a cotxera. Per bateries de mitjana o baixa capacitat, de menys de 300 kWh, els costos de l'estratègia de recàrrega a final de cicle i a final d'interval són molt semblants.

Les característiques d'aquesta línia fan que la distància entre l'inici o el final de la línia i la zona de càrrega a la via pública no sigui rellevant per a l'obtenció de les recomanacions. Així mateix, es detecta que la velocitat de recàrrega ràpida no afecta a la millor estratègia de recàrrega.

Escenari XI

A l'escenari XI es caracteritzen les línies amb una longitud llarga, un temps de pas reduït, una velocitat de circulació mitjana, un factor de consum reduït o mitjà, i una distància entre la línia i la zona de càrrega petita.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i < 15 \text{ min}; 11 \text{ km/h} \leq v_i < 17 \text{ km/h}; f_c < 1,45 \text{ kWh/km}; l_{A,B} < 0,4 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, SD [kWh/min]	7	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 35. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari XI.

Per aquesta tipologia de línies, l'estratègia més adequada és la recàrrega a final de cicle, sigui quina sigui la capacitat de les bateries que es facin servir, i sigui quina sigui la velocitat de recàrrega ràpida que s'implementi.

Per a bateries de capacitat baixa, els costos de la recàrrega a final de cicle i a final d'interval són semblants, pel que puntualment la recàrrega a final d'interval és més eficient que la recàrrega a final de cicle.

Les línies d'aquest escenari, tot i necessitar una flota extensa, tenen un factor de consum reduït, el que fa que l'energia es pugui recarregar en poc temps. En aquests casos, la recàrrega a final de cicle presenta costos molt reduïts, especialment quan la distància dels carregadors estan a prop de la línia.

Escenari XII

A l'escenari XII s'agrupen les línies amb una longitud llarga, un temps de pas reduït, una velocitat de circulació mitjana, un factor de consum reduït o mitjà, i una distància entre la línia i la zona de càrrega mitjana o alta.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i < 15 \text{ min}; 11 \text{ km/h} \leq v_i < 17 \text{ km/h}; f_c < 1,45 \text{ kWh/km}; l_{A,B} \geq 0,4 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	8	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	9	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	10	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	12	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	14	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	17	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	20	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	25	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn
	30	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn	Diürn

Figura 36. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari XII.

En aquest escenari, l'estratègia de recàrrega més adequada depèn de la capacitat de la bateria que s'utilitzi. Per capacitats de bateria molt petites (menors a 100 kWh), la millor estratègia és la recàrrega a final de cicle. Per bateries de capacitat baixa o mitjana (entre 100 kWh i 200 kWh), l'estratègia que presenta menors costos és la recàrrega a final d'interval. Per bateries de capacitat mitjana o alta (de 200 kWh o superior), la millor estratègia és la recàrrega diürna a cotxera.

S'observa que la velocitat de recàrrega dels carregadors ràpids no té efecte en l'elecció de la millor estratègia de recàrrega.

La única diferència entre aquest escenari i l'anterior és la distància entre la línia i la zona de carregadors. Per línies que necessiten una extensa flota, si cal recórrer una distància important cada cicle, l'estratègia de recàrrega a final de cicle es torna menys eficient.

Escenari XIII

A l'escenari XIII s'inclouen les línies amb una longitud llarga, un temps de pas reduït, una velocitat de circulació mitjana, i un factor de consum elevat.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i < 15 \text{ min}; 11 \text{ km/h} \leq v_i < 17 \text{ km/h}; f_c \geq 1,45 \text{ kWh/km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, SD [kWh/min]	7		Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	8		Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	9		Cicle	Cicle	Interval	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	10		Cicle	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	12		Cicle	Cicle	Cicle	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	14		Interval	Interval	Cicle	Interval	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	17		Interval	Interval	Cicle	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	20		Cicle	Interval	Interval	Cicle	Interval	Interval	Diürn	Diürn	Diürn
	25		Cicle	Cicle	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30		Cicle	Cicle	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 37. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari XIII.

Durant les anàlisis prèvies a l'obtenció de l'escenari XIII, s'ha detectat molta variabilitat en les estratègies que minimitzen el cost en aquesta tipologia de línies. Tot i que s'ofereixen unes recomanacions, es suggereixen anàlisis addicionals per a les línies d'aquests escenaris.

Per aquest escenari, la millor estratègia quan les bateries tenen capacitats elevades (400 kWh o superiors), és la recàrrega diürna a cotxera. L'electrificació de la línia no és viable si es realitza amb bateries menors a 100 kWh. Per a les bateries d'entre 100 i 400 kWh, l'estratègia més adient varia entre la recàrrega a final de cicle i la recàrrega a final d'interval.

Escenari XIV

L'escenari XIV inclou línies llargues amb un temps de pas reduït o mitjà i una velocitat de circulació elevada.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i < 15 \text{ min}; v_i \geq 17 \text{ km/h}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, SD [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	12	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	14	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	17	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	20	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Diürn	Diürn
	25	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 38. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari XIV.

L'estratègia de recàrrega recomanada per aquesta tipologia de línies és la recàrrega a final de cicle excepte per a línies servides amb bateries de gran capacitat, que puguin emmagatzemar 450 kWh o més, i que tinguin una velocitat de càrrega ràpida que no sigui molt elevada, menor a 25 kWh/min. En aquest cas, es recomana la recàrrega diürna a cotxera.

En aquest escenari, l'elevada velocitat de circulació afavoreix la recàrrega a final de cicle, ja que permet el temps suficient per a la recàrrega de les bateries, reduint la flota i els punts de càrrega

necessaris. L'elevada velocitat afavoreix la recàrrega a final de cicle de tal manera que el factor de consum i la distància entre l'inici o el final de la línia i la zona de càrrega no són rellevants.

L'elevada velocitat de les línies pertanyents a aquest escenari també redueix el temps que tarden els vehicles en accedir a la cotxera, reduint els costos de l'estratègia de recàrrega diürna a cotxera.

Escenari XV

Les línies de l'escenari XIII són línies llargues que tenen un temps de pas elevat i una distància mitjana o petita entre la línia i la zona de càrrega.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i \geq 15 \text{ min}; I_{A,B} < 0,6 \text{ km}$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	8	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 39. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari XV.

L'estratègia de recàrrega recomanada per aquesta tipologia de línies és la recàrrega a final de cicle. Aquesta és l'estratègia que presenta un menor cost sigui quina sigui la capacitat de les bateries que s'utilitzin i sigui quina sigui la velocitat de càrrega ràpida que s'implementi.

La poca freqüència del servei i la poca distància entre l'inici o el final de la línia i la zona de càrrega a la via pública afavoreixen la recàrrega a final de cicle en gran manera. Tant és així, que el factor de consum i la velocitat de circulació no són rellevants.

Escenari XVI

L'escenari XIV agrupa les línies llargues amb un temps de pas elevat, una distància llarga entre la línia i la zona de càrrega i un factor de consum petit o mitjà.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i \geq 15 \text{ min}; I_{A,B} \geq 0,6 \text{ km}; f_c < 1,90$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	8	Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 40. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari XVI.

En aquest escenari, l'estratègia de recàrrega recomanada per a línies servides amb bateries que tinguin una capacitat mitjana o alta, que puguin emmagatzemar 200 kWh com a mínim, és la recàrrega a final de cicle.

En canvi, per a línies servides amb bateries amb una capacitat baixa, que puguin emmagatzemar menys de 200 kWh, es recomana la recàrrega a final d'interval. Tot i això, per a bateries amb molt poca capacitat (menys de 100 kWh) i velocitat de càrrega ràpida mitjana o elevada (9 kWh/min o superior), la recàrrega a final de cicle torna a ser l'estratègia amb menor cost.

En aquest escenari, la velocitat de circulació de la línia no té un impacte rellevant a l'hora de determinar l'estratègia de recàrrega més adequada.

La llarga longitud de la línia i l'elevat temps de pas fan que la recàrrega a final de cicle o a final d'interval tinguin uns costos menors a la recàrrega diürna a cotxera tot i tenir una distància relativament llarga entre la línia i la zona de càrrega a la via pública.

Escenari XVII

S'agrupen les línies llargues amb un temps de pas elevat, una distància llarga entre la línia i la zona de càrrega i un factor de consum elevat.

$$L \geq 8 \text{ km}; H_i \geq 15 \text{ min}; l_{A,B} \geq 0,6 \text{ km}; f_c \geq 1,90$$

		Capacitat de la bateria, E [kWh]									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Velocitat de càrrega ràpida, S_D [kWh/min]	7		Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	8		Interval	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	9		Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	10		Interval	Interval	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	12		Interval	Interval	Cicle	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	14		Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	17		Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	20		Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	25		Interval	Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle
	30		Interval	Interval	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle

Figura 41. Estratègia de recàrrega recomanada segons E i S_D en l'escenari XVII.

L'estratègia de recàrrega més eficient en aquest escenari depèn de la capacitat de les bateries que s'utilitzin. Si s'utilitzen bateries amb una capacitat alta, que puguin emmagatzemar 350 kWh com a mínim, es recomana la recàrrega a final de cicle. Si s'utilitzen bateries amb una capacitat baixa, que puguin emmagatzemar menys de 200 kWh, es recomana la recàrrega a final d'interval.

Els costos de les estratègies de recàrrega a final de cicle i a final d'interval són molt semblants per a bateries amb capacitats entre els 150 kWh i els 300 kWh. Per això, i a causa de l'optimització de l'operativa que realitza el model, aquestes dues estratègies s'alternen el cost mínim del servei. Llavors, per bateries entre 150 kWh i 300 kWh i per qualsevol velocitat de recàrrega es recomana realitzar un estudi més en profunditat dels costos del servei per saber quina és la millor estratègia de recàrrega en cada línia.

Cal destacar que, donat l'elevat consum elèctric, la distància de la línia i la distància entre la línia i la zona de càrrega, el servei no és viable per a bateries que tinguin molt poca capacitat (menys de 100 kWh), ja que els vehicles es quedarien sense energia abans de poder arribar al carregador següent.

4.2. Elaboració de les guies

Les guies d'electrificació de línies d'autobús s'han elaborat a partir de l'anàlisi de sensibilitat realitzada per a totes les variables d'entrada del model de costos.

Tal com s'ha explicat prèviament, les guies parteixen dels valors de les cinc variables que s'han trobat més rellevants en l'anàlisi de sensibilitat: la longitud de la línia (L), el temps de pas (H_i), la velocitat de circulació (v_i), el factor de consum (f_c) i la distància fins a la zona de càrrega ($I_{A,B}$). Aquestes variables són les que tenen un impacte més important en el model de costos utilitzat, ja sigui per la gran elasticitat que provoquen en el sistema o perquè, tot i no variar de manera important els costos totals, són crucials per a decidir l'estratègia més adequada en cada cas.

Les guies tenen com a objectiu proporcionar una eina que pugui ser utilitzada de manera senzilla per qualsevol persona que disposi d'informació bàsica de la línia. És per això, que per a l'elaboració de les guies, es prioritzarà l'ús de les variables que recauen en l'àmbit de responsabilitat de l'operador i que alhora tenen menys possibilitats de canviar al llarg del temps. La priorització de les variables d'entrada de les guies, doncs, és la següent:

- **Longitud de la línia, L .** La longitud és una de les característiques més fonamentals de la línia, alhora que és una dada de molt fàcil obtenció. La longitud d'una línia és improbable que variï, ja que perquè una línia pateixi modificacions en la seva longitud caldria variar el seu recorregut. Addicionalment, la longitud de la línia és una de les variables que té un impacte més gran en el càlcul de costos de la línia. Per això, la longitud de la línia és la variable que es prioritzarà en l'elaboració de les guies.
- **Temps de pas, H_i .** El temps de pas és també una de les característiques més fonamentals del servei i també és una dada fàcil d'obtenir (en la majoria de casos és informació pública). El temps de pas és una variable que adequa el servei a la demanda, adoptant diversos valors al llarg del servei. Tal com es detalla a l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat**, a partir de valors del temps de pas mínim, s'han construït distribucions del temps de pas al llarg del servei. Donada l'alta variabilitat de possibles distribucions horaris del temps de pas, a les guies es demana el valor mínim del temps de pas.

Alhora, cal destacar que sota circumstàncies sobrevingudes, el temps de pas pot ser variat. Un bon exemple és la modificació dels temps de pas que s'ha fet a la gran majoria de les línies d'autobús durant els mesos de març a juny de 2020, a causa de l'estat d'alarma declarat arrel de la pandèmia de COVID-19.

- **Velocitat de circulació, v_i .** La velocitat de circulació és una variable bàsica per definir el temps de cicle i té un impacte directe en el nombre de vehicles necessaris per operar el servei. A diferència de les anteriors variables, no és un resultat directe de les decisions de l'operador, ja que el seu valor està molt lligat a les condicions de l'entorn del recorregut de la línia.

Tot i això, l'operador pot prendre accions per modificar la velocitat, com per exemple la implantació de carrils bus o la reducció del trànsit de vehicles privats, però el resultat sempre són variacions lleugeres. Donat l'important impacte de la velocitat de circulació en els costos, i la poca capacitat de variar-la per part de l'operador, fan que s'intenti prioritzar durant l'elaboració de les guies.

La velocitat és una variable que evoluciona al llarg del servei. A l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat**, es detalla la creació de diverses distribucions de velocitats al llarg del servei

depenent de la seva velocitat mitjana al llarg del servei. Donada l'alta variabilitat de possibles distribucions de velocitats al llarg del servei, així com la dificultat d'obtenir la velocitat de circulació per a cada moment del servei, a les guies es demana la velocitat de circulació mitjana al llarg del servei.

- **Factor de consum, f_c .** El factor de consum és una variable relacionada directament del funcionament dels vehicles elèctrics i habitualment es pot consultar en els catàlegs dels fabricants. Tot i això, es considera que el valor de la variable que s'aporti a les guies pot ser modificat posteriorment, ja que no només depèn del vehicle que s'adquireixi, sinó també de la tipologia de refrigeració que es faci servir, els pendents del recorregut i la conducció de cada persona, entre d'altres.

Tot i que l'efecte del factor de consum en el model de costos i en l'elecció de la millor estratègia per cada cas és important, la seva obtenció no és tant senzilla com l'obtenció de les variables anteriors. Per això, el seu ús en l'elaboració de les guies no serà tant prioritari com el d'altres variables.

- **Distància entre la línia i la zona de càrrega, $I_{A,B}$.** El valor d'aquesta variable és decisió directa de l'operador, però pot estar condicionada per les característiques urbanístiques de l'entorn de les parades d'inici o final de la línia.

D'altra banda, cal tenir en compte que es requereix el valor de la distància entre la línia i la zona de càrrega sense que l'operador conegui tots els detalls de l'operativa elèctrica, com ara el nombre de carregadors del que caldrà disposar.

L'ús d'aquesta variable tampoc es prioritzarà durant l'elaboració de les guies, ja que és una dada que pot patir modificacions segons el nivell detall d'estudis que s'hagin realitzat sobre la zona de la primera o última parada de la línia.

La **capacitat de la bateria (E)** i la **velocitat de recàrrega ràpida (S_D)** són dues variables significatives en els resultats de l'anàlisi de sensibilitat. Tot i això, les guies d'electrificació es basen en donar recomanacions per transformar les línies existents, i aquestes dues variables depenen de les decisions de compra de l'operador. Així, no s'han inclòs com a inputs de les guies, però s'utilitzen per tal d'emetre les recomanacions sobre l'estratègia de recàrrega a utilitzar en base a la combinació entre totes dues.

A l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat**, s'estudien les variables d'entrada del model i es determinen uns valors estàndards. Així mateix, es defineixen un valor mínim i màxim per cada variable. A continuació es mostra una taula resum del rang de valors i el valor estàndard de les dades d'entrada, on es destaquen les variables que s'utilitzen en l'elaboració de les guies.

Valors de les variables d'entrada del model de costos								
	Estàndard	Rang		Estàndard	Rang		Estàndard	Rang
h_{DAY}	17 h	-	s	300 m	150-500 m	f_c	1,5 kWh/km	1-2,5 kWh/km
N	17	-	I_A, I_B	200 m	0-1 km	SOC_{min}	20%	-
h_i	1 h	-	I_G	7,5 km	0,3-20 km	T_{el}	2 h	-
v_i	12 km/h	10-30 km/h	Δ	30 s	0-10 min	T_{pos}	30 s	10-60 s
Λ_i	300 pax/h	150-500 pax/h	τ	18,5 s / 23s	-	S_D	12 kWh/min	7-30 kWh/min
H_i	6 min	3-30 min	τ'	3 s	1-10 s	S_N	1 kWh/min	0,5-2 kWh/min
L	8 km	5-20 km	E	250 kWh	50-500 kWh			

Taula 2. Valor estàndard i rang de valors de les variables

L'elaboració de les guies d'electrificació es basa en diverses anàlisis de les variables d'entrada de les guies, per determinar el seu impacte a l'hora d'escollir l'estratègia de recàrrega que minimitza els costos del servei.

En aquestes anàlisis es modifiquen els valors de dues variables d'entrada. Per això, s'anomenen anàlisis creuades. Tenint en compte la prioritització escollida anteriorment, les primeres variables que s'analitzen són la longitud de la línia, L , i el temps de pas, H_i .

Cal mencionar que tant la longitud com el temps de pas són variables contínues. Tot i això, per tal de poder realitzar l'anàlisi, totes les variables s'han discretitzat, obtenint uns 10 valors per cada una, continguts dins dels rangs definits.

Per cada valor de les variables, s'ha calculat el cost total del servei per cada estratègia de recàrrega. Aquest càlcul s'ha realitzat mantenint el valor estàndard de la resta de variables. Així doncs, els valors utilitzats en aquesta anàlisi són els següents:

Valor de les variables per l'anàlisi creuada L-H _i					
h_{DAY}	17 h	s	300 m	f_c	1,5 kWh/km
N	17	I_A, I_B	200 m	SOC_{min}	20%
h_i	1 h	I_G	7,5 km	T_{el}	2 h
v_i	12 km/h	Δ	30 s	T_{pos}	30 s
Λ_i	300 pax/h	τ	18,5 s / 23s	S_D	12 kWh/min
H_i	3-30 min	τ'	3 s	S_N	1 kWh/min
L	5-20 km	E	250 kWh		

Taula 3. Valors de les variables per a l'anàlisi creuada L-H_i

Els costos totals del servei per cada estratègia de recàrrega i per cada valor de la longitud i del temps de pas es mostren a continuació. S'ha afegit una escala de colors per tal de poder identificar fàcilment la relació entre les variables i el cost de manera qualitativa.

Diürn a cotxera												
		Longitud de la línia, L [km]										
		5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
Temps de pas, H _i [min]	3	22.537 €	26.569 €	31.197 €	35.552 €	39.606 €	44.003 €	52.273 €	60.683 €	69.580 €	78.234 €	86.320 €
	4	18.227 €	21.866 €	25.383 €	28.914 €	32.145 €	35.719 €	42.524 €	49.234 €	56.305 €	63.128 €	69.933 €
	5	14.273 €	17.169 €	19.952 €	22.390 €	24.952 €	27.774 €	33.490 €	38.503 €	43.562 €	49.092 €	54.338 €
	6	12.442 €	15.174 €	17.214 €	19.685 €	21.803 €	24.021 €	28.880 €	33.302 €	37.930 €	42.506 €	47.210 €
	10	8.586 €	9.328 €	11.430 €	12.740 €	14.438 €	15.620 €	18.535 €	21.704 €	24.534 €	27.473 €	30.403 €
	15	6.438 €	6.926 €	7.892 €	8.881 €	9.929 €	12.201 €	13.883 €	15.834 €	18.082 €	20.235 €	22.271 €
	20	5.412 €	5.703 €	6.451 €	7.111 €	7.858 €	8.756 €	10.461 €	12.396 €	13.769 €	15.441 €	17.122 €
	25	4.375 €	5.339 €	5.891 €	6.536 €	7.151 €	7.505 €	9.085 €	10.320 €	11.859 €	13.178 €	14.760 €
	30	4.380 €	4.377 €	4.897 €	5.631 €	5.891 €	7.120 €	7.646 €	8.819 €	10.155 €	11.592 €	12.335 €

Taula 4. Costos de l'anàlisi L-H_i per a l'estratègia de recàrrega diürna a cotxera

A final de cicle												
		Longitud de la línia, L [km]										
		5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
Temps de pas, H _i [min]	3	22.180 €	26.232 €	30.076 €	34.503 €	38.201 €	42.246 €	50.821 €	58.799 €	67.733 €	76.379 €	84.827 €
	4	17.438 €	21.177 €	24.187 €	27.894 €	30.543 €	34.266 €	40.607 €	47.100 €	53.839 €	60.866 €	67.155 €
	5	13.888 €	16.411 €	19.134 €	21.777 €	24.138 €	27.035 €	32.420 €	37.357 €	42.466 €	47.536 €	52.780 €
	6	12.032 €	14.308 €	16.397 €	18.567 €	20.813 €	22.981 €	27.835 €	32.123 €	36.497 €	40.646 €	44.787 €
	10	7.799 €	9.238 €	10.643 €	11.969 €	13.666 €	14.822 €	17.381 €	20.444 €	23.372 €	25.956 €	29.009 €
	15	5.705 €	6.521 €	7.487 €	8.492 €	9.515 €	10.681 €	12.379 €	14.323 €	16.540 €	17.971 €	20.023 €
	20	4.679 €	5.323 €	5.743 €	6.726 €	7.469 €	7.993 €	9.696 €	11.220 €	12.613 €	14.231 €	15.587 €
	25	3.667 €	4.960 €	5.159 €	6.176 €	6.389 €	6.772 €	8.000 €	9.230 €	10.393 €	11.603 €	12.833 €
	30	3.647 €	3.669 €	4.541 €	4.893 €	5.531 €	6.005 €	6.909 €	8.051 €	9.058 €	10.097 €	11.213 €

Taula 5. Costos de l'anàlisi L-H_i per a l'estratègia de recàrrega a final de cicle

A final d'interval												
		Longitud de la línia, L [km]										
		5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
Temps de pas, H _i [min]	3	22.059 €	26.088 €	29.798 €	33.777 €	38.064 €	42.186 €	50.294 €	58.209 €	66.186 €	75.357 €	82.921 €
	4	17.559 €	20.453 €	23.822 €	26.947 €	30.407 €	33.235 €	39.548 €	46.394 €	52.544 €	59.260 €	65.116 €
	5	14.169 €	16.251 €	18.891 €	21.389 €	23.884 €	26.339 €	31.551 €	36.533 €	41.962 €	46.607 €	51.746 €
	6	12.315 €	14.521 €	16.524 €	18.617 €	20.416 €	22.612 €	26.886 €	31.122 €	35.337 €	39.454 €	43.619 €
	10	8.100 €	9.112 €	10.457 €	11.655 €	13.331 €	14.510 €	16.915 €	19.876 €	22.838 €	25.048 €	28.166 €
	15	6.031 €	6.442 €	7.407 €	8.358 €	9.409 €	10.300 €	11.862 €	13.752 €	15.851 €	17.203 €	19.099 €
	20	4.976 €	5.241 €	6.001 €	6.571 €	7.330 €	8.204 €	9.511 €	10.810 €	12.071 €	13.684 €	14.970 €
	25	3.949 €	4.909 €	5.121 €	6.024 €	6.276 €	6.612 €	7.768 €	8.948 €	10.060 €	11.127 €	12.282 €
	30	3.947 €	3.949 €	4.433 €	5.106 €	5.371 €	6.171 €	6.701 €	7.769 €	8.718 €	9.785 €	10.817 €

Taula 6. Costos de l'anàlisi L-H_i per a l'estratègia de recàrrega a final d'interval

A continuació, s'ha identificat per cada cas el mínim cost i l'estratègia de recàrrega que el produeix.

		Longitud de la línia, L [km]										
		5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
Temps de pas, H _i [min]	3	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	4	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	5	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	6	Cicle	Cicle	Cicle	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	10	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	15	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	20	Cicle	Interval	Cicle	Interval	Interval	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	25	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval
	30	Cicle	Cicle	Interval	Cicle	Interval	Cicle	Interval	Interval	Interval	Interval	Interval

Taula 7. Estratègia de recàrrega que provoca el mínim cost en cada cas de l'anàlisi L-H_i

Cost mínim												
		Longitud de la línia, L [km]										
		5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
Temps de pas, H _i [min]	3	22.059 €	26.088 €	29.798 €	33.777 €	38.064 €	42.186 €	50.294 €	58.209 €	66.186 €	75.357 €	82.921 €
	4	17.438 €	20.453 €	23.822 €	26.947 €	30.407 €	33.235 €	39.548 €	46.394 €	52.544 €	59.260 €	65.116 €
	5	13.888 €	16.251 €	18.891 €	21.389 €	23.884 €	26.339 €	31.551 €	36.533 €	41.962 €	46.607 €	51.746 €
	6	12.032 €	14.308 €	16.397 €	18.567 €	20.416 €	22.612 €	26.886 €	31.122 €	35.337 €	39.454 €	43.619 €
	10	7.799 €	9.112 €	10.457 €	11.655 €	13.331 €	14.510 €	16.915 €	19.876 €	22.838 €	25.048 €	28.166 €
	15	5.596 €	6.442 €	7.407 €	8.358 €	9.409 €	10.300 €	11.862 €	13.752 €	15.851 €	17.203 €	19.099 €
	20	4.523 €	5.241 €	5.743 €	6.571 €	7.330 €	7.993 €	9.511 €	10.810 €	12.071 €	13.684 €	14.970 €
	25	3.667 €	4.562 €	5.033 €	5.790 €	6.262 €	6.612 €	7.768 €	8.948 €	10.060 €	11.127 €	12.282 €
	30	3.450 €	3.669 €	4.433 €	4.753 €	5.371 €	5.941 €	6.701 €	7.769 €	8.718 €	9.785 €	10.817 €

Taula 8. Cost mínim en cada cas de l'anàlisi L-H_i

Els casos en els que la recàrrega a final de cicle és l'estratègia més adequada, es marquen en verd i amb la paraula "Cicle", mentre que els casos on la recàrrega a final d'interval és la millor estratègia es marquen en groc i amb la paraula "Interval". En el cas que la recàrrega diürna a cotxera fos l'estratègia més adequada, es marcaria en blau i amb la paraula "Diürn".

Un cop obtinguda la distribució de les estratègies de recàrrega més adients, s'identifiquen possibles relacions entre les variables i les estratègies.

En el cas de l'anàlisi $L-H_i$, quan les longituds de línia són molt petites, la millor estratègia és la recàrrega a final de cicle. En canvi, si les línies són llargues, l'estratègia més adequada és la recàrrega a final d'interval.

En el cas que no es pugui trobar una relació clara entre una variable i les estratègies de recàrrega, es considera que la variable no és determinant per a l'anàlisi. En l'anàlisi $L-H_i$, es detecta que el temps de pas, tot i tenir una influència important en els costos, no afecta a l'hora de decidir quina és la millor estratègia de recàrrega.

A continuació s'intenten obtenir els rangs de les variables pels quals hi ha una estratègia de recàrrega predominant. D'aquesta manera, es distingeixen els comportaments de les línies segons les seves característiques.

En l'anàlisi $L-H_i$, es pot discernir entre els comportaments de les línies molt curtes i les línies llargues, ja que presenten comportaments diferenciats en quan a l'estratègia de recàrrega més adient en cada cas. En canvi, no es detecten rangs del temps de pas pels quals predomini una estratègia de recàrrega concreta.

Donada la diferència de comportament entre les línies curtes i llargues, es defineixen dos rangs de L ($L < 8$ km i $L \geq 8$ km).

Com a l'anàlisi $L-H_i$, el temps de pas no és determinant, no es defineixen rangs de H_i . Tenint en compte la prioritització decidida anteriorment, la següent anàlisi que es realitzarà serà entre el temps de pas i la velocitat de circulació (anàlisi H_i-v_i).

Per tal de reflectir el comportament diferenciat que s'ha detectat en l'anàlisi $L-H_i$ entre les línies curtes i les línies llargues, no es realitzarà una única anàlisi H_i-v_i , sinó que se'n realitzaran dues. A cada anàlisi, la longitud de línia (L) adoptarà un valor representatiu del rang pel qual s'està realitzant l'anàlisi. Per exemple, per a línies de menys de 8 km, es realitzarà l'anàlisi amb $L = 5$ km, mentre que, per línies de 8 km o més, es realitzarà l'anàlisi amb $L = 10$ km.

El procediment de l'anàlisi creuada H_i-v_i serà el mateix que el de l'anàlisi $L-H_i$, de manera que es modificaran els valors de el temps de pas i la velocitat de circulació, mentre la resta de variables (excepte la longitud de la línia) mantenen el seu valor estàndard.

Aquesta metodologia es repetirà fins haver analitzat totes les variables d'entrada de les guies, de manera que s'hagin determinat rangs concrets de les variables pels quals les línies presentin comportaments similars. Aquest conjunt de rangs que caracteritza les línies que es comporten de manera similar respecte a les estratègies de recàrrega elèctrica, s'anomenen **escenaris**.

En alguns casos, és possible que una variable d'entrada de les guies no sigui rellevant per a cap de les anàlisis realitzades. En aquest cas no es definirà cap rang d'aquesta variable. Per a realitzar les guies d'electrificació aquesta variable mantindrà el seu valor estàndard. Així mateix, no es requerirà el valor d'aquesta dada per determinar l'escenari al qual pertany la línia que s'estigui estudiant.

Finalment, s'analitza per cada escenari la millor estratègia de recàrrega depenent de la capacitat de la bateria (E) i la velocitat de recàrrega dels carregadors de recàrrega ràpida (S_D). Les variables d'entrada de les guies adopten valors representatius dels rangs que defineixen l'escenari concret mentre la resta de dades d'entrada del model mantenen el seu valor estàndard. Els resultats d'aquesta anàlisi són les **guies d'electrificació** de les línies que pertanyen a cada escenari.

Aquesta última anàlisi es realitza seguint el mateix procediment: per cada valor de la capacitat de la bateria i de la velocitat de recàrrega es calcula el cost total del servei per cada estratègia de recàrrega. Es troba el cost mínim en cada cas i l'estratègia de recàrrega que el produeix.

Adicionalment, en aquest cas també es calcula el cost total del servei en el Cas 0, és a dir, si s'operés amb vehicles dièsel. Finalment, es mostra la diferència de costos entre la millor estratègia de recàrrega de cada cas i el Cas 0.

Un cop definits els escenaris, s'elaboren les preguntes que cal fer a l'operador en base als rangs determinants durant les anàlisis. És important tenir en compte que la intenció de les guies és proporcionar una recomanació sobre l'estratègia de recàrrega amb el menor nombre de dades possibles. Així doncs, les preguntes que es fan a l'operador s'ordenen de manera que es demanen les mínimes dades possibles per determinar l'escenari en el que es pot classificar la línia d'estudi. Així mateix, no es demanen les dades de les variables que s'han detectat que no són rellevants.

Cal fer notar que en primer lloc es realitzen les anàlisis creuades per determinar els rangs i, posteriorment s'elaboren les preguntes que cal fer per classificar les línies en els escenaris definits. L'esquema mostrat a la figura 21, es realitza en últim lloc, un cop determinat l'ordre de les preguntes, amb l'objectiu de tenir una eina visual complementària a l'aplicatiu, que permeti classificar ràpidament les línies.

El nombre d'anàlisi creuades realitzades és extens. En algunes ocasions, les anàlisis no permeten la determinació de rangs de les variables, mentre que en altres ocasions, una sola anàlisi creuada permet la identificació dels rangs de dues variables. Per això, no existeix una relació biunívoca entre les anàlisis realitzades i les preguntes que es fan en les guies.

El detall de l'elaboració de les guies es pot trobar a l'**Annex 2. Elaboració de les guies**, on es poden trobar totes els resultats de les anàlisis realitzades, així com el raonament realitzat en cada una d'elles per determinar l'existència de rangs clars per cada variable.

4.3. Limitacions de les guies

Les guies d'electrificació de línies d'autobús elaborades en aquest treball tenen l'objectiu de proporcionar una eina que proposi unes recomanacions sobre l'estratègia de recàrrega a utilitzar amb uns requeriments de dades d'entrada molt limitats.

Aquestes recomanacions es poden utilitzar en un estat inicial d'una planificació, per tal de preveure la millor manera de convertir una línia convencional en una línia elèctrica sense entrar en una anàlisi detallada de la línia. D'aquesta manera es poden facilitar decisions com ara, donat un gran nombre de línies, la prioritització de les línies a electrificar, etc.

Tot i això, les guies presenten diverses limitacions.

- En les anàlisis realitzades per a l'elaboració de les guies, s'han utilitzat els valors de les dades d'entrada del model definits en l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat**, el que s'ha definit com valors estàndards. Aquests valors s'han escollit en base a la literatura consultada i es consideren representatius. Tot i això, per línies que tinguin valors de les dades d'entrada del model molt diferents a les assumides en aquest treball, és possible que les guies no donin unes recomanacions tant precises. Un exemple podria ser la demanda, si la demanda és molt superior a l'estàndard considerat, el temps de pas augmentaria i s'elevarien els requeriments de vehicles. Això podria comportar lleugers canvis en les estratègies de càrrega més eficients.
- En les anàlisis realitzades per a l'elaboració de les guies, s'estudien les variables d'entrada de les guies modificant els seus valors en els seus rangs definits a l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat**. Per línies que tinguin característiques que es trobin fora dels rangs utilitzats, les guies poden no identificar correctament el seu comportament. Un exemple seria una línia que tingui una longitud superior als 20 km en un sentit, o una línia on la zona de càrrega a la via pública s'hagi de col·locar a una distància superior a 1 km. Aquests casos es consideren molt específics i requeririen estudis personalitzats o l'ús de models complexos per determinar la millor manera d'operar.
- Les guies d'electrificació poden tenir discrepàncies en aquelles línies que tinguin valors de les variables d'entrada propers a les fronteres escollides per definir els diversos escenaris. És a dir, si una línia té una longitud molt semblant a 8 km, és possible que les guies no tinguin tanta precisió en les seves recomanacions com una línia que té 5 km o 10 km de longitud, en la que els valors de les variables estan situats enmig dels rangs definits.
- A l'**Annex 1. Anàlisi de sensibilitat** es defineixen els costos unitaris que s'utilitzen en el model per realitzar el càlcul dels costos diaris de l'operador del servei. Tot i això, els costos en moltes ocasions depenen de l'estructura i l'organització dels diversos agents implicats en l'operació, així com de contractes o concessions amb els proveïdors. Si els costos finals són substancialment diferents als definits per a l'elaboració de les guies, és possible que les guies presentin discrepàncies. Tot i això, les guies pretenen ser una primera aproximació en un estat tàctic de la planificació i se suposa que es realitzaran estudis econòmics amb més profunditat en estats més avançats de l'electrificació de les línies.

Com ja s'ha mencionat, les guies d'electrificació presentades intenten servir com una eina per als planificadors municipals per tenir de manera senzilla unes recomanacions de la millor estratègia amb que es pot servir una línia elèctrica. Tot i això, els resultats d'aquestes guies són

una primera aproximació i en qualsevol cas, sempre caldrà realitzar anàlisis econòmics posteriors més detallats en quant a l'operativa i a les dades reals de la línia.

5. Conclusions

En aquest treball s'han elaborat unes guies per a l'electrificació de línies d'autobús que emeten recomanacions en funció de les característiques principals de les línies. Aquestes guies es basen en un marc teòric que defineix el funcionament de línies d'autobús servides tant per vehicles convencionals com elèctrics, mitjançant diverses estratègies de recàrrega diferents.

Amb un model de càlcul basat en aquest marc teòric que té en compte l'operativa de la línia i les externalitats generades, es realitza un anàlisi de les variables del model. Així s'identifiquen aquelles variables que tenen un major impacte en els costos, reduint la complexitat del model i permetent que es puguin obtenir les recomanacions sobre l'estratègia de recàrrega a utilitzar amb poques dades. Es determinen 17 tipologies de línies que tenen característiques semblants i presenten comportaments semblants en quant a la seva electrificació, i s'elaboren les recomanacions de l'estratègia de recàrrega per cada escenari.

Com a resultat d'una caracterització de les línies d'autobús i sense executar anàlisis específics per a cada línia i amb gran nivell de detall, les guies elaborades en aquest treball permeten obtenir recomanacions sobre la millor manera d'electrificar una línia. Aquestes recomanacions poden orientar i agilitzar la presa de decisions a nivells estratègics o tàctics. Tot i això, les guies no busquen substituir les anàlisis posteriors, en els que caldrà detallar el funcionament exacte de les línies, però poden reduir la incertesa en fases d'anàlisis preliminars.

Analitzant les guies per a tots els escenaris definits, es pot detectar que:

- L'estratègia de recàrrega diürna a cotxera és generalment la més eficient quan els temps de pas del servei són reduïts i les bateries tenen una capacitat mitjana o alta. Quan els temps de pas són reduïts la flota necessària és extensa i si les bateries tenen una capacitat mitjana o alta, es poden aprofitar les fluctuacions en la necessitat de vehicles circulant per retirar del servei els vehicles amb les bateries més descarregades i recarregar-les a la cotxera.
- L'estratègia de recàrrega a final de cicle és generalment la més eficient quan els vehicles tenen el temps a final de cicle suficient per recarregar gran part de les bateries, sense la necessitat d'augmentar la flota. Això succeeix en serveis amb un temps de pas elevat o bé amb una velocitat elevada.
- L'estratègia de recàrrega a final d'interval és la que minimitza els costos quan la flota necessària per al servei és extensa, però el consum d'energia és petit. Aquests casos inclouen per exemple, línies llargues amb un temps de pas petit, i velocitat baixa (una flota requerida molt extensa), però amb un factor de consum petit i una capacitat de bateria petita (és a dir, que la quantitat d'energia que cal recarregar és reduïda).

Finalment cal insistir en que les guies elaborades volen servir com una primera aproximació cap a quina estratègia de recàrrega és la més adequada per a les línies donades algunes dades bàsiques del servei que es vol electrificar. Per a una comparativa més detallada l'operador caldria detallar totes les dades d'entrada del model i realitzar una anàlisi en profunditat del funcionament del servei de la línia concreta.

6. Bibliografia

- Agencia Europea del Medio Ambiente. (2019). *Emisiones de dióxido de carbono procedentes del transporte de pasajeros*. Recollit de <https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/infografia/emisiones-de-dioxido-de-carbono/view>
- Agencia Europea del Medio Ambiente. (2020). *Transporte*. Recollit de Agencia Europea del Medio Ambiente: <https://www.eea.europa.eu/es/themes/transport/intro>
- Air Pollution & Climate Secretariat. (2020). *Air pollution from fossil fuels costs USD 8 billion a day*. Recollit de Air Pollution & Climate Secretariat: <https://www.airclim.org/acidnews>
- Autoritat del Transport Metropolità. (2019). *Enquesta de Moibilitat en Dia Feiner d'anys anteriors*. Recollit de Autoritat del Transport Metropolità: <https://www.atm.cat/web/ca/EMEF-historic.php>
- C40 Cities Finance Facility. (2018). *Análisis de tecnologías alternas para buses*.
- Daganzo, C. (2010). *Public Transportation Systems: Basic Principles of System Design, Operations Planning and Real-Time Control*. ITS Berkeley.
- Environmental blog. (2015). *Opportunity Charged Electric Buses*. Recollit de Environmental blog: volvobusesenvironmentblog.wordpress.com
- Estrada, M., Mensión, J., Salicrú, M., & Badia, H. (2020). Charging operations in battery electric bus systems considering fleet size variability along de service. *Transportation Research Part C, Emerging Technologies, under review*.
- European Metropolitan Transport Authorities. (2019). *Barometer 2017. Summary*.
- European Comissoin. (2019). *Sustainable Transport Infrastructure Charging and Internalisation of Transport Externalities: Main Findings*.
- IEA. (2019). *Tracking Transport 2019*. Recollit de <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019/electric-vehicles>
- Liu, Y., Wu, J., Yu, D., & Ma, Q. (2018). The relationship between urban form and air pollution depends on seasonality and city size. *Environmental Science and Pollution Research*, 15554–15567.
- Miles, J., & Potter, S. (2014). Developing a viable electric bus service: The Milton Keynes demonstration project. *Reserarch in Transportation Economics*, 357-363.
- OECD/IEA. (2018). <https://doi.org/10.1787/9789264302365-en>. Recollit de Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification.
- Oficina Catalana del Canvi Climàtic. (2019). *Guia pràctica per al càlcul d'emissions de gasos amb efece d'hivernacle (GEH)*.
- Red Eléctrica de España. (2019). *Las energías renovables en el sistema eléctrico español. Informe 2018*.

- Red Eléctrica de España. (15 / 05 / 2019). *Término de Facturación de Energía activa del PVPC*. Recollit de Sistema de información del operador del sistema. Red Electrica de España: <https://www.esios.ree.es/es/pvpc>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2019). *Our World in Data*. Recollit de <https://ourworldindata.org/outdoor-air-pollution>
- Rogge, M., Wollny, S., & Sauer, D. (2015). Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport - A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. *Energies*, 4587-4606.
- Teoh, L., Khoo, H., Goh, S., & Chong, L. (2018). Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10-25.
- Transports Metropolitans de Barcelona. (2020). *Dades bàsiques 2020*.
- UN. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Recollit de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). *World Urbanization Prospects. The 2018 Revision*. New York: United Nations.
- Xylia, M., Laurent, A., Leduc, S., & Patrizio, P. (2018). Impact of bus electrification on carbon emissions: The case of Stockholm. *Journal of Cleaner Production*.
- Zhou, B., Wu, Y., Bin, Z., Renje, W., Wenwei, K., Shaojun, Z., & Jiming, H. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 603-613.

Annexos