

Treball de Fi de Grau/Màster

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi de la transició energètica d'una línia d'autobús

MEMÒRIA

Autor: Carles Alay Ferrarons
Director: Xavier Carod de Arriba
Convocatòria: Gener 2022



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Per assolir els compromisos a nivell europeu de reducció d'emissions es requereix fer un estudi de transició energètica per a diferents sectors, entre ells el dels transports. Actualment s'estan utilitzant línies d'autobús propulsades per electricitat, però hi ha moltes casuístiques de línies, com les de barri. Aquestes línies, tot i oferir servei a un grup reduït de persones, és necessari que segueixin operant i s'ha de planificar una transició energètica per tal de poder seguir oferint aquest servei en un futur. Existeixen diverses opcions que permeten fer aquesta transició cap a una mobilitat sostenible, però algunes presenten problemes de planificació i costos elevats. Aquestes línies presenten un problema addicional, i és que per la manera en que està dissenyat el recorregut, es necessiten utilitzar autobusos més petits i, conseqüentment, amb menys capacitat per les bateries. És per aquest motiu que s'ha fet un anàlisi de les alternatives als autobusos propulsats per combustible dièsel i realitzat la comparativa a partir del mètode AHP per determinar quina d'elles és la millor opció. Els resultats obtinguts mostren que la millor de les opcions a nivell de reducció de contaminació i econòmic és substituir els autobusos actuals pels seus homòlegs elèctrics amb recàrrega d'oportunitat. D'aquesta manera, s'aconseguiran reduir unes 500 tones de diòxid de carboni emeses a l'atmosfera en un període de 10 anys.

Sumari

SUMARI	5
1. GLOSSARI	7
2. INTRODUCCIÓ	11
2.1. Objectius del projecte	13
2.2. Abast del projecte	13
3. LÍNIA 130 DE TMB	15
3.1. Introducció	15
3.2. Característiques tècniques	15
4. ESTAT DE L'ART DE LES LÍNIES D'AUTOBÚS ELÈCTRIC	19
4.1. Tecnologies de càrrega d'autobusos elèctrics	20
5. ELECTRIFICACIÓ DE LA LÍNIA 130	26
5.1. Propostes d'electrificació	26
5.1.1. Bateries de llarga duració	27
5.1.2. Recàrrega d'oportunitat via pantògraf	29
5.1.3. Recàrrega d'oportunitat per inducció	31
5.1.4. Autobús amb recàrrega dinàmica (Trolleybus)	32
5.1.5. Autobús amb bateries intercanviables	34
5.1.6. Autobús híbrid endollable	37
5.1.7. Autobús propulsat per CNG	39
5.1.8. Autobús amb cel·la d'hidrogen	40
5.2. Propostes no considerades per falta de maduresa tecnològica	42
5.2.1. Recàrrega inductiva dinàmica	42
6. COMPARATIVA	44
6.1. Funcionament del mètode AHP	44
6.2. Criteris d'avaluació	46
6.3. Avaluació de les alternatives segons criteris	49
6.3.1. Contaminació visual	49
6.3.2. Contaminació atmosfèrica	50
6.3.3. Contaminació sonora	51
6.3.4. Cost d'implementació	52
6.3.5. Cost de manteniment	53
6.3.6. Autonomia	54
6.4. Resultats de la comparativa	55

7. PROPOSTA DEFINITIVA: RECÀRREGA D'OPORTUNITAT VIA PANTÒGRAF	57
7.1. Adaptació a la línia.....	57
7.1.1. Càrrega nocturna.....	57
7.1.2. Recàrrega d'oportunitat.....	58
7.1.3. Vehicle utilitzat.....	60
8. ANÀLISI ECONÒMIC	64
8.1. Equipament.....	64
8.2. Consum energètic i tarifa d'internet.....	64
8.3. Mà d'obra.....	65
8.4. Cost total del treball.....	66
9. IMPACTE AMBIENTAL	67
CONCLUSIONS	69
AGRAÏMENTS	71
BIBLIOGRAFIA	72
Referències bibliogràfiques.....	72
10. ANNEX	77
10.1. Parades línia 130 i autobús actual.....	77
10.2. Taules comparatives AHP.....	78
10.2.1. Contaminació visual.....	78
10.2.2. Contaminació atmosfèrica.....	79
10.2.3. Contaminació sonora.....	80
10.2.4. Autonomia.....	81
10.3. Matriu comparativa.....	82
10.4. Temps de càrrega disponible.....	84
10.5. Especificacions tècniques autobús Mercedes Sprinter City 75.....	85
10.6. Taula d'emissions al llarg de 10 anys: autobús dièsel vs elèctric.....	87

1. Glossari

Les abreviatures que es fan servir en el projecte i el seu significat venen descrites aquí sota:

AHP: Analytic Hierarchy Process

ANP: Analytic Network Process

CA: Corrent alterna

CC: Corrent contínua

CNG: Compressed Natural Gas

MAUT: Multi Attribute Utility Theory

TMB: Transports Metropolitans de Barcelona

TOPSIS: Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution

2. Introducció

En un món canviant i cada dia més industrialitzat, on podem disposar de moltes comoditats, es presenta la problemàtica del canvi climàtic. Des del segle XIX, la crema de combustibles fòssils com el carbó, el petroli i el gas han produït el que s'anomenen gasos d'efecte hivernacle. Aquests actuen com una mena de capa que permet que l'escalfor del sol entri a la terra, però sense deixar-la sortir, provocant un augment en les temperatures del planeta.

El sector dels transports és el culpable aproximadament d'una quarta part dels gasos d'efecte hivernacle que emetem a l'atmosfera i es preveu que fins al 2050 incrementin les emissions en un 120% [1]. Una de les preocupacions més grans a nivell europeu és la de la qualitat de l'aire. Se sap que els transports emeten diòxid de nitrogen i partícules pesants a l'atmosfera, que tenen conseqüències greus en la salut dels éssers vius. De fet, es calcula que un 90% de la població que resideix en zones urbanes està exposada a concentracions de contaminants atmosfèrics a nivells alts considerats nocius per la salut [2]. A més, la major part de la contaminació inherent a les ciutats prové dels transports. Arran d'aquesta situació, s'està estenent la idea d'electrificar les flotes d'autobusos a les grans ciutats europees. D'aquesta idea neixen projectes com ZeEUS, un projecte a nivell europeu que avalua la viabilitat d'electrificació de flotes d'autobusos a través de diferents proves pilots arreu del continent europeu [3].

És per aquest motiu, que a nivell mundial s'han proposat diverses solucions per intentar redimir el canvi que s'està provocant.

En aquest marc, es va firmar l'acord de París. Un acord a nivell internacional per tal d'evitar un canvi climàtic perillós, mantenint l'escalfament global per sota dels 2°C i prosseguint amb els esforços per limitar-lo a 1,5°C respecte a nivells preindustrials. Entre els objectius més importants de l'acord, es defineix el d'arribar al màxim d'emissions globals el més ràpidament possible i posteriorment reduir ràpidament aquestes emissions [4].

El passat 2021 es va celebrar la cimera de Glasgow on es posava de relleu la importància de complir amb els compromisos de París i endurir les restriccions, donant especial rellevància a realitzar actuacions en aquesta dècada, reduint en un 45% les emissions de cara a l'any 2030 [5].

Cadascun dels diferents països de l'acord de París es compromet a definir i executar plans d'actuació per tal d'assolir els objectius proposats. És per aquest motiu que els països de la Unió Europea (UE), entre d'altres, han començat a aplicar mesures per tal de disminuir les emissions. Es calcula que el transport públic té un consum 3,4 vegades menor que els automòbils privats per passatger i km, de manera que si es concentren els esforços en reduir

el transport privat i reduir encara més les emissions del transport públic, ajudarien a arribar a l'objectiu EU 2050 de descarbonitzar el sector dels transports [2]. Algunes mesures de descarbonització que s'estan aplicant actualment en són les zones de baixes emissions (ZBE) [6] en grans ciutats com Barcelona i Madrid, subvencions dirigides a la mobilitat sostenible, prohibició de l'ús de vehicles molt contaminants...

Empreses de transport urbà com Transports Metropolitans de Barcelona (TMB) està fent passos cap a una transició al transport elèctric. Recentment ha adquirit el primer dels 8 autobusos d'hidrogen que adquiriran a la seva flota, moment en el qual s'ha iniciat la primera planta de producció d'H₂ verd d'Espanya a la Zona Franca [7]. Hi ha en marxa un pla d'adquisició de 210 autobusos entre híbrids (132) i 100% elèctrics (78) en els propers 4 anys i es pretén que a l'any 2030 més de la meitat d'autobusos de TMB siguin elèctrics.

Es calcula que en els últims 4 anys s'han reduït aproximadament en 27.880 les tones de diòxid de carboni i que de cara a l'any 2023, la reducció serà de 50.500 tones d'aquest gas. A més a més, es calcula que les emissions de CO₂ d'un autobús híbrid són de mitjana un 30% més baixes que el del vehicle homòleg dièsel, podent arribar a ser un 45% inferior en alguns models, i en el cas dels vehicles elèctrics, la reducció en emissions en fase d'ús arriba a ser del 100% [8].

Actualment s'ha acabat d'electrificar la línia H16 [9], que seguida de les línies H12 i V15, seran les primeres en estar electrificades. Aquestes línies compten amb autobusos de gran envergadura, i els nous autobusos que s'incorporaran a la flota (també de 18 metres) tindran bateries suficientment grans per poder treballar durant tot el dia, parant a principi i a final de línia per fer una càrrega ràpida en moments puntuals.

La capacitat de les bateries d'aquests autobusos és molt gran i permet que tinguin una autonomia de fins a 300 quilòmetres (recorregut diari habitual), però no totes les línies poden tenir autobusos tan llargs. Els autobusos de barri, per exemple, necessiten ser més curts perquè han de recórrer carrers més estrets, circular per grans pendents i l'afluència de gent és més reduïda. Així doncs, es presenta un altre repte: com adaptar la línia per tal de poder fer la transició de motors de combustió a elèctrics en aquests tipus de línia. Actualment hi ha 200 línies de barri a Barcelona, cadascuna de les quals conta amb 2 autobusos com a mínim. Per tant, estem parlant d'uns 400 autobusos d'aquesta modalitat que si s'adaptessin a noves tecnologies menys contaminants, permetrien fer un gran canvi en les emissions degudes al transport públic a Barcelona.

2.1. Objectius del projecte

La finalitat del treball és contribuir a una transició energètica en el sector dels transports a l'àrea metropolitana de Barcelona, en concret a les línies de barri. L'objectiu principal és realitzar un estudi d'alternatives per determinar quina actuació o solució viable és més favorable tècnica i econòmicament. Per tal d'arribar a aquest objectiu principal, es proposa desenvolupar l'estudi amb els següents objectius específics:

- Aconseguir reduir les emissions de la línia respecte l'actual i que puguin arribar a ser 0 en fase d'ús.
- Analitzar la despesa econòmica de diferents possibles actuacions.
- Trobar una alternativa econòmicament més adequada per a la implementació.
- Aconseguir una alternativa que permeti seguir oferint un servei amb un interval de temps entre autobusos igual que no variï en més de 5 minuts la línia actual.
- Trobar una alternativa que tingui una capacitat de transport igual a l'actual o superior.

2.2. Abast del projecte

L'abast del projecte serà:

- L'estudi de diferents alternatives per fer una comparativa de la qual sorgeixi una proposta.
- Establir un sistema de valoració de les alternatives.
- L'estudi de diferents sistemes de recàrrega que permetin allargar la distància a recórrer sense passar per la cotxera.
- La comparativa de les emissions en la línia actual respecte a la mateixa línia electrificada en un període de 10 anys.
- L'aproximació econòmica del cost de les alternatives per a l'electrificació de la línia d'autobús.

Per tant, queda fora de l'abast:

- Disseny dels sistemes elèctrics de funcionament de l'autobús i/o la línia, es faran servir tecnologies conegudes i que estiguin en el mercat, tot i així, es poden fer petites

adaptacions amb tecnologies conegudes a l'oferta de mercat actual. No es pretén dissenyar una nova tecnologia per a complir amb els objectius.

- L'estudi de l'impacte ambiental degut a la fabricació dels autobusos elèctrics.
- Tant l'estudi econòmic com l'ambiental es realitzen des d'una perspectiva d'ordre de magnitud del projecte. En el cas de l'estudi econòmic no es tenen en compte aspectes com les licitacions, permisos d'obra i altres costos indirectes.

3. Línia 130 de TMB

3.1. Introducció

La línia 130 d'autobús de Barcelona, operada per la companyia de transports TMB, és una línia de barri que opera entre la plaça d'Artós i can Caralleu. És una línia poc concorreguda, amb girs tancats i carrers estrets, per la qual cosa s'utilitzen autobusos de longitud reduïda (8 metres de llarg) i comporta una dificultat afegida a l'hora d'electricar la línia. Aquesta línia és un clar exemple del que es pot trobar a les línies de barri de la ciutat comtal, que juntament amb la resta fan un total de 200 línies d'aquest estil. D'aquesta dada podem deduir que per realitzar una transició completa, aquestes línies tenen una importància vital, doncs el nombre d'autobusos ascendeix a més de 400.

3.2. Característiques tècniques

La línia es troba a la zona nord de la capital catalana i realitza un recorregut de 7,36 km. En aquest recorregut fa diverses parades, entre les quals es troben la de la plaça d'Artós amb passeig de Sant Joan Bosco (parada nº 702 de TMB), des d'on comença la línia (km 0); la parada de l'avinguda de Josep Vicenç Foix amb el passeig de la Reina Elisenda de Montcada (2387), a 711 metres de l'inici del recorregut; la parada del carrer de Gaspar Casadó amb carrer dels Esports (2855), a 1725 metres de la parada anterior; i l'última, al carrer Major de Can Caralleu (2864), a 1547 metres de la parada 2855. Per tant, el recorregut total d'anada és de pràcticament 3,4 km.



Il·lustració 1: Recorregut de la línia 130 de TMB

La resta de parades queden referides a l'annex 9.1. Alguns dels carrers pels quals circula l'autobús tenen poca amplada, com és el cas del carrer dels Pins de Can Caralleu (veure il·lustració 2). Altres, com el carrer de la Capella de Can Caralleu o el camí de Lliçà (il·lustracions 3 i 4 respectivament), tenen molta pendent, i alguns revols difícils de fer amb mitjans de transport voluminosos.



Il·lustració 2: Carrer dels Pins de Can Caralleu, Barcelona



Il·lustració 3: Carrer de la Capella de Can Caralleu, Barcelona



Il·lustració 4: Camí de Lliçà, Barcelona

Així doncs, coneixent els quilòmetres que es recorren entre parades, es poden conèixer les distàncies que recorren els autobusos després d'una jornada laboral. Els dos autobusos realitzen 310,3 km des del moment que surten de la cotxera fins que hi tornen. Es pot assumir que la meitat de la distància (155 km aproximadament) la recorre cadascun dels dos cotxes que s'utilitzen per la línia. De la distància total a recórrer, 27,5 km es realitzen per fer els trajectes d'anada i tornada a la cotxera i la resta en serveis de línia.

Les velocitats entre les parades (computat i especificat a l'annex 9.3) varia en funció del tram i si l'autobús es desplaça entre parades o si entra o surt de la cotxera. Gràcies a les dades obtingudes de TMB, s'ha pogut conèixer la velocitat mitja a les quals circulen els autobusos quan es dirigeixen a la cotxera o venen d'ella (28,5 km/h), la velocitat comercial (13 km/h) i la velocitat bruta (10 km/h).

Els autobusos tenen una jornada laboral d'aproximadament 14 hores, sortint el primer autobús des del carrer Major de Can Caralleu a les 7:00 hores i realitzant l'última sortida des de la mateixa estació a les 20:37 hores. Pel que fa al segon torn, aquest comença des del carrer Major de Can Caralleu a les 7:25 hores, i realitza el recorregut de forma intercalada amb l'autobús de l'altre torn, fent l'última de les sortides a les 21:00 hores des de la mateixa parada.

A l'actualitat aquesta línia consta de dos autobusos propulsats per motors tèrmics dièsel. Aquests autobusos tenen un consum aproximat de 17,5L per cada 100 km recorreguts i una capacitat de 18 usuaris, 13 dels quals poden seure als seients, a més de la plaça destinada al conductor. La longitud d'aquests vehicles és d'uns 7 metres i l'amplada és de 2,14m (es poden consultar les especificacions tècniques del vehicle a l'annex 9.1).



Il·lustració 5: Autobús de barri de motor dièsel igual a l'utilitzat en la línia 130

4. Estat de l'art de les línies d'autobús elèctric

A l'actualitat existeixen diverses alternatives pel que fa al transport de passatgers als habituals mitjans de transport contaminants. Tot i que la seva implementació no és immediata, s'està avançant en matèria de capacitat de les bateries, millores en la recàrrega ràpida de les mateixes, i la regeneració d'energia. Els països europeus aposten cada cop més pels transports elèctrics, sobretot a les grans ciutats.

Algunes de les alternatives, es presenten com autobusos híbrids, és a dir, reben energia de dos mètodes o més diferents.

Algunes ciutats europees com Viena o Praga tenen tramvies connectats a un carenat que els alimenta de manera ininterrompuda amb energia elèctrica. De la mateixa manera, hi ha altres ciutats que fan servir aquest mateix mètode per als autobusos híbrids, de manera que poden carregar les bateries mentre estan connectats al carenat i funcionar amb ella durant una certa distància, i tenen l'opció de fer servir el motor de combustió quan no queda bateria.

Actualment existeixen diferents mètodes per tal de recarregar les bateries d'autobusos elèctrics. Aquests poden ser per contacte directe o no.

Hi ha alguns països europeus que han començat a fer implementacions de flotes d'autobusos elèctrics.

- **Ginebra** (Suïssa): El 2013 es va posar en servei un bus llançadora de 18,7 metres entre l'aeroport de Ginebra i Palexpo. Aquest trajecte té un recorregut de tan sols 2 km i té una estació de recàrrega ràpida de 400 kW a Palexpo, mentre que en té un de 200 kW a la part final del recorregut. A més, durant el recorregut, hi ha parades de 600 kW que donen un extra d'energia a l'autobús durant uns 15 segons, aprofitant la pujada i baixada d'usuaris de la línia. Aquest complement juntament amb una càrrega d'uns 4 o 5 minuts a l'inici i final de la línia, permetien a l'autobús poder oferir una jornada completa de servei.
- **Estocolm** (Suècia): El 2015 es va fer a Estocolm la primera autopista elèctrica d'Europa. L'autopista té una catenària que permet alimentar els mitjans de transport en 2 km. La potència del sistema és de 150 kW i era feta servir per camions híbrids. El mateix any a Göteborg es va instal·lar un altre sistema similar de 300 kW i a Stuttgart de corrent continu i 60 kW.
- **Madrid** (Espanya): Des de 2011 s'han incorporat vehicles híbrids a les flotes d'autobús de la ciutat. Aquesta solució és més econòmica d'implementar però no és de zero emissions. A Barcelona i altres ciutats es va aplicar aquesta tecnologia més tard per

tal de reduir les emissions. El 2017 però es va fer la primera línia d'inducció elèctrica, amb 42 parades (línia 76, gestionada per l'Empresa Municipal de Transports de Madrid). El sistema té dos carregadors, un a l'inici del recorregut i un al final, i es realitzen parades de 8 minuts (recàrrega d'oportunitat) mentre que es realitza una recàrrega sencera a la nit a la cotxera.

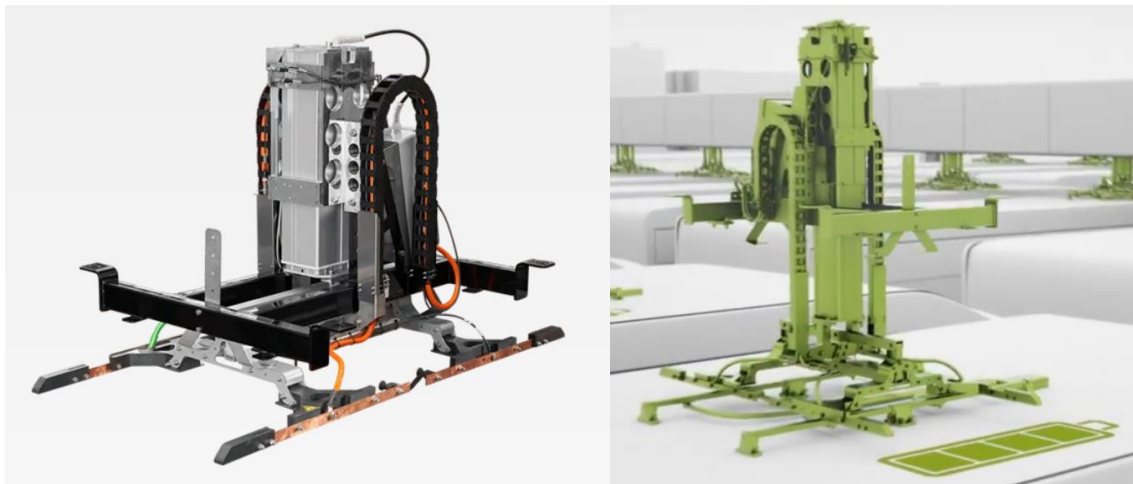
- **Londres i Manchester** (Regne Unit): Al 2017 es va habilitar durant 8 setmanes un sistema de recàrrega per autobusos elèctrics a Manchester i posteriorment a l'aeroport de Heathrow per transportar personal i passatgers. Aquest sistema, anomenat OppCharg, estava monitoritzat a distància de manera que permetia analitzar les dades recopilades. El sistema tenia diversos pantògrafs als quals es connectava l'autobús en un lapse de temps d'entre 3 i 6 minuts de manera que pogués operar durant tot el dia sense passar per la cotxera a la nit.
- **Amiens** (França): En aquesta localitat francesa es van contractar 43 autobusos de la casa espanyola Irizar de 18 metres articulats, amb una bateria de 90 a 150 kWh en funció del nombre de bateries de l'autobús i una potència nominal de 235 kW. Els autobusos s'alimenten per mitjà de la recàrrega d'oportunitat amb diferents pantògrafs en els quals hi està endollat durant un període d'uns 5 minuts, amb una potència de recàrrega és de fins a 500 kW.
- **Valladolid** (Espanya): A Valladolid es van rebre l'any 2017 5 autobusos híbrids endollables, que a més de recarregar la bateria a través d'una connexió elèctrica (pantògraf), recuperava l'energia de les frenades per convertir-la en electricitat i emmagatzemar-la.
- **Frankfurt - Darmstadt** (Alemanya): Siemens va construir una línia electrificada de 10 km per a camions a l'autopista A5. Aquest sistema és similar al sistema utilitzat a Estocolm, doncs utilitza les catenàries per a fer arribar l'energia als mitjans de transport. Estava pensat sobretot per a vehicles híbrids que no necessitessin rebre constantment energia elèctrica o autobusos amb bateria, doncs la longitud de la catenària era reduïda.

4.1. Tecnologies de càrrega d'autobusos elèctrics

Pel que fa a les empreses que es dediquen a fer estacions de recàrrega per a autobusos elèctrics i vehicles elèctrics en general, n'hi ha unes poques que lideren el sector a nivell mundial. Algunes d'elles són ABB Ltd., Ekoenergetyka-Polska Sp. z o.o., Bombardier Inc.,

JEMA Energy S.A., Heliox B.V., Proterra Inc., Schunk Carbon Technology, i Siemens Mobility GmbH. Els seus productes són molt variats, la qual cosa permet escollir entre diferents tecnologies per tal d'optimitzar el procés de recàrrega:

- **Depot charger (Schunk):** Aquest sistema de càrrega consisteix en un pantògraf situat a l'estació de recàrrega, que es desplega automàticament en el moment en el que un autobús es troba en posició de càrrega. La connexió es realitza per contacte directe entre el pantògraf i la part superior de l'autobús, on s'hi troben uns rails metàl·lics. Aquest tipus de connexió està pensada per a la càrrega nocturna (lenta). Els avantatges principals d'aquesta tecnologia són els següents:
 - ❖ El vehicle no ha d'estar perfectament situat sota el pantògraf, té una petita tolerància.
 - ❖ Al no haver-hi cables i un port d'entrada, el sistema és més durador.
 - ❖ Com que el pantògraf es desplega verticalment gràcies al sistema "top-down" (es desplega verticalment des de l'estació en sentit descendent fins a fer contacte amb la seva contrapart al sostre de l'autobús), els autobusos poden estar aparcats sense haver de deixar espai entre ells, de manera que es pot fer una estació de recàrrega per més autobusos en un menor espai físic.

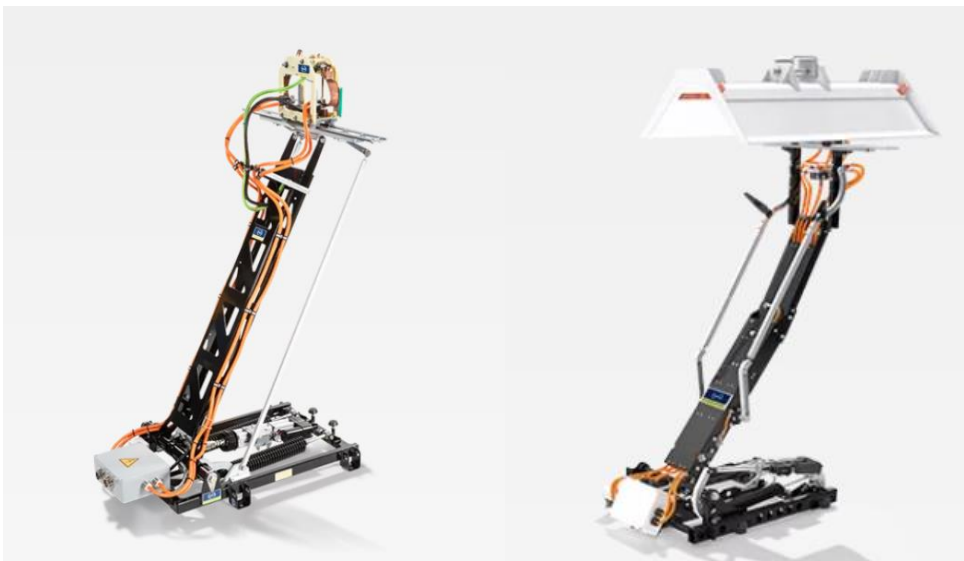


Font: <https://www.schunk-group.com/transit-systems/en/products/detail/depot-charger~p6404>

- **Roof mounted pantograph (Schunk):** És un dels sistemes més estesos i utilitzats per a poder fer recàrrega d'oportunitat en autobusos elèctrics. Consisteix en un pantògraf situat a la part superior de l'autobús que es connecta a una estació de

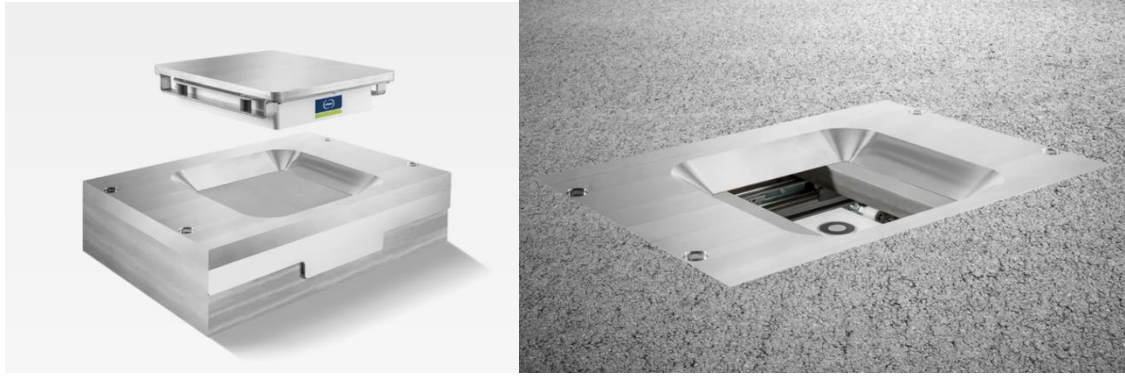
recàrrega ràpida (elevada potència). Quan l'autobús arriba a l'estació, desplega el pantògraf i queda connectat a la seva contrapart. Aquest sistema presenta els següents avantatges:

- ❖ Té un sistema de seguretat que necessita de 4 punts de contacte per a carregar.
- ❖ El sistema corregeix les desviacions produïdes en l'aparcament.
- ❖ Sistema tipus "bus-up" (es desplega verticalment des de la zona superior de l'autobús i en sentit ascendent).



Font: <https://www.schunk-group.com/transit-systems/en/products/detail/roof-mounted-pantograph~p6384>

- **Underbody charger (Schunk):** Aquest és un sistema molt nou que pretén agilitzar les recàrregues dels vehicles elèctrics. Per fer-ho, té un sistema que es desplega des del terra en vertical i es connecta a la part inferior de l'autobús. D'aquesta manera es pot disposar d'una càrrega ràpida sense necessitat del conductor ni de cap persona externa d'haver de realitzar cap connexió. Algunes dels avantatges del sistema són:
 - ❖ No crea impacte visual.
 - ❖ Sistema totalment automatitzat.
 - ❖ No requereix que l'aparcament estigui realitzat amb alta precisió.



Font: <https://www.schunk-group.com/transit-systems/en/products/detail/underbody-charger~p6417>

- **Pantograph down (ABB Ltd.):** Aquest sistema té un funcionament similar al del *Depot charger* ("top-down"), però permet fer càrregues ràpides. Pot treballar amb un rang de potències que va des dels 150 kW fins als 600 kW. Està pensat per a la recàrrega d'oportunitat, doncs normalment les càrregues que realitza són d'entre 3 i 6 minuts. Els principals avantatges d'aquest sistema són:
 - ❖ Capacitat de recàrrega de diferents potències, en funció dels requeriments de l'usuari.
 - ❖ Càrrega molt ràpida.
 - ❖ No necessita cablejat.



Font: <https://new.abb.com/ev-charging/products/pantograph-up>

Font: <https://new.abb.com/ev-charging/produkte/pantograph-down>

- **PRIMOVE (Bombardier):** Aquest sistema és un dels primers amb tecnologia de càrrega ràpida per inducció, proporcionant càrregues de fins a 200 kW de potència. El sistema està pensat de manera que quan l'autobús està situat sobre la plataforma de

càrrega, aquesta comenci a emetre energia per a carregar la bateria de l'autobús. El sistema ha estat provat per l'empresa de transports alemanya Braunschweiger Verkehrs-AG a la ciutat de Braunschweiger. Les seves característiques principals són:

- ❖ No crea impacte visual perquè la instal·lació està situada sota la calçada.
- ❖ La potència de recàrrega és prou elevada per a poder utilitzar la tecnologia per a recàrrega d'oportunitat.
- ❖ Accepta una desviació en l'aparcament de fins un 30%.
- ❖ Sistema totalment automàtic.



Font:

https://bombardier.com/sites/default/files/documents/images/ckeditor/staging/upload/news/pictures/51/15/82/96/13/bombardier-transportation-Primove2-20140327-LR-jpg_013658.jpg

- **Plug-in (Proterra):** Aquest sistema és un dels més coneguts pel públic general, doncs és el més estès per a carregar cotxes elèctrics. Aquest carregador pot tenir un rang ampli de velocitats de recàrrega en funció de l'ús que se li vulgui donar. Aquest rang va des dels 60 kW fins als 180 kW. Per aconseguir altes velocitats de recàrrega, en comptes d'utilitzar corrent alterna (d'ara endavant CA), s'utilitza un convertidor incorporat a l'estació de recàrrega per transformar en corrent contínua (d'ara endavant DC, per les seves sigles en anglès direct corrent). Aquest és un factor molt important, doncs el corrent elèctric que circula per la xarxa, ho fa com a CA, ja que ens evita pèrdues a llargues distàncies i es pot implantar el corrent trifàsic. Els dispositius electrònics però, funcionen amb DC, per la qual cosa és necessari l'ús d'un

convertidor. Quan aquest convertidor està situat al mateix aparell electrònic (abans de la bateria), el procés de càrrega és més lent que si el corrent es transforma a la font d'alimentació i el corrent circula directament a la bateria del dispositiu. A nivell energètic, el consum d'un carregador plug-in de DC és més elevat, així com el cost del carregador.



Font:

https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2021/08/SPEC_DISPENSER_NBi_8.20.21.pdf

5. Electrificació de la línia 130

5.1. Propostes d'electrificació

Existeixen autobusos elèctrics de diferents tipus. Alguns d'ells són una barreja de tecnologies i motorització com els híbrids, i d'altres són totalment elèctrics. Aquests últims poden ser molt diferents entre ells també, doncs alguns utilitzen bateries per emmagatzemar l'energia elèctrica i d'altres la converteixen a mesura que la necessiten, com és el cas dels autobusos d'hidrogen.

És important conèixer com afecten les tecnologies anteriorment vistes a l'autonomia dels autobusos i a la seva funcionalitat. És per això que en aquest apartat es desglossen les diferents tecnologies aplicades a la línia i s'expliquen les característiques que tindran.

Per tal de conèixer els costos d'operació de les alternatives s'ha seguit l'estudi realitzat per Lajunen i Lipman que data de l'any 2016 [10]. Aquest estudi estableix els preus per a la majoria d'alternatives que es recullen en aquest treball i es planteja l'equació següent per a calcular els costos d'operació:

$$Cost\ op. = C_r + \sum_{j=0}^T (N_{bus} * (C_{d_j} + C_{m_j} + C_{CO_2_j}))$$

On C_r és el cost del recanvi de la bateria (si és necessari), N_{bus} és el número de busos de la línia, C_{d_j} és el cost de l'energia degut a la distància recorreguda aquell any, C_{m_j} és el cost de manteniment del vehicle, (que es considera 0, perquè tots els vehicles tenen el mateix), C_{CO_2} és el cost per emissió de CO_2 , i T és el nombre d'anys pels que es calcula el cost. En el nostre estudi però, es prescindirà del cost de les emissions de CO_2 per fer més senzilla la comparativa.

A més, l'estudi té en consideració els següents criteris:

- Els costos derivats de la feina de les persones són iguals per a les diferents alternatives.
- Una vida útil dels autobusos de 12 anys.
- El valor dels autobusos és zero al finalitzar la seva vida útil.
- El cost del manteniment de possibles imprevistos no està inclòs.
- No es consideren les emissions directes de CO_2 emeses pels fabricants

d'autobusos.

L'estudi de Lajunen i Lipman no s'ha realitzat sobre microbusos com és el cas d'estudi d'aquest treball, però al ser tots autobusos de les mateixes característiques (tot i que utilitzen alternatives diferents, com en el cas del present treball), aquests valors són útils per tal de fer la comparativa, doncs es comparen alternatives d'igual a igual en quant a característiques físiques, com és el cas d'aquest treball.

5.1.1. Bateries de llarga duració

Aquesta proposta té com a objectiu principal no haver de realitzar parades per a recarregar les bateries. Per tant, per a aquesta proposta no es fan servir carregadors ràpids en el recorregut de l'autobús. Només s'utilitzaran els carregadors nocturns de la cotxera per a proporcionar energia als autobusos. Aquests carregadors tenen una potència de 50 kW, per la qual cosa requeriran de poc menys de 2 hores per carregar-se.

La seva implementació passa per l'estudi del nombre d'autobusos que es necessitaran, doncs cap d'ells es pot quedar amb un percentatge de bateria per sota del 30% per tal de poder arribar fins a un carregador amb la càrrega restant. Tot i que els autobusos a nivell comercial anuncien que tenen una autonomia estimada de 200 km, s'ha pogut observar mitjançant un experiment pràctic que amb altres vehicles elèctrics, com els cotxes, la seva autonomia acaba essent un 78-90% de la que s'enuncia segons el cicle WLTP [11]. Així doncs, es pot considerar que el rang de l'autobús seria d'entre 156 i 180km. Addicionalment, l'autobús no es pot quedar amb una bateria inferior a 60 km (30% de l'autonomia total), per tal de no tenir problemes en cas d'imprevistos. Així doncs, l'autonomia d'aquest autobús en una jornada disponible per a prestar el servei de la línia d'aquest autobús serà de 120 km, 35 km menys dels que ha de recórrer diàriament, en el supòsit que l'autonomia fos un 90% del que s'estableix a la fitxa tècnica (el millor dels casos). També s'ha de tenir en compte que a les èpoques d'hivern i estiu, quan s'utilitza l'aire condicionat i la calefacció, les bateries es descarreguen més ràpidament i l'autonomia podria veure's alterada.

Un dels punts a tenir en compte d'aquesta alternativa és que no està plantejada per haver de fer parades durant el seu recorregut. Per la qual cosa, l'autonomia de l'autobús és insuficient.

Hi ha autobusos que tenen una major quantitat de bateries i poden recórrer distàncies més grans sense haver de recarregar, però al ser autobusos de dimensions més reduïdes degut a les demandes de la línia, es requereix d'un autobús més per poder mantenir l'horari actual de la línia, per tant, seria necessari incorporar 3 autobusos a la flota per tal de poder seguir oferint el servei a aquesta línia.

Pel que fa a la contaminació de l'autobús elèctric de bateria, les seves emissions són nul·les. De fet, aquesta i la resta d'alternatives que no emeten gasos d'efecte hivernacle podrien ser

mitjans de transport totalment verds si l'electricitat que es consumeix prové de fonts d'energia renovables i no contaminants.

El cost d'implementació d'aquesta alternativa és elevat degut al preu de les bateries, que és el component més car dels vehicles elèctrics. Cadascun dels autobusos que s'utilitzarien per a aquesta alternativa (Karsan e-JEST de doble bateria [12]) es calcula que pot estar al voltant dels 374.000€, si es té en compte que aquest autobús és un 150% més car que la seva alternativa propulsada per combustible dièsel [10]. A més, el fet de necessitar un autobús extra per tal de poder seguir oferint el servei que es proposa encareix el cost total d'aquesta alternativa. Addicionalment, s'ha de contar amb la incorporació de 3 carregadors ràpids de 50kW que tenen un cost de 40.000€ [13] aproximadament que permet carregar els 3 vehicles durant la nit. El cost total de l'alternativa ascendeix fins als 1,16 milions d'euros.

Pel que fa al cost de manteniment, la vida útil de la bateria és de 8,2 anys (temps en el que s'assoleixen els 3000 cicles [10], a raó d'un cicle diari. En aquest punt, s'ha de canviar la bateria (de 88kwh), la qual té un cost de 500€/kWh [10], així doncs, el cost total de la bateria és de 44.000€. També s'ha de considerar el cost de l'energia que es consumirà al llarg de l'any, que serà de 5.507€:

$$Cost\ energia\ anual = \frac{0,2575\text{€}}{kWh} * \frac{41,9kWh}{100km} * 51041,6km = 5.507\text{€}$$

On 0,2575€ és la mitjana del cost de l'electricitat entre les 10 del vespre i les 6 del matí [14] (període durant el qual es du a terme la recàrrega del vehicle), 41,9kWh és el consum de l'autobús elèctric Karsan e-Jest que incorpora la bateria de 88kWh i és l'autobús que s'utilitzarà en aquesta alternativa.

$$Cost\ manteniment = 44.000\text{€} + \sum_{j=1}^{12} (3 * (5.507\text{€})) = 242.252\text{€}$$

El cost de manteniment ascendeix a un total de 242.252€ per als 12 anys de vida útil de l'autobús, que si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km), s'obté un valor de 0,395€/km.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
156-180 km	Nocturna, lenta (50 kW)	2 h	Sense parades	374.000€ x3 autobusos + 40.000€ (instal·lacions) = 1,16M€	0/5

Taula 1: Resum de l'alternativa bateries de llarga duració.

5.1.2. Recàrrega d'oportunitat via pantògraf

Aquesta alternativa consisteix en fer una càrrega nocturna i després realitzar una sèrie de parades curtes a l'inici o final de la línia per tal de recarregar l'energia perduda. En aquestes parades, inferiors a 8 minuts, es recuperaria energia ràpidament mitjançant l'ús de carregadors de gran potència de 500kW (ultra ràpids), als quals s'hi unirà l'autobús mitjançant un pantògraf amb un sistema automàtic de connexió.

Aquesta alternativa incorpora la càrrega nocturna de la mateixa manera que la primera alternativa, però ho complementa amb la recàrrega d'oportunitat, permetent utilitzar bateries més petites (permet disminuir el cost d'adquisició i manteniment del vehicle). En quant a l'autonomia, la recàrrega d'oportunitat permet allargar la jornada de treball i factors com les pujades, l'ús de l'aire condicionat i la calefacció no perjudiquen la dinàmica habitual de la línia, de la mateixa manera que succeeix amb la resta d'alternatives elèctriques, doncs a les pendents de baixada es pot aprofitar per recuperar energia. L'autonomia que s'ha tingut en compte, és aquella que assegura la durabilitat dels 84km. Tot i així, l'autobús té una autonomia teòrica d'aproximadament 100km, al disposar d'1 bateria de 44kWh.

La recàrrega d'oportunitat es realitza quan l'autobús espera abans de començar el recorregut de nou. L'interval de temps que transcorre mentre l'autobús espera a tornar a fer el recorregut varia en funció de l'hora del dia. Al voltant de les 8 del matí, a l'estar les carreteres més congestionades, el temps de parada del que disposa l'autobús és massa curt. A la resta d'hores l'autobús para un mínim de 9 minuts abans de reprendre la circulació, temps suficient per a recarregar la bateria parcialment per poder seguir circulant fins al final de la jornada. Les dades dels diferents temps de parada es poden consultar a l'annex.

El cost d'autobusos amb la tecnologia de recàrrega esmentada que tenen un preu de 518.000€ [15]. Aquests autobusos són el model *ie bus* de la casa Irizar, el qual té una longitud de 12 metres i incorpora unes bateries amb capacitat per emmagatzemar 350kWh. Tot i no haver trobat dades per a autobusos amb requeriments similars als de la línia 130, es podria considerar que el cost d'adquisició d'un autobús de fins a 7 metres de longitud de la mateixa

casa que l'alternativa de grans bateries i una bateria d'aproximadament 44kWh podria ser de 300.000€. Aquest preu és una aproximació i es basa en la diferència de preu entre un autobús dièsel i un d'elèctric amb recàrrega d'oportunitat, que és el doble de car [10].

El cost d'aquesta alternativa, a més de considerar el cost d'ambdós autobusos, considera també la incorporació de l'estació de recàrrega al final de la línia, que ascendeix a 350.000€ [13]. Aquest cost inclou el de l'aparell, però falta considerar el de l'obra civil, que podria ser d'uns 10.000€. El cost de l'estació de càrrega nocturna utilitzat a les cotxeres és de 40.000€ aproximadament, i és el mateix que s'utilitza actualment per als seus homòlegs articulats de 18m de longitud a la ciutat de Barcelona i carrega els autobusos mitjançant el mateix pantògraf en les hores en les quals no es presta servei. El cost és més elevat respecte l'alternativa anterior, però també permet incorporar un pac de bateries més petit (i econòmic) menys contaminant a la fabricació i la disminució de la vida útil de la bateria no afecta de forma tan negativa com en el cas de l'alternativa anterior, disminuint el cost de manteniment de la línia. A més, tot i que la vida útil dels autobusos s'estima que pot ser de 12 anys, les estacions de recàrrega poden tenir una vida útil més prolongada. El cost total d'implementació, que considera tots aquests costos, ascendeix a 1 milió d'euros.

Pel que fa al cost de manteniment, si se segueix el mateix procediment que a la primera alternativa, la vida útil de la bateria es considera que dura fins assolir-se els 10.000 cicles de càrrega [10], que a raó de 3 cicles de càrrega diaris (2 durant el servei i 1 a la cotxera), serà de 9,13 anys. Transcorregut aquest període de temps, s'haurà de fer un canvi de bateria. S'estima que el cost de les bateries amb elevada capacitat de potència de càrrega tenen un preu de 750€/kWh [10]. Així doncs, el cost de la bateria de recanvi seria de 33.000€.

El cost de l'energia utilitzada al llarg de l'any per als vehicles de la línia és:

$$Cost\ energia\ anual = \frac{0,356\text{€}}{kWh} * \frac{41,9kWh}{100km} * 51041,6km = 7.614\text{€}$$

On 0,356€ és la mitjana del cost de l'electricitat entre al llarg d'una jornada [14], 41,9kWh és el consum de l'autobús elèctric Karsan e-Jest que incorpora la bateria de 44kWh i és l'autobús que s'utilitza en aquesta alternativa.

$$Cost\ manteniment = 33.000\text{€} + \sum_{j=1}^{12} (2 * (7.614\text{€})) = 215.736\text{€}$$

El cost de manteniment ascendeix a un total de 215.736€ per als 12 anys de vida útil de l'autobús, que si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km), s'obté un

valor de 0,352€/km.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
84 km, extensibles	Nocturna, lenta (50 kW), càrrega ràpida 500 kW	<1 h (nocturna)	A l'inici de la línia	300.000€ x2 (autobusos) + 400.000€ (instal·lacions) = 1M€	3/5

Taula 2: Resum de l'alternativa recàrrega d'oportunitat via pantògraf

5.1.3. Recàrrega d'oportunitat per inducció

La proposta en qüestió és similar a la de l'alternativa de recàrrega d'oportunitat via pantògraf en quant a funcionament de la línia: per la nit l'autobús es carregarà a la cotxera mitjançant una càrrega lenta i al final del recorregut de la línia podrà recarregar-se en períodes de temps petits, en aquest cas mitjançant la càrrega per inducció. L'autonomia dels autobusos d'aquesta alternativa és la mateixa que en l'alternativa anterior, és a dir, de 100 km, i al ser de dimensions més reduïdes, permet disminuir el pes del vehicle i, consegüentment, millorar l'eficiència.

Tot i així, la tecnologia aplicada serà diferent. En aquest cas, la parada inicial de la línia tindrà instal·lat a terra el sistema de recàrrega. Aquest serà visible per a les persones, però no ocuparà espai físic sobre la calçada, si no que estarà integrat en ella. D'aquesta manera, s'aconsegueix reduir l'impacte visual de l'estructura de càrrega.

La tecnologia de la càrrega d'inducció no està tan avançada com la càrrega conductiva. És per aquest motiu, que tot i ser càrrega ràpida, no s'aconsegueixen potències tan elevades com en el cas anterior. Per a les càrregues inductives ràpides es poden obtenir potències d'entre 20 i 300 kW [16] (mentre que l'alternativa anterior arriba a 500 kW). Aquest fet provoca que els autobusos hagin de fer més parades per tenir suficient autonomia per a poder completar la jornada laboral, però per altra banda, també és més ràpid de connectar que l'alternativa anterior, ja que l'autobús només s'ha de situar sobre la plataforma de càrrega.

Aquesta tecnologia requereix d'una instal·lació més costosa a l'haver de refer la zona de la calçada a la que se situa per incorporar-hi el sistema de càrrega. A més, la tecnologia necessària per a dur a terme aquest tipus de recàrrega és més sofisticada que l'anterior i, consegüentment, més cara. Segons l'agència de notícies Europa Press, l'adequació d'aquesta tecnologia a la línia d'autobús número 76 de Madrid va costar uns 2 milions d'euros, considerant la preparació dels autobusos (no la seva adquisició) i el cost de l'obra [17]. Aquesta línia però, té una longitud de 14km, per la qual cosa requereix d'una estació de

recàrrega a l'inici i al final de la línia per a poder recarregar els autobusos. A més, la potència d'aquesta estació és de 100kW, per la qual cosa es necessiten fer més parades per recarregar les bateries. Es podria considerar que el cost per a la línia 130 referent a la construcció de l'estació de recàrrega i adaptació d'autobusos té un preu al voltant del milió d'euros. Els autobusos per la seva part, poden tenir un cost vora els 300.000€, ja que serien els mateixos que per a l'alternativa anterior.

Pel que fa al cost de manteniment, si se segueix el mateix procediment que a les alternatives anteriors, la vida útil de la bateria es considera que dura fins assolir-se els 10.000 cicles de càrrega [10], que a raó de 4 cicles de càrrega diaris (3 durant el servei i 1 a la cotxera), serà de 6,85 anys. Transcorregut aquest període de temps, s'haurà de fer un canvi de bateria. S'estima que el cost de les bateries amb elevada capacitat de potència de càrrega tenen un preu de 750€/kWh [10]. Així doncs, el cost de la bateria de recanvi seria de 33.000€.

El cost de l'energia utilitzada al llarg de l'any per als vehicles de la línia és el mateix que per a l'alternativa anterior, i té un valor de 7.614€.

$$Cost\ manteniment = 33.000€ + \sum_{j=1}^{12} (2 * (7.614€)) = 215.736€$$

El cost de manteniment ascendeix a un total de 215.736€ per als 12 anys de vida útil de l'autobús, que si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km), s'obté un valor de 0,352€/km, que és el mateix que en el cas de l'alternativa anterior.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
100 km, extensibles	Nocturna, lenta (50 kW), càrrega ràpida 300 kW, inducció	8 h	Parades a l'inici de la línia	2x300.000€ (autobús) + 1M€ (adaptació i infr.) = 1,6M€	1/5

Taula 3: Resum de l'alternativa recàrrega d'oportunitat per inducció.

5.1.4. Autobús amb recàrrega dinàmica (Trolleybus)

Aquesta proposta consisteix en un cablejat elèctric estès per una zona delimitada de la línia. L'autobús només requereix d'una petita bateria que permeti tenir suficient energia per desplaçar-se per la línia en els moments en els que no hi ha catenària. D'aquesta manera l'autobús no ha de parar durant un temps determinat a l'inici i al final de la línia per a carregar,

si no que ho fa en moviment.

L'autobús elèctric circula pel seu recorregut com fa ara l'autobús de combustió, però en certs espais del recorregut, desplegarà el pantògraf per connectar-se a la catenària mentre es troba en circulació. En aquests instants, l'autobús tindrà capacitat de carregar la bateria i alimentar directament el motor.

La implantació d'aquesta proposta és la que més impacte visual causa, doncs la infraestructura de la catenària ha de formar part d'una part del trajecte del recorregut suficient per a carregar l'autobús.



Il·lustració 6: Trolleybus en circulació per Moscou.

Pel que fa a l'autonomia, aquest no és un punt que preocupi, doncs la major part del temps l'autobús estarà connectat a la catenària i rep tota l'energia de la xarxa, sense haver de realitzar parades per a recarregar les bateries. Tot i així, s'ha d'estudiar quina és la disposició de la catenària a la línia perquè l'autobús no es quedi sense bateria intentant disminuir l'extensió del cablejat.

El cost d'un trolleybus és d'aproximadament 300.000€ (aproximadament el doble que el d'un autobús dièsel convencional [18]). També s'estima que la construcció de la instal·lació que es requereix per a aquest autobús és d'aproximadament 100.000€/km [19]. Per la qual cosa, el cost total de la instal·lació ascendeix a aproximadament 750.000€.

Pel que fa al cost de manteniment, seguint el mateix procediment que per a les alternatives anteriors, tot i que en aquest cas no s'ha de considerar el canvi de bateries, doncs al llarg dels 12 anys de vida útil de l'autobús es podran utilitzar les mateixes bateries, doncs tot i tenir molts cicles de càrrega i descàrrega, la seva capacitat és molt superior a la necessària per la línia.

El cost de l'energia utilitzada al llarg de l'any per als vehicles de la línia és el mateix que per a l'alternativa anterior, i té un valor de 7.614€.

$$Cost\ manteniment = \sum_{j=1}^{12} (2 * (7.614\text{€})) = 182.736\text{€}$$

El cost de manteniment ascendeix a un total de 182.736€ per als 12 anys de vida útil de l'autobús, que si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km), s'obté un valor de 0,298€/km.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
30-40% del recorregut	En circulació, càrrega conductiva	8 h mínim	Sense parades per carregar	2x300.000€ (autobús) + 750.000€ (infraestructura) = 1,35 M€	5/5

Taula 4: Resum de l'alternativa trolleybus.

5.1.5. Autobús amb bateries intercanviables

Aquesta alternativa consisteix en un autobús el qual funciona amb una bateria que li permet fer una distància d'uns 100 km (44kWh, igual que a les alternatives anteriors) i, posteriorment, s'intercanvia la bateria per una altra de totalment carregada en una estació adaptada. La situació d'aquesta estació podria ser un punt proper a la parada des d'on s'inicia el recorregut de la línia, o bé podria ser una estació compartida amb altres línies de TMB, per tal de reduir els costos. En qualsevol dels dos casos, s'hauria de fer una parada d'entre 5 i 10 minuts per completar el procés.

Aquesta solució permet alleugerir la càrrega sobre la xarxa elèctrica perquè les bateries no necessiten ser carregades en el moment de ser canviades, si no que es poden recarregar en un moment on la demanda de la xarxa és menor, per exemple durant la nit, i el dia següent podria estar carregada per tornar-se a fer servir. A més, les bateries es poden carregar a una potència baixa (50kW) de forma que no es degradin tan ràpidament.

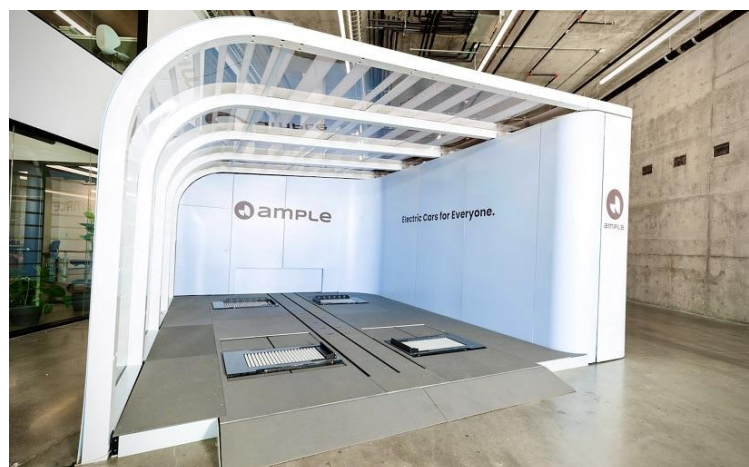
L'estació d'intercanvi de bateries és un espai on hi cap l'autobús, i el doble d'ample, per tal d'emmagatzemar-hi les bateries carregades i les velles que han de carregar-se. Al carregar la bateria amb un sistema de càrrega lenta, la potència consumida de la xarxa és inferior que en el cas de la càrrega ràpida. A més, es poden tenir bateries suficients per a poder abastir als autobusos de les línies i carregar les bateries a la nit.

El cost de l'autobús d'aquesta alternativa és similar al dels autobusos amb recàrrega d'oportunitat, tot i que la infraestructura és més cara. El preu de l'autobús, per tant, ronda els 300.000€.

Actualment, companyies com *Nio* (companyia xinesa de cotxes elèctrics) estan desenvolupant sistemes d'intercanvi de bateries que estan disponibles en el mercat asiàtic, però amb la intenció de portar aquesta tecnologia a altres continents [20]. Els vehicles d'aquesta companyia tenen una sola bateria molt gran, que al retirar-se del vehicle ocupa un gran espai i és més costosa de retirar i d'emmagatzemar. Per altra banda, companyies com *Ample* promouen l'ús de diverses bateries modulars, que es poden retirar individualment i ocupen un menor espai [21]. D'aquesta manera s'aconsegueix disminuir el cost de la instal·lació ja que es poden disposar de forma ordenada de manera que ocupin un espai molt inferior.



Il·lustració 7: Estació d'intercanvi de bateries de la marca Nio



Il·lustració 8: Estació d'intercanvi de bateries de la casa Ample

En el sector dels autobusos elèctrics, la companyia índia Sun Mobility ha dissenyat un sistema d'intercanvi de bateries que permet intercanviar les bateries modulars dels autobusos en aproximadament 3 minuts [22]. A diferència de les bateries dels cotxes, les dels autobusos s'intercanvien des del lateral del vehicle, de manera que la instal·lació és de menors dimensions.



Il·lustració 9: Estació d'intercanvi de bateries de la companyia Sun Mobility

Un estudi dut a terme pels departaments d'enginyeria elèctrica i turisme i lleure a la National Penghu University of Science and Technology [23] va estimar que el cost d'una estació per l'intercanvi de bateries ascendeix a 620.000€. A aquest cost, se li hauria de sumar el d'adquisició de 2 bateries per tal de fer l'intercanvi de bateries, una per cada autobús de la línia. Les bateries estaran a punt per utilitzar de nou quan l'autobús requereixi el canvi, doncs connectades a una potència de 50kW, requereixen menys d'una hora per carregar-se, temps més que suficient. El cost d'implementació d'aquesta línia ascendeix a 1,286 milions d'euros.

Pel que fa al cost de manteniment, seguint el mateix procediment que per a l'alternativa anterior, ja que en aquest cas tampoc s'ha de considerar el canvi de bateries, doncs al llarg dels 12 anys de vida útil de l'autobús es podran utilitzar les mateixes bateries, doncs els cicles de càrrega i descàrrega de les bateries és el mateix que a l'alternativa de recàrrega d'oportunitat però repartit en 2 bateries, per tant, la seva duració serà superior als 12 anys.

El cost de l'energia utilitzada al llarg de l'any per als vehicles de la línia és el mateix que per a les alternatives anteriors excepte la primera, per tant, té un valor de 7.614€.

$$\text{Cost manteniment} = \sum_{j=1}^{12} (2 * (7.614\text{€})) = 182.736\text{€}$$

El cost de manteniment ascendeix a un total de 182.736€ per als 12 anys de vida útil de l'autobús, que si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km), s'obté un valor de 0,298€/km, el mateix que per a l'alternativa anterior.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
100 km	Intercanvi de bateries	3 minuts	2 parades durant el servei	2 x 300.000€ (autobús) + 620.000€ (infraestructura) + 2x33.000€ (bateries de recanvi) = 1,286M€	4/5

Taula 5: Resum de l'alternativa intercanvi de bateries.

5.1.6. Autobús híbrid endollable

Aquest tipus d'autobús té la característica de tenir dos motors, un d'elèctric i un de combustió (propulsat per combustible dièsel). Mentre la bateria té suficient energia elèctrica, l'autobús circula propulsat per aquesta energia, però quan no hi ha més energia, el motor de combustió entra en funcionament per poder seguir operant l'autobús. Aquest autobús es recarrega amb l'energia cinètica, però també quan s'endolla a la corrent a les cotxeres. No és una alternativa de zero emissions de gasos contaminants però ofereix una reducció d'emissions respecte els autobusos propulsats per dièsel actuals i permeten estalviar un 30% de combustible.



Il·lustració 10: Autobús híbrid de la flota de TMB

La seva autonomia és suficient per poder realitzar el recorregut habitual sense necessitar cap

parada per recarregar la seva bateria i el dipòsit de dièsel es pot recarregar a l'acabar la jornada. El fet d'incorporar estacions de recàrrega a la línia suposaria un augment en el cost de la infraestructura que no justificaria l'aplicació d'aquesta alternativa, doncs el seu funcionament seria com el de l'opció d'autobús elèctric amb recàrrega d'oportunitat.

El cost de cada autobús ronda els 210.000€, per establir aquest criteri, s'ha comprovat que el cost d'un autobús híbrid és un 40% més car que el seu homòleg de combustió [10], i s'ha calculat aquesta diferència a partir del preu d'un autobús de les dimensions específiques per la línia propulsat per tecnologia dièsel, com en el cas de les alternatives anteriors. El cost de la infraestructura s'acosta als 40.000€, doncs utilitzaria un sistema de càrrega nocturna similar al de l'alternativa de grans bateries.

Pel que fa al cost de manteniment, la vida útil de la bateria és de 8,2 anys (temps en el que s'assoleixen els 3000 cicles [10], a raó d'un cicle diari. En aquest punt, s'ha de canviar la bateria (de 7,7kwh), la qual té un cost de 500€/kWh [10], així doncs, el cost total de la bateria és de 3.850€. També s'ha de considerar el cost de l'energia que es consumirà al llarg de l'any, que serà de 10.460€:

$$Cost\ dièsel = \frac{1,381\text{€}}{kWh} * \frac{21,2L}{100km} * 51041,6km * (1 - 0,3) = 10.460\text{€}$$

On 1,381€ és el cost del dièsel a Espanya en el moment de realitzar l'estudi [24], 21,2 és el consum de dièsel que consumeix un autobús de característiques similars al de la línia al recórrer 100km i 51.041,6 és el quilometratge anual que farà l'autobús. A més, es considera que un autobús híbrid permet estalviar un 30% de combustible dièsel en el transcurs d'un any [25], per tant, s'aplica el factor corrector d'estalvi (1-0,3).

$$Cost\ manteniment = 3.850\text{€} + \sum_{j=1}^{12} (2 * (10.460\text{€})) = 254.890\text{€}$$

El cost de manteniment ascendeix a un total de 254.890€ per als 12 anys de vida útil de l'autobús, que si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km), s'obté un valor de 0,416€/km.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
Suficient per a tota la jornada	Nocturna, a la cotxera	< 1h	0	2 x 210.000€ (autobús) + 40.000€ (infraestructura) = 460.000€	0/5

Taula 6: Resum de l'alternativa d'autobús híbrid endollable.

5.1.7. Autobús propulsat per CNG

Aquests autobusos tot i ser de combustió interna com els dièsel alimenten el motor amb gas natural comprimit. Quan hi ha suficient CNG, s'utilitza aquest combustible, doncs les emissions de gasos d'efecte hivernacle són inferiors a les emeses en la combustió del dièsel: un 40% menys de nitrats i un 20% menys de CO₂ [26].



Il·lustració 11: Autobús híbrid amb gas natural

La seva autonomia no suposa un problema per al funcionament de la línia, doncs l'autobús s'abasteix seguint el mateix procediment actual de la resta d'autobusos de la línia.

El preu d'aquesta alternativa es pot considerar d'un 10% superior a l'alternativa dièsel, com es veu a l'estudi de Lajunen i Lipman [10], per tant el cost d'adquisició d'un autobús propulsat per CNG seria de 165.000€ aproximadament per autobús. Al no tenir un motor elèctric, ni disposar de bateries, no suposaria un cost extra en quant a infraestructura, ja que TMB ja disposa d'instal·lacions per a recarregar els autobusos d'aquest combustible.

El cost del gas ha experimentat un augment dràstic en poc temps, a partir del 6 de gener de 2022 i el seu preu s'ha estabilitzat en 1,98€/kg [27]. L'energia utilitzada al llarg de l'any per als vehicles de la línia té un valor de 20.354€:

$$Cost\ energia\ anual = \frac{1,98\text{€}}{kg} * \frac{20,14L}{100km} * 51041,6km = 20.354\text{€}$$

El consum de gas natural s'ha obtingut observant la relació de consums que tenen les alternatives de major envergadura [28] i relacionant-ho amb el consum d'un autobús dièsel com el de la línia actual, que és de 21,2L/100km [29].

El cost de manteniment ascendeix a un total de 409.920€ per als 12 anys de vida útil de l'autobús:

$$Cost\ manteniment = \sum_{j=1}^{12} (2 * (20.354\text{€})) = 488.495\text{€}$$

Si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km), s'obté un valor de 0,798€/km, aproximadament el doble que les alternatives elèctriques.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
Suficient per tota la jornada	Benzinera	5 minuts	0	2 x 165.000€ (autobús) = 330.000€	0/5

Taula 7: Resum de l'alternativa CNG.

5.1.8. Autobús amb cel·la d'hidrogen

En el cas d'aquesta alternativa, la bateria de l'autobús en comptes d'emmagatzemar l'energia elèctrica en una bateria, tindria una pila de combustible d'hidrogen.

L'alternativa permet no dependre de l'autonomia del vehicle, doncs els tancs d'hidrogen s'omplirien a una velocitat similar a un tanc de dièsel, tot i que és circumstancialment superior, i podria circular de manera ininterrompuda durant tot el dia. Al final del dia, s'hauria de recarregar el dipòsit d'hidrogen, doncs l'autobús tindria capacitat per fer fins a 250 km amb un dipòsit al disposar d'una pila d'hidrogen de 104kW que s'adaptarà per a l'autobús en qüestió. Actualment a Barcelona hi ha una estació hidrogenera a la Zona Franca, la qual té un conveni amb TMB per a abastir la seva flota d'autobusos de 8 autobusos propulsats per cel·la d'hidrogen que entren en funcionament a principis de 2022 [30]. Al poder subministrar els autobusos amb hidrogen obtingut a partir d'energia neta, permet reduir considerablement la

petjada de carboni de la línia en la qual s'utilitzi la tecnologia.



Il·lustració 12: Autobús propulsat per pila de combustible d'hidrogen

El cost total d'adquisició d'un autobús d'hidrogen amb la seva infraestructura corresponent ascendeix als 742.500€ [10], que és 3,3 vegades més car que un autobús dièsel convencional. Si es considera que el cost de l'autobús dièsel d'unes dimensions com les requerides a la línia és de 150.000€ (com en el cas de la primera alternativa), un autobús d'hidrogen de les mateixes dimensions podria rondar els 495.000€.

Pel que fa al cost de manteniment, la vida útil de la pila d'hidrogen és de 2,74 anys (temps en el que s'assoleixen les 15.000 hores d'ús [10], a raó de 15 hores d'ús diari). La duració de la pila de combustible (que serà de 70kW com l'autobús de 12m de Solaris [31]) és molt curta, per la qual cosa s'hauran de realitzar 4 canvis al llarg dels 12 anys de vida útil de l'autobús. La pila té un cost de 500€/kWh [10], així doncs, el cost total de la bateria és de 35.000€. També s'ha de considerar el cost de l'energia que es consumirà al llarg de l'any, que serà de 32.733€:

$$\text{Cost hidrogen} = \frac{5\text{€}}{\text{kgH}_2} * \frac{11,66\text{kgH}_2}{100\text{km}} * 51041,6\text{km} = 32.733\text{€}$$

On 5,5€ és el cost mig (va des dels 3 fins als 8 euros) de l'hidrogen verd segons l'IEA [32], 11,66 és la conversió de kg d'hidrogen que es necessiten per recórrer 100km (la dada s'ha obtingut de la mateixa manera que s'ha realitzat per la resta d'estudis, assimilant els consums del combustible dièsel amb els d'hidrogen a partir d'alternatives de dimensions estàndard [33]) i 51.041,6 és el quilometratge anual que recorrerà l'autobús.

$$\text{Cost manteniment} = 4\text{bateries} * 2\text{autobusos} * 35.000\text{€} + \sum_{j=1}^{12} (2\text{autobusos} * (32.733\text{€})) = 1.065.592\text{€}$$

El cost de manteniment ascendeix a un total de 1,065 milions d'euros per als 12 anys de vida útil de l'autobús, que si es divideix entre el total de quilòmetres recorreguts (612499,2km),

s'obté un valor de 1,74€/km.

Autonomia	Tipus de càrrega	Temps de recàrrega	Parades	Cost d'implantació	Impacte visual
Suficient per tota la jornada	Hidrogenera	10 minuts	0	2 x 495.000€ (autobús) = 990.000€	0/5

Taula 8: Resum de l'alternativa autobús amb pila de combustible d'hidrogen.

5.2. Propostes no considerades per falta de maduresa tecnològica

5.2.1. Recàrrega inductiva dinàmica

Aquesta proposta consisteix en utilitzar la càrrega inductiva dinàmica per a carregar els autobusos.

La càrrega inductiva dinàmica permet a un vehicle elèctric carregar-se sense necessitat d'estar estacionat en un punt de recàrrega concret, si no que ho fa en circulació. Aquesta tecnologia encara no està disponible per a poder-se utilitzar en el dia a dia tot i que ja hi ha prototips que acosten aquesta tecnologia a la realitat. És el cas de Qualcomm Halo, que ha dissenyat un sistema de càrrega com el descrit que permet circular a velocitats de fins a 100km/h mentre carrega les bateries del vehicle a una potència de 20kW [34]. La idea fonamental consisteix en afegir conjunts de bobines esteses a les carreteres per tal de poder rebre energia elèctrica mentre se circula per sobre d'aquestes bobines. El sistema és molt més complex que la càrrega estàtica.

El cost de la instal·lació de la línia no es pot concretar exactament, tot i que hi ha estudis que diuen que pot ser d'aproximadament 236.000€/km línia [35]. Com es pot veure, el cost és significativament més elevat que la resta d'alternatives.

La mateixa infraestructura podria servir també per altres vehicles elèctrics que poguessin aprofitar aquesta tecnologia i fins i tot podria ser una proposta a implementar per l'ajuntament, de forma que el cost no l'hagués d'assumir íntegrament TMB. Si se situa en punts estratègics, podria arribar a ser una solució que permetés estendre la implantació del transport elèctric, aprofitant els carrers de major afluència per a carregar els vehicles.

Aquesta alternativa no és viable actualment per a la seva implementació al ser una tecnologia poc desenvolupada. De totes maneres, és important destacar-la perquè pot ser una proposta de futur per altres línies del centre de la ciutat.

6. Comparativa

Per escollir la millor alternativa per a electrificar la línia 130 de TMB, l'estudi es pot centrar en diferents punts que poden ser rellevants: l'aspecte econòmic, la utilitat de l'alternativa, la funcionalitat que té la línia (si es pot oferir un servei com l'actual), la capacitat de passatgers que es podran transportar a la vegada, l'impacte ambiental i l'impacte en la xarxa elèctrica.

D'aquests aspectes, l'estudi es centra en la viabilitat del projecte a nivell de funcionalitat i la disminució de la contaminació en fase d'ús, tot i que l'apartat econòmic també és un punt rellevant i es tindrà en compte. Per poder escollir quina és la millor de les opcions, l'estudi passa per una comparació de les alternatives. Per fer-ho existeixen diferents mètodes, com poden ser les matrius de filtrat o les matrius de selecció, que són mètodes senzills de selecció d'alternatives, i eines més elaborades com TOPSIS, MAUT, ANP o AHP.

D'entre tots aquests mètodes, l'escollit per a realitzar la comparativa ha estat el de l'analítica de processos jerarquitzada (AHP). Aquest sistema, desenvolupat per Thomas L. Saaty [36], és un mètode de decisió multicriteri que permet mesurar factors intangibles mitjançant comparacions per parelles. Les alternatives es comparen una a una utilitzant una escala de puntuacions que van de l'1 al 9 que, tal i com va demostrar Saaty en el seu treball i posteriorment ha quedat demostrat en diferents projectes, és l'escala més exacte per aproximar-se al resultat correcte.

Per tal de fer la selecció de la proposta, s'ha fet ús del programa SuperDecisions [37], dissenyat a partir del sistema d'AHP proposat per Thomas L. Saaty i permet realitzar la comparativa d'alternatives. El programa té la versatilitat de realitzar els càlculs a mode de calculadora, proporcionant les dades del resultat i de consistència, simplificant molt els càlculs.

6.1. Funcionament del mètode AHP

L'AHP s'estructura al voltant d'una matriu quadrada, on es prenen per files i columnes les diferents alternatives. A la matriu s'hi afegiran els valors de comparació entre els diferents criteris, de manera que quedin comparats tots entre ells. En el supòsit que tinguéssim 4 criteris, es muntaria una matriu com la de la taula 9, on els diferents valors representen com de millor és un criteri en comparació amb l'altre, amb valors que van de l'1 al 9.

	Criteri 1	Criteri 2	Criteri 3	Criteri 4
Criteri 1	1	a	b	c
Criteri 2	1/a	1	d	e
Criteri 3	1/b	1/d	1	f
Criteri 4	1/c	1/e	1/f	1
Suma columnes	$w=1+1/a+1/b+1/c$	$x=a+1+1/d+1/e$	$y=b+d+1+1/f$	$z=c+e+f+1$

Taula 9: Matriu de criteris del mètode AHP.

Posteriorment, es procedeix a dividir cadascun dels valors de la matriu per la suma total de la columna, de manera que quedin normalitzats. Ara, si es calcula la mitjana dels valors de cada fila, s'obté el valor ponderat de la importància del criteri segons els valors assignats a la primera taula:

	Criteri 1	Criteri 2	Criteri 3	Criteri 4	Mitjana
Criteri 1	$1/w$	a/x	b/y	c/z	r
Criteri 2	$1/(a*w)$	$1/x$	d/y	e/z	s
Criteri 3	$1/(b*w)$	$1/(d*x)$	$1/y$	f/z	t
Criteri 4	$1/(c*w)$	$1/(e*x)$	$1/(f*y)$	$1/z$	u

Taula 10: Obtenció dels pesos de les alternatives, on r, s, t i u són la mitjana de les files de la matriu.

Aquests valors indiquen el percentatge (en tant per 1) d'importància del criteri i poden no ser consistents, tot i haver-los assignat segons un ordre preestablert. En aquest treball no s'entrarà més en detall en l'anàlisi de la consistència, doncs s'ha pogut utilitzar un software que el calcula automàticament el ràtio de consistència (que quan és inferior del 10%, indica que la comparativa s'està fent de manera correcta), però la idea al darrere d'aquest software és comprovar matemàticament que els valors assignats tinguin sentit. Al tenir diferents valors que es comparen un a un, es pot comprovar que les noves comparacions tinguin sentit amb les anteriors, és a dir, si s'estableix que un alternativa és 3 vegades més gran que una altra, que les comparacions amb la resta d'alternatives sigui coherent amb aquest valor.

Un cop realitzada la comparativa dels diferents criteris, es procedeix a fer el mateix per a les alternatives, comparant les unes amb les altres a través dels diferents criteris per aconseguir la resta de pesos, que

D'aquesta manera, es comparen cadascuna d'elles amb sí mateixes i amb la resta d'alternatives creant una matriu amb els percentatges (en tant per 1) que representa com de millor és aquella alternativa en comparació amb les demés per a aquell criteri determinat.

Un cop es tenen tots els pesos dels criteris i de les alternatives, es pot obtenir quina és la millor de les propostes multiplicant cadascun dels pesos de les alternatives (de cadascun dels criteris) pel pes del criteri i sumant-los. El resultat final torna a ser un valor en tant per 1 que indica quina és la millor de les alternatives.

Amb el procediment explicat, s'aconsegueix poder fer una elecció de criteris objectius, però també subjectius amb poc error gràcies al procediment científic que hi ha al darrere. L'estructura en forma jeràrquica té l'objectiu de desglossar cadascun dels criteris amb totes les alternatives, les quals fan una comparació per parelles de judicis sobre la dominància de grups d'elements en un nivell inferior al de l'element al que estan connectats. Aquestes jerarquies simples poden estendre's a nivells de decisió múltiple de models de decisió amb jerarquies de beneficis, oportunitats, costos i riscos.

6.2. Criteris d'avaluació

Per tal d'obtenir la millor proposta de les descrites, es valoren aspectes com l'econòmic, la usabilitat, el tecnològic i la contaminació. Per tal fi, s'han establert els següents criteris:

- Contaminació: Aquest criteri es refereix a la contaminació de l'alternativa. Se'n poden distingir tres subcriteris:
 - Contaminació visual: fa referència a l'estructura de l'alternativa i com es veu en el seu entorn.
 - Contaminació atmosfèrica: es refereix a l'emissió de gasos contaminants en la fase d'ús de l'alternativa.
 - Contaminació sonora: el criteri té en compte el nivell de soroll que emet l'alternativa.
- Econòmic: El criteri fa referència a la despesa que comportarà aplicar una alternativa o altre. Aquesta serà a l'hora d'implementar-la o mentre funciona (manteniment):
 - Cost d'implementació: cost per posar en funcionament la línia d'autobús.

- Cost de manteniment: cost que suposa mantenir en funcionament la línia amb una tecnologia determinada durant un període de 12 anys.
- Usabilitat: Aquest criteri pretén avaluar com afecta la nova tecnologia a la circulació habitual de l'autobús per la línia pel que fa a canvi d'horaris, nombre de passatgers que es poden transportar i facilitat de maniobrabilitat en carrers estrets.
 - Autonomia: dificultat que suposa incorporar l'alternativa a la línia en funció de la distància que pot recórrer.
 - Viabilitat horària: es refereix a la capacitat de l'alternativa per mantenir la freqüència de pas de la línia actual. Aquest criteri s'ha establert com a estrictament necessari per tal de participar a la comparativa. Per tant, si alguna solució no podia assegurar l'horari establert, s'ha adaptat, com s'ha fet amb la incorporació d'un tercer autobús a l'alternativa d'autobusos amb bateries de llarga duració.

El procediment que s'ha seguit per establir la importància dels criteris ha estat condicionat pels objectius del projecte: aconseguir una alternativa menys contaminant, que permeti mantenir l'horari i oferir un servei com l'actual i que sigui econòmicament viable. Així doncs, s'han realitzat les comparacions tenint en compte aquests requeriments, i per tant, s'ha considerat que en ordre descendent la importància dels criteris és:

1. Viabilitat horària
2. Contaminació atmosfèrica
3. Cost d'implementació
4. Cost de manteniment
5. Autonomia
6. Contaminació visual
7. Contaminació sonora

Aquests criteris es comparen per parelles de manera que quedin comparats tots amb tots. Es comparen donant una puntuació entre l'1 i el 9 d'un criteri respecte d'un altre. Per establir els pesos, s'ha seguit el criteri d'experts en fabricació d'autobusos, instituts acadèmics, organitzacions de recerca i sectors d'operació d'autobusos recollit a l'article realitzat per Gwo-Hshiong, Cheng-Wei Lin i Serafim Opricovic [38]. En aquest article es posa en rellevància la importància de la usabilitat de la línia, així com la contaminació atmosfèrica, seguit de l'apartat econòmic com a criteris de més rellevància per la decisió d'una alternativa als autobusos dièsel. La matriu que s'ha establert per als criteris ha estat la que es pot veure a la taula següent:

Criteri	CA	CI	CM	A	CV	CS
Contaminació atmosfèrica (CA)	1	1,25	1,5	4	7	9
Cost d'implementació (CI)	(1/1,25)	1	1,25	2	5	7
Cost de manteniment (CM)	(1/1,5)	(1/1,25)	1	1,6	2,5	5
Autonomia (A)	(1/4)	(1/2)	(1/1,6)	1	2,5	5
Contaminació visual (CV)	(1/7)	(1/5)	(1/2,5)	(1/2,5)	1	2
Contaminació sonora (CS)	(1/9)	(1/7)	(1/5)	(1/5)	(1/2)	1

Taula 11: Matriu comparativa dels criteris d'avaluació (els valors del triangle inferior són l'invers del seu simètric).

A la taula es pot observar que tots els valors de la diagonal són 1, doncs un criteri comparat amb ell mateix és 1 vegada ell mateix. Per altra banda, s'ha establert que el pes de la contaminació atmosfèrica és 1,25 vegades més gran que el cost d'implementació i 1,5 vegades més gran que el cost de manteniment perquè amb l'estudi es vol prioritzar la transició energètica per sobre del cost, tot i que al ser important també, era el criteri que havia de seguir-lo. Per la resta de valors s'ha seguit la mateixa lògica, seguint la importància marcada anteriorment. En aquest sentit, un cop s'han establert els valors de la primera línia, el programa Superdecisions proposa valors per les següents caselles de manera que la inconsistència sigui del 0% o un valor molt proper.

A partir de la matriu de la taula 11 i seguint el procediment explicat a l'apartat 7.1, s'han obtingut els següents pesos per als criteris:

Criteris	Puntuació
Contaminació visual	0.051601
Contaminació atmosfèrica	0.345343
Contaminació sonora	0.031203
Cost d'implementació	0.247432
Cost de manteniment	0.201529
Autonomia	0.122891

Taula 12: Puntuació dels diferents criteris de la comparativa.

Al tenir una inconsistència de 0,856%, que se situa per sota del 10%, es considera que la puntuació dels criteris és factible.

6.3. Avaluació de les alternatives segons criteris

Per tal d'obtenir una alternativa que destaquí per sobre de la resta, es fa l'estudi comparatiu de cadascuna de les alternatives amb les altres per cadascun dels criteris. D'aquesta manera, s'ha establert una taula amb els valors ponderats on s'estableix l'ordre d'importància de les alternatives en funció del criteri que s'està avaluant.

6.3.1. Contaminació visual

Tal i com es pot observar a la taula 13, les alternatives que no requereixen d'una instal·lació física a la línia tenen millor puntuació que la resta. L'ordre ha estat establert en funció de les dimensions de les estacions de recàrrega a peu de carrer. La taula amb les ponderacions es poden trobar a l'annex 10.2.1. Aquestes ponderacions s'han establert considerant el següent criteri: hi ha 4 grups diferents, en funció de l'impacte visual que tenen en la via pública. En el primer grup, es troben les alternatives que no requereixen d'una estació de recàrrega o catenària a la via pública (bateries de grans dimensions, híbrid endollable, CNG, recàrrega d'oportunitat mitjançant inducció i cel·la d'hidrogen). Al segon grup s'hi troba l'alternativa de recàrrega d'oportunitat via pantògraf, que requereix d'una infraestructura de dimensions reduïdes a la via pública. En el tercer grup hi ha l'opció de bateries intercanviables, la infraestructura de la qual és molt voluminosa ja que conté les bateries de recanvi i la mecanització de l'intercanvi de les bateries. Per últim en el quart grup hi trobem el trolleybus, una alternativa que requereix tenir una catenària distribuïda al llarg del recorregut per carregar

la bateria dels autobusos. S'ha considerat que el pitjor dels grups és el quart, el qual té una puntuació d'1. Per altra banda, trobem al grup 3, el qual té una puntuació de 2, el doble que el quart grup. El segon grup té una puntuació de 6, 3 vegades més gran que el segon grup. Per últim, tenim el grup 1, que té una puntuació de 9, el que significa que és 1,5 vegades més gran que el grup anterior.

Pel que fa als valors obtinguts en l'anàlisi de la comparativa de la contaminació visual, es poden veure les dades següents:

Alternativa	Puntuació
Bateries de llarga duració	0,157132
Recàrrega d'oportunitat pantògraf	0,087646
Recàrrega d'oportunitat inductiva	0,167078
Trolleybus	0,017911
Bateries intercanviables	0,050196
Híbrid endollable	0,154548
CNG	0,166935
Cel·la combustible d'hidrogen	0,198554

Taula 13: Pesos de les alternatives segons la contaminació visual.

6.3.2. Contaminació atmosfèrica

L'ordre de les diferents alternatives ha estat establert segons l'emissió de gasos d'efecte hivernacle i nitrats de les diferents alternatives en el seu funcionament. D'aquesta manera, les alternatives més contaminants han estat els autobusos híbrids, essent més contaminant l'alternativa d'autobús propulsat per CNG que l'alternativa d'híbrid endollable en un 20% [39]. Per tant, a l'hora de plantejar les ponderacions, s'ha atorgat el valor de l'alternativa més contaminant (CNG) i s'ha considerat que l'alternativa híbrida era 1,2 vegades millor. La resta d'alternatives, que són de contaminació 0 en fase d'ús, tenen un valor de 9 en comparació amb l'alternativa de CNG i de 7 amb l'alternativa híbrida (aproximadament un 20% menys que

l'altre i sense decimals). La taula utilitzada en les ponderacions es pot veure als annexes 10.2.2.

El resultat de la comparativa pel que fa al criteri de la contaminació atmosfèrica ha estat el següent:

Alternativa	Puntuació
Bateries de llarga duració	0,162602
Recàrrega d'oportunitat pantògraf	0,162602
Recàrrega d'oportunitat inductiva	0,162602
Trolleybus	0,162602
Bateries intercanviables	0,162602
Híbrid endollable	0,016260
CNG	0,00813
Cel·la combustible d'hidrogen	0,162602

Taula 14: Pesos de les alternatives segons la contaminació atmosfèrica.

6.3.3. Contaminació sonora

Pel que fa a la contaminació sonora, les alternatives que tenen un motor elèctric, s'ha considerat que tenen una mateixa quantitat de soroll, mentre que les alternatives amb motors de combustió generen una quantitat de soroll superior a les anteriors. Així doncs, les alternatives de CNG i híbrida tenen una puntuació 5 i 3 vegades superior a la de les alternatives elèctriques. En el cas de l'alternativa híbrida, el valor és inferior perquè al circular una part del temps amb la motorització elèctrica, la quantitat de sorolls que s'emet és igual a la resta d'alternatives elèctriques. Els valors assignats per la comparativa es poden veure a l'annex 10.2.3.

Els resultats de la comparativa relatiu a la contaminació sonora de les diferents alternatives ha estat el següent:

Alternativa	Puntuació
Bateries de llarga duració	0,153063
Recàrrega d'oportunitat pantògraf	0,153063
Recàrrega d'oportunitat inductiva	0,153063
Trolleybus	0,153063
Bateries intercanviables	0,153063
Híbrid endollable	0,050995
CNG	0,030628
Cel·la combustible d'hidrogen	0,153063

Taula 15: Pesos de les alternatives segons la contaminació sonora.

6.3.4. Cost d'implementació

Pel cost d'implementació s'han considerat els costos d'adquisició d'un autobús i la instal·lació respectiva per tal de poder prestar el servei. Amb el programa Superdecisions, es poden entrar les dades com a valors numèrics en comptes d'haver de fer la comparativa si es vol. Al tenir les dades numèriques referents al cost, les ponderacions són encara més exactes que si es fa una comparativa segons criteris, doncs la inconsistència és del 0%.

Tot i que el cost és una variable que no es pot conèixer del cert, ja que les companyies són reticents a compartir els costos dels diferents vehicles públicament, l'estudi s'ha dut a terme adaptant els preus d'autobusos de 12 metres de longitud (i veient les diferències percentuals entre elles) als microbusos, del qual es coneix el cost del model propulsat per dièsel.

En aquest cas, els resultats de les ponderacions han estat els següents:

Alternativa	Puntuació
Bateries de llarga duració	0,084353
Recàrrega d'oportunitat pantògraf	0,09785
Recàrrega d'oportunitat inductiva	0,061156
Trolleybus	0,072481
Bateries intercanviables	0,076089
Híbrid endollable	0,212717
CNG	0,296515
Cel·la combustible d'hidrogen	0,098838

Taula 16: Pesos de les alternatives segons el cost d'implementació.

Tal i com es pot apreciar, les alternatives més econòmiques són les corresponents a les tecnologies de CNG i híbrida, en aquest ordre. Les alternatives que requereixen de pac de bateries incrementen considerablement el seu cost, però les alternatives més cares són aquelles que requereixen d'estacions de càrrega o infraestructura més costosa.

6.3.5. Cost de manteniment

De la mateixa manera que en el cas del cost d'implementació, la comparació del cost de manteniment s'ha realitzat a partir dels valors coneguts de cost/km recorregut de les diferents alternatives. Així doncs, també s'ha obtingut un valor d'inconsistència del 0%.

El cost de manteniment es considera en tres rangs, segons la tecnologia que utilitzen. Les tecnologies híbrides tindran un cost aproximat similar, mentre que les tecnologies amb tecnologia elèctrica seran d'un grup més car i la tecnologia amb cel·la d'hidrogen és la més cara de totes.

Alternativa	Puntuació
Bateries de llarga duració	0,132155
Recàrrega d'oportunitat pantògraf	0,1483
Recàrrega d'oportunitat inductiva	0,1483
Trolleybus	0,175173
Bateries intercanviables	0,175173
Híbrid endollable	0,125484
CNG	0,065415
Cel·la combustible d'hidrogen	0,030001

Taula 17: Pesos de les alternatives segons el cost de manteniment.

6.3.6. Autonomia

L'autonomia ha estat definida a partir de l'inconvenient que suposa les limitacions en quant a autonomia de les diferents tecnologies. Així doncs, s'ha considerat que la bateria de llarga duració és la més mal parada en aquesta comparativa, seguida de la recàrrega d'oportunitat inductiva i l'alternativa de bateries intercanviables i recàrrega d'oportunitat via pantògraf. La resta es considera que tenen la mateixa autonomia, doncs és molt superior a la necessària per operar en la línia.

Per a establir els valors s'han creat 4 grups. El primer, conformat per les alternatives que no necessiten cap consideració en quant a autonomia: trolleybus, autobusos híbrids, de CNG i hidrogen, els quals tenen la puntuació de 6. El segon, conformat pels autobusos amb recàrrega d'oportunitat via pantògraf i de bateries intercanviables, els quals tenen una puntuació de 4. El tercer integra la recàrrega d'oportunitat d'inducció, la qual requereix més parades a la línia per tal d'abastir-se i seguir operant, i té una puntuació de 2. Per últim, les bateries de llarga duració, que necessiten d'un tercer bus i que una de les dues alternatives passi per cotxera per tal de prestar el servei. Aquest últim té una puntuació de 1 per la inconveniència que suposa. La taula on es comparen els valors es pot veure a l'annex 10.2.4.

Les ponderacions obtingudes mitjançant el mètode d'AHP han resultat en els següents valors:

Alternativa	Puntuació
Bateries de llarga duració	0,0498
Recàrrega d'oportunitat pantògraf	0,09344
Recàrrega d'oportunitat inductiva	0,04672
Trolleybus	0,18688
Bateries intercanviables	0,09344
Híbrid endollable	0,18688
CNG	0,18688
Cel·la combustible d'hidrogen	0,15878

Taula 18: Pesos de les alternatives segons l'autonomia.

6.4. Resultats de la comparativa

La comparativa resulta en una matriu de valors com la que es pot veure a l'annex 10.3. Aquests valors que es poden observar a la taula són les ponderacions que tenen els diferents criteris i alternatives.

En quant al resultat que s'ha obtingut de la comparativa es poden veure a la següent taula, on l'alternativa més recomanable obté el valor d'1, i la resta d'alternatives són aconsellables també segons la proximitat del seu valor al de la unitat:

Nom	Recomanable
1Bateria llarga duració	0,922
2Recarrega oportunitat pantògraf	1
3Recarrega oportunitat inducció	0,907
4Trolleybus	0,946
5Bateries intercanviables	0,967
6Híbrid endollable	0,882
7CNG	0,926
8Cella hidrogen	0,906

Taula 19: Resultats de la comparativa d'alternatives.

Els resultats mostren que l'alternativa de recàrrega d'oportunitat via pantògraf és la més recomanable, seguit de les bateries intercanviables i del trolleybus, totes alternatives amb motor elèctric degut a la importància de la contaminació atmosfèrica. L'alternativa amb bateries de llarga duració també és una opció amb una puntuació molt elevada, tot i que es veu perjudicada respecte l'alternativa guanyadora en qüestió d'autonomia i els costos de manteniment i adquisició.

Es pot observar que tot i que les alternatives de CNG i híbrides són molt recomanables en criteris puntuals, surten molt penalitzades de la comparativa de contaminació atmosfèrica, que és la que més pes té. Tot i així, els autobusos de CNG obtenen la quarta posició ja que a nivell logístic i econòmic és una bona alternativa.

L'alternativa d'autobusos amb cel·la d'hidrogen es veu molt perjudicada per la baixa puntuació obtinguda en la comparativa referent al cost de manteniment. El preu de l'hidrogen, juntament amb el recanvi en 4 ocasions de la bateria han contribuït a aquesta mala puntuació.

Un estudi dut a terme per TMB i recollit per ZeEUS [40] sobre la viabilitat del transport públic urbà electrificat, ha arribat a la conclusió que el sistema d'autobusos totalment elèctric alimentat per una càrrega nocturna i recàrrega d'oportunitat entre estacions és la millor alternativa per tal de millorar l'impacte medi ambiental causat pel sistema de transports en les línies amb autobusos articulats de 18 metres de longitud.

7. Proposta definitiva: recàrrega d'oportunitat via pantògraf

Aquesta alternativa, a més de ser una de les més netes, és també molt versàtil. Permet mantenir l'horari actual de la línia sense emetre cap tipus de gas contaminant mentre circula. A més, aquesta tecnologia ha estat provada en algunes línies de la ciutat, com és el cas de la línia H16, i és una alternativa que funciona, permetent abastir una línia de més de 25 km i més de 21.000 passatgers al dia.

7.1. Adaptació a la línia

Tot i així, la línia 130 és diferent a la línia H16. Per un costat, el volum de passatgers diaris és molt inferior, de manera que els trajectes es fan amb una ocupació molt baixa. De fet, l'autobús circula la major part del temps pràcticament buit, i la contaminació per persona en el cas dels autobusos de dièsel d'aquesta línia és molt més alta en comparació amb línies que tenen una ocupació més alta. Per l'altre, la línia 130 té un recorregut de tan sols 7,4km, fet que permet tenir una flexibilitat més elevada per incorporar la recàrrega d'oportunitat, ja que l'autobús no ha de fer un gran recorregut abans de tenir l'opció de tornar a carregar.

Així doncs, es planteja aplicar la tecnologia de la recàrrega d'oportunitat a la línia 130, de manera que, combinada amb la recàrrega nocturna, pugui funcionar durant tota la jornada de servei.

El vehicle que es farà servir serà un autobús de 8,5 metres de longitud, de forma que sigui molt semblant a l'actual, amb una bateria de 44kWh, que li permet fer fins a 100km .

7.1.1. Càrrega nocturna

Durant la nit, a la cotxera, els dos autobusos de la línia estaran connectats a un sistema de càrrega ràpida (50kW de potència) instal·lat per Endesa com dels que es disposa per carregar els autobusos de les línies electrificades, que permetrà carregar els autobusos en un temps inferior a una hora. Aquest període de temps és més que suficient, doncs els autobusos es troben a la cotxera entre les 22 hores i les 6:30 del matí, permetent-los començar la jornada amb el 100% de la capacitat de les seves bateries carregades.

El dispositiu que es farà servir per a completar la càrrega nocturna serà l'actual dispositiu del qual disposa l'empresa TMB a la cotxera, d'aquesta manera es podrà combinar entre els dos autobusos i si se n'adquirissin més de les mateixes característiques, es podria arribar a compartir entre 8 unitats aproximadament.

7.1.2. Recàrrega d'oportunitat

Tot i que l'autonomia és d'uns 100 km, s'ha de contar que l'autonomia real és d'un 84% (punt mig entre 90 i 78 que és el valor prèviament explicat al qual arriben en quant a autonomia els vehicles elèctrics respecte el que s'anuncia). Això vol dir que haurà de realitzar algunes parades per a poder oferir el servei fins que acabi la jornada. La parada es realitza quan queda aproximadament un 30% d'autonomia ideal disponible, és a dir, 25km.



Il·lustració 13: Recàrrega d'oportunitat. Font: Endesa X

Si es calcula el recorregut que s'ha realitzat per fer la diferència entre la distància màxima que pot recórrer i la mínima que necessita quan s'ha de posar a carregar, es pot conèixer quants quilòmetres s'han recorregut entre estacions abans de fer la parada per carregar les bateries:

$$\text{Trajecte transcorregut} = 25\text{km} = (84\text{km} - 6,878\text{km} - x)$$

Si s'extreu la incògnita, es pot veure, que l'autobús ofereix el seu servei durant 52,122km abans d'abastir-lo.

Si es coneix que cada trajecte d'anada i tornada té una longitud de 7,36km, i a partir de la dada anterior, es pot conèixer quants recorreguts s'han completat:

$$N^{\circ} \text{ recorreguts realitzats} = 52,122\text{km} * \frac{1 \text{ recorregut}}{7,36\text{km}} = 7,08 \sim 7$$

Les dades referents a 6,878km i 7,36km/recorregut s'han obtingut dividint la distància entre la parada i la cotxera que recorren diàriament ambdós autobusos entre 4 i de les dades

obtingudes per TMB de la distància dels trajectes (anada i tornada), respectivament.

Així doncs, quan s'han realitzat 7 trajectes complets, correspon a les 12:26h del migdia per al primer torn i les 12:47h del migdia per al segon torn. És en aquest moment quan es durà a terme la recàrrega d'oportunitat de l'autobús. La recàrrega es du a terme a l'inici del trajecte, és a dir, al carrer Major de Can Caralleu per ambdós torns, ja que no coincidirán en el temps.

La recàrrega tindrà un període de 3 minuts a una potència de 500kW, que permetrà recarregar 25kWh d'energia de la bateria abans de tornar a iniciar el recorregut. El temps mínim que hi ha entre l'arribada a l'última parada de la línia i la sortida del següent recorregut és de 9 minuts (es poden consultar les taules de dades a l'annex 11.4), per la qual cosa no hi ha cap interval de temps que sigui prohibitiu per a carregar les bateries.

Amb la càrrega de 25kWh s'aconsegueix passar de 25km d'autonomia a 85km:

$$\text{Autonomia després de la recàrrega} = 25\text{km} + 25 * \frac{100\text{km}}{41,9\text{kWh}} = 84,66\text{km} \sim 85\text{km}$$

Tot i així, la recàrrega ultra ràpida no té una potència constant, això vol dir que a l'inici de la recàrrega es carrega a més velocitat que al final d'aquesta. Per tal de ser més coherents amb aquestes xifres, s'ha considerat aproximar l'autonomia resultant en 80km.

Si es torna a calcular quan es necessitarà carregar l'autobús quan hi hagi 25km d'autonomia, s'observa que al cap de 7 recorreguts s'ha de tornar a recarregar. En aquest cas, serà a les 17:30h per a la primera línia i a les 17:55h pel cas del segon torn. Un cop carregat, el següent subministrament d'energia es realitza a la cotxera (recàrrega de 50kW).

HORARI RECÀRREGA ULTRA RÀPIDA	T-01	T-02
1a	12:26	12:47
2a	17:30	17:55

Taula 20: Horari de recàrrega ultra ràpida dels diferents torns de la línia 130.

El temps de connexió serà inferior al de la parada, ja que l'autobús disposa d'un sistema automàtic de connexió, el qual permetrà al conductor no haver de baixar del vehicle per començar la recàrrega. L'autobús disposarà de l'anomenat "roof mounted pantograph", el qual es desplegarà verticalment per connectar-se al carregador fix de la parada.



Il·lustració 14: Carregador ultra ràpid pantògraf instal·lat per Endesa.

El dispositiu que s'utilitzarà per a realitzar la recàrrega d'oportunitat serà el mateix que està en ús a la línia H16 de TMB, el qual permet carregar la bateria de l'autobús fins a un 80% de la seva capacitat en el període de temps establert per a la recàrrega. El dispositiu en qüestió ha sorgit d'un projecte entre l'empresa TMB i la Endesa X i s'emmarca en el projecte ZeEUS.

7.1.3. Vehicle utilitzat

El vehicle utilitzat per a poder operar a la línia 130 serà un vehicle que tingui una longitud d'uns 8 metres. Tot i que actualment hi ha diverses companyies que treballen amb autobusos elèctrics, les companyies BYD i Solaris són les que estan subministrant els autobusos de dimensions estàndard (12 metres de longitud) i la companyia Irizar subministra els autobusos de 18 metres de longitud que incorporen la característica de poder-se recarregar a velocitat ultra ràpida. Aquesta companyia però, no dissenya microbusos. Així doncs, per tal de poder fer viable aquesta proposta, s'hauria de proposar una transformació elèctrica dels autobusos dièls actuals, que segueixin mantenint el xassís original, però canviant el seu tren motor de combustible fòssil per l'elèctric o arribar a un acord amb alguna de les companyies esmentades per tal de fabricar un autobús de dimensions més reduïdes, que es podria fer servir per la resta de línies de barri que requereixen d'autobusos d'aquestes dimensions.

La segona opció és un acord comercial al qual no es pot entrar en aquest treball, per tant, es planteja l'alternativa d'adquirir els nous microbusos de Mercedes (Sprinter City 75) i adaptar-los a nivell de components del tren motriu perquè utilitzi un motor elèctric propulsat per 1 bateries de 44kWh que permeti la càrrega ultra ràpida. Aquest autobús té una longitud de 8,5 metres i és molt maniobrable a la ciutat en carrers estrets (hi ha més dades sobre aquest model a l'annex 11.4.5).



Il·lustració 15: Autobús Sprinter City 75

L'adquisició d'un model d'autobús nou en comptes d'adaptar els actuals permetria seguir operant amb els autobusos dièsel fins que els nous autobusos estiguin disponibles per a la realització del projecte sense provocar parades temporals en el servei de la línia. El cost d'una nova unitat de l'autobús Sprinter City 75 ronda els 150.000€. Actualment no es disposa de gaire autobusos al mercat que reuneixin les característiques necessàries per als requeriments tècnics del vehicle i s'hauria d'arribar a un acord amb una companyia per poder fabricar aquests autobusos.

Aquesta modificació hauria d'incloure els següents requisits:

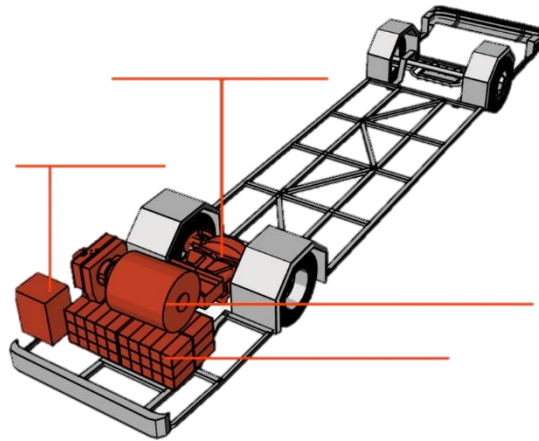
- Una bateria de 44kWh de capacitat i potència de recàrrega de fins a 500kW. De mitjana, el cost del kWh d'una bateria amb capacitat de càrrega ultra ràpida és de 750€ [10], així doncs, el cost de les quatre bateries ascendiria a 33.000€ aproximadament. Aquesta bateria és d'un sol bloc i se situa en els compartiments de l'autobús que actualment estan ocupats per les seccions de motor i transmissió. La dimensió d'aquesta bateria és similar a la que incorpora el model Leaf de Nissan (cotxe).



40 kWh

Il·lustració 16: Bateria de 40kWh del model Leaf de Nissan.

- Un motor elèctric de 308 cavalls de potència màxima (230kW) i 2500Nm de parell màxim situat a l'eix posterior del vehicle, on hi ha la major part de pes del vehicle. El motor elèctric proporcionarà una potència contínua de 115kW i un par continu de 1140Nm. Juntament amb el motor elèctric, s'hi inclourà un sistema de tracció que permeti transmetre l'energia del motor a les rodes.



Il·lustració 17: Render motor elèctric d'autobús.

- Pantògraf amb sistema automàtic de connexió a les estacions de recàrrega ultra ràpida i per la càrrega nocturna a la cotxera. Aquesta unitat ha d'anar acompanyada d'un sistema de càrrega del vehicle que controli l'entrada de corrent elèctric i protegeixi les bateries del vehicle. A més, la tecnologia d'aproximació a la parada, actualment utilitzada en els autobusos articulats de 18 metres de la línia H16 també s'haurien d'incloure.



Il·lustració 18: Pantògraf per a la recàrrega d'oportunitat.

El cost total del vehicle serà d'aproximadament 300.000€. Tot i així, aquest cost és una estimació del cost que pot suposar modificar un autobús d'aquestes característiques i no es pretén que sigui una guia d'adquisició, si no una manera de quantificar el cost del producte. El cost ha estat assumit al veure les diferències econòmiques que es donen entre les diferents tecnologies en vehicles de 12 metres de longitud i comparant-ho amb el cost d'un autobús dièsel com l'utilitzat.

8. Anàlisi econòmic

En aquest apartat del treball es desenvolupa el cost que representa la planificació del projecte a nivell de recursos utilitzats en aquest cas per l'estudiant. Al ser un estudi i no requerir de productes físics per arribar a les conclusions més enllà del propi ordinador, el cost del projecte es pot desglossar en els següents apartats:

8.1. Equipament

Per a realitzar aquest estudi s'ha utilitzat un ordinador, el mateix que s'ha utilitzat per a tota la carrera. El valor de l'ordinador en el moment de la seva compra va ser d'uns 800€, per la qual cosa, si es calcula que l'ordinador té una vida útil d'uns 5 anys, el cost que s'ha d'amortitzar degut a la feina realitzada resulta en:

$$\text{Cost amortització} = \frac{800\text{€}}{5 \text{ anys} * 365 \frac{\text{dies}}{\text{any}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}} = \frac{0,01826\text{€}}{\text{hora}}$$

Per tant, el cost que sorgeix de l'ús del dispositiu és:

$$\text{Cost} = 300h * \frac{0,01826\text{€}}{h} = 5,48\text{€}$$

8.2. Consum energètic i tarifa d'internet

El consum energètic es calcula com el consum del dispositiu durant el període d'ús multiplicat pel cost de la llum actual, que ascendeix a 0,356€/kWh. Aquest preu surt de fer la mitjana dels preus de la llum compresos en l'horari de 15:00 a 00:00, que és les hores en les que habitualment s'ha treballat. Així doncs, el cost relatiu al consum energètic és de:

$$\text{Cost energia} = \frac{0,356\text{€}}{\text{kWh}} * 300h * 0,4\text{kW} = 42,72\text{€}$$

També es calcula que un ordinador consumeix entre 0,18 i 0,2kW, i que una pantalla en consumeix entre 0,2 i 0,22kW. Per la qual cosa, s'ha suposat que el consum energètic total dels dispositius ha estat de 0,4kW.

Pel que fa a la tarifa de la companyia telefònica referent a l'internet utilitzat durant els 4 mesos

que han transcorregut des de l'inici del treball fins al final, és de 160€ (40€ mensuals). D'aquesta tarifa se n'ha de fer un repartiment equitatiu en 4 parts, doncs l'internet no és d'ús exclusiu per a una persona, si no per a les quatre que resideixen al domicili.

El cost total de la tarifa d'internet és de **40€**.

8.3. Mà d'obra

El temps que s'ha dedicat a l'elaboració del projecte ha estat de 385 hores, que s'han desglossat de la següent manera:

Activitat	Temps dedicat (h)	Cost (€)
Investigació prèvia i recerca d'informació	35	385,35
Definició de les alternatives	40	440,4
Comparativa de les diferents alternatives	160	1761,6
Anàlisi de les tecnologies utilitzades als diferents mercats	40	440,4
Anàlisi de resultats i conclusions	60	660,6
Redacció de la memòria	50	550,5
TOTAL	385	4.238,85

Taula 21: Cost mà d'obra

Per fer el càlcul dels costos de personal, s'ha tingut en compte el sou brut que percep un consultor tecnològic junior de mitjana a Espanya, que segons la pàgina Talent, és de 25.667€ [41]. Al salari brut, se li ha de descomptar la quantitat que es paga a la seguretat social i els impostos per IRPF, que són 1.630€ i 3.926€ respectivament. Per tant, el sou net anual per un treballador d'aquestes característiques és de 20.111€, que si es divideix entre les 1826 hores que es treballen anualment, resulta en un sou de 11,01€/h. Per tant, com que s'han dedicat

385 hores a realitzar el treball, el cost de la mà d'obra ascendeix a 4.238,85€.

8.4. Cost total del treball

En aquest apartat s'ha realitzat un petit resum del cost total del treball realitzat:

	Cost
Equipament	5,48€
Hores de mà d'obra	4.238,85€
Consum energètic	42,72€
Tarifa d'internet	40€
Cost total	4.327,05€

Taula 22: Resum dels costos associats a la mà d'obra

9. Impacte ambiental

Aquest estudi es centra en buscar una alternativa a les tecnologies actuals de transport urbà factible per a la línia 130 que permeti disminuir l'emissió de gasos contaminants i d'efecte hivernacle a l'atmosfera.

És per aquest motiu que totes les alternatives descrites suposen una millora respecte a la tecnologia utilitzada actualment a la línia en matèria d'emissió de gasos contaminants. Algunes d'elles, com l'autobús híbrid de GLP no suposen una millora tan quantiosa com altres alternatives totalment elèctriques als motors de combustió interna propulsats per dièsel.

L'alternativa final consta d'un autobús totalment elèctric, el qual carrega les seves bateries mitjançant dues alternatives tecnològiques diferents. Aquestes tecnologies de recàrrega no emeten cap tipus de contaminació per se, però si estan alimentades mitjançant electricitat obtinguda per vies renovables, l'impacte medi ambiental positiu que creen és molt major.

En general, els vehicles elèctrics aporten més avantatges que els seus homòlegs de combustió interna. Però al fer la comparativa, es destaquen sobretot les emissions a nivell de gasos en la circulació del vehicle. Un dels principals beneficis que es pot trobar a l'utilitzar el vehicle elèctric en comptes del de combustió és la descarbonització dels nuclis urbans de grans ciutats on el trànsit de vehicles diaris és molt gran.

Tot i així, també tenen alguns desavantatges, com són una major contaminació a l'hora de fabricar els components per als vehicles, sobretot en el cas de les bateries, i l'impacte mediambiental a la fase d'ús, la qual és molt volàtil degut a la obtenció de l'electricitat a través de recursos no renovables i el consum elèctric pot variar significativament.

Coneixent els quilòmetres diaris que recorren els autobusos de la línia 130 (310,286km) i multiplicant aquest valor pels 365 dies en que està operatiu el servei, en total es recorren 113.254,4 km l'any.

Si es té en compte que cada 100 km es consumeixen 21,2L de combustible dièsel [29] i que aquest combustible emet uns 2,64kg de CO₂ per cada litre consumit [42], es pot obtenir l'emissió anual de CO₂ que s'emet actualment:

$$Emissió\ anual = \frac{113.254,4\text{km}}{\text{any}} * \frac{21,2\text{L}}{100\text{km}} * \frac{2,64\text{kg}\ CO_2}{\text{L}} = 63.386,2\ \text{kg}\ CO_2$$

Per altra banda, l'energia elèctrica produïda a Espanya no prové íntegrament de fonts renovables, per tant també s'ha de tenir en compte que s'emeten emissions per a generar aquesta energia. Per a expressar el valor de les emissions associades a la generació de l'electricitat consumida a Espanya, s'utilitza el mix elèctric. El valor del mix elèctric de la xarxa

elèctrica peninsular era de 0,25kg de CO₂/kWh a l'abril de 2021 [43]. Si es realitza el mateix càlcul per a conèixer les emissions anuals de l'alternativa elèctrica de la línia:

$$Emissió\ anual\ de\ CO_2 = \frac{113.254,4km}{any} * \frac{41,9kWh}{100km} * \frac{0,25kg\ CO_2}{kWh} = 11.863,4\ kg\ CO_2$$

Tal i com es pot observar, les emissions de la línia quan s'utilitza el dièsel com a combustible són un 534% més grans.

Tot i així, hi ha variables com les emissions derivades de l'extracció dels materials necessaris per fer les bateries que són molt elevades, molt més que en el cas de la construcció dels autobusos dièsel, que es poden considerar iguals a l'hora de fabricar l'autobús actual i la proposta de nou autobús. Es calcula que la petjada de carboni és d'entre 150 i 200 kg de CO₂ per kWh d'una bateria [44]. Si es multipliquen els kg de CO₂ que s'emeten de mitjana pels kWh de les bateries que formen part de l'autobús (44kWh), s'obté una xifra d'entre 6.600 i 8.800 kg de CO₂.

Si se suposa que les emissions derivades de la fabricació de la bateria del vehicle han estat de 8.800 kg de CO₂, vol dir que es necessitaran una mica més de mig any per igualar les emissions totals d'ambdues alternatives:

$$Temps = 1 + \frac{0 - Dif.\ Any\ 1}{Dif.\ Any\ 1 - Dif.\ Any\ 0} = 1 + \frac{0 - (-8800)}{42.722,8 - (-8800)} = 0,1708\ anys$$

Per tal d'obtenir aquest valor, s'ha observat entre quins anys hi ha hagut el canvi de signe en la diferència d'emissions i s'ha ponderat el valor per tal d'obtenir el resultat, de la mateixa manera que es faria per veure l'amortització d'un projecte.

A la taula de l'annex 10.6 es pot observar la diferència d'emissions acumulades en els següents 10 anys, que serà de 506,4 tones de CO₂, essent l'alternativa d'autobús dièsel pitjor que l'alternativa elèctrica.

Conclusions

El present treball presenta una alternativa al model actual de la línia 130 d'autobús de Barcelona menys contaminant tot mantenint l'horari de servei establert per la companyia de transports TMB.

La primera conclusió del treball és que hi ha una alternativa viable menys contaminant que la proposta actual a la línia d'autobús 130. Aquesta alternativa té unes emissions a la ciutat de 0kg de CO₂ en la fase d'ús, la qual cosa permet evitar l'emissió de gasos contaminants al nucli urbà, contribuint a la millora de l'aire que s'hi respira. tot i que a nivell global no són nul·les. Les emissions provenen de la producció de l'electricitat, doncs a Espanya l'energia elèctrica no es genera a partir de fonts 100% renovables i la petjada de carboni no és zero tot i disminuir significativament l'actual contaminació i de la fabricació de les bateries per al vehicle, que és un factor a considerar degut a que la quantitat d'emissions en la fabricació representa un 57% de les emissions anuals de la línia quan aquesta és elèctrica. A nivell de contaminació la proposta d'electrificació de la línia és significativament millor que l'actual tecnologia utilitzada i es dedueix que és una implantació necessària per poder-se apropar a l'objectiu de París de reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle.

La viabilitat de la implantació passa per la renovació de la línia amb autobusos elèctrics de bateries, els quals tenen una autonomia aproximada de 85km. Per poder donar servei diàriament, els autobusos fan ús de la recàrrega d'oportunitat, la qual es realitza a l'inici de la línia (carrer Major de Can Caralleu) a través d'una estació de recàrrega ultra ràpida de 500kW de potència, que permet carregar les bateries del vehicle entre el 30% i el 80% de la seva capacitat en un període de temps de 8 minuts. En el temps en el qual no s'utilitzen els autobusos (període nocturn), aquests es carreguen a la cotxera mitjançant una càrrega ràpida de 50kW, aprofitant les instal·lacions de les quals es disposen per tal de reduir els costos d'implantació. Amb aquesta disposició d'horaris s'aconsegueix poder mantenir el servei habitual sense desviacions, tot mantenint el número de torns i el nombre de vehicles per torn (1 vehicle per cadascun dels 2 torns).

De les alternatives possibles, la recàrrega d'oportunitat via pantògraf era la millor seguint els criteris establerts, donant especial rellevància a la viabilitat horària i la reducció de la contaminació, tot seguit del cost d'implantació, tot i que aquest últim és una aproximació ja que no es pot conèixer el valor exacte. Pel que fa a costos de les alternatives, s'ha pogut veure que hi ha un gran estalvi a l'hora de fabricar un autobús amb menor autonomia, de la mateixa manera que se'n redueixen les emissions. Per altra banda, s'han de construir estacions de recàrrega per poder donar servei a la línia com fins ara.

El fet que la potència de càrrega sigui menor per a les alternatives d'inducció suposa un

problema en quant a autonomia, ja que amb el mateix temps de càrrega que l'alternativa de pantògraf, aquesta permet carregar més energia a les bateries. Això però no és un problema per a oferir un servei com l'actual a nivell d'horaris, simplement es necessiten fer més parades per tal de tenir suficient autonomia. Pel que fa al cost, aquest sí que és un element diferencial entre les dues alternatives, tot i que si es proposés fer estacions de càrrega en estacions comunes entre línies, es podria abaratir el cost de les estacions, que requereixen d'una construcció més costosa per implementar-se. Igualment aquesta tecnologia està fent grans canvis i les previsions futures són positives.

En el desenvolupament del treball, s'ha pogut veure que hi ha opcions tecnològiques molt avançades que poden fer front a problemes amb els quals es troben els vehicles elèctrics en quant a l'autonomia, com és el cas de la càrrega inductiva dinàmica o l'intercanvi de bateries. La primera podria suposar un gran avenç en la transició energètica dels vehicles elèctrics als nuclis urbans, però és una tecnologia molt poc evolucionada i requereix de molta investigació abans de poder-se utilitzar. La segona és una alternativa provada que permet allargar la vida útil de les bateries, ja que no utilitza càrrega ràpida. Tot i així, per poder incorporar aquesta alternativa, seria necessari implantar un sistema universal d'intercanvi de bateries per autobusos, el qual no existeix actualment degut a les diferències en les bateries utilitzades en els diferents vehicles.

També s'ha pogut observar que és viable obtenir una alternativa que permeti transportar un nombre de passatgers igual a l'actual, de manera que es pugui seguir prestant el servei com fins aquest moment. Aquest punt és especialment rellevant, perquè en cas contrari, s'hauria d'haver fet un estudi paral·lel de la necessitat de places en cada franja horària on es plantegés la incorporació d'un tercer torn d'autobús a la línia.

Finalment, s'ha arribat a la conclusió que l'electrificació de les línies d'autobús de barri és molt rellevant per poder fer un gran salt en la transició energètica dels vehicles en l'àmbit urbà. Tot i que a nivell de desplaçament de passatgers no representa un percentatge molt elevat en comparació amb altres línies com l'H16, el nombre d'autobusos utilitzats és molt elevat, per tant la reducció d'emissions de gasos d'efecte contaminant es veuria reduïda significativament.

Agraïments

M'agradaria aprofitar aquest apartat per donar el meu més profund agraïment a totes aquelles persones que amb la seva col·laboració han fet possible aquest treball.

En primer lloc al Dr. Xavier Carod, tutor de la memòria, que m'ha ajudat a profunditzar en la gestió de projectes i a tenir una visió més estructurada.

A Daniel Pradas, director de la línia H4 de TMB, per la seva predisposició a donar un cop de mà amb els dubtes que tingués sobre el funcionament de la línia i altres dades.

A la meva família, sense l'ajut de la qual no hagués pogut enfocar-me única i exclusivament en el treball, per ser un suport incondicional i inspirar-me a treballar en els moments de defalliment, no només amb el treball si no en el transcurs de la carrera.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] I. Carrilero, M. González, D. Anseán, J. C. Viera, J. Chacón, and P. G. Pereirinha, “Redesigning European Public Transport: Impact of New Battery Technologies in the Design of Electric Bus Fleets,” in *Transportation Research Procedia*, 2018, vol. 33, pp. 195–202, doi: 10.1016/j.trpro.2018.10.092.
- [2] “Contaminación atmosférica — Agencia Europea de Medio Ambiente.” <https://www.eea.europa.eu/es/themes/air/intro> (accessed Jan. 23, 2022).
- [3] “Vision – ZeEUS – Zero Emission Urban Bus System.” <https://zeeus.eu/about-zeeus/vision> (accessed Jan. 11, 2022).
- [4] “Acuerdo de París.” https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_es (accessed Oct. 21, 2021).
- [5] “Draft CMA decision proposed by the President,” Accessed: Jan. 23, 2022. [Online]. Available: <https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/>.
- [6] À. M. de B. AMB, “La ZBE - Àrea Metropolitana de Barcelona.” <https://www.zbe.barcelona/es/zones-baixes-emissions/la-zbe.html> (accessed Jan. 14, 2022).
- [7] T. M. de B. TMB, “Barcelona rep el primer bus d’hidrogen que es proveirà properament a la planta d’Iberdrola | TMB Notícies.” <https://noticies.tmb.cat/sala-de-premsa/barcelona-rep-primer-bus-dhidrogen-que-es-proveira-properament-planta-diberdrola> (accessed Jan. 14, 2022).
- [8] “TMB reducirá 27.900 toneladas de CO2 en cuatro años | Calidad del Aire | Ajuntament de Barcelona.” https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/es/noticia/tmb-reducira-27-900-toneladas-de-co2-en-cuatro-anos_652214 (accessed Jan. 11, 2022).
- [9] “Proyectos de innovación de TMB | Transports Metropolitans de Barcelona.” <https://www.tmb.cat/es/sobre-tmb/innovacion-y-proyectos/innovacion> (accessed Jan. 10, 2022).
- [10] A. Lajunen and T. Lipman, “Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses,” *Energy*, vol. 106, pp. 329–342, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2016.03.075.
- [11] C. L. Carwow, “Electric cars put to the ultimate range test | carwow,” Dec. 23, 2021. <https://www.carwow.co.uk/blog/ultimate-electric-car-range-test#gref> (accessed Jan. 12, 2022).
- [12] K. H. A. Karsan, “Specs - Jest Electric | Karsan.” <https://www.karsan.com/es/jest-electric-especificaciones> (accessed Jan. 15, 2022).

- [13] S. Fernández, “TMB y Endesa electrificarán una línea de autobús de Barcelona que incluirá recarga ultrarrápida | forococheselectricos,” Dec. 01, 2016. <https://forococheselectricos.com/2016/12/tmb-y-endesa-electrificaran-una-linea-de-autobus-de-barcelona-que-incluire-recarga-ultrarrapida.html> (accessed Jan. 16, 2022).
- [14] S. L. Selectra Madrid Energia, “Precio kWh España 2022: Evolución, Tarifas y Comparativa.” <https://tarifaluzhora.es/info/precio-kwh> (accessed Jan. 19, 2022).
- [15] S. A. E. M. de T. de M. EMT Madrid, “EMT Madrid. Empresa Municipal de Transportes de Madrid, S. A. - EMT invierte 177 millones en la compra de 520 autobuses de gas y 50 eléctricos.” <https://www.emtmadrid.es/Noticias/EMT-invierte-177-millones-en-la-compra-de-520-auto.aspx> (accessed Jan. 16, 2022).
- [16] M. D. C. Momentum Dynamics, “Wireless in Action - Momentum Dynamics.” <https://momentumdynamics.com/solution/> (accessed Jan. 15, 2022).
- [17] G. E. P. Europa Press, “La línea 76 será desde finales de enero la primera de la EMT 100% eléctrica con carga por inducción,” Madrid, Dec. 29, 2017.
- [18] Otero, “Viena incorpora 12 autobuses eléctricos.” <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/viena-incorpora-12-autobuses-electricos> (accessed Jan. 16, 2022).
- [19] G. Scitutto2, “Competitiveness of trolleybus in urban transport,” 2001. [Online]. Available: www.witpress.com,.
- [20] T. H. NIO, “The Current State of EV Battery Swapping | NIO.” <https://www.nio.com/blog/current-state-ev-battery-swapping> (accessed Jan. 15, 2022).
- [21] A. Ample, “How it works | Ample.” <https://ample.com/how-it-works/> (accessed Jan. 15, 2022).
- [22] S. M. Sun Mobility, “Sun Mobility.” <https://www.sunmobility.co.in/technology.html> (accessed Jan. 15, 2022).
- [23] F. Shyang-Chyuan, B.-R. Ke, and C.-Y. Chung, “Minimization of Construction Costs for an All Battery-Swapping Electric-Bus Transportation System: Comparison with an All Plug-In System,” 2017. [Online]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj4x5Luyrb1AhVQTB0KHd2sC9QQFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1996-1073%2F10%2F7%2F890%2Fpdf-vor&usq=AOvVaw0znHGUMeZG4cY9ifTWaehg>.
- [24] S. L. Alldatanow, “Precios de los derivados del petróleo: España 2022 | datosmacro.com.” <https://datosmacro.expansion.com/energia/precios-gasolina-diesel-calefaccion/espana> (accessed Jan. 20, 2022).
- [25] S. A. Transports Metropolitans de Barcelona, “Proyectos de innovación de TMB | Transports Metropolitans de Barcelona.” <https://www.tmb.cat/es/sobre-tmb/innovacion-y-proyectos/innovacion> (accessed Jan. 20, 2022).
- [26] L. A. Graham, G. Rideout, D. Rosenblatt, and J. Hendren, “Greenhouse gas emissions

from heavy-duty vehicles,” *Atmos. Environ.*, vol. 42, no. 19, pp. 4665–4681, Jun. 2008, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2008.01.049.














- [27] Gasolineras GNC, “Gasolinera GNC Naturgy Barcelona.” <https://www.gasolinerasgnc.com/barcelona/naturgy/13281/> (accessed Jan. 20, 2022).
- [28] S. A. Naturgy Energy Group, “El gas natural en el transporte: Ventajas económicas.” https://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2017/10/2_Benito-Páramo.pdf (accessed Jan. 20, 2022).
- [29] Grupo Editorial Editec, “Prueba: Sprinter City 75.” <https://www.revistaviajeros.com/noticia/12827/prueba-sprinter-city-75> (accessed Jan. 20, 2022).
- [30] S. A. Iberdrola, “Firmado el contrato TMB-Iberdrola para la primera planta de hidrógeno de uso público de España - Iberdrola.” <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/firmado-contrato-tmb-iberdrola-para-primera-planta-hidrogeno-publico-espana> (accessed Jan. 16, 2022).
- [31] S. A. Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles, “Hydrogen.” <https://www.solarisbus.com/es/vehiculos/zero-emissions/hydrogen> (accessed Jan. 20, 2022).
- [32] I. - International Energy Agency, “Global Hydrogen Review 2021,” Accessed: Jan. 20, 2022. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/.
- [33] L. Eudy, M. Post, and M. Jeffers, “Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2016,” 2016, Accessed: Jan. 09, 2022. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [34] Q. T. Qualcomm, “From wireless to dynamic electric vehicle charging: The evolution of Qualcomm Halo [video] | Qualcomm.” <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/18/wireless-dynamic-ev-charging-evolution-qualcomm-halo> (accessed Jan. 15, 2022).
- [35] J. S. Gill, P. Bhavsar, M. Chowdhury, J. Johnson, J. Taiber, and R. Fries, “Infrastructure Cost Issues Related to Inductively Coupled Power Transfer for Electric Vehicles,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 32, pp. 545–552, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROCS.2014.05.459.
- [36] T. L. Saaty, “How to make a decision: The analytic hierarchy process,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 9–26, Sep. 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- [37] S. SuperDecisions, “Super Decisions | Homepage.” <https://www.superdecisions.com/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [38] G. H. Tzeng, C. W. Lin, and S. Opricovic, “Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation,” *Energy Policy*, vol. 33, no. 11, pp. 1373–1383, Jul. 2005, doi: 10.1016/J.ENPOL.2003.12.014.
- [39] S. Chan, L. F. Miranda-Moreno, A. Alam, and M. Hatzopoulou, “Assessing the impact of bus technology on greenhouse gas emissions along a major corridor: A lifecycle analysis,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 20, pp. 7–11, May 2013, doi:

10.1016/J.TRD.2013.01.004.

- [40] ZeEUS and G. T. TMB, “Barcelona (ES) DESCRIPTION,” Accessed: Jan. 14, 2022. [Online]. Available: www.zeeus.eu.
- [41] Talent, “Salario para Consultor en España - Salario Medio.” <https://es.talent.com/salary?job=consultor> (accessed Jan. 23, 2022).
- [42] “IDAE -.” <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones> (accessed Jan. 22, 2022).
- [43] “Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico. Cambio climático.” https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/ (accessed Jan. 09, 2022).
- [44] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, and A. H. Strømman, “Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 17, no. 1, pp. 53–64, Feb. 2013, doi: 10.1111/J.1530-9290.2012.00532.X.

10. Annex

10.1. Parades línia 130 i autobús actual

Parada	
	Torrent de Can Caralleu - Major de Can Caralleu
	Major de Can Caralleu - Ronda de Dalt
	Ronda de Dalt - Ràfols
	Pl Borràs
	Via Augusta - Tres Reis
	Via Augusta - Margenat
	Clos de St Francesc- Pg Reina Elisenda de Montcada
	Pedró de la Creu - Gresolet
	Av J.V.Foix - Pedró de la Creu
	Sta Amèlia - Eduard Conde
	Sta Amèlia - Or
	Benet Mateu - Manuel de Falla
	Pl Artós

Il·lustració 19: Parades de la línia 130

10.2. Taules comparatives AHP

10.2.1. Contaminació visual

Contaminació visual	Bateria llarga duració	Oportunitat pantògraf	Oportunitat inducció	Trolleybus	Bateries intercanviables	Híbrid endollable	CNG	Cel·la d'hidrogen
Bateria de llarga duració	1	1,5	1	9	4,5	1	1	1
Oportunitat pantògraf		1	1,5	6	1,5	1,5	1,5	1,5
Oportunitat inducció			1	9	4,5	1	1	1
Trolleybus				1	2	9	9	9
Bateries intercanviables					1	4,5	4,5	4,5
Híbrid endollable						1	1	1
CNG							1	1
Cel·la d'hidrogen								1

Taula 23: Comparació de les alternatives segons la contaminació visual.

10.2.2. Contaminació atmosfèrica

Contaminació atmosfèrica	Bateria llarga duració	Oportunitat pantògraf	Oportunitat inducció	Trolleybus	Bateries intercanviables	Híbrid endollable	CNG	Cel·la d'hidrogen
Bateria de llarga duració	1	1	1	1	1	8	9	1
Oportunitat pantògraf		1	1	1	1	8	9	1
Oportunitat inducció			1	1	1	8	9	1
Trolleybus				1	1	8	9	1
Bateries intercanviables					1	8	9	1
Híbrid endollable						1	1,2	1
CNG							1	1
Cel·la d'hidrogen								1

Taula 24: Comparació de les alternatives segons la contaminació atmosfèrica.

10.2.3. Contaminació sonora

Contaminació sonora	Bateria llarga duració	Oportunitat pantògraf	Oportunitat inducció	Trolleybus	Bateries intercanviables	Híbrid endollable	CNG	Cel·la d'hidrogen
Bateria de llarga duració	1	1	1	1	1	3	5	1
Oportunitat pantògraf		1	1	1	1	3	5	1
Oportunitat inducció			1	1	1	3	5	1
Trolleybus				1	1	3	5	1
Bateries intercanviables					1	3	5	1
Híbrid endollable						1	1,6	3
CNG							1	5
Cel·la d'hidrogen								1

Taula 25: Comparació de les alternatives segons la contaminació sonora.

10.2.4. Autonomia

Autonomia	Bateria llarga duració	Oportunitat pantògraf	Oportunitat inducció	Trolleybus	Bateries intercanviables	Híbrid endollable	CNG	Cel·la d'hidrogen
Bateria de llarga duració	1	1/3	2/3	6	1/3	1/6	1/6	1/6
Oportunitat pantògraf		1	2	1/2	1	1/2	1/2	1/2
Oportunitat inducció			1	1/4	1/2	1/4	1/4	1/4
Trolleybus				1	2	1	1	1
Bateries intercanviables					1	1/2	1/2	1/2
Híbrid endollable						1	1	1
CNG							1	1
Cel·la d'hidrogen								1

Taula 26: Comparació de les alternatives segons l'autonomia.

10.3. Matriu comparativa

	1Object	1Contaminació visual	2Contaminació aèria	3Contaminació sonora	4Cost d'implementació
1Object	0	0	0	0	0
1Contaminació visual	0,0516	0	0	0	0
2Contaminació aèria	0,3453	0	0	0	0
3Contaminació sonora	0,0312	0	0	0	0
4Cost d'implementació	0,2474	0	0	0	0
5Cost de manteniment	0,2015	0	0	0	0
6Autonomia	0,1229	0	0	0	0
1Bateria de llarga duració	0	0,157132	0,162602	0,153063	0,084353
2Recàrrega d'oportunitat via pantògraf	0	0,087646	0,162602	0,153063	0,09785
3Recàrrega d'oportunitat per inducció	0	0,167078	0,162602	0,153063	0,061156
4Trolleybus	0	0,017911	0,162602	0,153063	0,072481
5Bateries intercanviables	0	0,050196	0,162602	0,153063	0,076089
6Híbrid endollable	0	0,154548	0,016260	0,050995	0,212717
7Híbrid GLP	0	0,166935	0,00813	0,030628	0,296515
8Cella d'hidrogen	0	0,198554	0,162602	0,153063	0,098838

...

...

	5Cost de manteniment	6Autonomia
1Object	0	0
1Contaminació visual	0	0
2Contaminació aèria	0	0
3Contaminació sonora	0	0
4Cost d'implementació	0	0
5Cost de manteniment	0	0
6Autonomia	0	0
7Viabilitat horària	0	0
8Maduresa tecnològica	0	0
1Bateria de llarga duració	0,132155	0,0498
2Recàrrega d'oportunitat via pantògraf	0,1483	0,09344
3Recàrrega d'oportunitat per inducció	0,1483	0,04672
4Trolleybus	0,175173	0,18688
5Bateries intercanviables	0,175173	0,09344
6Híbrid endollable	0,125484	0,18688
7Híbrid GLP	0,065415	0,18688
8Cella d'hidrogen	0,030001	0,15878

Taula 27: Ponderació de les comparatives

10.4. Temps de càrrega disponible

T-01									
Major Can Caralleu	Pl. d'Artós	Major Can Caralleu-> Pl. d'Artós			Pl. d'Artós -> Major Can Caralleu				
T-01	T-01	velocitats tornada	Dif	t recorregut (mins)	velocitats anada	Dif	t recorregut (mins)	T recàrrega	
7:00	7:13	15,56	0:13	13,02	12,56	0:32	19,03	12,97	
7:45	7:58	15,56	0:13	13,02	12,56	0:34	19,03	14,97	
8:32	8:54	9,2	0:22	22,02	10,85	0:28	22,03	5,97	
9:22	9:42	10,14	0:20	19,98	11,96	0:30	19,98	10,02	
10:12	10:27	13,51	0:15	15,00	12,56	0:32	19,03	12,97	
10:59	11:13	14,49	0:14	13,98	12,56	0:31	19,03	11,97	
11:44	11:58	14,49	0:14	13,98	12,56	0:28	19,03	8,97	
12:26	12:39	15,56	0:13	13,02	12,56	0:29	19,03	9,97	
13:08	13:21	15,56	0:13	13,02	12,56	0:29	19,03	9,97	
13:50	14:03	16,23	0:13	12,48	12,56	0:28	19,03	8,97	
14:31	14:43	16,89	0:12	12,00	12,56	0:28	19,03	8,97	
15:11	15:24	15,56	0:13	13,02	11,96	0:29	19,98	9,02	
15:53	16:07	13,745	0:14	14,74	11,67	0:33	20,48	12,52	
16:40	16:57	11,93	0:17	16,98	11,38	0:33	21,00	12,00	
17:30	17:47	11,93	0:17	16,98	10,85	0:33	22,03	10,97	
18:20	18:35	13,51	0:15	15,00	12,56	0:33	19,03	13,97	
19:08	19:22	14,49	0:14	13,98	13,28	0:31	18,00	13,00	
19:53	20:07	15,56	0:14	13,02	14,1	0:30	16,95	13,05	
20:37	20:50	16,89	0:13	12,00	14,92		16,02		

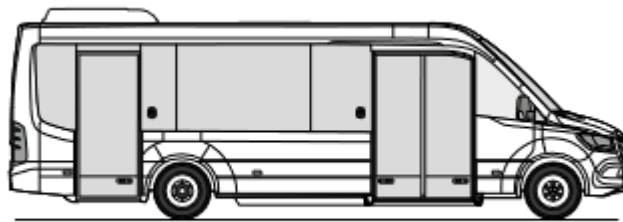
Taula 28: Dades del torn 1 de la línia 130. A la columna blava es pot veure el temps de recàrrega disponible.

T-02									
Can Caralleu	Pl. d'Artós	Major Can Caralleu-> Pl. d'Artós			Pl. d'Artós -> Major Can Caralleu				
T-02	T-02	velocitats tornada	dif t	t recorregut (mins)	velocitats anada	dif	t recorregut (mins)	T recàrrega	
7:25	7:38	15,56	0:13	13,02	12,56	0:29	19,03	12,97	
8:07	8:29	9,2	0:22	22,02	10,85	0:28	22,03	11,97	
8:57	9:18	9,2	0:21	22,02	11,96	0:29	19,98	8,02	
9:47	10:06	10,14	0:19	19,98	11,96	0:30	19,98	10,02	
10:36	10:51	13,51	0:15	15,00	12,56	0:31	19,03	12,97	
11:22	11:36	14,49	0:14	13,98	12,56	0:29	19,03	11,97	

12:05	12:18	15,56	0:13	13,02	12,56	0:29	19,03	8,97
12:47	13:00	15,56	0:13	13,02	12,56	0:29	19,03	9,97
13:29	13:42	15,56	0:13	13,02	12,56	0:29	19,03	9,97
14:11	14:23	16,89	0:12	12,00	12,56	0:28	19,03	8,97
14:51	15:04	16,89	0:13	12,00	12,56	0:27	19,03	8,97
15:31	15:44	15,56	0:13	13,02	11,96	0:32	19,98	9,02
16:16	16:33	11,93	0:17	16,98	11,67	0:32	20,48	12,52
17:05	17:22	11,93	0:17	16,98	11,38	0:33	21,00	12,00
17:55	18:10	12,72	0:15	15,93	10,85	0:34	22,03	10,97
18:44	18:59	13,51	0:15	15,00	12,56	0:32	19,03	13,97
19:31	19:45	14,49	0:14	13,98	13,28	0:30	18,00	13,00
20:15	20:28	16,89	0:13	12,00	14,1	0:32	16,95	13,05
21:00	21:12	16,89	0:12	12,00	14,92		16,02	

Taula 29: Dades del torn 2 de la línia 130. A la columna blava es pot veure el temps de recàrrega disponible.

10.5. Especificacions tècniques autobús Mercedes Sprinter City 75



Sprinter City 75 D.613.738 8,5 m

Il·lustració 20: Fotografia lateral Sprinter City 75

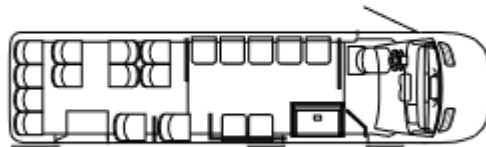


Il·lustració 21: Visió frontal Sprinter City 75

	Sprinter City 75
Longitud	8.486 mm
Anchura (delante/detrás)	2.020/2.080 mm
Altura (con ventilador de techo)	2.860 mm
Altura (con climatizador)	2.920 mm
Batalla	5.100 mm
Ancho de vía de eje delantero	1.685 mm
Ancho de vía de eje trasero (eje propulsor)	1.536 mm
Neumáticos de eje trasero (ruedas simples/gemelas)	gemelas
Neumáticos	WA: 205/75 R16 C HA: 215/75 R 17,5
Suspensión delantera/trasera	Plástico reforzado por fibra de vidrio/aire
Altura interior en el pasillo central	1.910 mm
Altura interior en la zona de piso bajo	2.325 mm
Capacidad de pasajeros máx.	38
Plazas de asiento (serie)	12
Capacidad de sillas de ruedas máx.	1
Divisores de asientos (serie)	690 mm
Maletero/espacio portaequipajes	-
Depósito de gasóleo	ca. 71 l.
Depósito de AdBlue	ca. 22 l.
Peso máximo autorizado (serie)	6.800 kg
Cargas autorizadas por ejes	
- Eje delantero (serie)	2.100 kg
- Eje trasero (eje propulsor)	4.800 kg

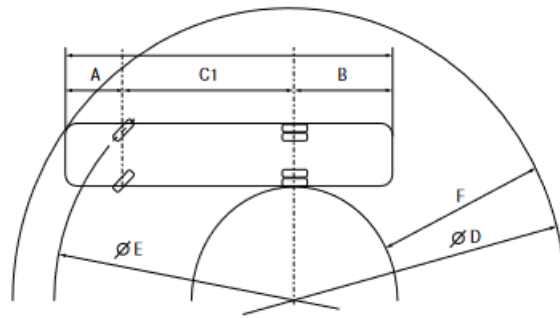
Il·lustració 22: Mesures i pesos Sprinter City 75

Sprinter City 75 D.613.738



De serie: N^o de asientos 12+1

Il·lustració 23: Disposició places Sprinter City 75



Sprinter City 75	
A: Volador delantero	1.021 mm
B: Volador trasero	2.370 mm
D: Círculo de viraje mínimo	17.700 mm
E: Radio de giro mín.	16.551 mm
F: Anchura de anillo de círculo de viraje mín.	4.234 mm
D: Círculo de viraje según norma BOKraft	25.000 mm
F: Anchura de anillo según norma BOKraft	4.234 mm
F: Anchura de anillo máx. autorizada según norma BOKraft	7.200 mm
Ángulo máx. de giro de las ruedas del eje delantero, interior y exterior de curva	46° /37°

II-Il·lustració 24: Circumferència de viratge Sprinter City 75

10.6. Taula d'emissions al llarg de 10 anys: autobús dièsel vs elèctric

	Emissions inicials (kg CO2)	Any 1	Any 2	Any 3	Any 4	Any 5
<i>Dièsel</i>	0	63386,2	63386,2	63386,2	63386,2	63386,2
<i>Elèctric</i>	8.800	11863,4	11863,4	11863,4	11863,4	11863,4
<i>Acumulat dièsel</i>	0	63386,2	126772,4	190158,6	253544,8	380317,2
<i>Acumulat elèctric</i>	8800	20663,4	32526,8	44390,2	56253,6	68117
<i>Diferència</i>	-8800	42722,8	94245,6	145768,4	197291,2	248814

	Any 6	Any 7	Any 8	Any 9	Any 10
<i>Dièsel</i>	63386,2	63386,2	63386,2	63386,2	63386,2
<i>Elèctric</i>	11863,4	11863,4	11863,4	11863,4	11863,4
<i>Acumulat dièsel</i>	380317,2	443703,4	507089,6	570475,8	633862
<i>Acumulat elèctric</i>	79980,4	91843,8	103707,2	115570,6	127434
<i>Diferència</i>	300336,8	351859,6	403382,4	454905,2	506428

Taula 30: Anàlisi d'emissions de CO2 en kg en un transcurs de 10 anys.