

## Annex 1. Anàlisi de sensibilitat del model de càlcul

## Índex

1. Introducció .....	3
2. Variables d'entrada, càlculs intermedis i resultats del model .....	4
2.1. Variables d'entrada .....	4
2.2. Càlculs intermedis .....	5
2.3. Resultats .....	5
3. Anàlisi de sensibilitat.....	7
3.1. Característiques del servei .....	7
3.2. Característiques tècniques .....	16
3.3. Variables pel càlcul de costos de l'operador .....	23
3.4. Variables per al càlcul d'externalitats .....	26
3.5. Elasticitat del model .....	28

## 1. Introducció

L'elaboració de les Guies per a l'electrificació d'una línia d'autobús s'han realitzat basant-se en el marc teòric i en el model de càlcul detallats en els apartats **3.1. Marc teòric** i **3.2. Model de càlcul dels costos** de la memòria.

Per a cada estratègia de recàrrega considerada (diürna a cotxera, a final de cicle o a final d'interval) i per al Cas 0 (vehicles dièsel), el model optimitza l'operativa de la línia en funció de les dades d'entrada, obtenint els càlculs intermedis i els costos resultants. A partir dels resultats, es pot determinar, per cada conjunt de dades d'entrada, quina és l'estratègia d'electrificació que té un menor cost, així com el cost que tindria la línia si estigués operada per vehicles dièsel (Cas 0).

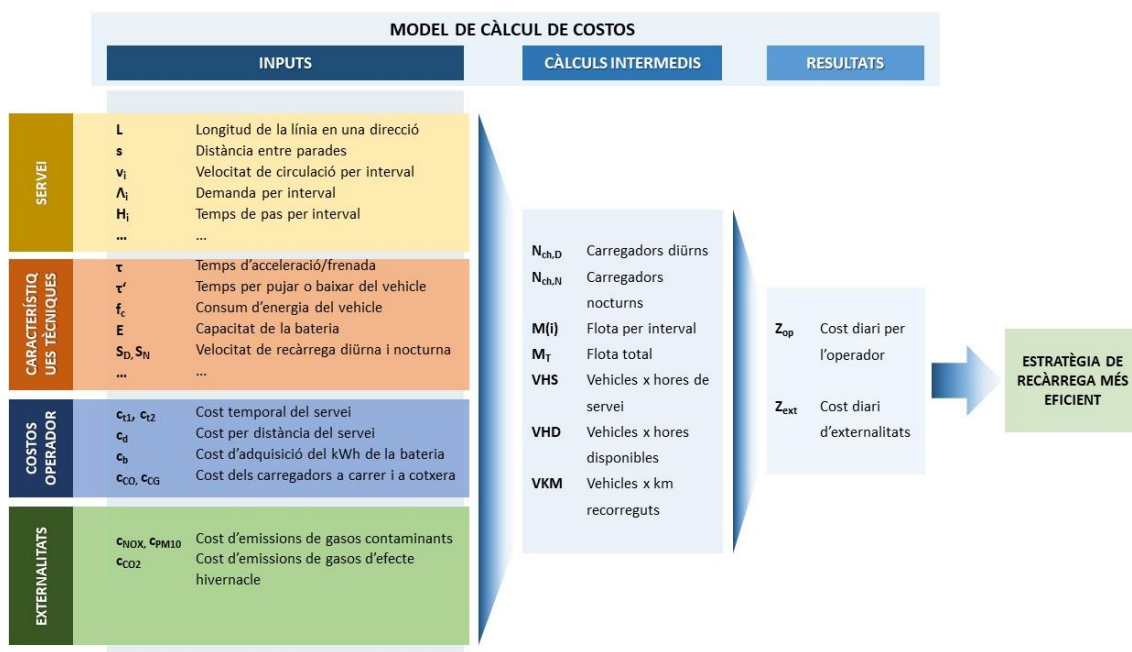


Figura 1. Estructura del model de càlcul de costos.

Cal tenir en compte que les Guies per a l'electrificació d'una línia d'autobús detallen l'estratègia de recàrrega que comporta un menor cost depenent de les característiques de la línia que es vol electrificar. Encara que es comparin els resultats amb el cost del Cas 0, l'opció de mantenir el servei amb vehicles dièsel no és considerada.

Per elaborar les Guies per a l'electrificació d'una línia d'autobús, s'analitzen les variables del model de costos per determinar quines tenen un major impacte en els costos de la línia mitjançant una anàlisi de sensibilitat.

En aquest annex s'estudiaran totes les dades d'entrada del model, per tal de determinar els seus valors habituals. De la mateixa manera, s'explorà la relació de cada variable amb el model de costos, realitzant un anàlisi de sensibilitat per identificar aquelles variables que tenen un major impacte en el model. Finalment, també s'analitza si la modificació de les variables fa que l'estratègia de recàrrega més adequada variï.

## 2. Variables d'entrada, càlculs intermedis i resultats del model

### 2.1. Variables d'entrada

El model de costos parteix de 21 dades d'entrada que caracteritzen el servei per optimitzar l'operativa de la línia i obtenir els càlculs intermedis. Alhora, també s'utilitzen 15 constants que monetitzen els paràmetres del servei per obtenir els costos de l'operador i les externalitats.

#### Característiques del servei:

$h_{DAY}$	Nombre d'hores del servei	[h]
$N$	Nombre d'interval	-
$h_i$	Nombre d'hores de cada interval	[h]
$v_i$	Velocitat de circulació	[km/h]
$\Lambda_i$	Demanda horària de passatgers	[pax/h]
$H_i$	Temps de pas	[min]
$L$	Longitud de la línia en un sentit de circulació	[km]
$s$	Distància entre parades	[km]
$l_A, l_B$	Distància entre la primera o la última parada d'una línia i el punt de càrrega	[km]
$l_G$	Distància entre la línia i la cotxera	[km]
$\Delta$	Pertorbació en la regularitat del servei	[s]

#### Característiques tècniques:

$\tau$	Temps addicional per parada corresponent a les operacions de frenada i acceleració	[s]
$\tau'$	Temps que tarda cada passatger en pujar o baixar del vehicle	[s]
$E$	Capacitat màxima d'energia de les bateries	[kWh]
$f_c$	Factor de consum d'energia de les bateries	[kWh/km]
$SOC_{min}$	Estat de càrrega mínim recomanat per l'operador o el fabricant	[%]
$T_{el}$	Hora del servei què es pot iniciar la recàrrega en cotxera	[h]
$T_{pos}$	Temps que cada vehicle necessita per posicionar-se i sortir d'un punt de recàrrega	[s]
$S_D$	Velocitat de recàrrega dels carregadors diürns, tant si estan al carrer o a la cotxera	[kWh/min]
$S_N$	Velocitat de recàrrega dels carregadors nocturns, en cotxera	[kWh/min]

#### Costos de l'operador

$c_{t1}$	Cost temporal dels vehicles en servei	[€/veh-h]
$c_{t2}$	Cost temporal de la flota de vehicles	[€/veh-h]
$c_d$	Cost dels vehicles per distància recorreguda	[€/veh-km]
$c_b$	Cost de la bateria	[€/kWh-h]
$c_{co}$	Cost diari dels carregadors ràpids	[€/carregador]
$c_{CG}$	Cost diari dels carregadors lents	[€/carregador]

Externalitats		
$f_{NOX}$	Factor d'emissió d'òxids de nitrogen	[g NOX/km]
$f_{PM}$	Factor d'emissió de material particulat	[g PM/km]
$c_{NOX}$	Cost de les externalitats provocades pels òxids de nitrogen	[€/g NOX]
$c_{PM}$	Cost de les externalitats provocades pel material particulat	[€/g PM]
$f_{CO2}$	Factor d'emissió de diòxid de carboni	[g CO2/km]
$c_{CO2}$	Cost de les externalitats provocades per diòxid de carboni	[€/g CO2]
$f_{ME}$	Mix elèctric	[g CO2/kWh]
$f_{VP}$	Factor espai públic	[m <sup>2</sup> /carregador]
$c_{VP}$	Cost de l'espai públic	[€/m <sup>2</sup> ]

Taula 1. Variables del model de costos

Les variables llistades són totes les que el model necessita per tal d'optimitzar l'operativa i determinar els costos de les tres estratègies de recàrrega considerades, així com del Cas 0. Tot i això, no totes les variables s'utilitzen per a totes les situacions. Per exemple, les dades referents a aspectes elèctrics com la velocitat de recàrrega o la capacitat de la bateria, no s'utilitzen per al càlcul del Cas 0.

## 2.2. Càlculs intermedis

Anomenem càlculs intermedis a les dades que caracteritzen el funcionament de la línia en cada modalitat considerada (elèctrica o dièsel), determinant els recursos necessaris per al servei. Aquestes dades, juntament amb algunes de les constants determinades a la Taula 1. Variables del model de costos, són les que determinaran finalment els costos de l'operador i les externalitats produïdes.

Càlculs intermedis		
$N_{ch,D}$	Nombre de carregadors ràpids, situats a la via pública.	[-]
$N_{ch,N}$	Nombre de carregadors lents, situats a la cotxera.	[-]
$M_T$	Flota total necessària per donar el servei.	[-]
$VHS$	Hores totals que la flota està en servei.	[h]
$VHD$	Hores totals que la flota està disponible.	[h]
$VKM$	Distància total recorreguda per la flota en un servei.	[km]

Taula 2. Càlculs intermedis del model de costos

De la mateixa manera que succeïa amb les dades d'entrada del model, depenent de l'estratègia d'electrificació que es considera o si es considera el Cas 0, alguns dels càlculs intermedis no es consideraran. Per exemple, per al Cas 0, el nombre de carregadors serà nul.

## 2.3. Resultats

Utilitzant les dades d'entrada de costos de l'operador i d'externalitats i els càlculs intermedis obtinguts, es determinen els costos d'operació i d'externalitats de cada estratègia de recàrrega i del Cas 0.

Resultats		
$Z_{op}$	Cost diari que incorre l'operador en donar el servei.	[€]
$Z_{ext}$	Cost diari de les externalitats generades al donar el servei.	[€]
$Z_T$	Cost diari total incorregut al donar el servei.	[€]

Taula 3. Resultats del model de costos.

El cost diari total, que inclou el cost d'operació i el cost de les externalitats, és el que s'utilitza per determinar l'estratègia d'electrificació més eficient en cada cas i per comparar-la amb el Cas 0.

### 3. Anàlisi de sensibilitat

Un cop determinat el funcionament del model de costos que s'utilitzarà, es realitza una anàlisi de sensibilitat modificant cada variable d'entrada per detectar el seu impacte en el resultat final.

Per tal de mesurar l'efecte de la variació de cada dada d'entrada, s'estableix un valor estàndard, un valor mínim i un valor màxim per a totes elles. D'aquesta manera, per cada anàlisi, totes les variables mantindran el seu valor estàndard excepte aquella que està sent analitzada, que variarà entre el seu valor mínim i màxim.

Valor estàndard de les variables de l'anàlisi de sensibilitat					
$h_{DAY}$	17 h	$s$	300 m	$f_c$	1,5 kWh/km
$N$	17	$I_A, I_B$	200 m	$SOC_{min}$	0,2%
$h_i$	1 h	$I_G$	7,5 km	$T_{el}$	2 h
$v_i$	12 km/h	$\Delta$	30 s	$T_{pos}$	30 s
$\Lambda_i$	300 pax/h	$\tau$	18,5 s / 23s	$S_D$	12 kWh/min
$H_i$	6 min	$\tau'$	3 s	$S_N$	1 kWh/min
$L$	8 km	$E$	250 kWh		

Taula 4. Valors estàndard de les variables

#### 3.1. Característiques del servei

Aquestes variables descriuen característiques intrínseques al servei que es vol electrificar. Són propietats relatives a la línia com ara la seva longitud o la velocitat a la qual pot circular el vehicle, però també inclouen variables que habitualment són decisió de l'operador com el temps de pas entre expedicions, el nombre d'hores del servei, etc.

##### *Nombre d'hores del servei ( $h_{DAY}$ )*

L'anàlisi de sensibilitat s'ha realitzat considerant **17 hores** de servei, el que correspondria a un servei entre les 5:00 h i les 22:00 h. Aquesta variable no s'ha modificat durant l'anàlisi.

##### *Nombre d'interval·ls en què es divideix el servei ( $N$ )*

El servei es divideix en el nombre d'interval·ls necessari per a poder representar les seves variacions al llarg del dia. Així, per a cada interval les característiques del servei en termes de demanda, velocitat i temps de pas són homogènies. L'anàlisi de sensibilitat s'ha realitzat considerant **17 interval·ls**. Aquesta variable no es modifica durant l'anàlisi.

##### *Nombre d'hores que comprèn cada interval ( $h_i$ )*

L'anàlisi es realitza considerant 17 h de servei i 17 interval·ls, d'**1 h** cadascun. Aquesta variable no es modifica durant l'anàlisi.

##### *Velocitat de circulació a cada interval ( $v_i$ )*

Aquesta variable descriu la velocitat a la qual els vehicles realitzarien un cicle sense fer les parades tenint en compte aspectes com el trànsit, el recorregut o els semàfors.

La velocitat comercial mitjana a la xarxa d'autobusos de TMB és d'11,83 km/h (Transports Metropolitans de Barcelona, 2020). Si comparem aquesta velocitat amb la resta de xarxes d'autobús urbà de diverses ciutats europees, es pot veure que Barcelona és la que té la velocitat més baixa, mentre que Hèlsinki té la velocitat més alta (26 km/h) (Európean Metropolitan

Transport Authorities, 2019). Per a l'anàlisi de sensibilitat, doncs, es considera com a velocitat mitjana estàndard **12 km/h**, la velocitat mínima **10 km/h** i la màxima **30 km/h**.

Per incorporar al model l'efecte de les puntes de trànsit sobre la velocitat de circulació dels vehicles, s'ha modificat la velocitat mitjana, augmentant-la o disminuint-la en cada interval. A continuació es mostren els valors que s'han pres per a l'anàlisi de sensibilitat de la velocitat de circulació:

$h_i$	$v_i$ [km/h]							
1	11,0	12,0	13,0	15,0	18,0	21,0	26,0	31,0
2	10,5	11,5	12,5	14,5	17,5	20,5	25,5	30,5
3	9,0	10,0	11,0	13,0	16,0	19,0	24,0	29,0
4	9,0	10,0	11,0	13,0	16,0	19,0	24,0	29,0
5	9,5	10,5	11,5	13,5	16,5	19,5	24,5	29,5
6	9,5	10,5	11,5	13,5	16,5	19,5	24,5	29,5
7	10,0	11,0	12,0	14,0	17,0	20,0	25,0	30,0
8	10,0	11,0	12,0	14,0	17,0	20,0	25,0	30,0
9	10,5	11,5	12,5	14,5	17,5	20,5	25,5	30,5
10	10,0	11,0	12,0	14,0	17,0	20,0	25,0	30,0
11	9,5	10,5	11,5	13,5	16,5	19,5	24,5	29,5
12	9,5	10,5	11,5	13,5	16,5	19,5	24,5	29,5
13	9,5	10,5	11,5	13,5	16,5	19,5	24,5	29,5
14	10,0	11,0	12,0	14,0	17,0	20,0	25,0	30,0
15	10,5	11,5	12,5	14,5	17,5	20,5	25,5	30,5
16	11,0	12,0	13,0	15,0	18,0	21,0	26,0	31,0
17	11,0	12,0	13,0	15,0	18,0	21,0	26,0	31,0

Taula 5. Valors de la velocitat de circulació

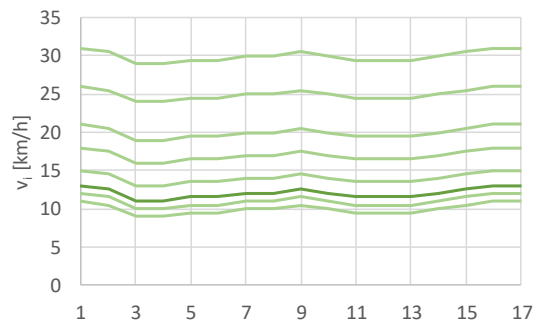


Figura 2. Valors de la velocitat de circulació

Els resultats de l'anàlisi de sensibilitat de la velocitat de circulació, mostren que, a mesura que augmenta la velocitat, l'estratègia de recàrrega a final de cycle es torna més eficient, de la mateixa manera que l'estratègia de recàrrega diürna a cotxera. En canvi, el cost de l'estratègia de recàrrega a final d'interval pateix una disminució menor.

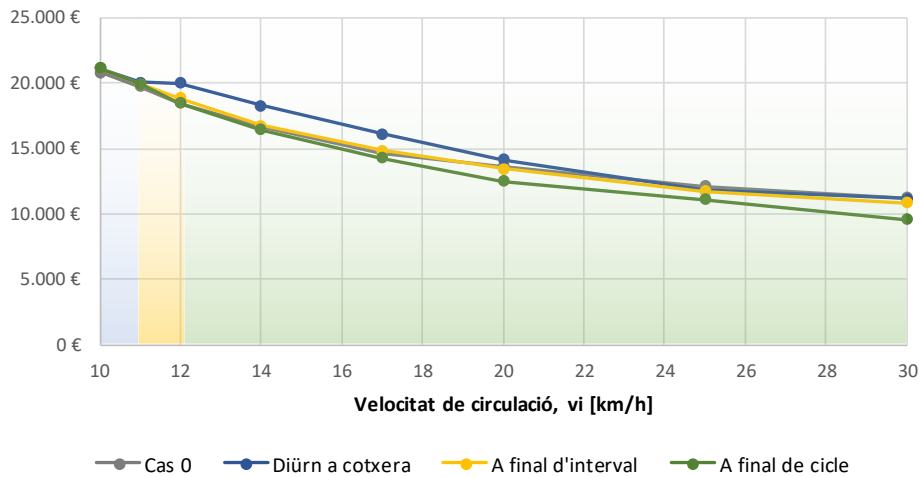


Figura 3. Anàlisi de sensibilitat de la velocitat de circulació

L'impacte de la velocitat de circulació en els costos es considera **rellevant**, ja que es produeix una disminució important del cost en augmentar la velocitat de circulació. Tot i això, la variació de la velocitat de circulació no genera un canvi substancial en l'estratègia de recàrrega més eficient, ja que aquesta disminució es produeix de manera molt similar en totes les estratègies de recàrrega.



*Demanda de passatgers a cada interval ( $\Lambda_i$ )*

A la xarxa d'autobusos de TMB, la demanda horària mitjana per a una línia, aproximadament, és de 320 passatgers. La demanda és molt diferent en altres ciutats europees, com Lió, on és de 200 passatgers i Londres, on hi ha una demanda de 500 passatgers per hora i línia (European Metropolitan Transport Authorities, 2019).

En aquest cas, es pren com a valor estàndard **300 pax/h**, com a valor mínim **150 pax/h** i com a màxim **500 pax/h**.

Per incorporar l'efecte de les hores puntes al model, la demanda horària de passatgers descrita anteriorment, es fa variar per a cada interval horari del servei. A continuació es mostren els valors que s'han pres per a l'anàlisi de sensibilitat de la demanda:

$h_i$	Demanda horària de viatgers [ $\Lambda_i/h$ ]								
1	113	150	188	225	263	300	338	375	375
2	150	200	250	300	350	400	450	500	500
3	225	300	375	450	525	600	675	750	750
4	188	250	313	375	438	500	563	625	625
5	150	200	250	300	350	400	450	500	500
6	90	120	150	180	210	240	270	300	300
7	90	120	150	180	210	240	270	300	300
8	90	120	150	180	210	240	270	300	300
9	113	150	188	225	263	300	338	375	375
10	150	200	250	300	350	400	450	500	500
11	165	220	275	330	385	440	495	550	550
12	165	220	275	330	385	440	495	550	550
13	188	250	313	375	438	500	563	625	625
14	225	300	375	450	525	600	675	750	750
15	188	250	313	375	438	500	563	625	625
16	150	200	250	300	350	400	450	500	500
17	113	150	188	225	263	300	338	375	375

Taula 6. Valors de la demanda

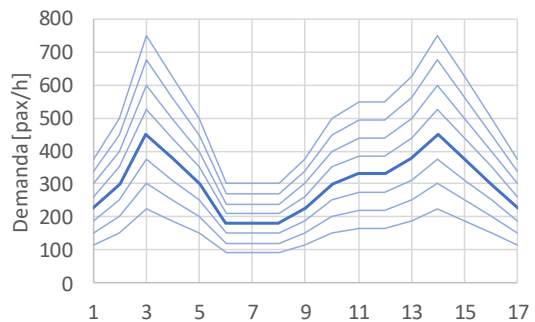


Figura 4. Valors de la demanda

Un cop realitzada l'anàlisi de sensibilitat s'observa que a mesura que augmenta la demanda, el cost de totes les estratègies de recàrrega i del Cas 0 augmenten de manera similar. També es detecta que els costos s'incrementen substancialment per a demandes majors a 350 passatgers l'hora. L'estratègia de recàrrega més eficient és a final de cicle per tot el rang de demandes excepte per a demandes de 350 pax/h, en les que puntualment, l'estratègia de recàrrega amb menor cost és a final d'interval.

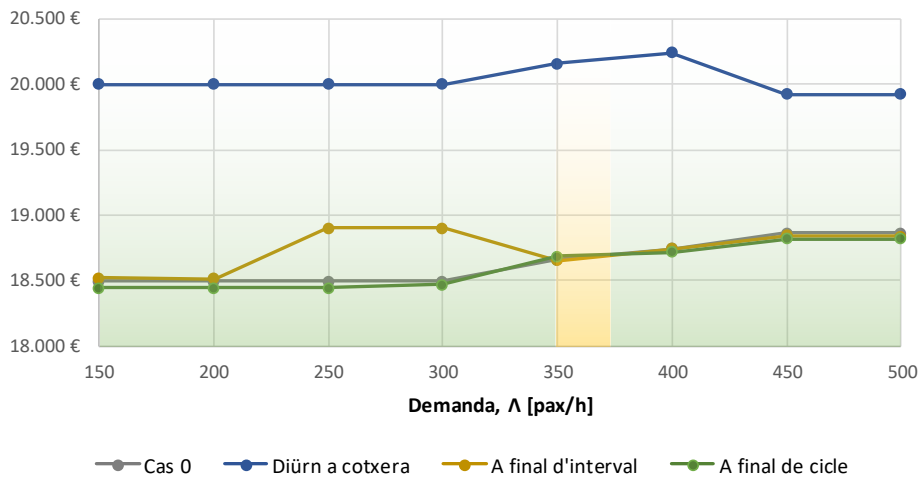


Figura 5. Anàlisi de sensibilitat de la demanda

La demanda horària de passatgers es considera una variable **no rellevant** per a l'elaboració de les Guies, ja que, tot i que els costos augmenten amb la demanda, l'increment no és significatiu i no es detecten diferències entre les estratègies de recàrrega.

*Temps de pas entre vehicles a cada interval ( $H_i$ )*

El temps de pas s'adapta a la demanda de cada moment, augmentant la capacitat del servei en hores punta i reduint-la en hores vall.

A la xarxa ortogonal de Barcelona, el menor temps de pas en gran part de les línies és de 6 min. En canvi, hi ha altres línies a l'Àrea Metropolitana que tenen temps de pas superiors, arribant als 30 min. En altres ciutats trobem temps de pas més reduïdes, de fins a 4 min.

Per a l'anàlisi del model, es considera el temps de pas estàndard, **6 min**, el temps de pas mínim **3 min** i el temps de pas màxim **30 min**.

A continuació es mostra l'evolució dels temps de pas al llarg del dia:

$h_i$	$H_i$ [min]									
1	10	10	15	15	20	30	30	30	30	30
2	8	8	10	10	15	30	30	25	30	30
3	5	5	7	8	10	15	20	25	30	30
4	5	5	7	8	10	15	20	25	30	30
5	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
6	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
7	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
8	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
9	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
10	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
11	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
12	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
13	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
14	3	4	5	6	10	15	20	25	30	30
15	5	5	7	8	15	15	20	25	30	30
16	8	8	10	10	15	15	20	25	30	30
17	10	10	15	15	20	30	30	30	30	30

Taula 7. Valors del temps de pas.

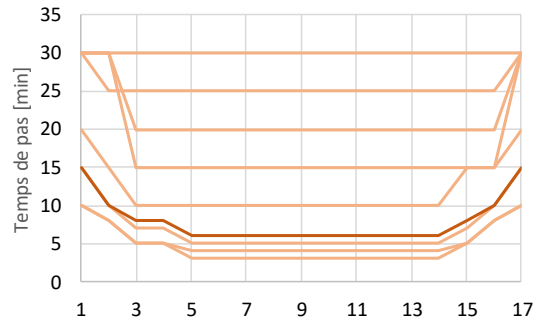


Figura 6. Valors del temps de pas.

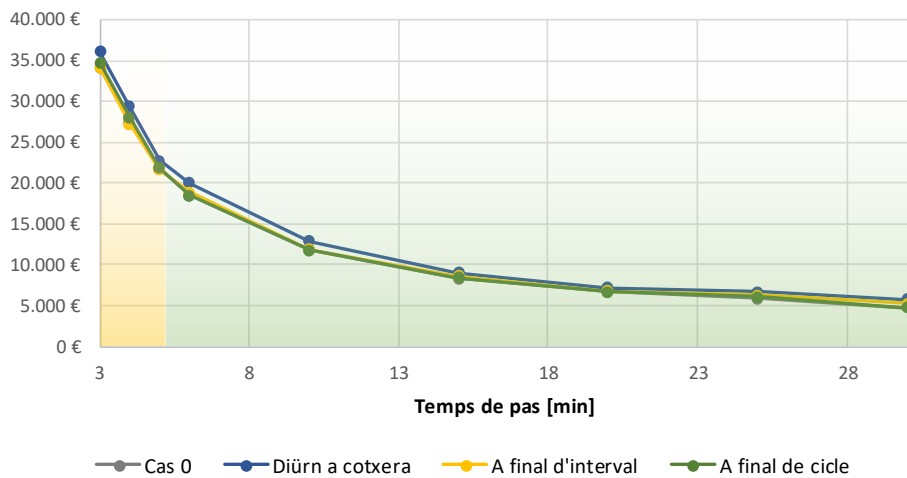


Figura 7. Anàlisi de sensibilitat del temps de pas.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que el temps de pas té un important efecte en el cost final del servei. Això és degut a la relació entre el temps de pas i el nombre d'expedicions, un valor molt lligat als vehicles necessaris, així com als quilòmetres diaris i al temps en servei de la flota.

Amb l'augment del temps de pas, disminueix en gran manera el cost final del servei per a totes les estratègies de recàrrega, com també pel Cas 0.

Per a temps de pas menors a 6 minuts, l'estratègia de recàrrega més eficient és a final d'interval, mentre que per temps de pas majors, l'estratègia amb menor cost és a final de cicle. Aquesta diferència fa que el temps de pas es consideri una variable **rellevant** en l'anàlisi del model i s'estudiï en apartats següents per poder incloure-la a les Guies. Tot i això, cal tenir en compte que la diferència de costos entre les dues estratègies de recàrrega més eficients és reduïda, pel que hi pot haver altres variables que tinguin un efecte major sobre el model.

#### Longitud de la línia en una direcció (L)

La longitud de les línies depèn molt de la geometria de la ciutat i de la tipologia de xarxa d'autobús que hi ha. A Barcelona, la xarxa d'autobús operada per TMB té 102 línies arribant als 835,26 km de longitud total. La longitud mitjana de les línies és 8,19 km.

Una de les línies amb menor recorregut és la V7 amb origen a Pl. Espanya i final a Sarrià. La longitud en cada sentit d'aquesta línia és de 5,05 km, mentre que una de les línies amb un recorregut més llarg és la H4, amb 14,8 km per sentit.

Per a realitzar l'anàlisi del model, s'ha considerat com a longitud estàndard de la línia, **8 km**. Alhora, s'ha considerat la longitud mínima **5 km** i la longitud màxima **20 km**, tenint en compte el cas en què s'hagués de posar en marxa una línia més llarga que la H4 o una línia amb un recorregut molt tortuós. Tot i això el valor màxim no arriba, per exemple, als 23 km que és la longitud d'algunes línies d'altres ciutats com Nova York.

Tenint en compte la velocitat mitjana exposada anteriorment, es tardaria 1 h 20 min a fer el cicle complet de la línia amb longitud estàndard.

La longitud de la línia té un efecte significatiu en el cost diari del servei, com s'observa en l'anàlisi de sensibilitat. Utilitzant qualsevol estratègia de recàrrega, el cost total diari per a línies de 5 km està sobre els 12.000 € o 13.000 €, mentre que per a línies de 15 km, el cost arriba als 35.000 €.

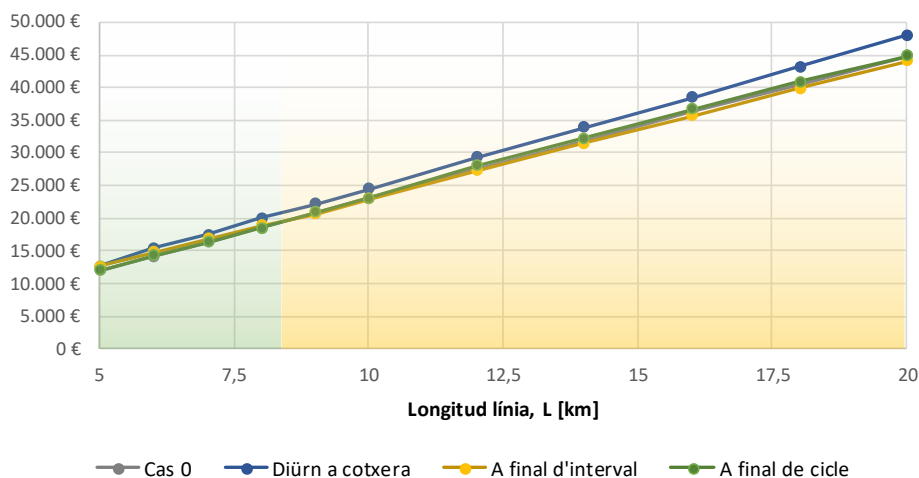


Figura 8. Anàlisi de sensibilitat de la longitud de línia.

S'observa que en augmentar la longitud de la línia, el cost de la recàrrega a cotxera augmenta per sobre de la resta, mentre que la recàrrega a final d'interval és la que presenta un cost menor. Tot i això, per a línies curtes no hi ha una diferència substancial en el cost de les diverses estratègies de recàrrega.

Donada la forta dependència del cost del servei amb la longitud de la línia, aquesta variable es considera **molt rellevant** en l'anàlisi del model i s'estudia en apartats següents per poder incloure-la a les Guies.

#### *Distància entre parades (s)*

Tenint en compte dades de TMB de nou, la longitud total de la xarxa és de 835,06 km i hi ha 2.600 parades, amb el que es pot dir que la distància mitjana entre parades mitjana a la xarxa d'autobús de TMB és de 320 m.

Per a realitzar l'anàlisi del model es considerarà la distància entre parades estàndard, **300 m**, la distància mínima **150 m** i la màxima **500 m**. A continuació es mostra una imatge per donar context a aquestes distàncies:



Figura 9. Distància entre parades.

S'observa que tenir parades a menys de 150 m implicaria tenir les parades pràcticament a la mateixa illa de cases. Alhora, les parades separades per més de 500 m s'acosten més a les dimensions per tenir un servei de major capacitat, com ara un tramvia, un metro o un ferrocarril.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que l'augment de la distància entre parades disminueix el cost en tots els casos. Aquesta variació, però afecta en major manera als serveis que utilitzen la recàrrega a final de cicle o a final d'interval.

Es determina que l'estratègia de recàrrega més eficient és a final de cicle per a parades situades a menys de 450 m entre elles. Per parades situades a una major distància, l'estratègia de recàrrega més recomanada és a final d'interval, tot i que les diferències entre les dues són menors. Per altra banda, la recàrrega diürna a cotxera presenta costos similars a la resta d'estratègies per a distàncies entre parades menors a 250 m, però l'increment de distància entre parades no provoca una disminució significativa dels costos.

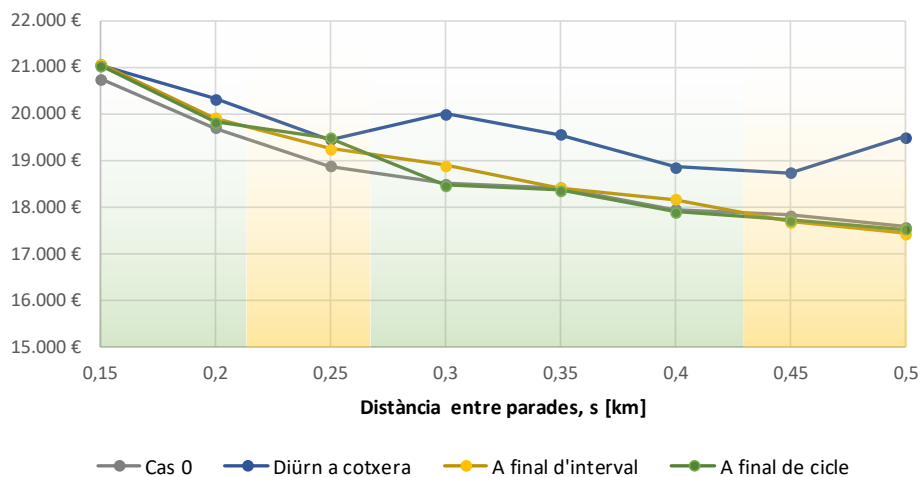


Figura 10. Anàlisi de sensibilitat de la distància entre parades.

La distància entre parades es considera una variable **no rellevant** en l'anàlisi de sensibilitat, ja que la modificació d'aquesta variable no provoca una gran diferència en els costos del servei.

#### *Distància entre la primera/última parada i el punt de càrrega ( $l_A, l_B$ )*

Sempre que sigui possible, el punt de càrrega s'instal·laria a la parada final o inicial de la línia. Per això, el valor mínim d'aquesta variable es considera **0 km**.

Hi ha diversos casos en què la instal·lació no es pot realitzar a la parada, per exemple, per falta d'espai. En aquest cas, el punt de càrrega caldria instal·lar-lo en algun punt proper, però suficientment a prop per no augmentar massa el temps de cicle, ja que els vehicles hi ha d'anar cada cop que acaben el recorregut de la línia.

La distància màxima s'ha considerat **1 km**, que tenint en compte la velocitat de circulació afegiria 10 min de recorregut per cicle, a banda del temps de recàrrega.

Com a distància estàndard, s'ha considerat **200 m**, que a l'exemple de Barcelona serien 1,5 illes de cases.

Com es pot observar a l'anàlisi de sensibilitat, la modificació d'aquesta variable no provoca cap canvi en el servei amb recàrrega a cotxera. Pel que fa a les estratègies de recàrrega a final de cicle i a final d'interval, es detecta que, per longituds menors a 350 m i superiors a 750 m la recàrrega a final de cicle té un menor cost. Per longituds entre 350 m i 750 m, la recàrrega a final de servei és l'estratègia més eficient.

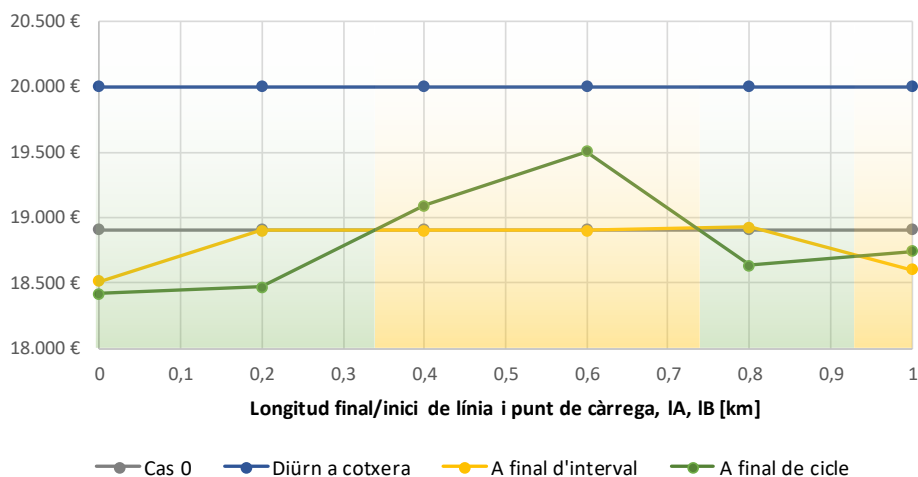


Figura 11. Anàlisi de sensibilitat de la longitud entre el final/inici de la línia i el punt de càrrega.

La longitud entre el final/inici de la línia i el punt de càrrega es considera una variable **rellevant** per al model, ja que les modificacions en la variable provoquen variacions substancials en l'estratègia de recàrrega més adequada.

#### *Distància entre la línia i la cotxera ( $I_G$ )*

Habitualment, els operadors disposen d'algunes cotxeres distribuïdes en diversos punts de la xarxa on operen. Els vehicles que serveixen una línia accedeixen a una d'aquestes cotxeres, així que es fa difícil estimar la distància a la qual estan les capçaleres de les línies de les seves cotxeres corresponents.

Així mateix, és habitual que les cotxeres estiguin situades en zones industrials dels afores de les ciutats, amb alguna excepció com la de les cotxeres del Triangle, situat al polígon de Montsolís, molt a prop del bari de Sant Andreu.

Com a valor mínim entre la capçalera d'una línia i les cotxeres s'ha pres **300 m**, considerant el cas en què el final o inici de la línia es trobés davant de les cotxeres. A diferència de la distància entre la línia i el punt de càrrega, en cap cas la distància entre la línia i la cotxera podria ser nul·la, ja que els vehicles, com a mínim haurien d'accedir a les cotxeres.

Per estimar un valor estàndard i màxim entre la línia i la cotxera, s'ha analitzat la situació de les cotxeres en diverses ciutats i s'ha calculat la distància màxima a la qual podrien estar els inicis o finals de línia de la cotxera més propera en cada cas. Per Barcelona, la màxima distància és 8 km (s'ha tingut en compte la distància de recorregut, en comptes de la distància euclidiana). En el cas de Madrid, la distància màxima és de 9 km.

Es considera la distància màxima entre la línia i cotxera **20 km**, afegint folgances per incorporar recorreguts més tortuosos, la necessitat d'anar a una cotxera que no és la que està més a prop o en un cas en què s'hagi de disposar les cotxeres fora del continu urbà.

Finalment, la distància estàndard entre la línia i la cotxera es considera **7,5 km**. Tenint en compte la velocitat de circulació estàndard considerada, es tardaria 40 min a anar del final de la línia a la cotxera.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que la longitud entre la línia i la cotxera afecta els costos de totes les estratègies. Tot i això, l'augment de la distància entre la línia i la cotxera fa augmentar en

major mesura els costos de la recàrrega en cotxera. Així mateix, el servei amb recàrrega a final d'interval és el que menys es veu afectat per l'augment de la distància a cotxera. Més concretament, per a distàncies entre la línia i la cotxera menors a 18 km, l'estratègia de recàrrega més eficient és a final de cycle. A partir de 18 km, l'estratègia amb un menor cost és a final d'interval.

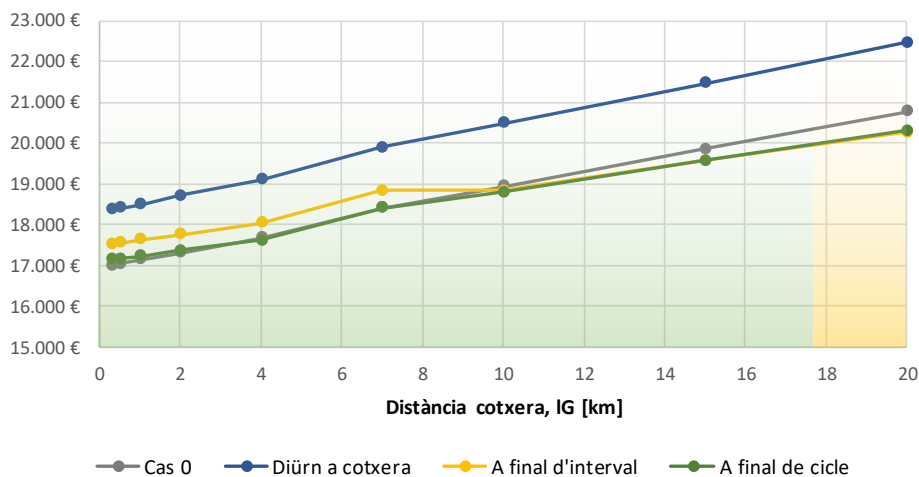


Figura 12. Anàlisi de sensibilitat de la distància entre la línia i la cotxera.

La distància entre la línia i la cotxera es considera una variable **no rellevant** per al model de costos, ja que la seva variació no provoca una variació de l'estratègia de recàrrega més eficient.

#### *Pertorbació en la regularitat del servei ( $\Delta$ )*

La pertorbació en la regularitat del servei és la diferència entre el moment d'arribada dels vehicles i el moment d'arribada designat per l'horari de l'operador.

En una línia electrificada, el temps màxim que els autobusos poden recarregar les bateries està condicionat pel temps de pas del servei. Si els vehicles arriben al punt de càrrega un  $\varepsilon$  de temps més tard del seu horari teòric, disposen de  $H_i - \varepsilon$  per recarregar la bateria. Alhora, si s'endarrereix la sortida del punt de càrrega per disposar de tot el temps teòric per recarregar la bateria, pot ser que les expedicions posteriors no trobin un punt de càrrega lliure, provocant un efecte en cadena on es traslladaria l'endarreriment i es provocarien cues al punt de càrrega.

Per evitar aquest efecte, es fa servir la pertorbació en la regularitat del servei per, si és necessari, augmentar el nombre de carregadors, evitant que els autobusos es quedin sense bateria per no poder recarregar, evitant cues al punt de càrrega i evitant la propagació de l'endarreriment.

El valor mínim per a l'anàlisi del model es considera **0 s**, l'estàndard es considera **30 s** i el màxim **10 min**.

L'única estratègia de recàrrega que es veu afectada per la variació en la pertorbació del servei és la recàrrega a final de cycle, ja que si la pertorbació en el servei augmenta, s'han d'afegir més plataformes de recàrrega per evitar traslladar aquesta pertorbació a través del servei.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que només hi ha variació en la recàrrega a final de cycle, però que aquesta és mínima. La recàrrega a final de cycle és l'estratègia que presenta un menor cost, independentment de la variació de la pertorbació en el servei.

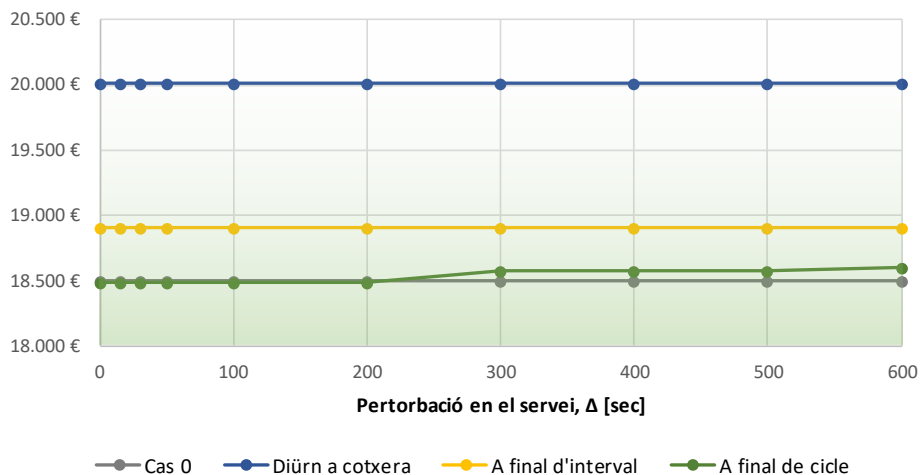


Figura 13. Anàlisi de sensibilitat de la pertorbació en el servei.

La pertorbació en el servei es considera una variable **no rellevant** per a l'anàlisi del model, ja que la seva variació no suposa un canvi substancial en els costos.

### 3.2. Característiques tècniques

Aquestes variables descriuen característiques del servei o dels vehicles que l'operen. Els seus valors poden dependre d'aspectes com de la tipologia del vehicle, la tipologia de carregadors o el perfil dels passatgers.

#### *Temps addicional per parada corresponent a les operacions de frenada i acceleració ( $\tau$ )*

Aquesta variable té en compte el temps que consumeix un vehicle en realitzar una parada en comparació amb el cas que no l'hagués fet i sense tenir en compte el temps necessari perquè els passatgers puguin o baixin del vehicle.

Aquest temps té en compte el temps consumit en frenar, apropar-se a la parada, sortir de la parada, reincorporar-se al trànsit i accelerar fins a la velocitat que es duia abans de parar.

Aquesta dada varia segons la tipologia de vehicle, la potència d'acceleració que tingui, el trànsit que hi hagi, la configuració de la parada i, fins i tot, de la conducció. Un dels factors més rellevants però, és la potència d'acceleració, ja que és substancialment diferent per a vehicles elèctrics i vehicles dièsel. L'acceleració dels vehicles dièsel pot ser del voltant d' $1 \text{ m/s}^2$ , mentre que la potència d'acceleració dels vehicles elèctrics ronda els  $1,3 \text{ m/s}^2$ .

Aquesta variable no es modifica durant l'anàlisi del model. El seu valor es considera **18,5 s** per a línies electrificades i **23 s** per a línies operades amb vehicles dièsel.

#### *Temps que tarda cada passatger a pujar o baixar del vehicle ( $\tau'$ )*

El temps de pujada i baixada al vehicle és una variable que té molta importància, ja que per demandes grans pot augmentar considerablement el temps de viatge.

Aquesta variable depèn majoritàriament de tres factors: el sistema d'accés i baixada del vehicle, el sistema de validació del títol de transport i el perfil del passatger.

Pel que fa al sistema d'accés i baixada, els passatgers podrien pujar per una o dues portes, podrien haver de deixar baixar abans de pujar, etc. Respecte al sistema de validació del títol de



transport, pot ser dins del vehicle amb una sola validadora, amb diverses validadores, amb pagament amb metàl·lic permès o no o bé amb títol de transport *contactless* o bé amb altres sistemes com la validació a la parada. Finalment, el temps de pujada o baixada de cada passatger variarà si és una persona gran, si porta cotxet i altres situacions que es poden donar, com l'accés de persones en cadires de rodes amb la necessitat que el vehicle desplegui una rampa, per exemple.

En aquest model considerem que totes les persones accedeixen al vehicle per la mateixa porta i que es puja i baixa a l'hora (les baixades es fan per una porta diferent de les pujades). Alhora, considerem que la validació del títol de transport es realitza a l'interior del vehicle amb les validadores necessàries perquè no hi hagi cues i que el pagament en metàl·lic està permès però no es realitza fora de moments puntuals. Finalment, es considera un perfil mitjà de l'usuari.

Es considera el temps estàndard de pujada/baixada de cada passatger **3 s**. Durant l'anàlisi de sensibilitat del model es varia aquesta dada entre l'**1 s** i els **10 s** per passatger. El mínim és el cas en què es pot accedir per dues portes, es valida el títol de transport fora del vehicle i el perfil de l'usuari no inclou casos de dificultats de mobilitat. El temps màxim considerat es donaria en els casos en què, per exemple, es comprés el títol de transport en metàl·lic dins del vehicle, o que hi hagués moltes persones amb problemes de mobilitat.

L'anàlisi de sensibilitat del temps de pujar i baixar del vehicle per passatger mostra un augment en el cost del servei quan augmenta la variable. L'augment de cost es dona de manera similar en les estratègies de recàrrega a final de cicle i a final d'interval, que per tots els valors del temps de pujar/baixar per passatger presenten costos molt similars.

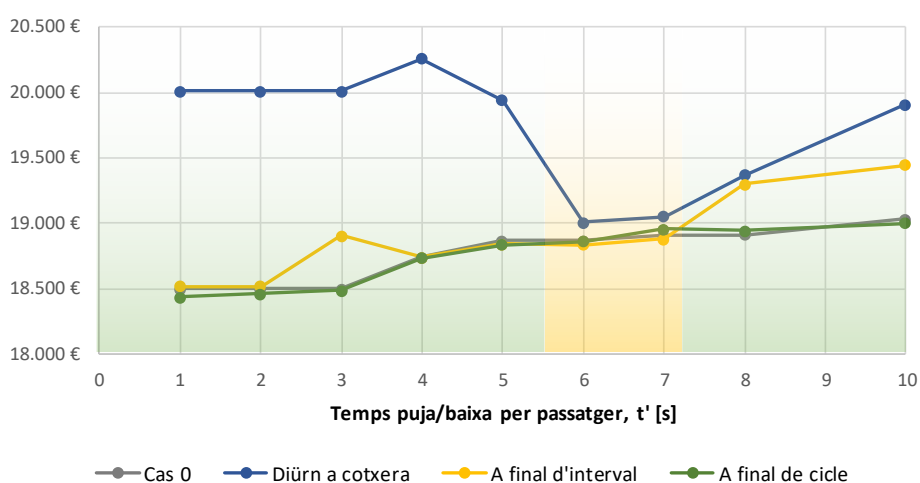


Figura 14. Anàlisi de sensibilitat del temps de pujar/baixar per passatger.

El temps de pujar i baixar del vehicle per passatger es considera una variable **no rellevant** per al model, ja que la variació dels costos provocada per la seva modificació és bastant lleu.

### Capacitat màxima d'energia de la bateria (E)

Aquesta variable és una de les principals per descriure un servei elèctric, ja que descriu l'energia que tenen els vehicles en començar el servei i, juntament amb altres variables, regula l'operativa de càrrega.

Les flotes de vehicles elèctrics que tenen els operadors de transport públic normalment no estan fabricades per un sol proveïdor i difícilment es poden trobar les especificacions tècniques o el

preu en catàlegs convencionals. Tot i això, s'han trobat algunes referències de la capacitat d'energia de les bateries per diverses tipologies d'autobús urbà elèctric.

Cal tenir en compte que les bateries dels autobusos urbans s'encarreguen tenint en compte la línia a la qual han de servir i l'estratègia de recàrrega que se servirà. Per això, dos vehicles que haguessin sigut iguals si la línia s'operés amb vehicles dièsel, poden tenir bateries amb capacitats radicalment diferents si la línia s'opera amb recàrrega a final de cicle o amb recàrrega diürna a cotxera, per exemple.

El novembre de 2018, durant l'Smart Mobility Congress, TMB va presentar un minibús elèctric, pensat per donar servei en línies de bus barri, amb una capacitat d'emmagatzematge d'energia de 125 kWh. El catàleg d'autobusos elèctrics de l'empresa Irizar contempla bateries d'entre 282-376 kWh per al model i2e de 12 m i d'entre 90-150 kWh per al model i2e de 18 m. Tot i això, hi ha diversos operadors que utilitza autobusos urbans amb bateries que emmagatzemen uns 350 kWh, i alguns prototips amb 500 kWh/vehicle.

Com a capacitat estàndard, s'ha considerat **250 kWh**, una mesura bastant central entre la gran diversitat de bateries que hi ha. S'ha considerat una capacitat mínima de **50 kWh** i màxima de **500 kWh**, deixant folgances amb les dades de mercat.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que la capacitat màxima de la bateria té un important efecte en els costos del servei. Per a bateries amb una capacitat menor a 300 kWh, la recàrrega diürna en cotxera augmenta el seu cost de manera exponencial. Això és degut al fet que per a bateries amb capacitat menor, els vehicles necessiten realitzar més viatges a cotxera a recarregar-les. En canvi, per bateries superiors a 300 kWh, totes les estratègies de recàrrega tenen costos gairebé idèntics, que augmenten de manera molt similar. Això és degut al fet que, per bateries majors a 300 kWh, l'operativa no depèn de la recàrrega d'aquestes.

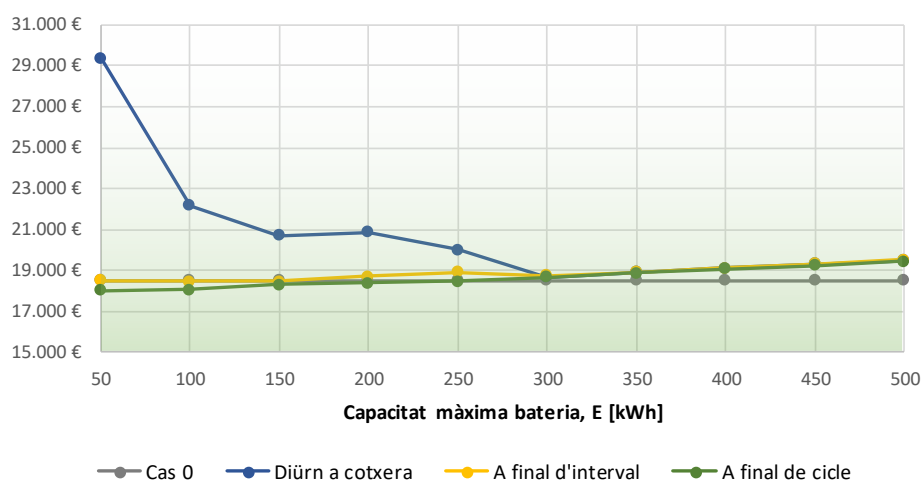


Figura 15. Anàlisi de sensibilitat de la capacitat de la bateria.

La capacitat màxima de la bateria es considera una variable **molt rellevant** en el model, ja que el seu valor presenta una gran influència en el cost del servei, així com en l'estratègia de recàrrega més eficient. Per això, aquesta variable s'estudiarà en els popers apartats.

### Factor de consum d'energia de les bateries ( $f_c$ )

El factor de consum mesura l'energia consumida en desplaçar-se el vehicle. Aquesta dada depèn de factors molt diversos com la orografia de la ruta, la velocitat, la quantitat de passatgers, la qualitat del paviment, el comportament del conductor o s'utilitza l'aire condicionat o la calefacció.

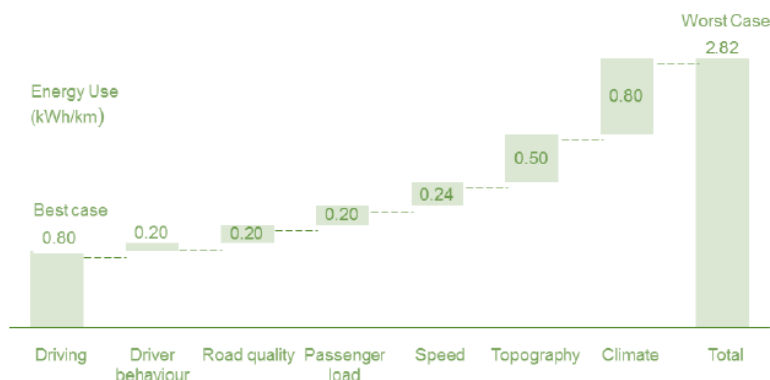


Figura 16. Influència dels factors sobre el consum d'energia d'un autobús elèctric. (C40 Cities Finance Facility, 2018)

Per a vehicles de 12 m, el factor de consum mitjà és d'1,2 kWh/km i per a vehicles de 18 m, el factor de consum mitjà és d'1,8 kWh/km.

Com a factor de consum estàndard es considera **1,5 kWh/km**, el que suposaria que una bateria de 250 kWh tindria gairebé 14 h d'autonomia. Com a factor de consum mínim, tenint en compte l'efecte favorable de tots els factors condicionants, es considera **1 kWh/km** i com a factor de consum màxim, tenint en compte l'efecte desfavorable de tots els factors condicionants, es considera **2,5 kWh/km**.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que el factor de consum té un fort impacte en els costos de les diverses estratègies de recàrrega. Més concretament, per a factors de consum menors a 1,3, les tres estratègies tenen un cost semblant. En canvi, per factors de consum majors a 1,3, la recàrrega diürna a cotxera té un significat augment del cost. La recàrrega a final de cicle i a final d'interval també pateixen augments en el seu cost, però no són tan elevats i són similars entre ells.

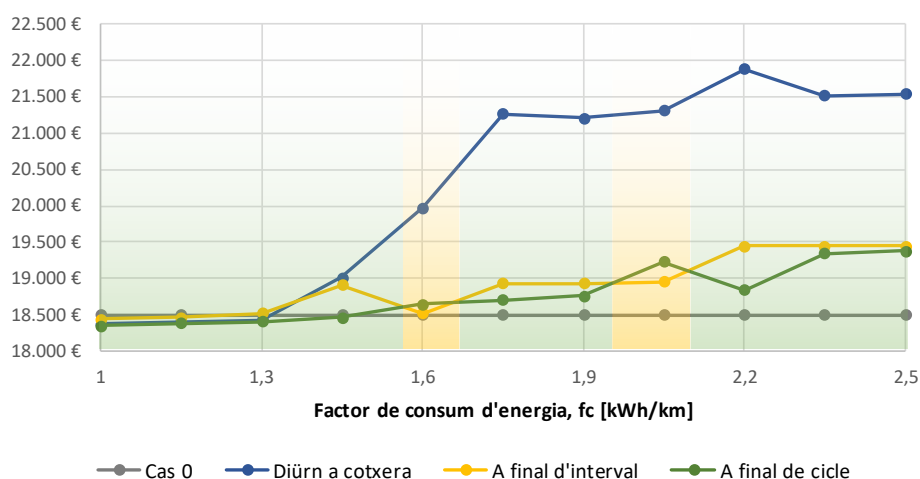


Figura 17. Anàlisi de sensibilitat del factor de consum.

El factor de consum d'energia es considera una variable **rellevant** en el model de costos, ja que el seu valor té un important impacte en el cost del servei. Per això aquesta variable s'estudia en apartats següents.

#### *Estat de càrrega mínim recomanat ( $SOC_{min}$ )*

L'estat de càrrega és el percentatge d'energia que hi ha a la bateria.

Els operadors poden determinar un estat de càrrega mínim a partir del qual no es pot seguir circulant, pel risc de quedar-se sense bateria enmig de la línia. Alhora, el fabricant recomana un estat de càrrega mínim del que no s'hauria de baixar per tal de garantir el correcte funcionament de les bateries en el temps.

L'estat de càrrega mínim que s'ha fet servir al model és el recomanat pels fabricants, el 20%. Donada la naturalesa d'aquesta dada, no es varia en l'anàlisi de sensibilitat del model.

#### *Hora del servei en què es pot inicial la recàrrega en cotxera ( $T_{el}$ )*

Aquesta dada determina el moment en el qual, els vehicles que estiguin en el servei però no hagin de ser utilitzats durant l'interval següent, en retornar a la cotxera, poden recarregar la bateria.

El temps mínim en què pot succeir és el segon interval, si es donés el cas que la flota necessària per al segon interval és menor que per al primer interval. Per això, considerem l'hora que es pot iniciar la recàrrega en cotxera, **2 h**. Aquesta dada no es modifica durant l'anàlisi del model.

#### *Temps necessari per a posicionar-se i sortir d'un punt de recàrrega ( $T_{pos}$ )*

Aquesta variable mesura el temps que cada vehicle necessita per fer les operacions de posicionament en un punt de càrrega, per connectar el vehicle i per sortir del punt de càrrega.

En les zones de càrrega en les que hi ha dos punts de càrrega en sèrie, aquesta variable s'utilitza per calcular el temps que tarda un vehicle a traslladar-se al primer punt de càrrega des del segon, per deixar-lo lliure.

El temps de posicionament i sortida d'un punt de recàrrega depèn del trànsit que hi hagi, del disseny de la zona de càrrega, del mètode de càrrega (endoll, pantògraf, etc.) i problemàtiques puntuals que es puguin donar, com les infraccions de trànsit (vehicles aparcats en la zona de càrrega) o el temps que tardi a deixar lliure el punt de càrrega el vehicle anterior, per exemple.

El valor estàndard es considera **30 s**. Cal tenir en compte que el temps addicional per parada a causa de la frenada i l'acceleració era de 18,5 s, però no incloïa la connexió del vehicle. Per realitzar l'anàlisi de sensibilitat del model, aquesta variable es modifica entre els **10 s** i els **60 s**.

El mínim està condicionat per un accés i una sortida del punt de recàrrega extremadament ràpida i senzilla (per exemple, si el punt de càrrega està en el mateix carril bus i no hi ha cap obstacle) i també d'una connexió gairebé immediata (per exemple amb carrils d'inducció). El màxim es pren tenint en compte les dificultats que es poden donar, com la necessitat de maniobrar o tardar més de l'esperat en sortir del vehicle per endollar el carregador.

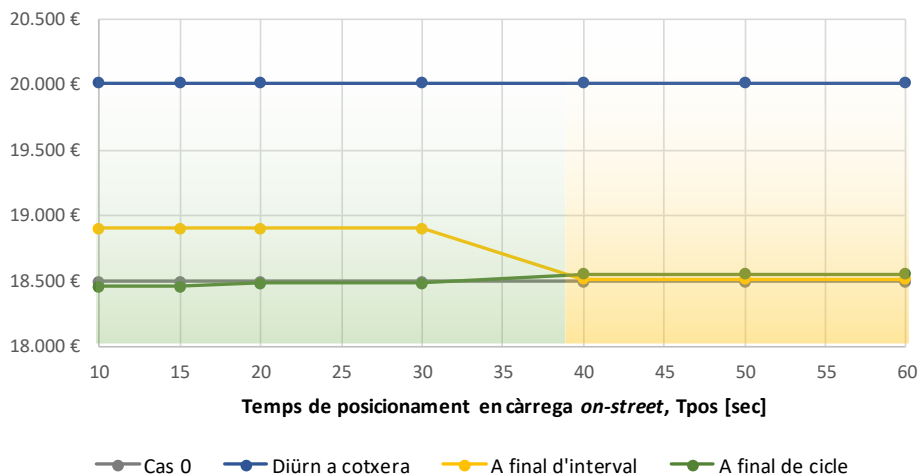


Figura 18. Anàlisi de sensibilitat del temps de posicionament.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que la variació del temps de posicionament no afecta l'estratègia de recàrrega a cotxera. Així mateix, el seu impacte a la recàrrega a final de cicle és molt reduïda. En canvi, el cost del servei amb recàrrega a final d'interval es redueix substancialment per a temps de posicionaments majors a 30 segons, de manera que per temps de posicionament majors a 40 segons, l'estratègia amb un cost menor és la recàrrega a final d'interval.

El temps de posicionament es considera una variable **no rellevant**, ja que la seva modificació té un impacte molt menor en els costos del servei.

#### Velocitat de recàrrega dels carregadors diürns ( $S_D$ )

Tant si estan situats a la via pública o a la cotxera. Aquesta variable determina el temps necessari per recarregar les bateries de la flota, de manera que també determina la quantitat d'energia que es recarregarà en un temps donat.

De la mateixa manera que la capacitat d'emmagatzematge d'energia de la bateria (E), la velocitat de càrrega és una dada molt variable segons el model de carregador. Havent recopilat dades de diversos proveïdors, es considera la velocitat de recàrrega dels carregadors diürns estàndard **12 kWh/min**, amb el que serien necessaris 28,5 min per recarregar una bateria de 200 kWh sencera. S'ha considerat un valor mínim de **7 kWh/min** i un valor màxim de **30 kWh/min**.

Cal tenir en compte que, en una estratègia de recàrrega a final de cicle, només es carrega una part de la bateria. Amb la velocitat estàndard considerada, es podrien recarregar 72 kWh en 6 min, que és un 36% de la capacitat de la bateria.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que la velocitat de recàrrega ràpida, dels carregadors que se situen a la via pública, no té efecte en la recàrrega diürna a cotxera, i el seu efecte sobre el cost de la recàrrega a final d'interval és molt reduïda. En canvi, en el servei amb recàrrega a final de cicle l'augment en la velocitat de recàrrega dels carregadors situats a la via pública redueix el seu cost. Per velocitats de càrrega menors a 11 kWh/min, l'estratègia més eficient és la recàrrega a final d'interval, però per velocitats de càrrega majors a 11 kWh/min, és la recàrrega a final de cicle.

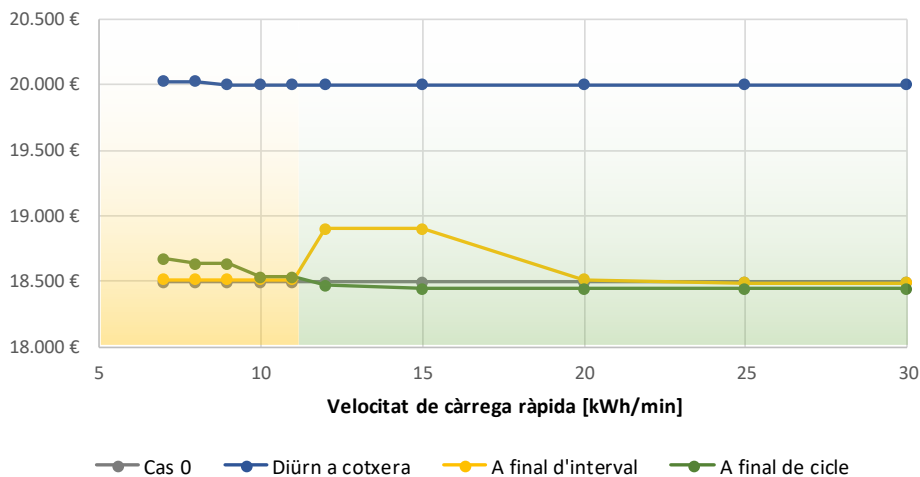


Figura 19. Anàlisi de sensibilitat de la velocitat de càrrega ràpida.

La velocitat de recàrrega dels carregadors situats a la via pública es considera una variable **rellevant**. Tot i que el seu valor no té una repercussió substancial en els costos del servei, és crucial per determinar quina és l'estratègia de càrrega més adient.

#### Velocitat de recàrrega dels carregadors nocturns ( $S_N$ )

Situats a la cotxera. Per a l'obtenció de dades per a aquesta variable s'han realitzat les mateixes consideracions que per a la velocitat de recàrrega dels carregadors diürns.

La velocitat de recàrrega dels carregadors nocturns estàndard s'ha considerat **1 kWh/min**, és a dir que per carregar completament una bateria de 200 kWh serien necessàries 3 h 20 min. S'ha considerat un valor mínim de **0,5 kWh/min** i un valor màxim de **2 kWh/min**.

L'anàlisi de sensibilitat mostra una lleugera reducció en els costos del servei per totes les estratègies de recàrrega quan s'augmenta la velocitat de càrrega a cotxera. Això és degut al fet que, quan els vehicles tornen a cotxera durant el servei perquè no són necessaris durant alguns intervals, es comencen a recarregar en cotxera, independentment de l'estratègia de recàrrega que s'estigui duent a terme. Donat que la reducció en els costos és similar en totes les estratègies de recàrrega, la més eficient és sempre la recàrrega a final de cicle.

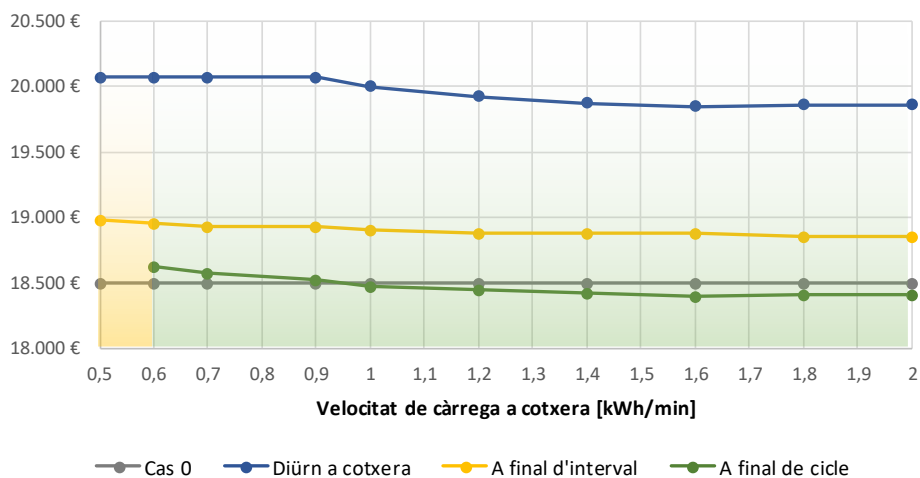


Figura 20. Anàlisi de sensibilitat de la velocitat de càrrega a cotxera.

La velocitat de recàrrega dels carregadors situats en les cotxeres es considera una variable **no rellevant** per al model, ja que la seva variació té un efecte menor en els costos del servei.

### 3.3. Variables pel càlcul de costos de l'operador

Aquestes variables monetitzen els recursos necessaris per operar una línia d'autobús. Els valors depenen de les condicions socioeconòmiques en les quals es trobi la línia, així com la maduresa de la tecnologia que es vulgui adquirir, entre d'altres.

#### *Cost temporal dels vehicles en servei ( $c_{t1}$ )*

Aquesta variable comprèn els costos relatius al temps de circulació dels vehicles, com ara el cost del conductor.

En el model, el cost temporal dels vehicles en servei és de **42 €/veh-h** (dada obtinguda amb informació d'alguns operadors). Aquesta variable es considera independent a la tipologia de vehicles amb què s'operi la línia. No es realitzarà un anàlisi de sensibilitat d'aquesta variable.

#### *Cost temporal de la flota de vehicles ( $c_{t2}$ )*

Aquesta dada inclou el cost d'amortització dels vehicles de la flota així com el cost de manteniment d'aquesta.

El seu valor depèn del cost de compra del vehicle (sense tenir en compte la bateria) i el temps que es calcula que estarà en servei. Així, es pot trobar una diferència substancial entre el cost temporal de la flota depenent de la tipologia de vehicles. Aquesta diferència no només es dona en el preu de compra dels vehicles elèctrics i vehicles convencionals, sinó que també es pot trobar entre vehicles articulats de 18 m, vehicles de 12 m, microbusos, etc.

Per al model, s'ha considerat un preu de compra dels vehicles elèctrics de 900.000 € i una renovació cada 10 anys i un preu de compra dels vehicles convencionals de 300.000 € i una renovació cada 6 anys. Per al cost de manteniment del vehicle, s'ha calculat que en ambdós casos és del 25% del preu de compra i que aquest cost es distribueix de manera uniforme entre els anys que els vehicles estan en servei.

Així, el cost temporal de la flota per al cas 0 és de **7,13 €/veh-h**, mentre que el cost temporal per a vehicles elèctrics és de **12,84 €/veh-h**.

Per realitzar l'anàlisi de sensibilitat es determinen costos de compra mínims i màxims dels vehicles. Per als vehicles elèctrics, es varia el cost de compra entre 750.000 € i 1.200.000 €, mentre que per vehicles dièsel, es varia el cost de compra entre 250.000 € i 400.000 €.

L'anàlisi de sensibilitat mostra que, al variar el cost unitari temporal, els costos totals del servei per a les tres estratègies de càrrega augmenta de manera similar. En canvi, hi ha un augment menys acusat en els costos del servei per al Cas 0. Això fa que les estratègies de recàrrega deixin de ser competitives en costos totals a partir dels 14,5 €/veh-h.

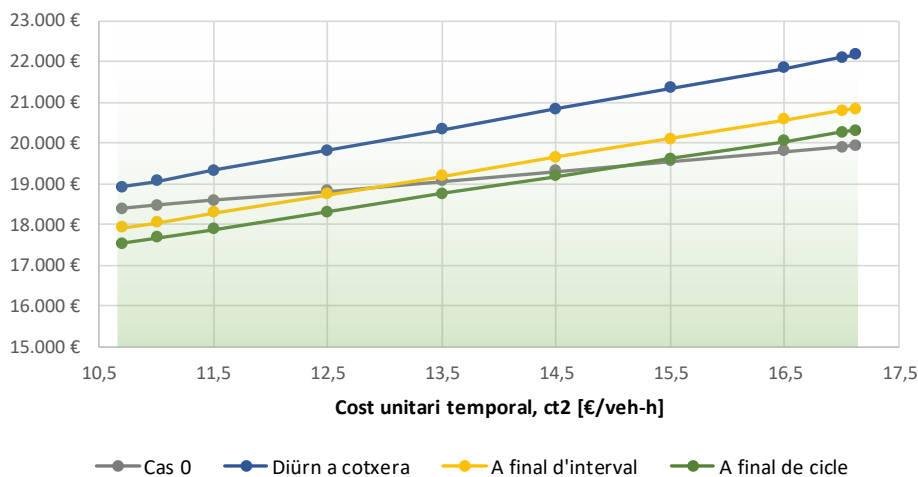


Figura 21. Anàlisi de sensibilitat del cost unitari temporal  $c_{t2}$ .

### Cost dels vehicles per distància recorreguda ( $c_d$ )

Aquesta variable inclou el cost de l'energia elèctric o del combustible. El seu valor varia si es tracta de vehicles elèctrics o vehicles dièsel, donada la diferència entre el preu del combustible i de l'energia.

Per al càlcul del cost per distància del model, s'ha obtingut el preu mitjà del litre de dièsel a Catalunya durant el 2018, de 1,21€/l (Oficina Catalana del Canvi Climàtic, 2019). Alhora, s'ha obtingut la tarifa per defecte de l'energia el 15 de maig de 2019, de 0,12€/kWh (Red Eléctrica de España, 2019).

D'altra banda, també s'ha tingut en compte el factor de consum elèctric mitjà considerat en el model: 1,5 kWh/km i el consum mitjà dels vehicles dièsel: 70l/100km.

En el model el cost per distància recorreguda és de **0,18 €/veh-km** en el cas dels vehicles elèctrics i de **0,85 €/veh-km** en el cas dels vehicles dièsel.

No es realitzarà un anàlisi de sensibilitat del model amb aquest cost.

### Cost de la bateria ( $c_b$ )

Aquesta dada recull el cost de depreciació de la bateria. Es calcula tenint en compte el preu de compra de cada kWh de la bateria, ja que, en general, les bateries de més capacitat solen tenir un cost més elevat.

Donat que la tecnologia que utilitzen les bateries encara s'està desenvolupant, hi ha molta incertesa sobre el cost que podrien tenir en un futur. És per això que, per calcular el cost del kWh de les bateries s'utilitzen tres escenaris: el més restrictiu fixa el cost de compra del kWh en 400 USD/kWh, l'escenari moderat fixa el preu en 260 USD/kWh i l'escenari favorable en 120 USD/kWh (OECD/IEA, 2018).

Així mateix, es considera que les bateries tenen una vida útil d'entre 3 i 5 anys. Si calculem el cost del kWh-h per al cas més restrictiu de cost de compra i la vida útil més restrictiva i, per altra banda, calculem el cost del kWh-h per al cas més favorable de cost de compra i la vida útil més favorable, obtenim els preus màxims de **0,0135 €/kWh-h** i mínim de **0,0024 €/kWh-h**. Així mateix, si calculem el cost per a l'escenari moderat de cost de compra i una vida útil de 4 anys, obtenim el cost estàndard de la bateria: **0,0066 €/kWh-h**.



En l'anàlisi de sensibilitat, es detecta que l'augment dels costos del servei augmenten de la mateixa manera en totes les estratègies de recàrrega. S'observa també que les estratègies de recàrrega a final de cicle i a final d'interval presenten un avantatge gran respecte a estalvi de costos totals fins que el cost de la bateria arriba als 0,010 €/kWh-h.

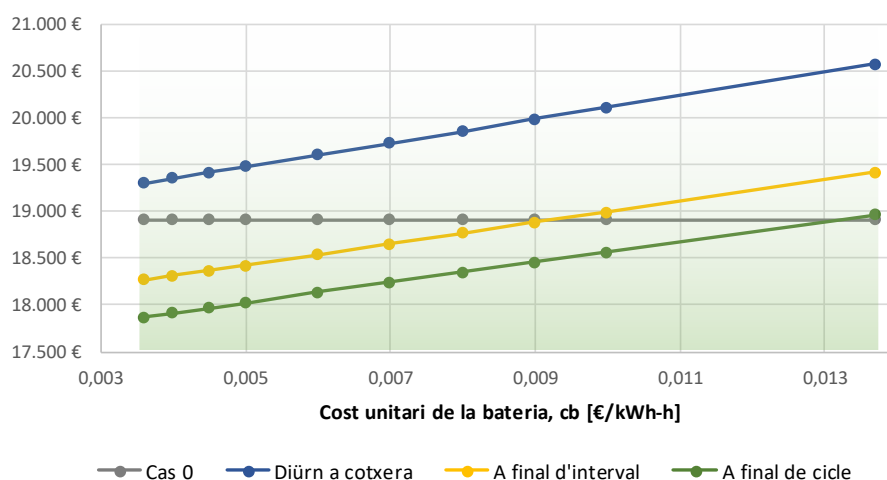


Figura 22. Anàlisi de sensibilitat del cost unitari de la bateria.

#### Cost diari dels carregadors ràpids ( $c_{CD}$ ) i carregadors lents ( $c_{CN}$ )

Aquestes variables representen el cost de disposar dels carregadors de càrrega ràpida a la via pública i de càrrega lenta a la cotxera. Al model, el cost diari dels carregadors ràpids és de **25 €/carregador** i el cost diari dels carregadors lents és de **25 €/carregador**.

Per realitzar una anàlisi de sensibilitat del cost dels carregadors, aquest es varia entre els 15 €/carregador i els 45 €/carregador. En primer lloc es realitza l'anàlisi de sensibilitat per al cost dels carregadors ràpids i, posteriorment, es realitza l'anàlisi de sensibilitat per al cost dels carregadors nocturns.

S'observa que els costos no varien en gran manera amb la modificació del cost dels carregadors ràpids. Amb la variació del cost dels carregadors nocturns els costos varien en major mesura, tot i que la modificació segueix sent molt lleugera.

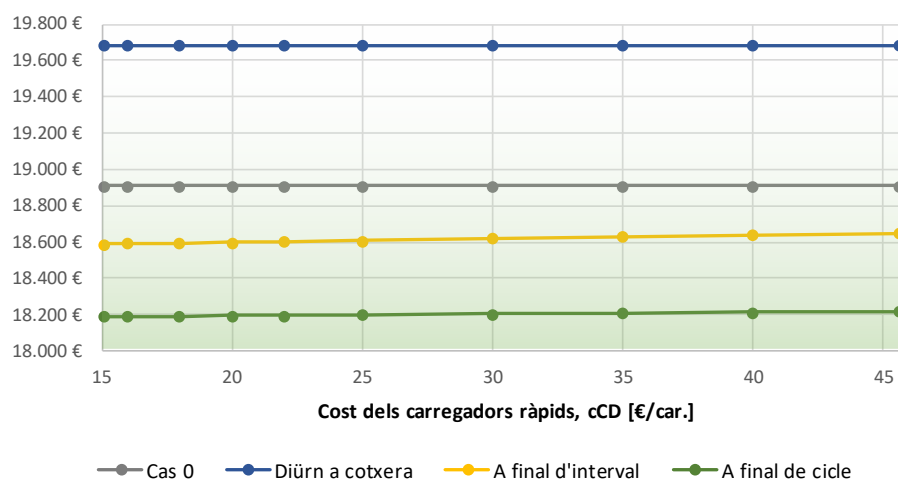


Figura 23. Anàlisi de sensibilitat del cost dels carregadors ràpids.

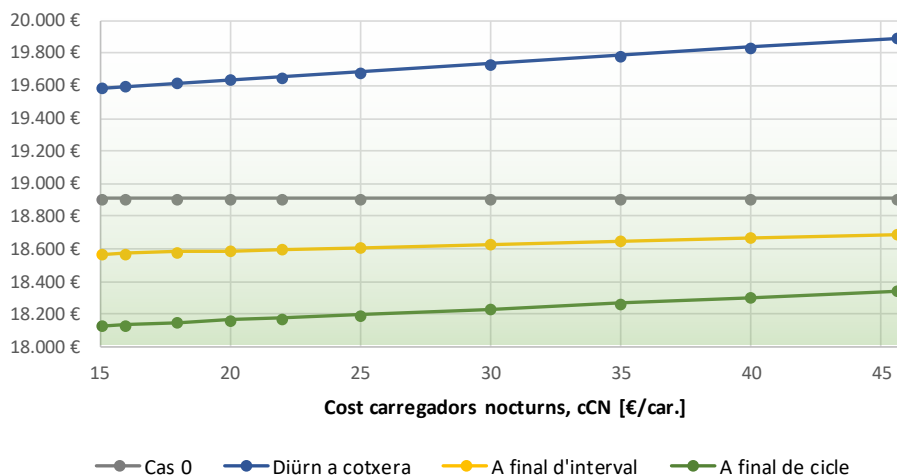


Figura 24. Anàlisi de sensibilitat del cost dels carregadors lents.

### 3.4. Variables per al càlcul d'externalitats

Aquestes variables calculen l'impacte negatiu que el servei té sobre la societat i monetitzen els efectes. En el model es calcularan els impactes relacionats amb l'emissió de gasos contaminants, l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, les emissions de la producció d'energia, l'ús d'espai públic i el soroll.

#### Emissió de gasos contaminants

L'ús de vehicles amb motors de combustió interna provoca l'emissió de gasos que contenen components nocius per a la salut de les persones que s'hi exposen, com ara els òxids de nitrogen ( $\text{NO}_x$ ) o el material particulat (PM), entre d'altres. El diòxid de nitrogen ( $\text{CO}_2$ ) es tracta en el següent apartat, ja que no té un efecte tan nociu sobre les persones que el respiren, però sí que és nociu per al medi ambient.

El cost de les emissions d'un servei d'autobús es calcularan de la següent manera:

$$Z_{GC} = VHKM * (f_{NOX} * c_{NOX} + f_{PM} * c_{PM}) \quad (1)$$

On  $f_{NOX}$ , i  $f_{PM}$  són els factors d'emissió de cada contaminant, és a dir, quants grams per distància s'emeten i  $c_{NOX}$ , i  $c_{PM}$  són els costos associats a cada contaminant, és a dir, quin cost té cada gram de cada contaminant. Finalment, VHKM és la distància total recorreguda per la flota en un dia de servei.

Els factors d'emissió s'obtenen a partir del reglament europeu que regula les emissions màximes que han de tenir els autobusos per ser homologats. Més concretament, es fan servir les emissions màximes de la norma Euro V, vigent entre els anys 2008 i 2014. Els valors es mostren a la següent taula.

Norma	Òxids de nitrogen NOX (g/kWh)	Matèria particulada PM (g/kWh)
Euro V	2	0,02

Taula 8. Emissions màximes permeses a les normes Euro V

Les emissions màximes de les normes Euro V es donen en grams per unitat d'energia. Aquestes dades s'han transformat per obtenir el factor d'emissió dels gasos contaminants per distància

recorreguda. Per fer-ho, s'ha tingut en compte un factor d'11,94 kWh/kg de dièsel, una densitat de dièsel de 0,9 kg/l i un consum mitjà dels autobusos de 70 litres de dièsel cada 100 km.

Els factors d'emissió obtinguts es mostren a continuació.

Norma	$f_{NOx}$ (g/km)	$f_{PM}$ (g/km)
Euro V	15,04	0,015

Taula 9. Factors d'emissió segons les normes Euro V

Pel que fa als costos de cada contaminant, es fan servir els següents:

$c_{NOx}$ (€/g NO <sub>x</sub> )	$c_{PM}$ (€/g PM)
0,0213	0,0223

Taula 10. Costos de les emissions de gasos contaminants

### Emissió de gasos d'efecte hivernacle

Les emissions de CO<sub>2</sub> són les principals causants del canvi climàtic que està patint el planeta. Les externalitats causades per l'emissió de CO<sub>2</sub> en un servei d'autobús es calculen de la següent manera:

$$Z_{CO_2} = VHKM * f_{CO_2} * c_{CO_2} \quad (2)$$

Per calcular les emissions de CO<sub>2</sub> d'un servei d'autobús s'obtenen les emissions de CO<sub>2</sub> produïdes pel consum d'un litre de dièsel: 2.870 g CO<sub>2</sub>/l dièsel (Oficina Catalana del Canvi Climàtic, 2019).

A continuació s'obté el factor d'emissió,  $f_{CO_2}$ , per a un autobús que, de mitjana, té un consum de 70 litres de dièsel cada 100km: **2.009 g CO<sub>2</sub>/km**.

El cost de les externalitats produïdes per les emissions,  $c_{CO_2}$ , és de: 250 €/t CO<sub>2</sub>, és a dir, **0,00025 €/g CO<sub>2</sub>** (European Comissoin, 2019).

### Mix elèctric

S'anomena mix elèctric a les emissions de CO<sub>2</sub> que es produeixen en el procés d'obtenir energia elèctrica. A continuació es mostren les fonts d'obtenció d'energia de l'estat Espanyol durant el 2018 (Red Eléctrica de España, 2019).

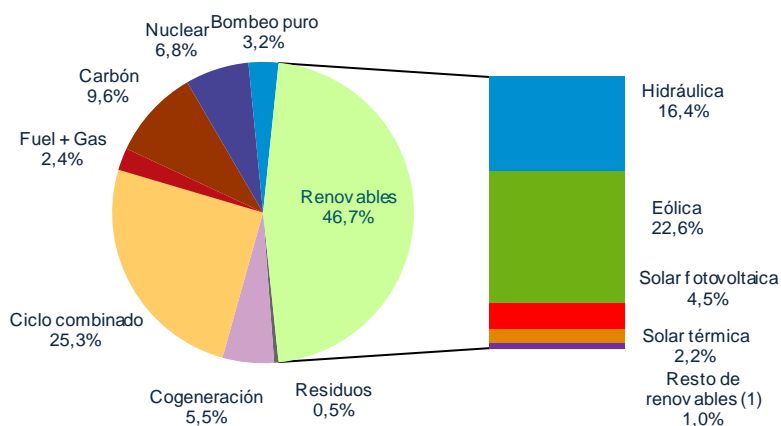


Figura 25. Obtenció de l'energia elèctrica a l'estat Espanyol durant 2018.

L'obtenció d'energia elèctrica a partir de fonts renovables no genera emissions de CO<sub>2</sub>. En canvi, l'obtenció d'energia elèctrica a partir de fonts no renovables emet, de mitjana, 321 g CO<sub>2</sub>/kWh (Oficina Catalana del Canvi Climàtic, 2019).

El mix elèctric que s'utilitzarà en el model té en compte que el 47% de l'energia es produeix amb energia neta, i és de **171,09 g CO<sub>2</sub>/kWh**. Així mateix, s'utilitzarà el cost d'externalitat del CO<sub>2</sub> mencionat anteriorment, **0,00025€/g CO<sub>2</sub>**.

En el model, es calculen les externalitats produïdes en l'obtenció de l'energia elèctrica de la següent manera:

$$Z_{ME} = f_{ME} * f_c * VHKM * c_{CO2} \quad (3)$$

On  $f_{ME}$  és el mix elèctric,  $f_c$  és el factor de consum dels vehicles (1,5 kWh/km),  $VHKM$  és la distància recorreguda per tota la flota al llarg del servei i  $c_{CO2}$  és el cost de les externalitats provocades per l'emissió de diòxid de carboni.

#### Ocupació de l'espai de la via pública

La instal·lació de punts de recàrrega a la via pública produeix un consum d'espai de domini públic que si no s'utilitzés per a la instal·lació de punts de recàrrega, es podria dedicar a altres usos. Les externalitats causades pel consum d'espai públic per la instal·lació de carregadors es calcula de la següent manera:

$$Z_{EP} = N_{CH,D} * f_{EP} * c_{EP} \quad (4)$$

On  $f_{EP}$  és el factor d'espai, que indica la superfície que necessita cada carregador per ser instal·lat, i  $c_{EP}$  és la mitjana del cost de la superfície de sòl industrial a l'Àrea Metropolitana de Barcelona.

Per al model, es considera un factor d'espai de **6,10 m<sup>2</sup>/carregador** i un cost de **0,048 €/m<sup>2</sup>**.

### 3.5. Elasticitat del model

Addicionalment a l'anàlisi de sensibilitat que s'ha realitzat per a cada variable d'entrada i també per als costos unitaris de l'operador, s'estudia l'elasticitat del model per a cada variable. D'aquesta manera, s'obté una comparació de l'impacte que té cada variable en els costos del servei.

L'elasticitat dels costos totals del servei s'ha calculat per diversos valors de cada dada d'entrada utilitzant la següent fórmula:

$$\varepsilon_{Z,\gamma} = \frac{\Delta Z}{\Delta \gamma} * \frac{\gamma_0}{Z_0} \quad (5)$$

On  $\gamma$  és cada variable d'entrada del model i també els costos unitaris,  $Z$  és el cost total i el subíndex 0 indica el valor de referència de la variable.

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

Taula 11. Elasticitat dels costos per les variables d'entrada del model.

Les variables que tenen un major impacte en el model de costos són el temps de pas, la velocitat de circulació i la longitud de la línia.

Tot i això, cal destacar que, algunes variables no provoquen grans canvis en els costos del servei, però si s'observa la seva anàlisi de sensibilitat es veu que són decisives per escollir quina és la millor estratègia de càrrega. Alguns exemples poden ser la capacitat de la bateria, el factor de consum, la longitud entre la línia i la zona de càrrega a la via pública o la velocitat de recàrrega dels carregadors ràpids.

Estratègia	Elasticitat dels costos per variable			
	$c_{t2}$	$c_b$	$c_{CD}$	$c_{CG}$
Diürn a cotxera	0,3517	0,0550		0,0142
A final de cycle	0,3270	0,0511	0,0015	0,0107
A final d'interval	0,3372	0,0527	0,0030	0,0060
Cas 0	0,1781			

Taula 12. Elasticitat dels costos per les variables del càlcul de costos de l'operador.

S'observa que, de les variables de càlcul dels costos de l'operador, l'única que té un efecte important en el model és el cost temporal del vehicle, cost que inclou la depreciació del vehicle.