



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

**DISSENY DE CORREDORS
HÍBRIDS DE TRANSPORT PÚBLIC
AMB PATRONS ESPACIALS
FLEXIBLES**

Treball realitzat per:

Pau Cardona Olives

Dirigit per:

Miquel Estrada Romeu

Grau en:

Enginyeria Civil

Menorca, 14 de setembre de 2021

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Resum

El transport públic col·lectiu ha mostrat la seva eficàcia al llarg dels anys però la rigidesa dels serveis tradicionals dificulta la seva adaptació a situacions de baixa demanda o a usuaris que necessiten una major qualitat del servei.

Com a conseqüència, durant els darrers anys han aparegut noves propostes de línies d'autobús a la demanda (DRT) on es flexibilitza la ruta per oferir un servei més personalitzat a un número menor d'usuaris. Desgraciadament, aquests nous models no compten amb els anys de tradició de les línies d'autobús convencionals i hi ha una mancança de mètodes de disseny que tinguin en compte totes les vessants d'una línia de transport, des de l'assignació de rutes a la rendibilitat econòmica o l'acceptació ciutadana.

Davant aquest fet, aquest treball formularà, estudiarà i validarà una sèrie d'eines, aplicables a diferents etapes del procés de disseny i que facilitin la implementació de sistemes de transport a la demanda.

En una primera etapa, des del punt de vista més acadèmic, s'estudiaran els factors clau pel bon funcionament del servei, es formularan tres models ideals amb el mètode d'aproximacions contínues i es proposarà una estructura tarifària adient.

En una segona etapa, s'aplicaran tots aquests coneixements a un cas aplicat a Ciutadella de Menorca (Espanya), exemplificant una metodologia d'idealització de la realitat, aplicant els models ideals, verificant-los amb un model de simulació microscòpica i finalment materialitzant el servei en un pressupost d'operació.

Paraules clau: *DRT, model d'aproximacions contínues, model microscòpic, rendibilitat econòmica, disseny, validació*

Resumen

El transporte público colectivo ha mostrado su eficacia a lo largo de los años pero la rigidez de los servicios tradicionales dificulta su adaptación a situaciones de baja demanda o a usuarios que necesitan un servicio de mayor calidad.

Como consecuencia, durante los últimos años han aparecido nuevas propuestas de líneas de autobús a la demanda (DRT) donde se flexibiliza la ruta para ofrecer un servicio más personalizado a un número menor de usuarios. Desgraciadamente, estos nuevos modelos no cuentan con los años de tradición de las líneas de autobús convencionales y hay una carencia de métodos de diseño que tengan en cuenta todas las vertientes de una línea de transporte, desde la asignación de rutas a la rentabilidad económica o la aceptación ciudadana.

Ante este hecho, este trabajo formulará, estudiará y validará una serie de herramientas, aplicables a diferentes etapas del proceso de diseño y que faciliten la implementación de sistemas de transporte a la demanda.

En una primera etapa, desde el punto de vista más académico, se estudiarán los factores clave para el buen funcionamiento del servicio, se formularán tres modelos ideales con el método de aproximaciones continuas y se propondrá una estructura tarifaria adecuada.

En una segunda etapa, se aplicarán todos estos conocimientos a un caso aplicado en Ciutadella de Menorca (España), ejemplificando una metodología de idealización de la realidad, aplicando los modelos ideales, verificándolos con un modelo de simulación microscópica y finalmente materializando el servicio en un presupuesto de operación.

Palabras clave: *DRT, modelo de aproximaciones continuas, modelo microscópico, rentabilidad económica, diseño, validación*

Abstract

Collective public transport has shown its effectiveness over the years, but the rigidity of traditional services hinders their adaptation to low demand scenarios or to users who need a higher service quality.

As a result, new proposals for demand responsive transport (DRT) bus lines have appeared during the last years. In this form of transportation the route is flexible in order to offer a more personalized service to a smaller number of users. Unfortunately, these new models do not have the same background and experience as conventional bus lines and therefore there is a lack of design methods that take into account all aspects of a public transport line, from the optimisation of routes to economic profitability or user acceptance.

Given this fact, this work will formulate, study and validate a series of tools, applicable to different stages of the design process in order to facilitate the implementation of DRT systems.

In a first stage, from an academic point of view, the key factors for the good functioning of the service will be studied, three ideal models will be formulated with the method of continuous approximations and an appropriate fare structure will be proposed.

In a second stage, all this knowledge will be applied to a case study in Ciutadella in Menorca (Spain), showing a methodology of idealization of reality, implementing the ideal models, verifying them with microscopic simulation and finally creating an agency budget.

Keywords: *DRT, continuous approximation model, microscopic model, economic profitability, design, validation*

Agraïments

Abans de començar m'agradaria donar les gràcies a totes les persones que m'han ajudar a arribar fins aquí.

En primer lloc agrair als meus pares, na Lina i en Nesto, per haver-me acompanyat, ajudat i inspirat durant 22 anys però sobretot aquests mesos de TFG en els que han sentit parlar d'autobusos dia sí i dia també.

En segon lloc valorar enormement la feina del meu tutor, Miquel Estrada. Gràcies per totes les idees, consells i recursos que m'has donat, per seguir-me virtualment a Barcelona, Hèlsinki i Menorca però especialment per permetre'm començar a entrar al món de la recerca que tant m'apassiona i que gràcies a tu ja conec una mica.

També agrair al gerent d'Autocares Torres, Isidro Bellota, per ajudar-me a aconseguir tota la informació sobre el transport públic de Ciutadella que tant estima i treballa per millorar cada dia.

Per últim m'agradaria donar les gràcies a tots els amics i companys de dins i fora del món universitari per tot el que he après d'ells durant aquests quatre anys de carrera.

Moltes gràcies a tots,

Pau Cardona Olives

Índex

Resum	1
Resumen	2
Abstract.....	3
Agraïments.....	4
Índex	5
Índex de figures	8
Índex de taules	10
1. Introducció i objectius	11
1.1 Objectius del treball	13
1.2 Estructura del treball	13
Capítol I. Estudi acadèmic	15
2. Conceptes previs i estat de l'art	15
2.1 Transport flexible / a la demanda	15
<i>Definició.....</i>	<i>15</i>
<i>Classificació.....</i>	<i>16</i>
<i>Claus per l'èxit.....</i>	<i>17</i>
2.2 Disseny de corredors de transport públic	18
<i>Models ideals.....</i>	<i>19</i>
<i>Simuladors microscòpics.....</i>	<i>20</i>
2.3 Viabilitat econòmica del DRT.....	21
2.4 Acceptació ciutadana del DRT	22
2.5 Corredors híbrids	24
3. Models analítics	25
3.1 Llistat de variables	25
3.2 Hipòtesis	26
3.3 Definició del problema d'optimització	27
3.4 Model convencional	28
<i>Variables de l'usuari</i>	<i>28</i>
<i>Variables de l'agència.....</i>	<i>31</i>
3.5 Model DRT	32
<i>Variables de l'usuari</i>	<i>32</i>
<i>Variables de l'agència.....</i>	<i>34</i>
3.6 Model alpha.....	35
<i>Passos previs.....</i>	<i>36</i>
<i>Variables de l'usuari</i>	<i>37</i>
<i>Variables de l'agència.....</i>	<i>39</i>

4. Anàlisi de sensibilitat dels models	41
4.1 Anàlisi respecte les variables de decisió.....	42
4.2 Anàlisi respecte la demanda.....	48
4.3 Anàlisi respecte la geometria de la zona.....	50
5. Estructura tarifària	53
5.1 Alternatives tarifàries	53
5.2 Particularitats del DRT	55
5.3 Proposta d'estructura tarifària per un DRT	55
6. Conclusions del capítol I	57
Capítol II: Aplicació pràctica.....	59
7. Descripció del cas real	59
7.1 Justificació de la zona d'estudi	59
7.2 Funcionament actual del servei.....	60
7.3 Experiència d'usuari	61
8. Inputs dels models	64
8.1 Geometria.....	65
8.1.1 Model microscòpic.....	65
Acotació de l'àrea de simulació.....	66
Revisió i senyalització	67
Semàfors.....	69
Flux de trànsit.....	71
8.1.2 Model ideal.....	78
Longitud i amplada (L i w).....	79
Espaiament entre carrers (D_s)	79
Velocitat lliure (v)	80
8.2 Demanda.....	82
8.2.1 Model microscòpic.....	82
Zonificació.....	82
Demanda base	84
8.2.2 Model ideal.....	86
Demanda uniforme (λ)	86
Tarifa (θ)	87
Valor del temps (βt)	87
8.3 Vehicle	88
9. Optimització: model ideal.....	90
9.1 Inputs de l'optimització	90
9.2 Resultats i discussió sobre l'optimització	90
10. Verificació: model microscòpic.....	95
10.1 Procediment de simulació	95
Calibratge	95

<i>Distribució d'origens i destins</i>	96
10.2 Resultats i discussió	99
10.2.1 <i>Escenari de matí</i>	99
10.2.2 <i>Escenari d'hora punta</i>	103
11. Justificació del servei òptim	105
12. Pressupost d'operació del servei	106
13. Conclusions del capítol II	109
14. Cloenda del treball	110
Bibliografia i annexos	111
Bibliografia	111
Annex 1: Formulació model alpha amb demanda diferent	113
Annex 2: Codi VBA optimització model alpha	117
Annex 3: Mesura dels cicles semafòrics	120
Annex 4: Codi Matlab per generar punts aleatoris	123
Annex 5: Xarxa final model Aimsun	125

Índex de figures

Figura 1.1: Esquema general del treball.....	14
Figura 2.1: Adequació a la demanda dels FTS (adaptat de (Brake, Mulley, Nelson, & Wright, 2007)).....	16
Figura 3.1: Espai de treball dels models ideals.....	26
Figura 3.2: Esquema del model convencional.....	28
Figura 3.3: Distància mitjana a peu pel servei convencional (en vermell).....	29
Figura 3.4: Esquema del model DRT.....	32
Figura 3.5: Esquema del model alpha.....	35
Figura 3.6: Recorreguts dins el vehicle pels diferents tipus de viatge del model alpha.....	39
Figura 4.1: Distància viatjada en una hora (Q) i la mida de la flota (M) — Interval de pas (H).....	43
Figura 4.2: Distància entre parades (s) i nombre de parades efectives (Se) — Interval de pas (H).....	44
Figura 4.3: Components del temps de viatge ($A, W, IVTT$) — Interval de pas (H).....	45
Figura 4.4: Costos (Zt, Za, Zu) — Interval de pas (H) (només mini bus).....	46
Figura 4.5: Costos totals (Zt) — Interval de pas (H).....	47
Figura 4.6: Costos d'agència (Za) — Interval de pas (H).....	47
Figura 4.7: Cost total per passatger (zt) — Densitat de demanda (λ).....	48
Figura 4.8: Cost de l'agència per passatger (za) — Densitat de demanda (λ).....	49
Figura 4.9: Cost total (zt) — Densitat de demanda (λ) — Alpha (α).....	50
Figura 4.10: Alpha òptima (α) — Densitat de demanda (λ) — Forma (L/w).....	51
Figura 4.11: Alpha òptima (α) — Densitat de demanda (λ) — Forma (L/w) (CAR).....	51
Figura 4.12: Cost total (zt) — Densitat de demanda (λ) — Forma (L/w).....	52
Figura 5.1: Esquema de costos del sistema tarifari.....	56
Figura 7.1: Ruta actual de la L60, vermell anada i lila tornada.....	61
Figura 7.2: Bitllet senzill de la L60 d'autobús, un dimarts d'agost a les 12 del matí.....	61
Figura 8.1: Esquema inputs pel model ideal i microscòpic.....	65
Figura 8.2: Zona aproximada de simulació.....	66
Figura 8.3: Divisió de la xarxa per tipus de via.....	68
Figura 8.4: Localització i nomenclatura de les cruïlles amb semàfors.....	69
Figura 8.5: Exemple de refinament de la xarxa de carrers.....	70
Figura 8.6: Xarxa final de carrers marcant les vies d'entrada.....	71
Figura 8.7: Estacions d'aforament de trànsit del Consell Insular. Font: (Consell Insular de Menorca, 2019).....	72
Figura 8.8: Seccions mesurades a la campanya d'aforament realitzada.....	73
Figura 8.9: Variació de les intensitats horàries de trànsit per mesos. Font: (Consell Insular de Menorca, 2019).....	75
Figura 8.10: Visualització qualitativa del flux de trànsit base simulat.....	77
Figura 8.11: Idealització de l'àrea total.....	78

Figura 8.12: Parelles origen-destí aleatòries pel càlcul de v	81
Figura 8.13: Polígons de Voronoi pels punts de parada de la L60 (realitzat amb (Rodríguez-Sánchez, 2017)).....	83
Figura 8.14: Zonificació de l'àrea d'estudi.....	83
Figura 8.15: Parades corresponents a cada zona.....	84
Figura 8.16: Passatgers totals (3 anys) segons hora del dia i dia de la setmana.....	85
Figura 8.17: Demanda horària (pujades) per parades, pels tres escenaris definits.....	85
Figura 10.1: 7 parells de punts per una simulació DRT homogènia de matí.....	97
Figura 10.2: 14 punts distribuïts proporcionalment entre les zones per l'escenari de matí.....	98
Figura 10.3: Recorregut del DRT en un escenari homogeni de matí.	98

Índex de taules

Taula 3.1: Inputs dels models analítics.....	25
Taula 3.2: Outputs dels models analítics.....	26
Taula 3.3: Variables de decisió dels models analítics.....	26
Taula 3.4: Temps d'accés, d'espera i dins el vehicle pel model alpha.	38
Taula 4.1: Inputs estàndard per l'anàlisi de sensibilitat.	41
Taula 4.2: Costos i capacitat de vehicles estàndard.....	42
Taula 8.1: Tipus de xarxa i les seves característiques.	67
Taula 8.2: Mesures campanya aforament.....	73
Taula 8.3: Coeficients de correcció horària.....	74
Taula 8.4: IMD corregida pels punts mesurats.....	75
Taula 8.5: Mesures trajectes aleatoris pel càlcul de v	81
Taula 8.6: Zonificació de l'àrea d'estudi.....	82
Taula 8.7: Demanda horària agregada per zones.....	86
Taula 8.8: Valors de demanda uniforme (λ).....	86
Taula 8.9: Procés obtenció tarifa mitjana (θ).....	87
Taula 8.10: Costos unitaris del vehicle.	88
Taula 8.11: Càlcul del preu del combustible.	89
Taula 9.1: Inputs de l'optimització amb els models ideals.....	90
Taula 9.2: Densitat de demanda pels tres escenaris.	90
Taula 9.3: Resultats de l'optimització per demanda de matí.....	91
Taula 9.4: Resultats de l'optimització per demanda d'hora punta.	92
Taula 9.5: Resultats de l'optimització per demanda de tarda i dissabtes.....	93
Taula 10.1: Resultats Matí serveis convencionals.	99
Taula 10.2: Resultats DRT Matí amb demanda homogènia.....	100
Taula 10.3: Resultats DRT Matí amb demanda per zones.....	101
Taula 10.4: Resum de diferents simulacions de matí.....	102
Taula 10.6: Resultats feeder DRT i L60 Hora Punta.....	104
Taula 12.1: Pressupost general d'operació d'una línia convencional amb parades flexibles.....	107
Taula 12.2: Partides extres sense valorar per a la inversió inicial d'un servei DRT many-to-many complet.	108
Taula 12.3: Partides extres sense valorar per a la operació d'un DRT many-to-many complet.....	108

1. Introducció i objectius

El transport públic és una de les grans riqueses de la societat actual. No només permet la reducció de les externalitats que provoca l'ús massiu del vehicle privat, sinó que té un efecte democratitzador que garanteix el dret a la mobilitat a totes aquelles persones que no poden utilitzar el cotxe o la moto per desplaçar-se. Desgraciadament, però, no totes les regions tenen una xarxa de transport públic adequada i molts cops és per falta de rendibilitat del servei.

La gran majoria del transport públic entra també en la categoria de transport col·lectiu (vehicles amb més d'un passatger). Aquest sistema de transport es sustenta econòmicament gràcies a les economies d'escala: el cost marginal d'un passatger d'autobús extra és pràcticament zero, però els ingressos han crescut. D'aquesta manera, encara que operar un autobús sigui més car que operar un únic cotxe, quan repartim el preu entre tots, acostuma a ser molt més rendible.

Aquest plantejament té dos problemes. El primer és que per aconseguir acumular prou viatgers en un mateix vehicle, els usuaris (la demanda) són els que s'adapten a l'autobús (l'oferta) i en molts casos la pèrdua de qualitat que això comporta fa que l'usuari s'acabi decantant pel vehicle privat. El segon problema el trobem a les zones on no s'aconsegueix reunir el mínim d'usuaris per assegurar la rendibilitat del transport públic (zones de baixa demanda), on en molts casos l'administració acaba subvencionant un transport públic mínim, ineficient i poc competitiu.

Així, què es pot fer per abordar els problemes del transport públic convencional? La solució passa per obrir la porta a altres sistemes de transport menys col·lectiu (però encara públic) i més personalitzats: els serveis de transport a la demanda. Aquest tipus de transport consisteix en reduir la mida del vehicle i oferir un servei flexible que s'adapti a la demanda i així adequar-se a zones de baixa densitat amb un servei de major qualitat. En principi un pot pensar que un servei personalitzat no pot funcionar per l'augment dels costos però, un usuari que demana un augment de qualitat, no estarà disposat a pagar més per aconseguir-ho? I per una zona amb pocs usuaris, si ja no es podien explotar les economies d'escala i el servei tradicional surt molt car, no seria millor oferir un servei de més qualitat al mateix (i en molts casos menor) cost d'operació?

Aquesta mateixa reflexió l'han feta a molts indrets arreu del món que en els darrers anys han vist l'aparició de nous serveis de transport flexible. El concepte no és precisament modern però la digitalització de la societat actual ha propiciat la reducció dels costos associats a la gestió de rutes i viatges, començant el que per alguns és una revolució del transport públic.

Sense entrar en si és revolució o no, el que sí podem assegurar és que el transport a la demanda és un concepte prometedor però a qui li manquen eines per a la seva efectiva implementació. És difícil dissenyar un servei eficient quan moltes de les eines i l'experiència estan enfocades exclusivament al disseny i operació de línies convencionals. De fet, en els darrers anys hem vist tant aparicions com desaparicions de serveis a la demanda i és que, encara que hi hagi nombrosos estudis sobre el paper, manquen eines que tinguin en compte en la capa física (materialització del servei), la gestió econòmica (que asseguri la rendibilitat), l'experiència d'usuari i la regulació politicoadministrativa, entre altres.

Així, aquest treball pretén estudiar i proposar eines i mètodes a tots els nivells del procés de disseny, que permetin incloure una perspectiva integral necessària i aportar així un valor tant acadèmic com aplicat a la producció científica actual sobre disseny de transport a la demanda. Per fer-ho es partirà d'una contextualització teòrica, que portarà a la formulació de tres models ideals d'aproximacions contínues i una estructura tarifària. Un cop analitzats des del punt de vista acadèmic, els tres models s'optimitzaran per un cas d'estudi a Ciutadella de Menorca, exemplificant la idealització de la realitat necessària i validant la seva bondat amb una simulació microscòpica. Finalment es tancarà el procés de disseny materialitzant el servei amb un pressupost d'operació.

No deixarem passar cap revolució de la mobilitat per falta d'eines; anem per feina.

1.1 Objectius del treball

El principal objectiu d'aquest treball és **proporcionar eines de disseny i optimització de sistemes de transport a la demanda i validar-les amb un cas pràctic.**

Per arribar a aquest objectiu es necessiten assolir una sèrie de fites menors, que podem resumir en:

- Descriure els sistemes de transport a la demanda i **localitzar els punts claus per una implementació exitosa**, abordant els reptes i limitacions a nivell d'eines de disseny, viabilitat econòmica i acceptació ciutadana.
- Plantejar el problema d'optimització i **formular models ideals** per serveis convencionals, a demanda i híbrids que el resolguin.
- Analitzar en un espai estàndard el **rang de solucions del problema d'optimització.**
- Analitzar i **proposar un esquema tarifari** adaptat a un servei a la demanda.
- Plantejar un **exemple de metodologia per adaptar les característiques d'un cas real** als inputs necessaris per un model ideal o un model microscòpic.
- Optimitzar un servei real i utilitzar un model microscòpic per **validar els resultats dels models ideals** i detectar possibles millores.
- Realitzar un **pressupost** per la solució escollida pel cas real.

1.2 Estructura del treball

El treball s'estructura principalment al voltant de la totalitat del procés de disseny, des de l'estudi de la teoria fins la realització del servei. Així, s'anirà seguint el camí natural d'aquest procés, amb dos desviaments per analitzar el funcionament dels models de disseny. A més, per separar les parts més generalistes del cas pràctic particular, es separa el treball en dos capítols:

- Capítol I: Estudi acadèmic
- Capítol II: Aplicació pràctica

A la Figura 1.1 visualitzem l'esquema principal del treball, amb el número de secció on es tracta cada tema. Els números de secció que no apareixen són apartats d'introducció, presentació del cas o conclusió.

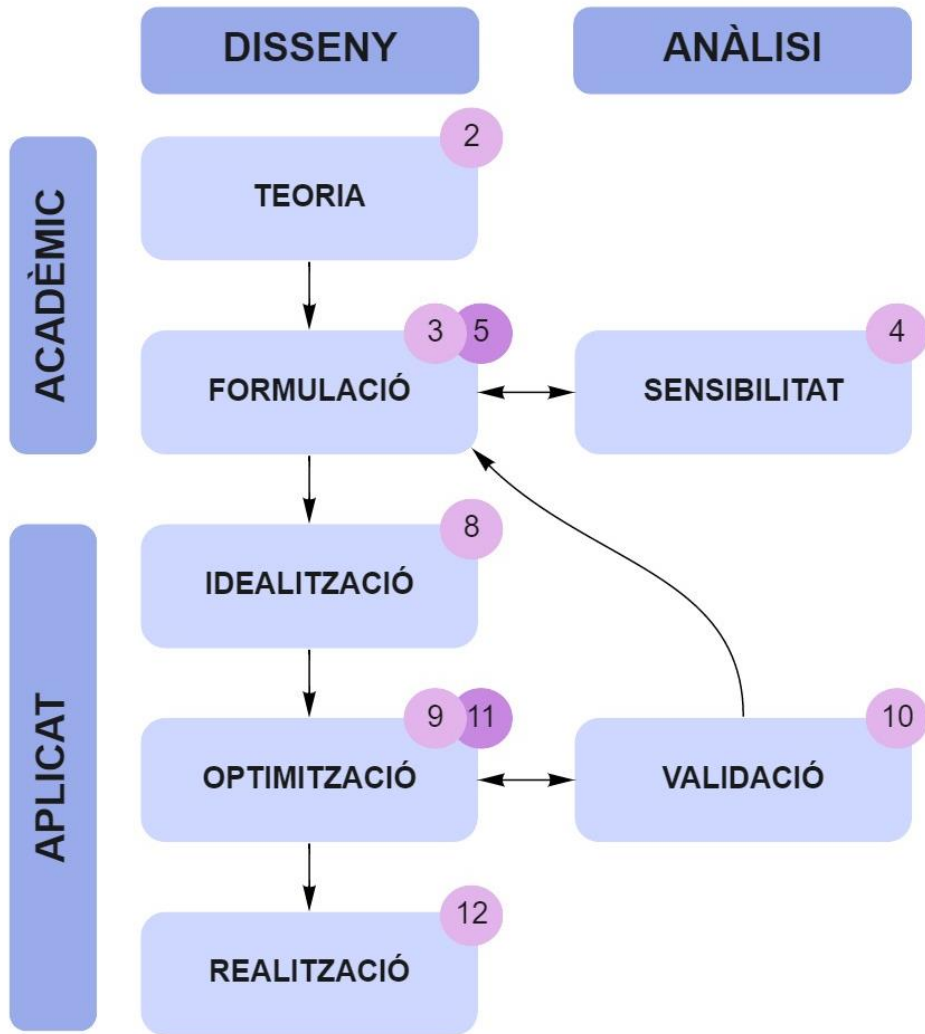


Figura 1.1: Esquema general del treball.

Capítol I. Estudi acadèmic

2. Conceptes previs i estat de l'art

Aquest treball es titula *Disseny de corredors híbrids de transport públic amb patrons espacials flexibles* així que es començarà per explicar i discutir, part per part, el títol. D'aquesta manera en les següents pàgines es definiran els principals conceptes relacionats amb el transport flexible, el disseny de corredors de transport públic i els corredors híbrids a partir d'informació trobada a la literatura i el propi coneixement sobre el tema.

2.1 Transport flexible / a la demanda

Definició

Entenem com transport flexible o **Flexible Transport Services (FTS)** els serveis de transport on almenys una de les característiques (ruta, vehicle, horari, passatgers i sistema de pagament) no està fixada (Mulley, Nelson, Teal, Wright, & Daniels, 2012), al contrari del que passa amb les línies tradicionals.

D'altra banda, quan parlem de transport a la demanda o **Demand Responsive Transport (DRT)** ens referim a un subgrup dintre dels FTS on la provisió diària del servei està influenciada per la demanda dels usuaris (Derek Halden Consultancy, 2006). Així, el que defineix els DRT és el seu grau de personalització, omplint tota l'escala de grisos entre una línia d'autobús convencional (la demanda s'adapta al servei) i un servei de taxi (el servei s'adapta a la demanda) (Engels & Ambrosino, 2004).

Ambdós conceptes són similars i força generals i és comú utilitzar-los junts. De fet, un pot plantejar un sistema de DRT flexibilitzant un o més característiques del FTS, com podem veure a la Figura 2.1. De totes maneres, la gran majoria de DRT tendeixen a basar-se en la flexibilització de la ruta (els patrons espacials) apropant als passatgers a la seva destinació final i eliminant el recorregut de la parada al destí (servei porta a porta), com serà el cas del model proposat en seccions posteriors.

Aquesta flexibilitat pot suposar grans beneficis per tots els involucrats en el sistema de transport, ja sigui personalitzant el servei a cada usuari o reduint costos de l'agència durant hores vall. Un dels beneficis més comuns del porta a porta acostuma a ser ajudar a persones amb mobilitat reduïda i garantir així la seva independència, així com oferir un servei més còmode i de major qualitat pel públic general.

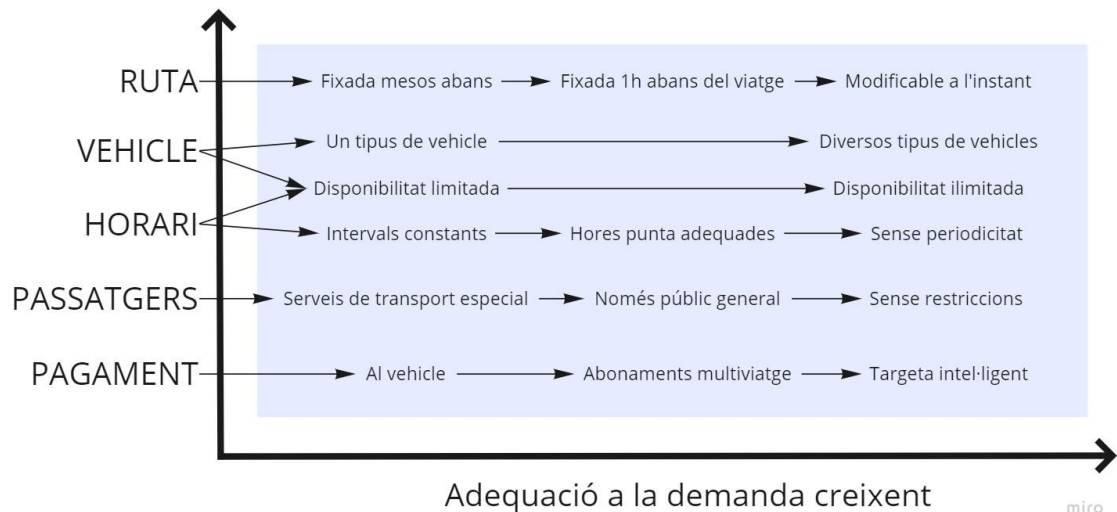


Figura 2.1: Adequació a la demanda dels FTS (adaptat de (Brake, Mulley, Nelson, & Wright, 2007)).

Classificació

Tenint en compte que els DRT abasten un gran nombre de serveis diferents, és necessari classificar-los per així entendre'n les diferències. Trobem a la literatura un gran nombre de classificacions però ens centrarem en agrupar els serveis segons la seva relació amb la resta de serveis convencionals (Enoch, Potter, Parkhurst, & Smith, 2004) o en funció de la planificació o tipus d'operació que es serveix (D'este a (Currie & Fournier, 2020)).

La primera categorització de DRT, **segons la relació amb el serveis tradicionals**, divideix els sistemes en quatre grups:

1. **Interchange DRT**: quan es proporciona un servei d'alimentació o *feeder* a la xarxa convencional de transport públic.
2. **Network DRT**: quan es millora la xarxa convencional ja sigui tant afegint nous serveis com substituint línies ineficients.
3. **Destination-Specific DRT**: quan es serveix un destí particular com per exemple un aeroport.
4. **Substitute DRT**: quan el servei a demanda substitueix completament la xarxa tradicional.

D'altra banda i fixant-nos en aspectes més tècnics dels serveis, podem dividir els DRT **segons el tipus d'operació**:

1. Many-to-one: la demanda es concentra a un dels dos extrems de la línia, simplificant considerablement les operacions.
2. Many-to-few: hi ha més d'un destí a un dels extrems de la línia però encara prou pocs per ser manejables.
3. Many-to-many (transfer): els passatgers poden tenir qualsevol origen o destí però potser necessitaran fer transferències.
4. Many-to-many: els passatgers poden tenir qualsevol origen o destí amb servei directe.
5. Shared taxis: servei convencional de taxi on més d'un usuari pot viatjar al mateix vehicle, incloent desviacions de la ruta.

Els nostres models de DRT, per la naturalesa de l'espai ideal en el que es treballarà (un únic corredor, amb demanda homogènia), seran network DRTs amb operacions many-to-many.

Claus per l'èxit

Per dissenyar un DRT útil i durader, s'han de tenir en compte un gran nombre de factors, passant pel disseny, la rendibilitat econòmica i l'acceptació ciutadana. Currie & Fournier, 2020 recull les idees de diferents autors sobre experiències prèvies de serveis a demanda i les seves recomanacions, d'on s'extreuen els següents **consells a per un pròsper DRT**:

1. Dissenyar un servei simple: els serveis many-to-many o substitutius no tendeixen a prosperar i necessiten tenir ingressos i funcionament assegurats. És millor proposar un servei:
 - Fàcil d'operar (many-to-few o basat en *detours*).
 - Utilitzant vehicles petits per reduir costos.
 - On les noves tecnologies facilitin tot el procés, tant pels usuaris com d'operació.
 - Bo d'entendre i assimilar per tots els actors.
2. Adaptar el preu al cost/qualitat del servei: personalment el consell més important i el que ha suposat la majoria de retirades de servei a Europa. Es pot fer:
 - Reduint costos (i potser qualitat).
 - Pujant els preus generals del bitllet.
 - Justificant subsidis més alts servint grups de població especials (no oblidem que la mobilitat és un dret per a tothom).
 - Creant diferents nivells de servei on qui vulgui o necessiti un servei de major qualitat pagui més.
 - Qualsevol altra estratègia.

3. Assegurar la confiança: les persones tendim a desconfiar del desconegut i s'ha d'assegurar la confiança d'operador, administració i usuaris abans de la implementació. Molts serveis han fallat perquè algunes parts s'han tirat enrere abans de completar el projecte inicial o perquè el servei no era fàcil/accessible pels usuaris. Per això, s'ha de fer bona publicitat d'un servei nou però lògic i comprensible per tothom.
4. Triar bé la zona de servei: els DRT no són òptims a tot arreu però funcionen molt bé per:
 - Zones de baixa demanda.
 - Amb el desenvolupament urbanístic pràcticament complet.
 - On els carrers no siguin extremadament sinuosos.
 - On el servei públic tradicional no estigui funcionant.
 - On hi hagi nínxols de mercat com persones amb mobilitat reduïda, on uns majors subsidis estarien justificats.

En el context d'aquest treball es tractaran els quatre punts en diferent mesura, ja sigui de manera exclusivament teòrica (confiança), fent propostes de disseny (estructura tarifària) o amb una aplicació pràctica (triar bé la zona). De totes maneres, el punt fort i que estructurarà totes les parts del treball serà pròpiament el disseny del servei, proporcionant eines d'optimització i validació per prendre decisions justificades a l'hora d'implementar un DRT.

2.2 Disseny de corredors de transport públic

Podem definir un **corredor de transport** com un eix o passadís, unitat bàsica de la xarxa completa de transport, que connecta àrees allunyades geogràficament. Si la mobilitat a través d'aquest eix es fa amb un servei públic, és un corredor de transport públic.

En general, un servei de transport operarà, com a mínim, al llarg de tot un corredor (a l'escala que sigui). Així, es defineixen corredors per facilitar el procés de planificació i disseny i poden unir-se amb altres corredors en diversos punts, formant una xarxa més o menys densa.

En el nostre cas ens centrarem en el corredor com unitat diferenciada i optimitzarem la mobilitat dins aquesta mateixa unitat, sense tenir en compte les repercussions a la resta de la xarxa. De totes maneres, els avanços fets a nivell d'un corredor acostumen a poder-se replicar a la resta de serveis i, per tant, escalar a nivell xarxa.

Per fer aquesta optimització i disseny, ens ajudarem de diferents **sistemes de modelització** de la realitat, per diferents nivells de detall. I és que en el món de la

mobilitat i de l'obra pública en general, es pot dir que no hi ha prototips. Qualsevol implantació al món real té un cost molt alt així que tot s'ha de validar per endavant, a l'etapa de disseny.

Per fer-ho s'utilitzen tot tipus de models i simulacions però en el nostre cas n'utilitzarem dos, diferents i cadascun adequat per un cert nivell de detall: un **model ideal pel mètode d'aproximacions contínues** (per un disseny estratègic, optimització) i una **simulació microscòpica** (per imitar amb el màxim detall tots els comportaments del món real, validació). A més, es compararà el rendiment d'ambdós models per definir un rang de confiança dels resultats de cadascun.

Models ideals

Els models ideals d'aproximacions contínues es troben a la primera etapa del procés de disseny, al punt de planificació estratègica. Tenen l'objectiu de donar a l'enginyer **resultats ràpids i una explicació senzilla de com funciona un servei** perquè pugui desenvolupar una intuïció sòlida i aplicable a les seves decisions de disseny. Així, aquest models ideals són prou flexibles i al mateix temps fiables com ser una eina d'**optimització**, a partir de la qual es tria l'esquema general de servei.

El concepte d'aproximació contínua és proposat per G. Newell al 1971 per abordar problemes de logística sense necessitat d'utilitzar models discrets, que poden necessitar grans quantitats de poder de càlcul, ser sensibles a inputs poc precisos i difuminar el funcionament del sistema, minvant el coneixement sobre el problema. En l'àmbit de l'estudi de rutes, on entren els models que es proposaran en aquest treball, C. F. Daganzo n'és un referent gràcies a les seves propostes en sistemes d'entrega amb un vehicle (*traveling salesman problem*) o multivehicle (Ansari, Basdere, Li, Ouyang, & Smilowitz, 2018).

La clau d'aquest mètode és descompondre el problema gran en petits processos controlats amb configuracions assimilables a homogènies (sense efectes estocàstics, o amb efectes controlats). Així, de la suma d'aquestes funcions d'aplicació local es treu un output general vàlid (Ansari, Basdere, Li, Ouyang, & Smilowitz, 2018).

A més, es caracteritza per ser una idealització de la realitat que no ha de necessitar una gran quantitat d'inputs per treure resultats. De fet, com aquests inputs s'obtidran en una etapa primitiva de disseny, és possible que no siguin extremadament precisos i, per tant, el model ha de ser prou convergent per no ser sensible a aquestes variacions. Tot això sense deixar de donar resultats correctes (dins un rang de confiança adequat) i que expliquin bé els comportaments de la realitat.

A més, com part de l'objectiu és promoure no només la modelització sinó l'enteniment de la realitat, els inputs han de tenir significat físic. No es tracta d'una regressió que

haguem de calibrar per treure coeficients màgics, sinó d'una vertadera idealització de tots els processos que es donen a la realitat, a partir de variables amb significat tangible.

Per aconseguir tots aquests requisits es simplifica la realitat amb termes de geometria bàsica, seguint vàries **estratègies**:

- **Simplificació**: reduïm l'espai de treball a un rectangle perfecte, simplifiquem els costos del vehicle a costos unitaris per distància o temps, carrers i distàncies ortogonals, etc.
- **Homogeneïtzació**: demanda uniforme a tota la zona (o uniforme per subzones), costos del temps de viatge constants, xarxa de carrers igual, intervals de pas constants, etc.
- **Divisió de processos**: separem el temps gastat per un usuari en accés, espera i viatge, idealitzem el temps de viatge com temps a velocitat lliure, menys pèrdues per frenada, menys pèrdues per pujada i baixada de passatgers, etc.

Cada professional pot decidir quin nivell d'idealització vol pel seu model, conseqüència de l'equilibri entre quantitat i precisió dels inputs, temps computacional i qualitat del resultat. De totes maneres, els models han de sorgir del conjunt de processos individuals que es segueixen al llarg de l'operació i ús del servei, per garantir que els resultats són intuïtius i es poden aplicar en etapes posteriors de disseny.

Finalment, en quant al procés concret d'optimització, s'acostuma a traduir totes les variables a indicadors monetaris, per així optimitzar i aconseguir el menor cost. En el nostre cas (i en molts altres a nivell estratègic) s'optimitzarà per aconseguir el **mínim cost per la societat** en el seu conjunt, és a dir, es pren la solució més barata, comptant costos de l'operador i dels usuaris al mateix nivell.

Simuladors microscòpics

Un **simulador microscòpic** és una eina que representa el flux de vehicles a través de la xarxa viària de manera realista, simulant els vehicles un a un, de manera discreta. Aquest models estan validats com una eina potent per representar completament les dinàmiques del flux de trànsit i permeten incloure tot tipus de submodels de comportament per diferents parts de la simulació (Barceló & Casas, 2005).

Generalment, aquesta simulació microscòpica es deriva dels **models de seguiment de vehicles** desenvolupats pel General Motors Group als anys cinquanta. Els models de GM, que van anar creixen en complexitat amb els anys, seguien una estructura molt simple que es replica per tots els vehicles i s'itera per cada increment de temps:

$$Resposta_{n+1}(t + T) = Sensibilitat \cdot Estímul_n(t) \quad (2.1)$$

Bàsicament, la resposta del vehicle posterior ($n + 1$) es dona passat un cert temps de reacció (T) i depèn de l'estímul provocat pel vehicle anterior (n) modificat per una certa sensibilitat a aquest estímul.

Aquest model s'aplica després a un sistema de **modelització per agents**, on totes les entitats físiques relacionades amb la mobilitat (cotxes, autobusos, carrers, interseccions, etc.) passaran per una seqüència d'estats en funció de les seves interaccions amb la resta d'agents. A més, els models per agents inclouen també altres models per tota la resta de comportaments: canvi de carril, espaiament entre vehicles, transport públic, etc. D'aquesta manera es crea una còpia virtual de la ciutat, cada cop amb més precisió, on els agents es mouen seguint les normes fixades pels models. Així es poden simular noves propostes en un espai realista sense els elevats costos (monetaris i polítics) associats a la implantació d'un pla pilot.

Tot això es pot fer en diversos **programes comercials** que van millorant cada any per incloure nous models i funcionalitats, com per exemple l'utilitzat en aquest treball, Aimsun Next. Aquest software ja té un quants anys d'història (el primer prototip és de 1986) i el van originar antics membres del Laboratori de Simulació i Investigació Operativa de la UPC. Actualment forma part del grup Siemens i és un dels programes més utilitzats en aquest aspecte, comparable amb el líder del sector PTV VISSUM.

En el nostre cas s'ha triat utilitzar Aimsun Next per ser un software potent i accessible pel desenvolupament d'aquest treball. A més, la definició de variables és senzilla i necessita poc calibratge (Chaudhry & Ranjitkar, 2009) i està recomanat per l'estudi de grans àrees urbanes (Saidallah, 2016).

2.3 Viabilitat econòmica del DRT

Passem del disseny al model de negoci, per assegurar que els sistemes dissenyats siguin rentables i durin en el temps. I és que encara que els sistemes de transport flexible hagin guanyat popularitat en els últims anys i estiguin a l'ordre del dia en temes de mobilitat, no és un concepte ni nou ni amb rendibilitat assegurada. De fet, trobem sistemes DRT sorgits als anys 70 i alguns d'ells encara en funcionament (després de ser modificats/actualitzats). Encara així, més de la meitat dels sistemes a tot el món fan fallida abans dels 7 anys de servei, molts d'ells durant menys de 2 anys (Currie & Fournier, 2020). Així, anem a detectar els punts crítics d'aquests serveis per tenir-los en ment a l'hora de dissenyar.

Cada servei DRT té unes característiques particulars i les causes que puguin provocar la seva caiguda són també variades. De totes maneres, podem trobar certs problemes generalitzats, sobretot si acotem una mica la zona d'estudi. L'experiència europea (on la taxa de fallida és inferior a altres regions) suggereix que la principal barrera per la implementació i la causa de que desapareguin part dels serveis és la viabilitat econòmica (Mulley, Nelson, Teal, Wright, & Daniels, 2012). La gran majoria de línies de servei públic, excepte casos molt particulars com els transfers a aeroports, necessiten algun tipus de subsidi per assegurar la viabilitat del servei sense imposar tarifes desorbitades. En la majoria de sistemes a demanda però, aquest subsidi és molt elevat; i és que, com s'acostuma a sentir, molts DRT ofereixen un **servei propi del taxi a preu de transport públic**.

Podem fixar-nos en un dels exemples més coneguts a Europa, el servei Kutsuplus a Helsinki entre els anys 2012 i 2015. El projecte era un DRT a gran escala que realment competís amb el vehicle privat. Desgraciadament el pilot es va tirar enrere abans d'arribar a l'etapa d'expansió per problemes econòmics, no per falta de demanda. El cost mitjà de la tarifa era d'uns 5€ però la subvenció associada per viatge era de 17€ i l'administració va cessar el servei per la controvèrsia de córrer amb més del 75% dels costos (Sulopuisto, 2016).

Així, és clau no només dissenyar un servei òptim sinó també un esquema tarifari adequat que pugui assegurar tant l'accessibilitat com la rendibilitat econòmica del servei. A més, cal tenir en compte que en molts casos el públic general és més sensible a les variacions de qualitat del servei que a la tarifa (Robusté & Pérez, 1999) i acostuma a assumir bé increments tarifaris raonables si van acompanyats de millores en el servei. De totes maneres, implantar un servei completament nou sempre provoca incerteses a la societat, com veurem en el següent apartat.

A més, a la secció 5 d'aquest treball s'aprofundirà en la discussió sobre esquemes tarifaris i es farà una proposta que tingui en compte les particularitats del DRT.

2.4 Acceptació ciutadana del DRT

Com qualsevol canvi, implementar un nou servei (en aquest cas a la demanda) sempre porta incerteses associades que no tots els actors estan disposats a assumir. Per aquesta raó és necessari que un DRT, a més de donar un bon servei, tingui la confiança d'administració, operador i, especialment, els usuaris. Perquè potser el servei a la demanda és òptim i beneficiós per a la comunitat però, és el que els ciutadans volen?

Per intentar tenir una imatge general de l'acceptació ciutadana podem mirar els resultats de serveis reals que estiguin o hagin estat en funcionament. A la majoria de

grans ciutats ja és comú poder demanar un taxi o un vehicle compartit mitjançant una aplicació mòbil. Ja sabem que la majoria d'aquests serveis quedarien fora del DRT ja que són un servei de taxi, però ens serveix per veure la facilitat de la població per **adoptar la part tecnològica** i l'únic esforç extra que suposa el DRT: sol·licitar el viatge. Segons (Clewlow & Mishra, 2017), el 30% de la població de les grans ciutats americanes ha utilitzat aquest servei (*ride-hailing*) en algun moment i una quarta part d'aquests l'utilitza més d'un cop per setmana. Els usuaris tendeixen a ser població jove, educada i amb majors ingressos. Potser la dada més interessant i que podem extrapolar als DRT és que una tercera part dels usuaris només utilitzen *ride-hailing* amb amics i mai han instal·lat l'aplicació per el servei ells mateixos. Així, s'ha de posar especial interès en l'accessibilitat per demanar els viatges perquè inclús a les grans ciutats, on les habilitats tecnològiques són majors que a les zones rurals, una part important dels usuaris no demana el servei per ells mateixos.

Podem tornar també al servei Kutsuplus a Helsinki. Aquest sí era un servei completament de DRT i, a pesar de la fallida, va complir els objectius d'accessibilitat tecnològica i **acceptació ciutadana** (Sulopuisto, 2016). Segons (HSL, 2016) els usuaris van valorar molt positivament la possibilitat de demanar el servei multi plataforma i tant immediatament com amb fins un dia d'antelació. A més, com a futures ampliacions que mai van arribar, els usuaris consideraven important integrar el pagament per avançat amb la targeta de transport metropolitana (i que realment s'utilitza per pràcticament qualsevol cosa a la ciutat). En resum, la satisfacció dels 21000 ciutadans registrats era excepcionalment alta encara que el servei costés pràcticament 10 cops més que el transport públic convencional i hi hagués només 15 vehicles i una àrea petita en funcionament.

De fet, Kutsuplus és paradoxalment un exemple de gran acceptació ciutadana i poca **confiança de l'administració**. I és que segons membres de l'autoritat de transport, els problemes econòmics es devien a que els vehicles estaven dissenyats per ocupacions altes i desapareixerien amb l'extensió total del servei. L'administració però, no va permetre que acabés la implantació i per tant, mai es va arribar a nivells de rendibilitat acceptable (Sulopuisto, 2016). Veiem doncs com no només s'ha de tenir la confiança dels usuaris, sinó de totes les parts implicades.

Si ens movem cap a **zones més rurals**, amb serveis DRT més petits, veiem que les prioritats dels ciutadans no són tant diferents. Observant els resultats a dues zones rurals d'Alemanya (König & Grippenkov, 2020) veiem que els paràmetres que més faciliten el servei són la confiança en què el servei funcionarà bé i l'accessibilitat per demanar viatges; i que el principal inconvenient és la facilitat i actitud positiva envers el vehicle privat. Així, incloem la importància d'explicar i promocionar bé el servei a unes societats acostumades a la simplicitat del cotxe o el transport públic convencional. A més, els usuaris de transport públic en aquests entorns acostumen a

ser usuaris que no poden utilitzar el cotxe (joves i tercera edat) i per tant l'accessibilitat no s'ha de centrar només en el públic general, sinó en aquestes parts de la població que no acostumen a tenir altes habilitats tecnològiques.

En resum, a mesura que els serveis a demanda es van estenent, parts de la societat s'adapten al nou servei. Els dos factors principals per l'acceptació i confiança ciutadanes són la facilitat per demanar el servei i el coneixement de que funcionarà bé (que ja tenen moltes zones urbanes). De totes maneres, cal tenir en compte que, de moment, els DRT s'utilitzen quan no es pot fer servir el cotxe.

2.5 Corredors híbrids

Un cop vist de forma general quina és la metodologia de modelització i les possibilitats que té el transport a la demanda, passem al darrer adjectiu del títol que en falta explicar: híbrids. Hem vist que els DRT donen un servei més personalitzat però que poden tenir problemes de rendibilitat importants. Per aquesta raó, es pensa en un sistema híbrid o mixt, que combini trams de servei convencional amb trams DRT.

Realment, es podria definir com **corredor híbrid** tot aquell que combini diferents tipus de servei, ja sigui convencional amb DRT com un servei Hub and Spoke que es vagi ramificant, o un servei que combini vehicles normals amb vehicles exprés. La clau està en què es mantingui la continuïtat en el corredor dintre del possible per no acabar amb un corredor tradicional + transferència + alimentador (*feeder*) DRT. De totes maneres aquesta definició és flexible i, una mica com la definició de models a la demanda, inclou totes les solucions que combinin serveis.

D'aquesta combinació de serveis se'n poden extreure dos **resultats** principals:

1. Sinèrgia: aconseguir un servei òptim en si mateix, amb un nínxol d'aplicació propi i que sigui més competitiu que els serveis per separat.
2. Compromís: que la solució no sigui òptima en cap regió en concret però que serveixi per abaratir costos quan la voluntat política o social sigui implementar el servei més car.

En general, un pot esperar que el resultat sigui de sinèrgia quan el corredor passa per regions físicament diferents i que cal integrar i, per tant, té sentit implantar serveis personalitzats a cada regió. En el nostre estudi, amb la metodologia d'aproximacions contínues i models ideals, tota la regió de l'espai tindrà les mateixes característiques així que probablement hauríem d'esperar una solució de compromís.

3. Models analítics

En aquesta secció descriurem els tres models de ideals que s'estudiaran, així com les variables, les hipòtesis i el problema d'optimització. Els dos primers casos (el model de línia convencional i el model de DRT) parteixen dels proposats a (Estrada, Salanova, Medina-Tapia, & Robusté, 2020) i només han sofert partits canvis de formulació o hipòtesis. El tercer model (model mixt o model alpha) sí és de producció pròpia i sorgeix de la combinació dels dos models anteriors, per acabar sent la generalització dels tres. De fet, només serà necessari utilitzar pròpiament el model mixt, però explicar els seus predecessors per separat ajuda a clarificar quines són les hipòtesis i els mètodes de construcció que s'han emprat.

3.1 Llistat de variables

Al llarg dels models s'aniran utilitzant nombroses variables i, encara que s'intentarà explicar què signifiquen en tot moment, és possible que sorgeixin moments de dubte sobre el significat d'un símbol. Així, fem el recull de tots els símbols i variables utilitzats, agrupats en inputs, outputs i variables de decisió.

	Nom	Símbol	Unitats
Geometria	Longitud de la ruta	L	km
	Amplada de la banda	w	km
	Distància entre carrers	D_s	km
	Velocitat de creuer	v	km/h
Vehicle	Capacitat del vehicle	C	pax
	Acceleració ^(*)	a	m/s^2
	Temps de pujada o baixada ^(*)	τ'	s/pax
	Cost unitari per distància	c_d	$€/km$
	Cost unitari per temps	c_t	$€/veh \cdot h$
	Variància de l'interval de pas ^(*)	s_H^2	h^2
	Interval de pas mínim ^(*)	H_{min}	min
Demanda	Densitat de demanda per hora	λ	$pax/km^2 - h$
	Valor del temps	β_t	$€/pax - h$
	Velocitat a peu ^(*)	v_w	km/h
	Tarifa	θ	$€/pax$

Taula 3.1: Inputs dels models analítics.

(*) Aquestes variables, encara que siguin inputs del sistema, acostumen a rebre valors estàndard.

	Nom	Símbol	Unitats
Agència	Distància total viatjada en una hora	Q	km/h
	Mida de la flota	M	veh
	Velocitat comercial	v_c	km/h
	Cost total per l'agència	Z_a	$€/h$
Usuaris	Temps d'accés	A	h/pax
	Temps d'espera	W	h/pax
	Nre. de parades efectives en un cicle	S_e	$[ad]$
	Longitud mitjana de viatge	l	km
	Temps total dins el vehicle	$IVTT(l)$	h/pax
	Cost total pels usuaris	Z_u	$€/h$
Altres	Cost total	Z_t	$€/h$
	Ocupació màxima	O	pax/veh
	Factor de cobertura	F_c	$\%$
	Coef. d'augment de la longitud DRT	k_o	$[ad]$

Taula 3.2: Outputs dels models analítics.

Nom	Símbol	Unitats
Interval de pas	H	h
Espaiament entre parades	s	km
Percentatge de línia convencional	α	$[ad]$

Taula 3.3: Variables de decisió dels models analítics.

3.2 Hipòtesis

Recordem que l'estudi amb models analítics necessita d'una idealització de la realitat que dependrà de les hipòtesis utilitzades. A l'hora d'implementar els models, és imprescindible tenir clares quines suposicions s'han fet per prendre els resultats amb el grau de confiança que mereixin. Així, enumerem les hipòtesis generals dels models:

1. L'àrea d'aplicació del servei és un rectangle o banda d'àrea $R = L \cdot w$; $L > w$, amb un servei que opera al llarg de la dimensió major.

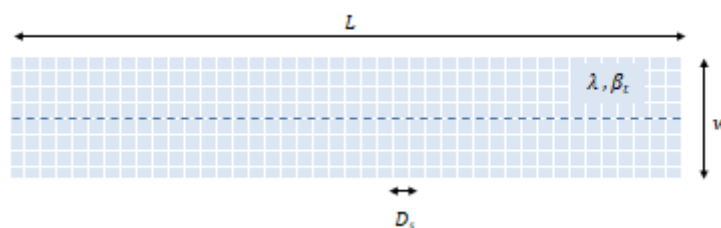


Figura 3.1: Espai de treball dels models ideals.

2. La xarxa de carrers serà ortogonal i de doble sentit, amb illes quadrades de costat constant D_s . Així, totes les distàncies es calcularan amb la mètrica L1 (mètrica Manhattan), que només té en compte distàncies horitzontals i verticals. Es defineix com:

$$\text{Sent } p = (p_x, p_y) \text{ i } q = (q_x, q_y) \text{ dos punts del pla cartesià } XY \\ \text{la distància entre ells és: } d_1(p, q) = |p_x - q_x| + |p_y - q_y| \quad (3.1)$$

3. La demanda λ es considerarà uniforme en tota l'àrea i, per tant, qualsevol diferencial d'àrea tindrà la mateixa probabilitat de generar o atreure un viatge.
4. El valor del temps dels usuaris β_T també serà constant i uniforme per tots ells i no es consideraran diferències en les percepcions dels diferents temps de viatge.
5. Les longituds de viatge (l) seran mitjanes suposant la demanda homogènia de la hipòtesis 3.
6. Es considerarà que els passatgers accedeixen a la parada sense saber l'hora d'arribada de l'autobús i que per tant esperen allà el temps que sigui necessari fins que arribi.

3.3 Definició del problema d'optimització

Es definirà com l'alternativa òptima aquella que tingui el menor cost horari total, sumant els costos tant per l'agència (Z_a) com per l'usuari (Z_u). Així, iterant les variables de decisió H, s, α trobarem la configuració òptima i d'allà n'extraurem la resta de variables definitòries del servei. Formalitzem el problema com:

$$\min_{H, s, \alpha} Z = Z_a + Z_u = (c_d Q + c_t M) + \beta_t \lambda L w \cdot (A + W + IVTT) \\ \text{amb } H \geq H_{min}, \quad s > 0, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (3.2)$$

$$0 \leq C$$

Notem els dos grans sumands de la funció a minimitzar, el cost per l'agència i el cost pels usuaris. També es defineixen les condicions de contorn associades a les variables de decisió: un interval mínim H_{min} , una distància entre parades positiva i un percentatge de línia convencional entre zero i un.

L'altra condició és la que es refereix a l'ocupació, que no pot superar la capacitat dels vehicles en cap punt.

Per últim hem de tenir en compte que aquesta formulació del problema es fa des d'un punt de vista estratègic, on la solució òptima és aquella amb el **menor cost per la societat en el seu conjunt**, no només per l'operador. Així, definim un output que no és necessari per l'optimització com a tal però que serveix com un indicador general de com es reparteixen els costos del servei i quin és el nivell de subvenció que necessitarà la línia. Aquest és el **factor de cobertura (F_c)** que indica el percentatge dels costos d'operació que es cobreixen amb el preu del bitllet (és a dir, que paguen els usuaris). Es defineix com la ràtio entre el preu d'un viatge i el cost unitari d'aquest:

$$F_c = \frac{\theta}{\frac{Z_A}{\lambda L W}} \quad (3.3)$$

3.4 Model convencional

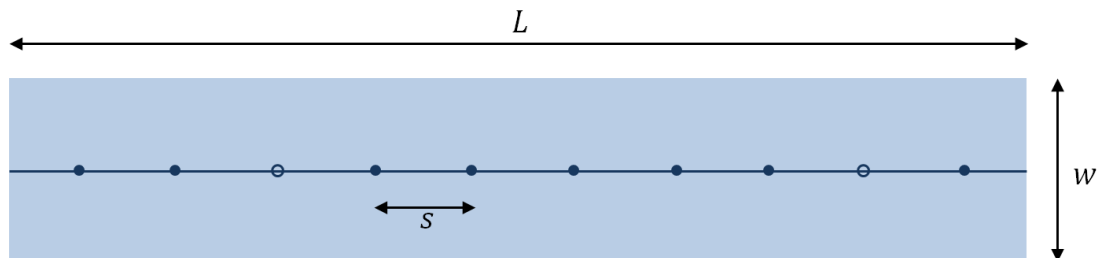


Figura 3.2: Esquema del model convencional.

El primer model consisteix en una línia d'autobús tradicional, que circula per la part central de la banda de treball amb intervals i espaiament entre parades constants. A més, la línia no para a les estacions on no hi hagi demanda, reduint lleugerament el temps de viatge.

Variables de l'usuari

Comencem presentant les variables necessàries per trobar el cost total dels usuaris Z_u . Aquest cost consisteix principalment en trobar el temps mitjà que fa un usuari porta a porta i multiplicar-lo pel total de viatgers en una hora. Aquest temps total generalment consta de quatre parts:

- Temps d'accés (A), des de l'origen fins la parada i de la parada al destí.
- Temps d'espera (W), parat a la parada esperant a que arribi el vehicle.
- Temps dins el vehicle o *In Vehicle Travel Time (IVTT)*, des que l'usuari puja al vehicle fins que baixa, comptant tot el temps "perdut" per *detours* o altres parades.
- Temps de transferència, que en el nostre cas no utilitzarem perquè es dissenyaran corredors únics que no necessiten transferència.

En alguns estudis més detallats o per estudis d'assignació on sí influeix la percepció del temps per part de l'usuari és comú aplicar factors de percepció del temps a les diferents components del temps. En el nostre cas i com s'explica a la hipòtesis 4, aquestes components tindran totes el mateix pes.

La primera component a modelitzar és el **temps d'accés (A)**. Aquesta component es calcularà com la distància d'accés mitjana entre la velocitat a peu. Recordem que utilitzem la mètrica Manhattan i, per tant, la distància fins la parada serà la suma de les distàncies verticals i horitzontals. Pel que fa a la distància horitzontal, variarà entre zero i $s/2$, tenint un valor mitjà esperat de $s/4$. El mateix passa amb la distància vertical, que es mou entre zero i $w/2$, amb el valor esperat de $w/4$. Així, comptant que es fa aquest trajecte dos cops (origen-parada i parada-destí) l'expressió queda:

$$A = \frac{s + w}{2 \cdot v_w} \quad (3.4)$$

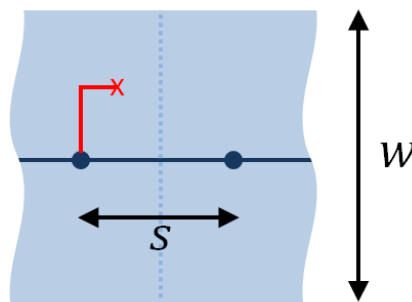


Figura 3.3: Distància mitjana a peu pel servei convencional (en vermell).

A continuació tenim el **temps d'espera (W)**. Com passa en molt casos, es considera que els passatgers no saben l'interval de pas i simplement esperen el temps necessari a la parada (hipòtesis 6). Així, aquest temps variarà entre zero i l'interval de pas (H) i de mitjana serà $H/2$ amb un augment per la possible variabilitat de l'interval¹:

$$W = \frac{1}{2} \left(H + \frac{S_H^2}{H} \right) \quad (3.5)$$

¹ Aquest model d'espera s'utilitza en models basats en l'interval de pas com és el nostre. Com a prova de la flexibilitat que té aquesta formulació, si un dissenyador preferís utilitzar un altre model, com per exemple un basat en horaris, simplement hauria de definir els inputs necessaris i canviar una fórmula.

Per últim, tenim el temps total dins el vehicle o ***in vehicle travel time (IVTT)***, que depèn de la longitud del viatge i consta de tres components:

- Temps recorregut a velocitat lliure.
- Temps afegit degut a l'acceleració i frenada a cada parada.
- Temps afegit degut a la pujada i baixada de passatgers.

Veiem que les dues darreres components depenen de les parades que es facin al llarg de la distància recorreguda i, com el servei té la possibilitat de saltar-se parades quan hi ha poca demanda, suposem que el **nombre de parades efectives en un cicle (S_e)** és:

$$S_e = \min \left\{ \left[\frac{2L}{s} \right]^+, [2\lambda LwH]^+ \right\} \quad (3.6)$$

On el primer cas representa una línia que s'atura a totes les parades (longitud total entre espaiament) i el segon cas representa una situació on hi ha menys gent que parades i llavors, si suposem que cada passatger puja o baixa a una parada diferent, hi haurà com a màxim $[2\lambda LwH]^+$ parades efectives. Com apareixerà algunes ocasions més, fixem-nos que el terme λLwH és la demanda uniforme λ (pax/km²-h) multiplicada per l'àrea total Lw (km²) i l'interval de pas H (h) i per tant representa el total de viatgers d'una línia en tot el seu cicle (pax).

Així, tornant a l'IVTT, podem formular-lo en funció de la longitud mitjana de viatge com:

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + 2 \cdot \frac{l}{2L} \cdot S_e \cdot \frac{v}{2a} + 2 \cdot \frac{l}{2L} \cdot \lambda LwH \cdot \tau' \quad (3.7)$$

On cada sumant és una de les components del temps. La primera és simplement distància total entre velocitat comercial. La segona és dos cops (acceleració i frenada) el percentatge de línia viatjat ($l/2L$) pel número total de parades (S_e) i el temps perdut a cada maniobra ($v/2a$). La tercera és també dos cops (pujada i baixada) pel percentatge de línia viatjat ($l/2L$) pel número total de passatgers en el cicle (λLwH) i el temps perdut a cada pujada/baixada (τ'). Si operem obtenim una expressió més compacta:

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + \frac{l \cdot S_e}{2L} \cdot \frac{v}{a} + l\lambda wH \cdot \tau' \quad (3.8)$$

Per últim cal definir la **longitud mitjana de viatge (l)**. Com la distribució de demanda és uniforme i el vehicle només viatja en horitzontal, la longitud mitjana és la mateixa que la longitud entre dos punts aleatoris en un segment de longitud L (Daganzo, 2010) i, per tant,

$$l = \frac{L}{3} \quad (3.9)$$

Variables de l'agència

Continuem amb les variables necessàries pel càlcul del cost de l'agència Z_a , que té un component de cost per temps i per distància.

Pels costos per distància, es necessita trobar la **distància total viatjada en una hora (Q)**, que calcularem com la longitud total d'un cycle entre l'interval de pas:

$$Q = \frac{2L}{H} \quad (3.10)$$

D'altra banda, els costos temporals depenen de la **mida de la flota (M)**. Per calcular-la, necessitarem primer la **velocitat comercial (v_c)**. Aquesta velocitat és menor que la velocitat de creuer ja que inclou els retards de cada parada. De fet, es pot calcular a partir de l'IVTT amb longitud 1km com:

$$\frac{1}{v_c} = IVTT(1) \quad (3.11)$$

I llavors la mida de la flota es calcula com la distància total recorreguda en una hora (Q) entre la velocitat comercial, i és un nombre enter:

$$M = \left[\frac{Q}{v_c} \right]^+ \quad (3.12)$$

Per últim, per poder verificar la restricció de capacitat, calculem l'**ocupació màxima (O)**, que es donarà en la secció central de la línia. Per qualsevol punt del corredor, la densitat de demanda en la direcció del corredor és $\delta_x = \lambda w L / 2L$. El flux de passatgers estarà donat per la longitud de línia anterior x i, per tant, el flux a qualsevol secció serà $q = l \delta_x$. Si multipliquem per l'interval de pas obtenim:

$$O(x) = \frac{x\lambda w}{2} H \quad (3.13)$$

Que per la secció central ($x = L/2$):

$$O\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\lambda w L}{4} H \quad (3.14)$$

3.5 Model DRT

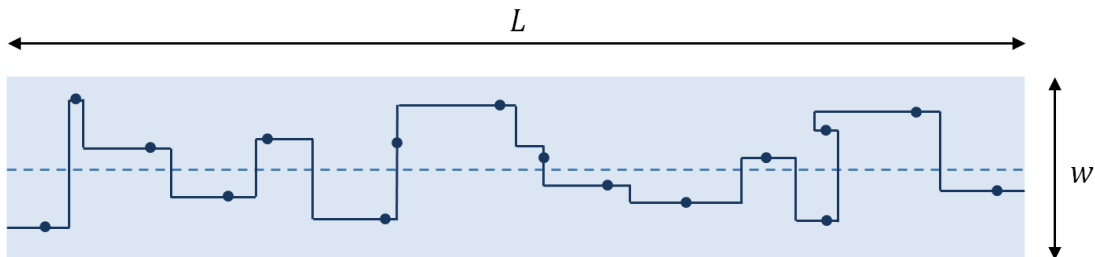


Figura 3.4: Esquema del model DRT.

El segon model proposa un servei completament porta a porta on el vehicle es mou en la direcció del corredor però fent desviaments o *detours* per recollir o deixar passatgers. Intuïtivament es pot veure que com més demanda, més desviaments es necessiten i la longitud de viatge augmenta, per tant, el model s'espera efectiu pels casos amb poca demanda.

Variables de l'usuari

L'estructura a seguir per descriure el model és molt similar a l'anterior però amb un petit esglaó més de dificultat: a partir d'ara la distància recorreguda pel vehicle ja no és només horitzontal i, per tant, la longitud de viatge l serà major que la distància horitzontal x . Per facilitar els càlculs posteriors definim un **coeficient d'augment per la longitud DRT (k_o)** on s'inclouran tots els augments de trajecte causats pels *detours*. Aquest coeficient serà adimensional i sempre major o igual que 1. Consta de tres termes:

- Distància horitzontal: en un trajecte de longitud l , per definició, la distància horitzontal recorreguda serà x .

- Distància vertical: tindrem una desviació vertical mitjana $w/3$ per cada origen o destí. El número d'orígens i destins és $2Lw\lambda H$ i el percentatge de línia recorreguda en una longitud l és $x/2L$.
- Possibilitat de que hi hagi dues parades a la mateixa columna d'illes: si es donés aquest cas, el vehicle hauria de tornar enrere per poder deixar o recollir els passatger extres. Suposem que el vehicle ha d'arribar fins la següent cruïlla per poder donar la volta així que, sent i el total de parades en una mateixa columna, la distància extra recorreguda per aquella columna és $(i - 1) \cdot 2D_s$. Ara cal multiplicar aquesta distància extra per la probabilitat de què aquell cas en concret (amb i passatgers a la mateixa columna) es doni. L'àrea d'una columna d'illes és $w \cdot D_s$ i, comptant-la dos cops perquè hi pot haver tant un origen com un destí, la probabilitat de que coincideixin i vegades és:

$$P\{i\} = \left(\frac{2wD_s}{wL}\right)^i = \left(\frac{2D_s}{L}\right)^i \quad (3.15)$$

Tot plegat doncs es formula de la següent manera:

$$k_o = \frac{l}{x} = 1 + wH\lambda \cdot \frac{w}{3} + \sum_{i=2}^{\infty} (i - 1) \cdot 2D_s \cdot P\{i\} \geq 1 \quad (3.16)$$

Cal destacar que aquest coeficient té l'avantatge d'incloure tots els efectes dels *detours* i, per tant, si es volgués canviar part del mètode operacional o afegir alguna altra hipòtesis, només s'ha de modificar el coeficient.

Per completesa i per veure fàcilment la equivalència amb la formulació de Estrada et al, 2020, observem que el coeficient d'augment també equival a la longitud total d'un cicle entre $2L$:

$$k_o = \frac{l}{x} = \frac{QH}{2L} \quad (3.17)$$

Havent definit aquest paràmetre, passem a descriure les tres components del temps, com en el model anterior. El **temps d'accés (A)** és el més directe ja que per definició, el model porta a porta té:

$$A = 0 \quad (3.18)$$

Pel **temps d'espera (W)**, mantenim la mateixa definició que en el cas anterior, encara que ara el temps d'espera es pot fer en origen/destí, enlloc de a la parada:

$$W = \frac{1}{2} \left(H + \frac{S_H^2}{H} \right) \quad (3.19)$$

Finalment l'**in vehicle travel time (IVTT)** seguirà estant en funció de la longitud mitjana de viatge l i es formula com:

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + 2 \cdot \frac{l/k_o}{2L} \cdot 2\lambda L\omega H \cdot \frac{v}{2a} + 2 \cdot \frac{l/k_o}{2L} \cdot \lambda L\omega H \cdot \tau' \quad (3.20)$$

On cada sumant és una component del temps. El primer és el temps viatjat a velocitat comercial. El segon és dos cops (acceleració i frenada) el percentatge de línia viatjat ($\frac{l/k_o}{2L}$) pel número total d'orígens i destins ($2\lambda L\omega H$) i el temps perdut a cada maniobra ($v/2a$). El tercer és també dos cops (pujada i baixada) pel percentatge de línia viatjat ($\frac{l/k_o}{2L}$) pel número total de passatgers en el cicle ($\lambda L\omega H$) i el temps perdut a cada pujada/baixada (τ'). Veiem que els percentatges de línia recorreguda necessiten ser només en horitzontal ($x/2L$) però, com el *IVTT* ha d'estar en funció de la longitud de viatge l , utilitzem el coeficient k_o per corregir-ho. Si operem una mica obtenim una expressió més compacta:

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + \frac{l}{k_o} \cdot \lambda\omega H \cdot \left(\frac{v}{a} + \tau' \right) \quad (3.21)$$

La **longitud mitjana de viatge (l)** es manté com en el cas anterior i és:

$$l = \frac{L}{3} \quad (3.22)$$

Variables de l'agència

Les variables necessàries pel càlcul del cost de l'agència Z_a , són pràcticament iguals a les del model anterior, amb una component de cost per temps i per distància.

Per la **distància total viatjada en una hora (Q)**, la calcularem com la longitud total d'un cicle (augmentada per k_o) entre l'interval de pas:

$$Q = \frac{2Lk_o}{H} \quad (3.23)$$

D'altra banda, la **mida de la flota (M)** i la **velocitat comercial (v_c)** mantenen exactament la mateixa expressió ja que les modificacions s'han introduït a Q i al $IVTT$. Tenim:

$$\frac{1}{v_c} = IVTT(1) \quad (3.24)$$

$$M = \left[\frac{Q}{v_c} \right]^+ \quad (3.25)$$

Per últim, l'**ocupació màxima (O)** també es troba a la secció central ($L/2$) i la calculem com:

$$O\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\lambda w L}{4} H \quad (3.26)$$

3.6 Model alpha

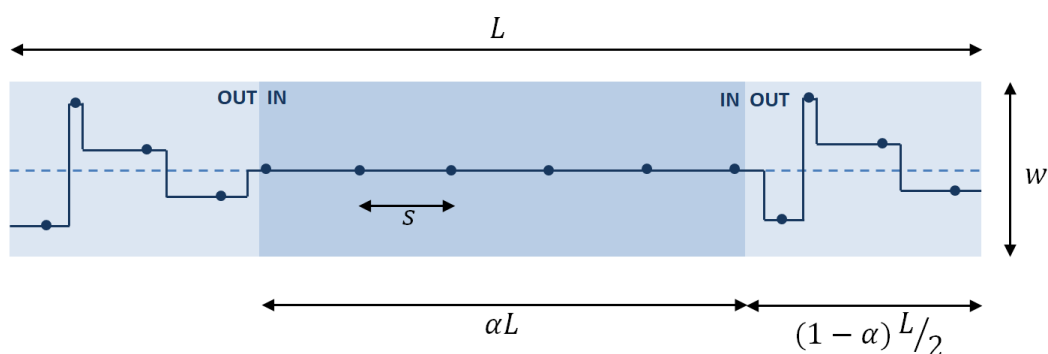


Figura 3.5: Esquema del model alpha.

Després de tots aquests passos previs presentem a la fi el model generalitzat, que anomenarem model mixt o model alpha. Com podem veure a la Figura 3.5, el que es

proposa és un model simètric, amb una línia que opera de manera convencional al tram central (IN) i com un DRT a les zones perifèriques (OUT).

El punt on es fa aquest canvi de servei ve fixat per l'únic paràmetre extra que necessita el model, el **percentatge de línia convencional o paràmetre alpha (α)**. Aquest paràmetre pot variar entre zero (tot el servei és DRT) i un (tot el servei és convencional) així que realment el model alpha inclou els dos models anteriors com a casos particulars. Es planteja que aquest paràmetre sigui una variable de decisió en un espai de demanda uniforme però, també existeix la possibilitat de que vingui fixat per factors físics relacionats amb l'espai real d'implementació del servei. A l'annex 1 es plantejarà aquest model amb alpha fixat i possibilitat de variar la demanda entre els espais IN i OUT.

Passos previs

Per poder integrar dos tipus de servei en una mateixa línia i mantenir la mateixa estructura a l'hora de definir els models, parlarem de quatre tipus de viatge segons la seva zona d'origen o destí. Tenim:

1. Viatges amb origen i destí a la zona interior (i,i)
2. Viatges amb origen a la zona interior i destí a l'exterior o vice versa (i,o)
3. Viatges amb origen i destí a la mateixa zona exterior (o,o)
4. Viatges amb origen a una zona exterior i destí a l'altra (o,i,o)

Llavors, com la demanda és uniforme, podem definir la probabilitat de que es doni cada cas simplement a partir de la geometria o, en aquest cas, el paràmetre alpha:

$$P_{i,i} = \alpha^2 \quad (3.27)$$

$$P_{i,o} = 2\alpha(1 - \alpha) \quad (3.28)$$

$$P_{o,o} = \frac{(1 - \alpha)^2}{2} \quad (3.29)$$

$$P_{o,i,o} = \frac{(1 - \alpha)^2}{2} \quad (3.30)$$

Notem que, excepte el primer cas, totes les probabilitats estan multiplicades per dos, ja sigui perquè el trajecte es pot fer en dos sentits ($P_{i,o}, P_{o,i,o}$) o perquè hi ha dues zones amb les mateixes característiques ($P_{o,o}$).

Homòlogament al model DRT, també ens cal definir el **coeficient d'augment per la longitud DRT (k_o)** on s'inclouran tots els augments de trajecte causats pels *detours* sota les mateixes hipòtesis.

$$k_o = \frac{l}{x} = 1 + wH\lambda \cdot \frac{w}{3} + \sum_{i=2}^{\infty} (i-1) \cdot 2D_s \cdot P\{i\} \geq 1 \quad (3.31)$$

$$P\{i\} = \left(\frac{2D_s}{L}\right)^i$$

També definim prèviament el **nombre de parades efectives en un cicle convencional (S_e^*)**:

$$S_e^* = \min \left\{ \left[\frac{2L}{s}\right]^+, [2\lambda LwH]^+ \right\} \quad (3.32)$$

La formulació és la mateixa però el sentit és una mica diferent ja que es calcula el número total de parades si tot el servei fos convencional, però a la majoria de casos no ho serà. Així, el número real de **parades efectives en un cicle (S_e)** es calcula com:

$$S_e = \left[\alpha \cdot \min \left\{ \frac{2L}{s}, 2\lambda LwH \right\} + (1-\alpha) \cdot 2\lambda LwH \right]^+ \quad (3.33)$$

Variables de l'usuari

Per les variables de l'usuari, com cada tipus de viatger prèviament definit tindrà uns costos temporals, la manera més senzilla de presentar el **temps d'accés (A)**, el **temps d'espera (W)** i el **in vehicle travel time (IVTT)** és amb la següent taula:

	Accés (A)	Espera (W)	Temps total dins el vehicle (IVTT)
i, i	$A_{i,i} = \frac{s+w}{2 \cdot v_w}$	$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$	$IVTT_{i,i} = IVTT_i \left(\frac{\alpha}{3} L \right)$
i, o	$A_{i,o} = \frac{s+w}{4 \cdot v_w}$	$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$	$IVTT_{i,o} = IVTT_i \left(\frac{\alpha}{2} L \right) + IVTT_o \left(\frac{1-\alpha}{4} L \cdot k_o \right)$
o, o	$A_{o,o} = 0$	$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$	$IVTT_{o,o} = IVTT_o \left(\frac{1-\alpha}{6} L \cdot k_o \right)$

$$o, i, o \quad A_{o,i,o} = 0 \quad W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right) \quad IVTT_{o,i,o} = IVTT_i(\alpha L) + IVTT_o \left(\frac{1-\alpha}{2} L \cdot k_o \right)$$

Taula 3.4: Temps d'accés, d'espera i dins el vehicle pel model alpha.

On els *IVTT* interiors i exteriors són els mateixos que als models convencional i DRT:

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + \frac{l \cdot S_e^*}{2L} \cdot \frac{v}{a} + l\lambda wH \cdot \tau' \quad (3.34)$$

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + \frac{l}{k_o} \cdot \lambda wH \cdot \left(\frac{v}{a} + \tau' \right) \quad (3.35)$$

Així, per trobar els valors de cada tipus de viatge simplement hem de pensar quin serà el camí que seguirà cada viatger. Per exemple, pel temps d'accés, sumem $\frac{s+w}{4 \cdot v_w}$ per cada origen o destí a la zona interior. El temps d'espera és el mateix per tots els passatgers ja que seguim operant a intervals constants.

Potser el terme que necessita més explicació és el temps dins el vehicle. Notem primer que, de la manera en què està definit el *IVTT*, es compleix la propietat:

$$IVTT(a+b) = IVTT(a) + IVTT(b) \quad (3.36)$$

Per tant, separem les distàncies recorregudes per cada tipus de viatge segons si es fan en una zona interior o exterior i el temps total serà simplement la suma dels temps parcials. Per trobar la **longitud parcial dels viatges (l)** podem ajudar-nos de la Figura 3.6 i veure que:

- Per viatges interns dins una zona, la distància serà 1/3 de la longitud de la zona en horitzontal.
- Per viatges que canvien de zona, origen i destí es trobaran a 1/2 de la longitud de cada zona, ja que es farà el viatge fins el centre de gravetat de demanda de cada zona.
- Totes les longituds de viatges en zones exteriors (OUT) estan majorades per k_o .

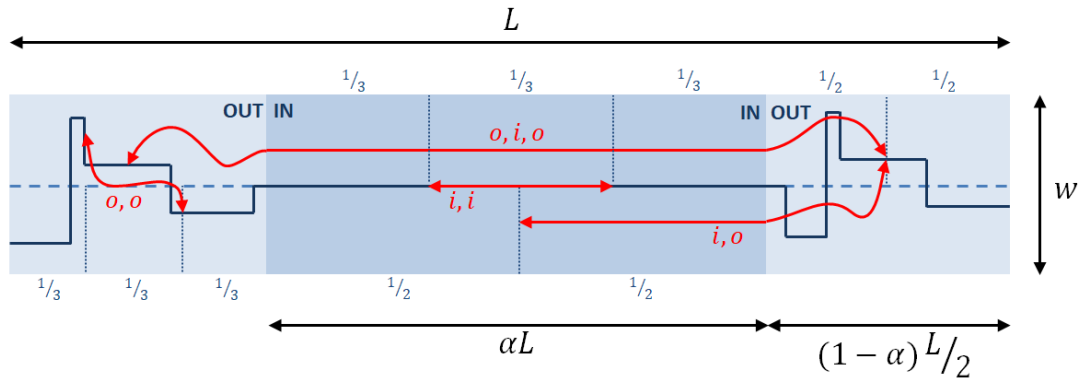


Figura 3.6: Recorreguts dins el vehicle pels diferents tipus de viatge del model alpha.

Un cop tenim les components del temps per cada tipus de viatge només cal agregar-les en funció de la probabilitat de cada viatge, obtenint:

$$A = \sum_j A_j \cdot P_j \quad \text{sent } j = \{i, i \mid i, o \mid o, o \mid o, i, o\} \quad (3.37)$$

$$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right) \quad (3.38)$$

$$IVTT = \sum_j IVTT_j \cdot P_j \quad \text{sent } j = \{i, i \mid i, o \mid o, o \mid o, i, o\} \quad (3.39)$$

Variables de l'agència

Les variables de l'agència segueixen una mica la mateixa filosofia a l'hora de combinar els serveis però, com que en aquest cas no ens centrem en els viatgers sinó en el vehicle, no caldrà utilitzar els quatre tipus de viatge abans explicats, sinó ponderar amb el paràmetre α .

Per la **distància total viatjada en una hora (Q)**, sumem les distàncies en cicles interiors i exteriors (majorats per k_o):

$$Q = Q_i + Q_o = \frac{2L\alpha}{H} + \frac{2L(1-\alpha)k_o}{H} \quad (3.40)$$

És important mantenir les dues components per separat ja que els trams tindran una velocitat comercial diferent i per tant, afectaran de manera diferent a la mida de la flota.

Continuem amb la **velocitat comercial** (v_c) diferent per cada zona:

$$\frac{1}{v_{c,i}} = IVTT_i(1) \quad (3.41)$$

$$\frac{1}{v_{c,o}} = IVTT_o(1) \quad (3.42)$$

I la **mida de la flota** (M), que també es calcularà amb dos sumands:

$$M = M_i + M_o = \left[\frac{Q_i}{v_{c,i}} + \frac{Q_o}{v_{c,o}} \right]^+ \quad (3.43)$$

Per últim, l'**ocupació màxima** (O) també es troba a la secció central ($L/2$). Aquest fet pot sorprendre en un primer moment però recordem que, amb la demanda uniforme, els fluxos de passatgers en la direcció del corredor no depenen del tipus de model i, per tant, es mantenen encara que el servei sigui mixt:

$$O\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\lambda w L}{4} H \quad (3.44)$$

4. Anàlisi de sensibilitat dels models

En aquest apartat analitzarem de manera general com funcionen els models i com canvien els resultats en funció dels inputs més sensibles. L'objectiu és poder facilitar l'enteniment dels models presentant ordres de magnitud i relacions no tan evidents entre outputs, així com extreure rangs d'aplicació dels diferents tipus de servei. Evidentment, com els models convencional i DRT són casos particulars del model alpha, es farà l'anàlisi sobre aquest últim, particularitzant els resultats quan es consideri oportú.

A més, es realitzarà l'anàlisi de sensibilitat per una geometria, demanda i vehicles estàndard, que puguin donar una visió general del funcionament i el rendiment del model sense incloure escenaris especials. Veiem els inputs fixats a la Taula 4.1.

	Nom	Símbol	Unitats	Valor
Geometria	Longitud de la ruta	L	km	var / 10
	Amplada de la banda	w	km	var / 1
	Àrea d'estudi	$L \cdot w$	km^2	10
	Distància entre carrers	D_s	km	0.1
	Velocitat de creuer	v	km/h	30
Vehicle	Capacitat del vehicle	C	pax	Taula 4.2
	Acceleració ^(*)	a	m/s^2	0.895
	Temps de pujada o baixada ^(*)	τ'	s/pax	5
	Cost unitari per distància	c_d	$€/km$	Taula 4.2
	Cost unitari per temps	c_t	$€/veh \cdot h$	Taula 4.2
	Variància de l'interval de pas ^(*)	s_H^2	h^2	0.003
	Interval de pas mínim ^(*)	H_{min}	min	3
Demanda	Densitat de demanda per hora	λ	$pax/km^2 - h$	var / 20
	Valor del temps	β_t	$€/pax - h$	10
	Velocitat a peu ^(*)	v_w	km/h	2.5
	Tarifa	θ	$€/pax$	1.10

Taula 4.1: Inputs estàndard per l'anàlisi de sensibilitat.

Els inputs fixats, excepte l'àrea, corresponen a valors generals per una línia nocturna o de festius (baixa demanda) de Barcelona, així com es descriu a Estrada et al, 2020.

Els vehicles que s'utilitzaran seran un bus estàndard ($C=70$ pax/veh), un minibus ($C=22$ pax/veh) i un cotxe de passatgers o taxi ($C=4$ pax/veh). Els seus costos i s'obtenen de dades de TMB (2019) i l'observatori del taxi de Barcelona (2015) i estan descrits també a Estrada et al, 2020 i presentats a la Taula 4.2. En seccions posteriors d'aquest treball es detallarà com es fa la definició de tots els inputs a partir de dades reals però per l'anàlisi de sensibilitat només utilitzem els resultats finals.

	Nom	Símbol	Unitats	BUS	MINI	CAR
Vehicle	Capacitat del vehicle	C	pax	70	22	4
	Cost unitari per distància	c_d	$€/km$	1.509	0.810	0.166
	Cost unitari per temps	c_t	$€/veh \cdot h$	52.20	47.44	19.24

Taula 4.2: Costos i capacitat de vehicles estàndard.

Les diferents optimitzacions i visualitzacions s'han realitzat mitjançant macros dins un full de càlcul Excel utilitzant el llenguatge de programació VBA. D'aquesta manera, amb l'optimització integrada al full de càlcul, és més accessible per tothom i no s'han de transferir resultats entre softwares per tenir bones visualitzacions. A l'annex 2 hi ha una còpia del codi pel model alpha, que com engloba els altres dos, serà l'únic que realment es necessitarà.

4.1 Anàlisi respecte les variables de decisió

Comencem per visualitzar com varien els diferents outputs del model en funció de les variables de decisió (principalment interval de pas (H) i servei (α)) per un cas concret de geometria i demanda (Taula 4.1). Aquest primer anàlisi ens servirà per entendre com varia tot l'espectre d'outputs i quins valors podem esperar.

Abans de començar, només comentar breument la manera en què es pintaran les gràfiques. Com pràcticament sempre es compararan diferents valors d'alpha, els colors sempre faran referència a aquesta variable, sent vermell un servei DRT ($\alpha = 0$), blau un servei convencional ($\alpha = 1$) i verd un servei entremig ($\alpha = 0.5$).

Ara sí, iniciem amb els outputs operacionals. Mirem primer la distància viatjada en una hora (Q) i la mida de la flota (M) (Figura 4.1) i ens trobem amb dues primeres relacions poc sorprenents: aquestes variables son menors quan major sigui l'interval de pas (menys freqüència d'autobusos) i com més a la demanda sigui el servei. Els serveis comparteixen tendències però les diferències entre ells són importants, sobretot per intervals de pas alts, on el nombre de vehicles per un servei DRT triplica els del servei convencional.

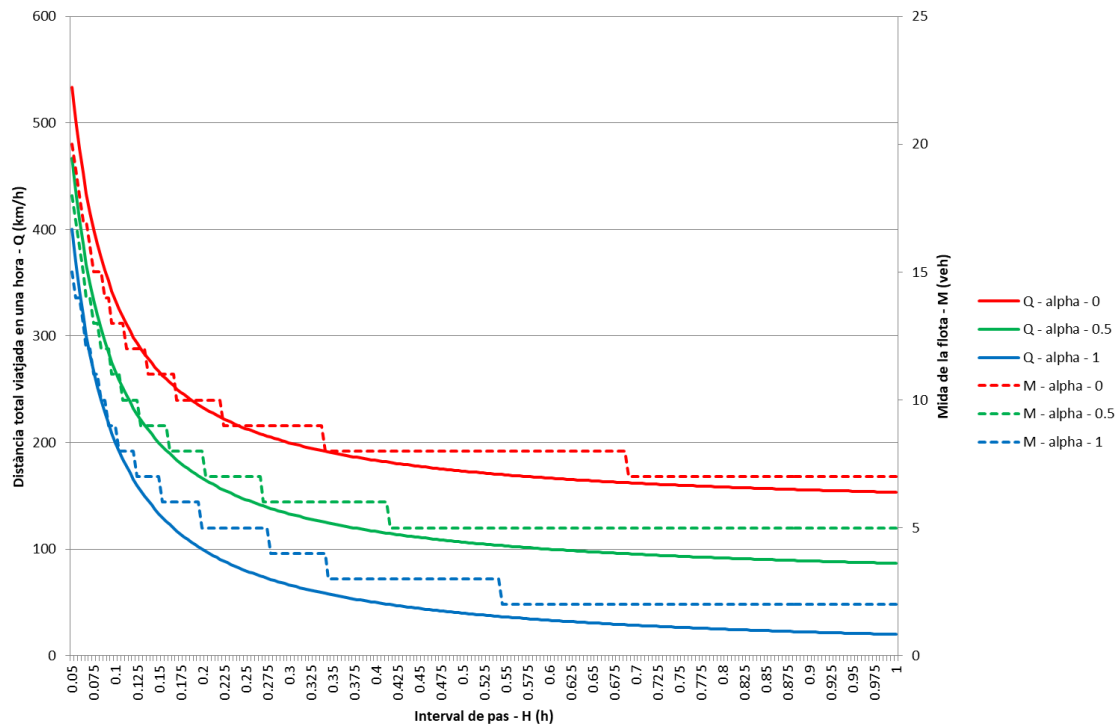


Figura 4.1: Distància viatjada en una hora (Q) i la mida de la flota (M) — Interval de pas (H)

Pel que fa a les característiques més físiques del servei, comentem la distància entre parades (s) i nombre de parades efectives (S_e) (Figura 4.2). Recordem que la distància entre parades és una variable de decisió i que aquí es mostra la corresponent a la solució òptima. A més, està directament relacionada amb el nombre de parades pels trams convencionals: a més espaiament, menys parades.

Si ens fixem en la línia convencional ($\alpha = 1$, blau) podem observar dos tipus de comportament: una primera part on la distància és la mínima (10 metres) i una segona on s'estabilitza a 220 m. Per explicar aquests casos cal recordar que el model permet que el bus es salti parades buides.

Per tant, el primer tram realment representa un servei amb una parada contínua al llarg del corredor i que simplement es para a qualsevol lloc on hi hagi un passatger esperant. Veiem que el nombre de parades efectives coincideix amb el del model a demanda, per tant confirmem que es salta parades. Destaquem que aquest cas de línia convencional és força especial, ja que realment és un servei sense parades físiques (cap operador materialitzarà parades cada 10 metres) i que s'ha d'implementar d'aquesta manera. També podem donar-li una volta extra si pensem en la xarxa de carrers (amb cruïlles cada 100m) ja que sembla que les parades que no es trobin a les cruïlles es podrien sacrificar i acabar amb un espaiament de 100m. De totes maneres, l'existència d'aquesta alternativa també serveix per deixar vigent que els models són aproximacions generals però de fàcil personalització: si com a dissenyadors haguéssim

volgut evitar l'aparició d'aquest servei "fluid", podríem haver fixat la condició de contorn $s \geq D_s$.

El segon tram ja sí és realment un model convencional on no es salten parades. Destaca veure que l'espaiament òptim s'estabilitza de manera molt clara inclús després de les irregularitats/pics causats per salts en la mida de la flota entera (M).

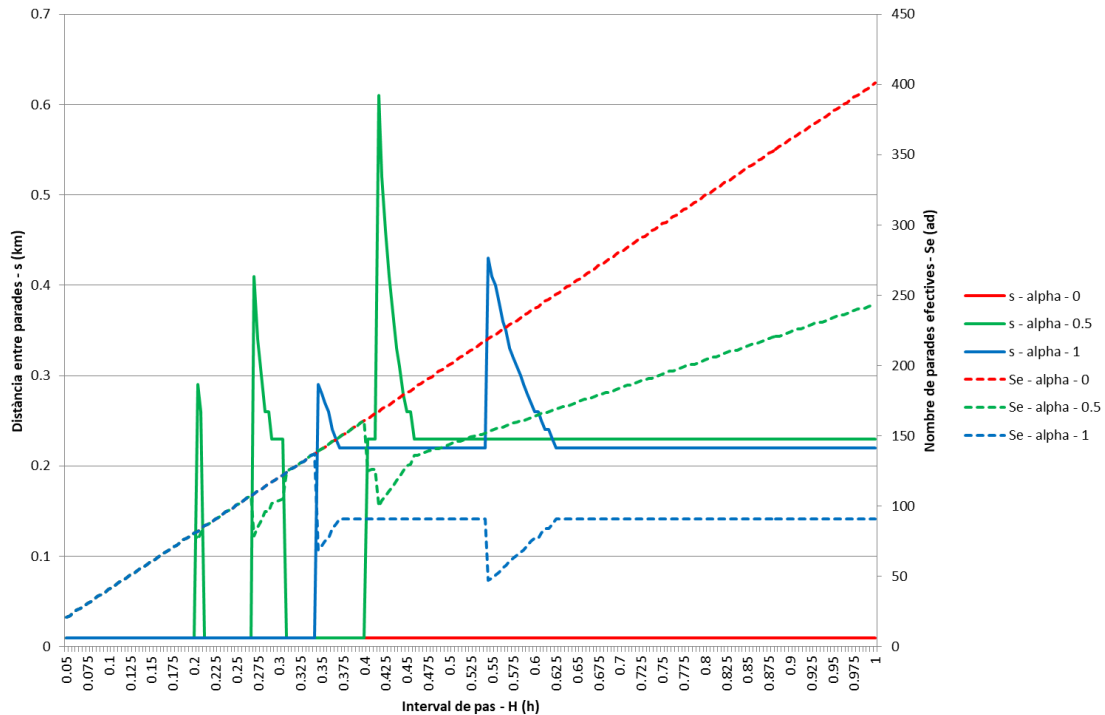


Figura 4.2: Distància entre parades (s) i nombre de parades efectives (S_e) — Interval de pas (H)

També podem mirar les diferents components del temps de viatge ($A, W, IVTT$) a la Figura 4.3. El temps d'espera és constant pels tres models ja que realment només depèn de l'interval de pas. Per les altres dues components, veiem representat com per aconseguir un menor temps d'accés s'ha de sacrificar temps dins el vehicle i, a simple vista, no sembla que sempre surti a compte (confirmarem aquest comportament amb l'anàlisi de costos de la Figura 4.4). A més, un altre factor que podria afectar al temps d'accés és l'espaiament entre parades (com major, més temps d'accés) però pels casos estudiats aquest augment no és significatiu.

Pel que fa al $IVTT$ notem una dependència molt gran de l'interval de pas pels casos DRT i per tant, una freqüència alta i regular és imprescindible per la rendibilitat d'aquest servei, ja que petits retards pugen molt la demanda, i per tant el nombre de parades, i per tant el temps de viatge de la resta d'usuaris.

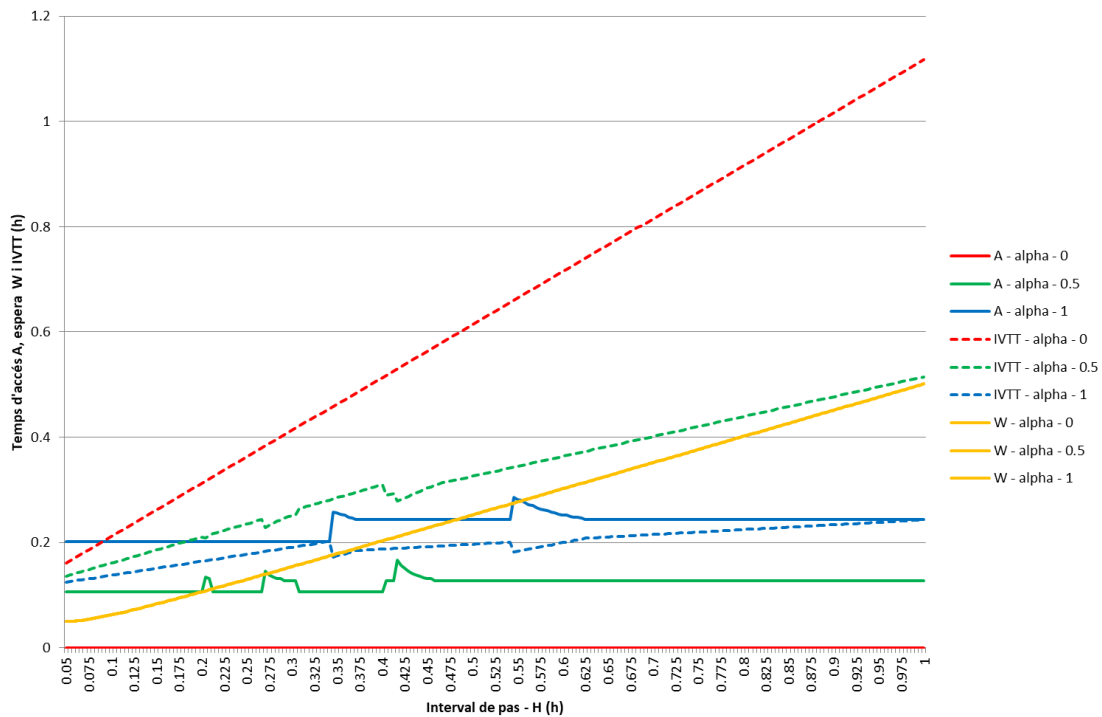


Figura 4.3: Components del temps de viatge (A, W, IVTT) — Interval de pas (H)

Un cop hem vist els principals outputs, podem observar quin ha estat el seu efecte en els costos totals (Z_t), de l'agència (Z_a) i de l'usuari (Z_u) a partir del cas en què operéssim amb un mini bus de 22 places (Figura 4.4). Incloem cinc casos diferents d'alpha, per veure com és el ventall de serveis. Els costos de l'agència (línia discontinua) són com esperàvem i proporcionals a Q i M : majors com més DRT sigui el servei i es van reduint a mesura que puja l'interval de pas. Notem que les diferències de costos són bastant proporcionals a les variacions d'alpha i, per tant, els costos estan directament relacionats amb el percentatge de línia convencional.

D'alta banda, podem mirar els costos de l'usuari (línia de punts). Veiem clarament com estan marcats pel balanç entre temps d'accés i temps dins el vehicle, que afavoreix al servei DRT per intervals de pas petits però que a mesura que traïem freqüència, els vehicles comencen a anar més plens i tot el temps perdut pels *detours* d'altres passatgers no compensa l'estalvi en temps d'accés. Aquest comportament confirma el que ja sabíem de què un bon DRT s'ha d'operar amb vehicles petits i baixa ocupació. També cal destacar un petit resultat que pot passar desapercebut a simple vista, i és que en augmentar H , el servei DRT passa de ser el menys costós al més, però el model convencional no es converteix en el millor pels usuaris quan H creix, sinó que els models mixtos són els més beneficiosos. Aquest és un estat transitori i la diferència no justificaria un canvi de servei però comença a deixar entreveure que, així com en general els models mixtos són un terme mig entre DRT i convencional, el seu nínxol d'aplicació també podria estar entremig dels dos.

Per últim comentem els costos totals (línia contínua). Pel mini bus i el cas proposat, el servei més rentable és sempre el convencional, amb costos molt similars a baix interval de pas i només diferències clares a mesura que augmenta H . Notem que aquí el cost ja no és tant directament proporcional a α i el servei $\alpha = 0.75$ té pràcticament els mateixos costos que el servei convencional. Ja per acabar comentar que la forma plana a la concavitat de Z_t amb un mínim “estable” dona seguretat a la solució òptima triada ja que petites modificacions de l’interval de pas no canvien significativament el cost. Aquest efecte és més fort per models convencionals.

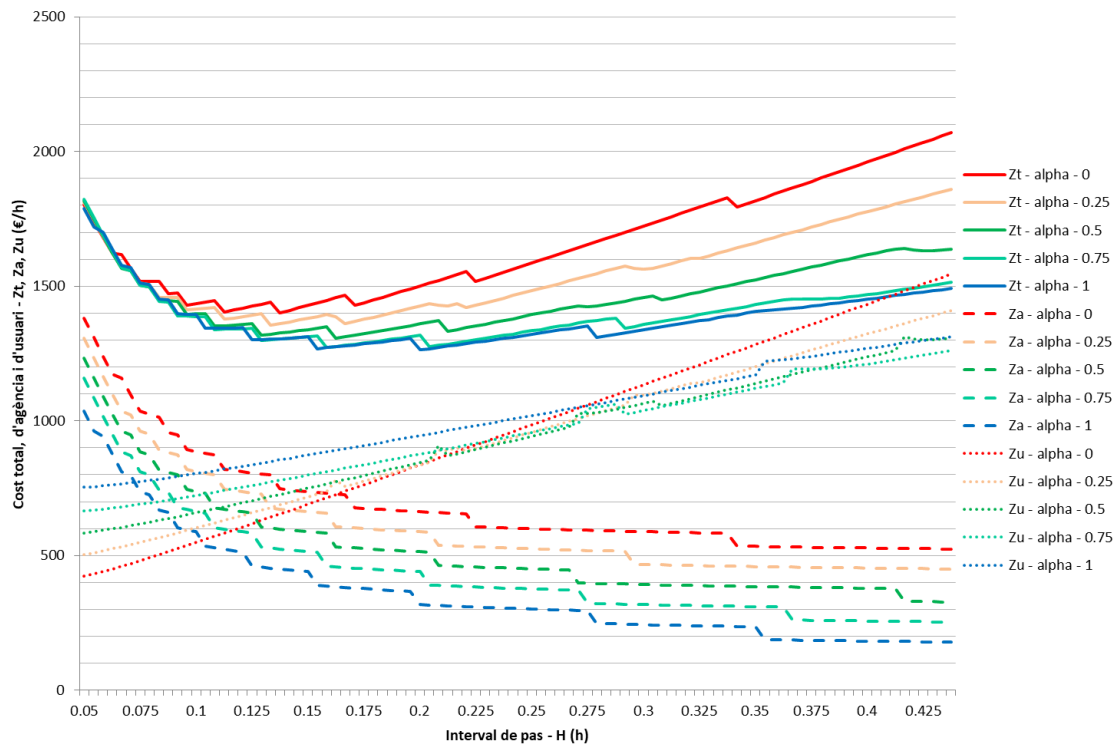


Figura 4.4: Costos (Z_t, Z_a, Z_u) — Interval de pas (H) (només mini bus)

Si incloem els tres tipus de vehicles (Figura 4.5) ja tenim la imatge completa. Veiem que les tendències pels tres vehicles són molt similars a les del mini bus. A més, el model DRT només està justificat amb vehicles petits (cotxe) però no arriba a formar una concavitat a la corba i per tant s’opera en una zona una mica antiintuitiva en la que augmentar l’interval de pas millora el cost total. Encara així, sempre té el perill de col·lapsar per capacitat dels vehicles en moments de major demanda.

Pel que fa als costos de l’agència (Figura 4.6), només comentar un comportament esperat, on sempre el servei més tradicional és el més barat. De totes maneres, fixem-nos que per aconseguir un factor de cobertura major a 1 necessitem que el cost estigui per sota dels 200 €/h, cosa que només passa per intervals de pas majors a 20 minuts i pel model convencional.

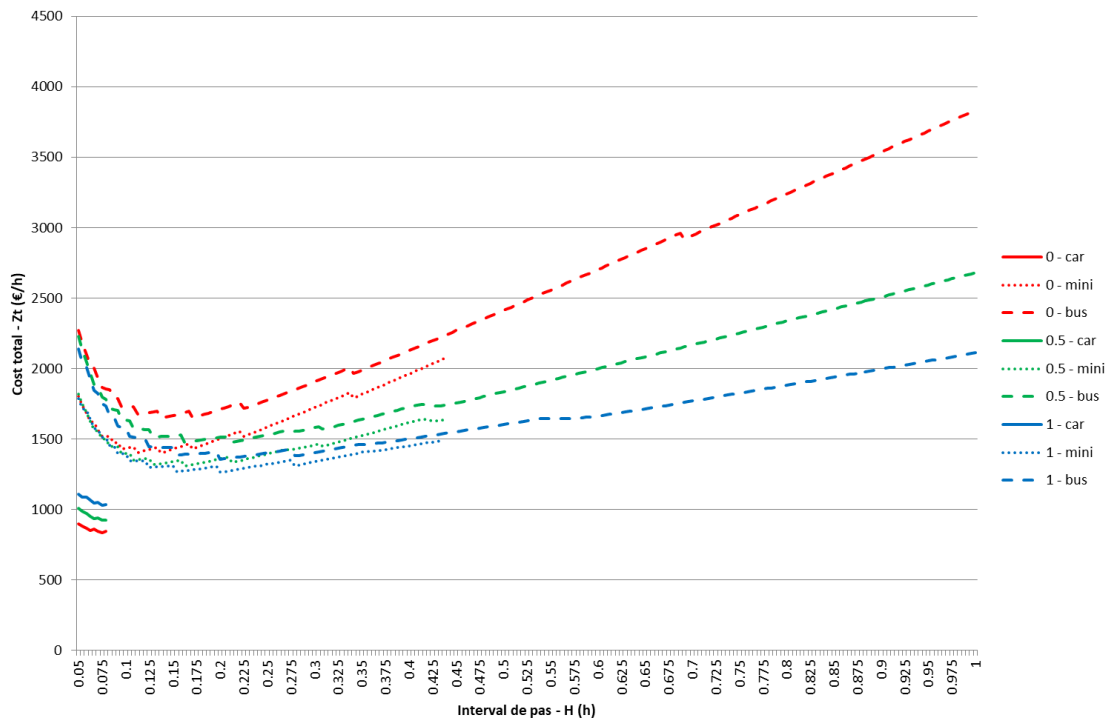


Figura 4.5: Costos totals (Z_t) — Interval de pas (H)

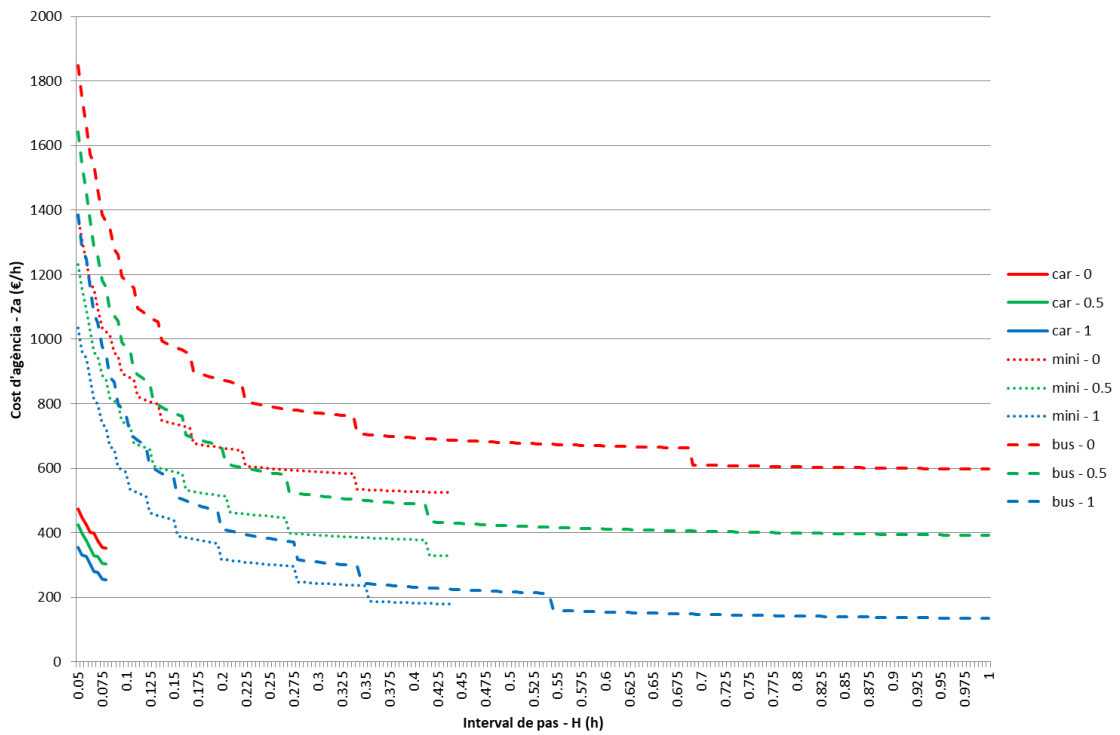


Figura 4.6: Costos d'agència (Z_a) — Interval de pas (H)

4.2 Anàlisi respecte la demanda

Aquesta part de l'estudi és una de les més importants ja que la demanda és un dels valors amb més pes a l'hora de caracteritzar una línia i, a més, un paràmetre difícil de predir. En el nostre model estem treballant sota la hipòtesi de demanda constant i coneguda, però no acostuma a ser el cas.

Comencem analitzant els costos totals respecte la demanda (λ) i el tipus de servei (α). En aquest cas, com anem augmentant la demanda, treballarem amb costos per passatger. Aquest gràfic (Figura 4.7) és l'estàndard per definir una mica quines son les regles generals pel model, és a dir, quin és el tipus de servei òptim en cada cas. Seguint en la mateixa línia que en la resta de l'estudi, el model DRT és l'òptim per nivells baixos de demanda i vehicles petits. Un cop aquests cotxes o taxis superen la seva capacitat (veiem que es talla la línia del cotxe als 35 pax/km²h), el canvi de vehicle ve lligat a un canvi de servei (línia convencional), operat per mini busos fins superar capacitat i passar a busos. Veiem que les fronteres estan bastant clares i vénen marcades per la condició de capacitat.

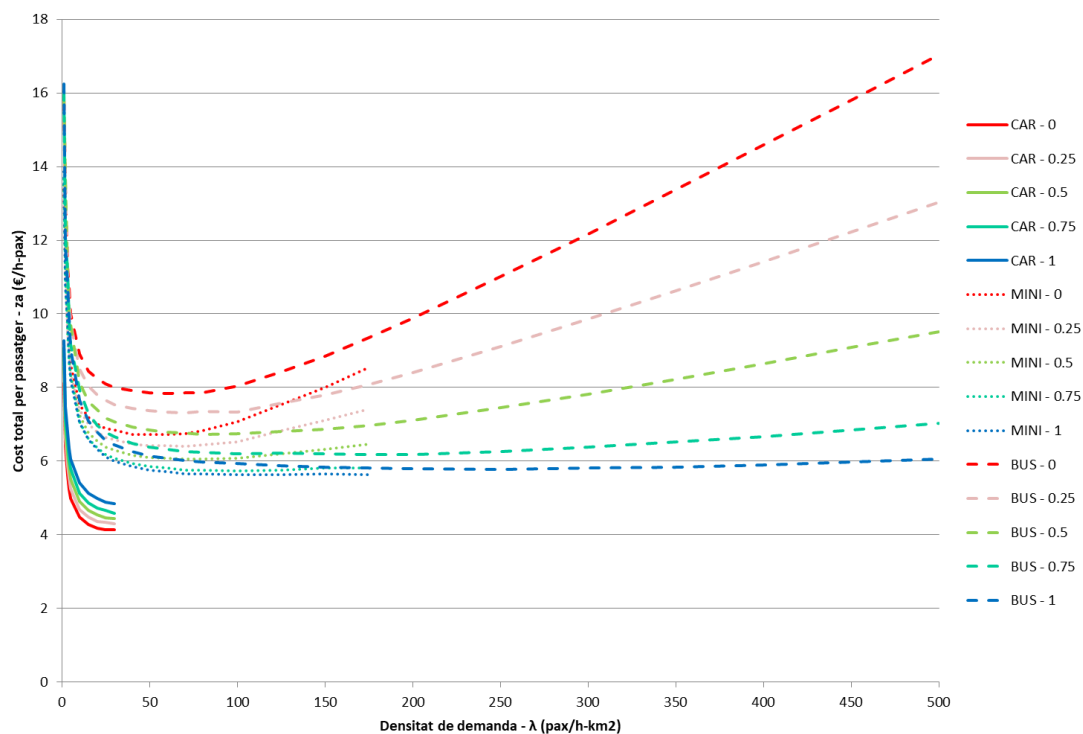


Figura 4.7: Cost total per passatger (z_t) — Densitat de demanda (λ)

Una segona lectura sobre la implementació de un sistema DRT es pot fer mirant les corbes resultants. Fixem-nos en les corbes pels vehicles més grans i imaginem que, encara que sigui el sistema més car, altres factors fan que s'implementi un sistema a la demanda que acaba tenint molt èxit entre els usuaris. Així com els models tradicionals es beneficien de les economies d'escala i mantenen els costos per rangs amplis de

demanda, els models DRT no són escalables ja que quan es sobrepassa una certa demanda (en el nostre cas unes 75 pax/km²-h) augmentar la demanda també suposa una pujada dels costos totals. De totes maneres, aquest augment dels costos totals no prové de costos alts per l'agència, sinó d'augment en el temps de viatge deguts als *detours* d'altres passatgers. De fet, podem veure a la Figura 4.8 que el comportament per l'agència, amb valors més o menys alts, és el mateix independentment d'alpha.

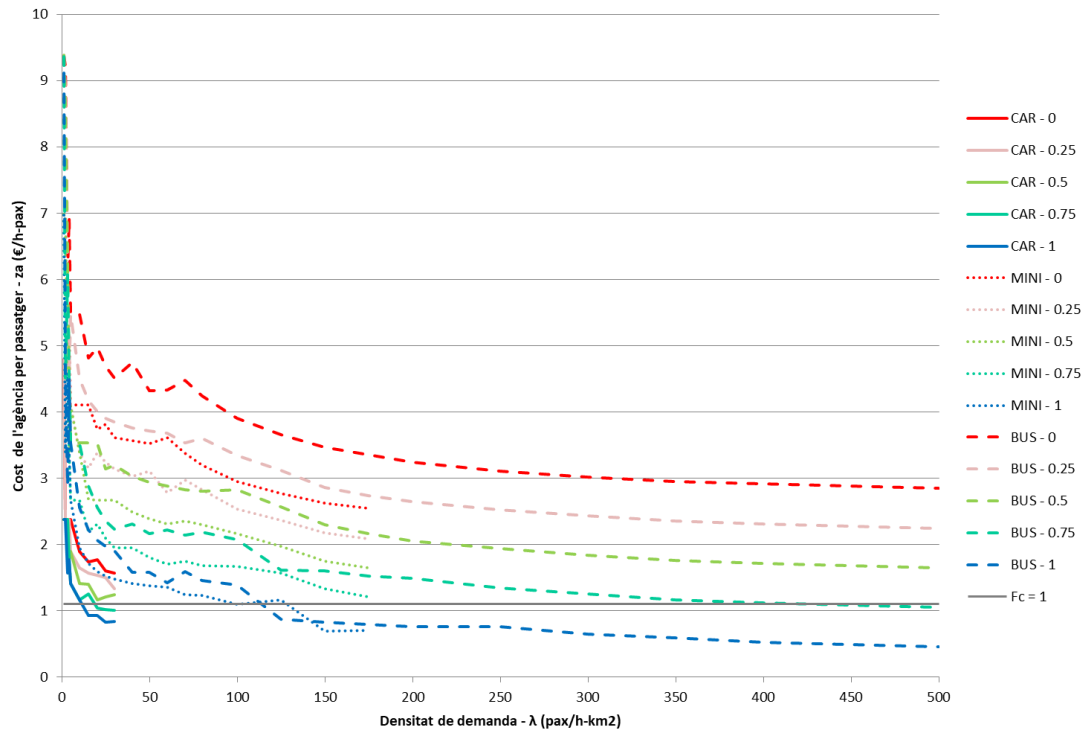


Figura 4.8: Cost de l'agència per passatger (z_a) — Densitat de demanda (λ)

A la Figura 4.8 també s'ha marcat el valor amb factor de cobertura (F_c) igual a 1 i tots els serveis per sota de la línia són els econòmicament rendibles sense subvenció. Aquest seria l'objectiu a aconseguir pel servei, encara que un factor de més del 50% també es considera una victòria en molts casos ($z_a < \sim 2 \text{ €/h} - \text{pax}$).

Llavors, fem la següent reflexió. Imaginem el nostre DRT aplicat amb una demanda de 75 pax/km²h. Cost per l'agència d'uns 4.50€/pax, factor de cobertura només del 25%. L'administració no pot assumir un servei tant subvencionat però confia que el servei tingui èxit i que augmentin els usuaris, per així abaratir costos, però, és això factible? Què passa amb el cost total quan mirem la Figura 4.7 a una demanda de, per exemple 200? En el moment en què un DRT té molt èxit, deixa de ser eficient per l'usuari i aquest deixa d'utilitzar-lo. I quan perd demanda torna a ser eficient i tornen alguns usuaris. En conclusió, un DRT pot semblar escalable per l'agència però té molt difícil mantenir augments considerables de demanda, un cop passada la demanda del punt òptim.

constant però amb diferents relacions entre longitud i amplada, des de $\frac{L}{w} = 1$ (un quadrat) fins a $\frac{L}{w} = 50$ (una banda llarga i prima).

A la Figura 4.10 veiem quin seria el servei òptim per cada configuració. En funció de la demanda, segueix les conclusions de l'apartat anterior amb canvis de servei marcats principalment per la limitació de capacitat dels cotxes. Considerem que valors de 0.05 o 0.9 s'aproximen a 0 i 1 respectivament i, per tant, no hi ha cap òptim mixt. Si sobrepassem la restricció de capacitat pel menor vehicle (Figura 4.11) veiem que els casos entremetjats apareixen a la mateixa regió. Respecte la dependència de la forma, no veiem que el model òptim depengui en extrem de la forma però hi ha una lleugera tendència cap als DRT quan l'àrea és quadrada i viceversa.

Alpha α	Densitat de demanda - λ (pax/h-km2)																								
	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450
Factor de forma - L/w (ad)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1	1	1	1	1	1
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1	1	1	1	1	1
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.95	0.9	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	0.95	1	1	1	1	1	1
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0.95	1	0.95	0.95	1	1	0.95	0.95	1	1	1	1	1	1
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	1	0.95	1	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1	1	1	1	1	1
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	1	1	1	1	0.95	1	0.9	1	1	1	1	1	1	1
	40	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	1	1	0.95	1	1	1	1	1	1	1	0.95	1	1	1	1
	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0.95	1	1	1	0.95	0.95	1	1	1
											CAR					MINI					BUS				

Figura 4.10: Alpha òptima (α)— Densitat de demanda (λ) — Forma (L/w)

Alpha α	Densitat de demanda - λ (pax/h-km2)																								
	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450
Factor de forma - L/w (ad)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.45	0.55	0.65	0.75	0.8	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95	0.95
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.45	0.55	0.7	0.75	0.8	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95	0.95
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.45	0.55	0.7	0.75	0.8	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95	0.95
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.4	0.6	0.7	0.75	0.8	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95	0.95
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.05	0.55	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95	0.95
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.5	0.55	0.75	0.8	0.8	0.85	0.85	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95
	30	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0.55	0.6	0.7	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9	0.95
	40	0	0	0	0	0	0.05	0	0.05	0	0.1	0	0.65	0.55	0.55	0.7	0.85	0.8	0.85	0.85	0.9	0.85	0.9	0.9	0.95
	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0.65	0.65	0.75	0.7	0.75	0.8	0.9	0.9	0.95	0.9	0.9	0.9	0.95

Figura 4.11: Alpha òptima (α)— Densitat de demanda (λ) — Forma (L/w) (CAR)

A la Figura 4.12 veiem com la forma afecta al cost total segons el tipus de vehicle. Generalment, les formes extremes pugen el cost, fent que sigui recomanable mantenir-se a la regió de $4 < \frac{L}{w} < 20$. A més, els vehicles petits es mantenen òptims en zones més quadrades que els grans. Així, concloem que la forma afecta principalment als costos totals del model i no tant al tipus de model òptim.

Zt (€/h-pax)	Densitat de demanda - λ (pax/h-km2)																									
	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450	
CAR Factor de forma - L/w (ed)	1	6.3247	5.1624	4.786	4.6307	4.5321	4.3657	4.3718	4.5344	4.7624	5.023	5.5932	6.1961	6.7068	6.981	7.1828	7.4248	7.6037	7.7368	7.8459	7.9437	8.1066	8.2563	8.4046	8.5268	8.6512
	2	6.6171	5.2893	4.8017	4.5299	4.3553	4.0894	4.0566	4.0854	4.1804	4.3238	4.6832	5.0525	5.435	5.6288	5.7963	6.0148	6.1616	6.263	6.3526	6.4351	6.5757	6.7097	6.8453	6.9599	7.0777
	4	7.0961	5.5055	4.9205	4.6246	4.4538	4.0915	3.9943	3.9408	3.9692	4.006	4.3691	4.4116	4.6792	4.8362	4.9452	5.1084	5.3072	5.3927	5.4591	5.5278	5.6493	5.7707	5.8952	6.009	6.1224
	8	7.8168	6.1193	5.3828	5.0441	4.8284	4.3354	4.1715	4.0753	4.0595	4.037	4.4099	4.2189	4.7703	4.8653	4.5485	4.6682	4.8181	4.9773	5.0467	5.0966	5.2107	5.3167	5.433	5.5415	5.6506
	10	8.1185	6.3962	5.618	5.2355	4.9978	4.4724	4.2719	4.1822	4.1388	4.137	4.4442	4.2782	4.3573	4.4326	4.4893	4.5968	4.7426	4.8994	5.0022	5.048	5.1571	5.2577	5.3712	5.4795	5.5875
	20	9.294	7.3659	6.534	6.0448	5.7423	5.0648	4.8063	4.6843	4.6065	4.5701	4.5212	4.5164	4.5663	4.5895	4.6115	4.6734	4.7733	4.8986	5.0252	5.1678	5.2584	5.3526	5.4517	5.5579	5.6614
	30	10.199	8.1029	7.2327	6.6799	6.313	5.5425	5.2648	5.1043	5.0131	4.9537	4.8955	4.8717	4.8736	4.8665	4.8749	4.8926	4.9776	5.0716	5.1982	5.3271	5.5033	5.5927	5.6854	5.7872	5.8875
	40	10.965	8.7239	7.7716	7.221	6.8337	5.9798	5.6487	5.4707	5.369	5.2917	5.2282	5.1883	5.1652	5.1431	5.1367	5.1376	5.199	5.2842	5.3982	5.5192	5.7633	5.8488	5.9379	6.0364	6.1356
	50	11.651	9.2684	8.2536	7.6724	7.277	6.3448	5.994	5.8086	5.6954	5.6058	5.5169	5.4673	5.4259	5.4026	5.3904	5.3857	5.4219	5.5016	5.6058	5.7198	5.8554	6.0982	6.1821	6.2772	6.3776
	MINI Factor de forma - L/w (ed)	1	12.134	10.674	10.093	9.7968	9.5525	9.0004	8.7536	8.6547	8.5629	8.515	8.4541	8.4396	8.4274	8.4247	8.4058	8.3844	8.3816	8.3965	8.4103	8.4452	8.5261	8.62	8.7143	8.8122
2		11.656	9.9585	9.2021	8.7416	8.4571	7.7273	7.4069	7.2449	7.1436	7.0647	6.989	6.9436	6.9295	6.9227	6.9222	6.8958	6.874	6.8666	6.8878	6.9015	6.9707	7.0523	7.134	7.2298	7.3307
4		11.94	9.9139	8.9527	8.3564	7.9606	7.0647	6.7034	6.4997	6.3709	6.2767	6.1564	6.1034	6.0732	6.0524	6.0287	6.0331	6.0233	6.0072	6	6.0145	6.0531	6.1231	6.198	6.2901	6.3791
8		12.911	10.41	9.2638	8.5178	8.0657	6.9724	6.5255	6.2762	6.1081	5.9951	5.8472	5.7754	5.722	5.6843	5.6616	5.641	5.6491	5.6551	5.6384	5.6481	5.6561	5.7034	5.7687	5.8483	5.9324
10		13.368	10.727	9.4667	8.6758	8.1971	7.0526	6.5675	6.2943	6.1218	6.0051	5.8567	5.7581	5.7085	5.661	5.6442	5.6281	5.6156	5.64	5.6231	5.6106	5.6189	5.6866	5.7257	5.797	5.8835
20		18.492	12.156	10.428	9.5298	9.0527	7.5796	6.9944	6.6741	6.4555	6.3213	6.1337	6.0297	5.9508	5.8886	5.8514	5.8107	5.8052	5.7896	5.8257	5.8369	5.8279	5.9413	5.8942	5.9429	6.009
30		19.488	13.072	11.234	10.331	9.7105	8.1003	7.4653	7.1099	6.8768	6.7033	6.5019	6.3691	6.2865	6.2391	6.1764	6.1239	6.0955	6.0965	6.1138	6.1559	6.1468	6.1454	6.1721	6.2213	6.2856
40		20.298	13.864	11.941	11.05	10.272	8.5858	7.9053	7.5105	7.2631	7.0902	6.8552	6.7032	6.6153	6.5496	6.4972	6.4419	6.3961	6.3892	6.3877	6.4156	6.4662	6.4638	6.4769	6.5134	6.5709
50		20.991	14.561	12.589	11.642	10.775	9.0542	8.294	7.89	7.6164	7.4329	7.1865	7.0406	6.9416	6.8589	6.8044	6.7394	6.6935	6.6808	6.6695	6.6817	6.7708	6.7582	6.7645	6.7955	6.8474
BUS Factor de forma - L/w (ed)		1	14.539	12.054	11.065	10.548	10.322	9.4763	9.2175	9.0444	8.903	8.8499	8.7565	8.6913	8.6437	8.5949	8.5653	8.5334	8.5115	8.5044	8.5165	8.5329	8.5918	8.6733	8.7626	8.8557
	2	14.057	11.157	10.035	9.5316	9.3107	8.2085	7.8168	7.6335	7.5187	7.4032	7.305	7.227	7.1943	7.1438	7.1097	7.0564	7.0255	7.0106	7.0046	7.0144	7.0512	7.1225	7.1956	7.2848	7.3818
	4	14.345	11.026	9.8027	9.4134	8.8223	7.667	7.1802	6.9035	6.7345	6.6457	6.4969	6.4231	6.3703	6.331	6.3052	6.2373	6.1911	6.168	6.1529	6.1513	6.1619	6.2154	6.2784	6.3624	6.4448
	8	15.317	11.525	10.402	9.6335	9.207	7.5762	7.0423	6.7501	6.5571	6.4089	6.2256	6.1256	6.0673	6.0231	5.984	5.9465	5.8841	5.8478	5.8228	5.8136	5.801	5.8272	5.8756	5.9441	6.0186
	10	15.772	11.844	10.776	9.7929	9.0586	7.655	7.0982	6.7875	6.5716	6.4357	6.258	6.1328	6.0751	6.0085	5.9808	5.9305	5.8836	5.8408	5.8196	5.798	5.7855	5.8083	5.8436	5.9014	5.9788
	20	23.334	14.554	11.975	10.648	9.9114	8.3104	7.6392	7.2569	7.0052	6.839	6.5917	6.4663	6.3686	6.3108	6.2647	6.1943	6.1767	6.1234	6.0861	6.06	6.0338	6.0286	6.0464	6.0846	6.136
	30	23.531	15.478	12.78	11.444	10.754	8.5587	8.1547	7.721	7.4516	7.2617	7.0034	6.8507	6.7656	6.6754	6.6165	6.5472	6.5223	6.4799	6.4483	6.4161	6.3859	6.3666	6.3698	6.3913	6.4377
	40	24.532	16.268	13.487	12.166	11.516	9.4472	8.6317	8.1699	7.8757	7.6895	7.3953	7.2334	7.1265	7.0438	6.9868	6.8917	6.8414	6.8097	6.7994	6.7883	6.7254	6.7075	6.7018	6.7121	6.7461
	50	25.434	16.966	14.132	12.849	12.151	9.9144	9.0741	8.6044	8.2816	8.0601	7.757	7.58	7.4593	7.3711	7.3243	7.2288	7.1573	7.1232	7.1123	7.0898	7.0455	7.023	7.0139	7.0149	7.0407

Figura 4.12: Cost total (z_t) — Densitat de demanda (λ) — Forma (L/w)

5. Estructura tarifària

Al llarg de la revisió bibliogràfica (apartat 2) i l'anàlisi de sensibilitat (apartat 4) hem vist com un dels principals problemes dels serveis DRT és la falta de rendibilitat econòmica. Com deia el segon consell, per un pròsper DRT s'ha d'adaptar el preu a la qualitat/cost del servei perquè sinó, estarem oferint un servei de taxi a preu de bitllet d'autobús, i no calen grans estudis per veure que això és, com a poc, problemàtic. Aquesta adequació es pot fer plantejant reduccions de la qualitat, com s'ha proposat amb el model mixt, o augmentant les tarifes, com veurem a continuació.

Així, anem a presentar quines alternatives tarifàries existeixen per després fer una proposta tarifària que tingui en compte les particularitats dels costos i ingressos d'un DRT. De totes maneres, l'elecció d'estructura tarifària depèn de molts altres factors i és un aspecte molt particular de cada cas d'aplicació.

5.1 Alternatives tarifàries

Quan parlem d'alternatives tarifàries en referim a la manera de definir els ingressos d'un servei de transport públic, ja sigui a través de la tarifa (preu directe del bitllet) o a través de subvencions. No sempre s'apliquen subsidis però en general el transport públic rep algun tipus de compensació pública ja que al ser un bé inferior, es necessita la subvenció per beneficiar al màxim d'usuaris.

Pel que fa a la **tarifa**, acostuma a estar fixada pel cost marginal del servei en qüestió. Per materialitzar-la, hi ha infinitud d'esquemes que varien d'es d'una tarifa completament plana fins a pagaments diferenciats segons la distància, l'hora del dia, la qualitat del servei o el sector de mercat (TCRP, 1996):

- Tarifa plana: la tarifa més senzilla i bona d'entendre pels usuaris. Cost constant independentment de qualsevol altre variable.
- Basada en la distància: on els viatges més llargs tenen una tarifa més alta. En general aquests sistemes són els més complicats tant per l'usuari com per l'operador. A més, es pot plantejar de diverses maneres:
 - Directament proporcional a la distància.
 - Directament proporcional a la distància més una quota fixa inicial.
 - Tarifa plana per distàncies petites i a partir de cert límit directament proporcional a la distància
 - Basat en zones de tarifa plana, pagant increments cada cop que es canvia de zona.
- Basada en el temps: principalment pujant els preus de l'hora punta ja que els costos marginals són més alts i a més la demanda és menys sensible al preu.

- Basada en la qualitat: generalment canviant les tarifes als diferents mitjans de transport.
- (Basada en el mercat): oferint preus més baixos als viatgers freqüents i que comprin un títol per avançat. Així, es beneficia la compra de passes, ja siguin il·limitats o amb un nombre considerable de viatges, ajudant al sector del mercat més sensible al preu i també repercutint en l'usuari l'estalvi operacional de comprar el bitllet per avançat. Aquest darrer sistema s'acostuma a utilitzar quasi sempre i combinat amb qualsevol dels sistemes anteriors.

A part d'això, també s'ha de fixar una política de transferències i integració de serveis, ja sigui pagant la tarifa sencera cada cop, pagant una tarifa reduïda o tenint transferències gratis.

Des del punt de vista de la rendibilitat, hi ha diversos arguments que apunten cap a una estructura diferenciada enlloc de plana. En primer lloc, els increments de costos degut a viatges llargs, en hora punta o de major qualitat s'haurien de cobrar directament perquè sinó ens trobem en una situació on els passatgers de viatges curts, en hora vall i amb servei de menys qualitat són qui subvencionen aquests increments de cost. D'altra banda, els usuaris dels serveis d'alt cost acostumen a tenir una menor elasticitat que els usuaris de baix cost, així que una estructura diferenciada té major potencial recaptatori (TCRP, 1996).

D'altra banda, tenim les estructures dels **subsidis** de l'administració. Aquests pagaments es fan per assegurar la rendibilitat d'un servei que es consideri públic i necessari per a la societat. També entraria en aquesta secció l'abonament de les reduccions de tarifa per raó social, com poden ser les reduccions per persones de la tercera edat, joves, famílies nombroses, etc. Cada subvenció és un món i en cada contracte de concessió es fixen les normes del joc, més o menys enrevessades. D'una manera molt general, es podria dir que el subsidi s'abona principalment de tres maneres:

- En funció de la distància recorreguda
- En funció del temps en servei
- En funció del nombre de passatgers

Les grans concessions poden rebre combinacions dels tres models de pagament però el més comú és que sigui per distància. En línies convencionals, on el recorregut és fixe tant en l'espai com en el temps, és fàcil traduir tots els costos a costos per distància i per tant aquest model és senzill i bo d'implementar. Per les reduccions degut a preus socials, si es paguen apart, sí es fa en funció dels passatgers reals.

5.2 Particularitats del DRT

Els serveis DRT són un servei que es desvia de les línies d'autobús tradicionals. Recordem que es defineix com tota l'escala de grisos entre un autobús (sense flexibilitat) i un taxi (amb flexibilitat total). Així, el DRT va prenent característiques d'ambdós serveis, però, de qui ha de prendre l'estructura tarifària?

Evidentment, diferents esquemes necessiten de diferents tarifes, però tots els DRT comparteixen certes particularitats, tal com hem observat en el que portem del treball:

- Els serveis DRT són **òptims per demandes baixes**, on els costos són elevats però decreixen ràpidament amb l'augment de demanda (a curt termini).
- El cost total dels serveis DRT no s'estabilitza amb la demanda, sinó que passada una **demanda òptima crítica** torna a créixer ràpidament. Aquest efecte és degut a l'augment del temps de viatge (causat pels *detours*) que ocasiona un augment del costos temporals. Així, s'ha de controlar bé l'ocupació dels serveis.
- Els serveis DRT **no són escalables** i no arriben a la regió de costos marginals ja que la demanda crítica és molt abans.

A més, centrant-nos en el procés d'operació:

- Es **necessiten molts vehicles petits** més que un gran bus i, per tant, hi ha un cost de personal important.
- **Cada recorregut del vehicle és diferent**, tenint inclús **temps d'espera** a ser servit en els què el vehicle simplement està disponible però no hi ha passatgers.

5.3 Proposta d'estructura tarifària per un DRT

Vistes aquestes consideracions, sembla evident que un servei tant personalitat no pot tenir una estructura plana. Llavors, es planteja una estructura amb **quatre components**, dues de tarifa i dues de subsidi:

1. Una tarifa per distància per cobrir els costos generals.
2. Una baixada de bandera variable per adequar el pagament a la qualitat del servei.
3. Una subvenció per hora per cobrir els costos derivats de la disponibilitat del servei i compensar els temps morts on el vehicle no està facturant.
4. Una subvenció per viatge equivalent a la que es podria donar per un servei convencional i on s'incloguin els descompte socials dels diferents grups de població.

Aprofundint en la tarifa, la base és la distància, per compensar el cost més directe del servei. A aquest cost li sumem una baixada de bandera en funció de la qualitat. En moments de baixa demanda, amb vehicles pràcticament buits, s’oferirà un temps molt competitiu i per tant el factor de qualitat pujarà la tarifa total per adequar-la a les altes prestacions del servei. En moments d’alta demanda, aquest factor de qualitat baixarà (inclús sent zero) per compensar als usuaris que, degut a la gran quantitat d’orígens i destins, fan el trajecte amb un temps molt poc competitiu. Aquesta compensació és necessària per intentar contrarestar la falta d’escalabilitat del servei i poder tenir els vehicles plens, ja que així l’agència abarateix costos.

A més, si hi ha vehicles disponibles, es pot utilitzar la baixada de bandera per fer una mica de gestió de la demanda i repartir els usuaris de manera homogènia entre vehicles i obtenir temps mínimament competitius per tothom.

El sistema funciona sempre i quant se li ofereixi a l’usuari varies opcions de viatge segons la qualitat desitjada. Aquesta funcionalitat necessita doncs d’un nombre considerable de vehicles i usuaris que facin rutes a diferents nivells de servei, així que es planteja principalment per **zones grans de DRT**.

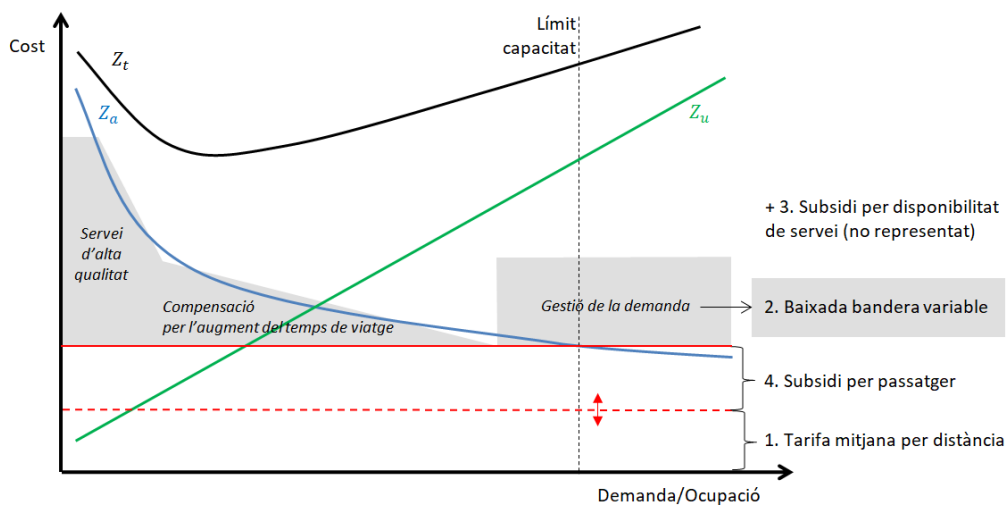


Figura 5.1: Esquema de costos del sistema tarifari.

A la Figura 5.1 es representen de manera **esquemàtica** les diferents parts de la tarifa i quins costos pretenen compensar en funció de la demanda. Com podem veure, la gràcia del sistema està a la baixada de bandera variable, que adapta el preu a la qualitat, compensa els temps de viatge alts als usuaris amb els beneficis que això suposa per l’agència i gestiona la demanda quan ens apropem a capacitat. Aquesta compensació el que intenta fer és moure “virtualment” la demanda crítica cap endavant i apropar-la a la capacitat del vehicle, on els costos de l’agència són menors.

Evidentment el model és només indicatiu i necessita calibratge i adaptació a cada cas.

6. Conclusions del capítol I

Acabem aquest capítol resumint els principals resultats de l'anàlisi teòric i analític.

De la discussió bibliogràfica s'ha trobat que:

1. Els sistemes de transport a la demanda necessiten un **disseny simple** i ben verificat. Per això, es fa una optimització mitjançant models ideals i es validen els models amb una simulació microscòpica per agents.
2. La **tarifa s'ha d'adaptar al cost i la qualitat** del servei ja que els problemes de rendibilitat són la principal causa de fallida dels DRT.
3. L'**acceptació de tots els involucrats** és clau; necessiten facilitats per demanar els viatges i coneixement/confiança de que el servei funcionarà bé.

Com a productes d'aquest estudi s'han obtingut:

4. **Tres models ideals** de probabilitat per sistemes convencional, DRT i mixt. Els models són flexibles i funcionals per optimització i necessiten només 15 inputs, 5 dels quals acostumen a prendre valors estàndard.
5. **Un full de càlcul d'optimització** dels tres models mitjançant macros d'Excel i VBA.
6. **Un esquema tarifari general** que intenta compensar el cost variable del servei i adequar la tarifa a la qualitat.

D'altra banda, com a conclusions teòriques sorgides de l'anàlisi d'aquests productes s'ha deduït que:

7. Els serveis DRT són **òptims** per demandes baixes amb vehicles petits (fins assolir la restricció de capacitat, en el nostre cas $< 30 \text{ pax/km}^2\text{h}$). Per demandes majors el servei òptim és el convencional.
8. La **geometria de la zona** no afecta el tipus de servei però sí els costos d'aquest, fent preferibles les zones en les quals $4 < \frac{L}{w} < 20$.
9. El model convencional a intervals de pas baixos, com pot saltar-se parades, es converteix en un **servei fluid** sense parades físiques on els passatgers pugen a l'altura que volen del carrer central.
10. Per estalviar temps d'accés s'ha de sacrificar temps dins el vehicle però a partir de cert punt aquest canvi ja no és rendible. Això fa que els **DRT** tinguin un interval de pas crític (15-20 min) i una **demanda crítica** ($75 \text{ pax/km}^2\text{h}$). Aquest fet fa que els **DRT no siguin escalables** ja que els creixents costos pels usuaris (causats per augments del temps de viatge) fan que la demanda s'estanqui en la demanda crítica.

11. Els **costos de l'agència són inversament proporcionals a alpha**, baixant de manera constant al augmentar alpha.
12. El nínxol perquè el model alpha sigui sinèrgic és massa transitori i poc competitiu. El paper dels **models híbrids** a zones de demanda uniforme és donar una **solució de compromís**, per abaratir el preu del DRT en zones subòptimes i alleugerar la falta d'escalabilitat dels models a demanda.
13. Una **tarifa que s'adapti a la qualitat** i compensi als passatgers pels augments de temps de viatge és una opció per intentar moure l'equilibri més enllà de la demanda crítica, on els costos de l'agència són menors.

Capítol II: Aplicació pràctica

7. Descripció del cas real

Un cop hem presentat tot el rerefons teòric i la metodologia d'optimització, anem a fer el salt cap al món real per veure com passar de característiques físiques a paràmetres ideals, com optimitzar i validar el model i com materialitzar un servei. Per fer-ho s'ha decidit abordar la mobilitat urbana de la ciutat de Ciutadella, a l'illa de Menorca.

7.1 Justificació de la zona d'estudi

Ciutadella és una de les dues "grans ciutats" de Menorca (Espanya) i el principal nucli de la zona oest de l'illa. Amb 29.000 habitants (el 30% de l'illa) funciona i s'ha construït com un nucli urbà important, però sense perdre la tradició i la manera de fer més rural que caracteritza a la societat menorquina.

Aquest balanç ha facilitat la creació d'una ciutat compacta, densa, amb diferents patrons d'eixample en quadrícula i on els carrers més antics i sinuosos queden confinats al casc antic per a vianants. Al mateix temps, però, degut a la gran simpatia i accessibilitat envers el vehicle privat, el transport públic i sobretot l'urbà mantén demandes molt baixes, típiques de zones rurals, composades principalment pels grups de població que no poden conduir.

Així, i fent referència al quart consell per un bon DRT, s'ha triat Ciutadella per ser un indret:

- On la demanda és baixa i adient per un servei DRT.
- On un grup important dels usuaris de transport públic són persones majors o amb mobilitat reduïda, que es poden beneficiar enormement d'un servei porta-a-porta i que justifiquen una millora de qualitat del servei.
- On l'àrea a servir no és ni gran ni petita, uns 3km².
- On la xarxa de carrers és prou homogènia, en quadrícula i sense sinuositats o cul de sacs importants que pugin causar que la idealització a xarxa ortogonal es separi massa de la realitat.
- On la xarxa urbana està completa i no s'esperen canvis importants d'usos o de demanda.
- On el servei d'autobús actual és deficitari i poc atractiu, i per tant una proposta de millora pot transcendir aquest anàlisi teòric per almenys encetar una discussió sobre la millora del transport públic a Ciutadella, i a Menorca.

Apart, més enllà de que la zona sigui idònia per a la implantació d'un petit DRT, també hi ha un justificant de proximitat i una motivació personal de l'autor per estudiar i donar idees de millora per l'illa que l'ha vist créixer i que molts cops queda oblidada. De totes maneres, no era l'única alternativa i s'ha triat principalment per les seves característiques pròpies.

7.2 Funcionament actual del servei

Ciutadella té una única línia urbana, la L60, que transporta uns 26000 passatgers anuals. La gran majoria d'usuaris són locals, principalment gent jove i gent gran (bàsicament la població que no pot conduir un vehicle privat). Degut a la poca demanda, s'opera amb un únic mini bus de 14 seients.

Aquest servei s'adjudica juntament amb la resta de línies que van des del nucli urbà de Ciutadella fins a totes les urbanitzacions costaneres del municipi i actualment està operat per Autocares Torres. També forma part del sistema tarifari integrat de l'illa, sent un viatge d'una zona i amb un preu de 1.55€ per un senzill. La tarifa es pot veure reduïda comprant bitllets combinats (T10, 11.45€ o T40, 32.65€) amb la targeta per gent gran (TMes, 50% de descompte) o amb la targeta per menors de 21 anys (T21 amb viatges il·limitats, 17.65€).

Actualment s'opera només els matins però en el període estudiat la línia està en servei de 7:00 a 16:00 i de 17:00 a 21:00 els dies feiners i de 8:00 a 15:00 els dissabtes. L'interval de pas és alt, 60 min, el que es tarda en fer un cycle complet. La ruta (Figura 7.1) consta de 32 parades (anada i tornada) i 15.8 km de longitud.

Sobre el paper veiem que és simplement una ruta de barri, tranquil·la, amb pocs usuaris però que proporciona un servei mínim de mobilitat a dintre de la ciutat. En el següent apartat es presentarà la descripció més "a peu de carrer" per confirmar el paper de la línia en el context de la mobilitat dins la ciutat.



Figura 7.1: Ruta actual de la L60, vermell anada i lila tornada.

7.3 Experiència d'usuari

Per acabar, una manera senzilla però efectiva de veure com funciona un servei d'autobús és participant de l'experiència d'usuari. D'aquesta manera, fruit del viatge en primera persona i una entrevista informal amb el conductor de la línia, n'extraurem una primera imatge qualitativa de quin és l'estat actual i com i a qui serveix. Molta d'aquesta primera informació ja s'ha vist o es veurà reforçada posteriorment amb dades oficials sobre servei.

Torres Allés Autocares
S.L.
CIF: B07114366
Sastres, 1 - 07760
Ciutadella
Telf.: 902075066
menorca.tib.org

Senzill
De: Ciutadella
A: Ciutadella

TOTAL: EUR 1,55
(INCLOU IVA I SOV)

Núm Bitllet
34614-16709-42674

L60a SO C-34094
MAQ-34614 BUS-03054
12:07

17/08/2021
NO TIRI EL BITLLET, EL
NECESSITARÀ A LA
SORTIDA.

Figura 7.2: Bitllet senzill de la L60 d'autobús, un dimarts d'agost a les 12 del matí.

Comencem descrivint les característiques més directes del servei. El preu del bitllet senzill és 1,55€ i el vehicle utilitzat és un autobús petit, de 14 seients més 21 de peus amb possibilitat de pujar-hi en cadira de rodes.

Un cop a dintre de l'autobús, s'aniran descrivint situacions per exemplificar el funcionament del servei. En primer lloc, descobrim que si hi ha poca ocupació, el conductor demana i recorda el destí dels usuaris i així es salta les parades sense demanda ni de pujada ni de baixada. A més molts cops acaba avisant als usuaris d'on han de baixar. Aquest és un indicati d'una línia de barri, amb poca demanda, on el conductor fa pràcticament de taxista i coneix als usuaris habituals.

Una segona font d'informació és una petita enquesta a tots els usuaris que aniran pujant, indicant el seu perfil i el motiu del seu viatge. Principalment hi ha tres perfils d'usuari:

1. Persones majors o amb dolors per caminar que es mouen per fer els encàrrecs del dia a dia, al metge o per pujar a la zona de Dalt els penyals, a l'altre costat del port (4 persones).
2. Turistes que van del centre al polígon, per comprar a les grans superfícies (6 persones).
3. Una parella d'avis amb els seus néts que simplement han pujat per fer una volta, com si fos un bus turístic per Ciutadella, i que baixaven al mateix lloc on havien pujat. (5 persones).

Com es pot veure, la demanda és petita i el servei d'autobús no s'ha triat per ser l'opció més competitiva, sinó per ser la única opció.

En tercer lloc s'observa que el bus para en un punt del carrer que no té cap parada estipulada (sense desviar-se de la ruta i en un lloc segur a prop de la vorera) perquè baixin una parella de turistes. La situació era que els turistes tenien por de perdre's i el conductor el havia deixat el més a prop possible del seu destí final per evitar-ho. Aquest és el segon indicati de què la L60 és un servei més personalitzat del que sembla i que realment ja integra petits comportaments de DRT que beneficien als usuaris sense incrementar els costos d'operació.

Finalment es manté una conversació informal amb el conductor per saber més sobre el dia a dia del servei. Li pregunto per la demanda de la línia i em diu que mai ha vist l'autobús ple. De fet, està d'acord amb els meus perfils d'usuari i hi afegeix els estudiants que van i tornen de l'institut Maria Àngels Cardona a les 8 i a les 14h dels dies lectius. A més, em comenta que a aquelles hores el bus fa un petit *detour* de 500m i apropa als estudiants fins a l'institut, a una parada estipulada però que no apareix als horaris, i que normalment espera allà fins les 14:10 perquè a tots tinguin temps d'arribar. Aquest es el tercer indicati de què la L60 realment cuida als seus passatgers habituals i que les necessitats dels diferents fluxos de viatgers s'han tingut en compte a l'hora d'operar el servei.

També pregunto al conductor per la regularitat de la línia i em diu que no li és difícil mantenir l'horari, que els retards deguts als petits embussos de les zones amb semàfors ja estan contemplats i que excepte els dies que fa mal temps, el trànsit de Ciutadella és bastant regular. L'únic contratemps que es troba amb freqüència és que hi hagi vehicles aparcats a les zones de parada però veu difícil solucionar aquest problema així que simplement para al mig del carrer i continua sense sobresaltar-se.

Per últim reflexionem sobre la utilitat de la L60. El conductor remarca que és de les línies més deficitàries de la xarxa però que realment està allà per oferir un servei públic i social. I és que la mobilitat no deixa de ser un dret ciutadà i la gran majoria d'usuaris, sobretot els joves i la gent gran, perdrien part de la seva independència si haguessin de dependre sempre d'algú amb vehicle privat. Aquesta intenció del servei justifica bona part de les pèrdues i manté a la línia en funcionament.

En resum, podem extreure les següents idees sobre el servei que ens ajudaran a entendre la realitat de la línia i de la demanda a Ciutadella:

1. El cost del bitllet és 1.55€, amb reduccions pels passatgers habituals.
2. La línia s'opera amb un autobús petit, adaptat i de 21 places.
3. La L60, encara que es defineixi com a línia convencional, té diversos trets de DRT, concretament:
 - Es salta parades sense demanda (sense modificar la ruta).
 - En casos molt puntuals els passatgers poden baixar a llocs sense parada definida (sense modificar la ruta ni obstaculitzar el trànsit).
 - El servei s'adapta a un grup de demanda, concretament els estudiants que entren i surten de l'institut Maria Àngels Cardona, modificant la ruta habitual (amb possibilitat de retardar l'horari uns minuts).
4. La demanda habitual del servei és:
 - Persones majors o amb problemes de mobilitat.
 - Persones de tots els grups d'edat que han d'anar al polígon i no disposen de vehicle privat.
 - Estudiants que van a l'institut.
5. La línia és altament deficitària i es manté com a servei públic que garanteix el dret a la mobilitat dels grups de demanda ja esmentats.

8. Inputs dels models

Un cop hem presentat el cas, comencem a modelar. Recordem que es duran a terme dos tipus de simulacions:

1. Optimització amb models ideals: seguint la formulació descrita i obtenint resultats generals de caracterització del servei.
2. Verificació amb model microscòpic: per implementar els resultats de l'optimització dins un espai "realista", confirmar la bondat dels models ideals i veure les possibles desviacions d'algunes variables.

En el context d'aquest treball, es fa la verificació, com s'ha dit, per confirmar la validesa dels models ideals, però en molts casos no caldria utilitzar simuladors microscòpics com a part del procés de disseny. De totes maneres, sempre dona un valor afegit a una proposta i es pot acabar reciclant el model per dur a terme operacions de control del trànsit a la zona simulada.

Passant a la part pràctica, tot model necessita uns **inputs ben definits** i el nostre cas no és diferent. En les següents pàgines s'explicarà amb el màxim detall com s'han definit tots els inputs, no només com una presentació dels resultats sinó com un exemple de **metodologia** a seguir en casos similars al nostre.

Notem que s'aniran detallant els inputs pel model microscòpic i pel model ideal en paral·lel ja que per l'àmbit d'aquest treball han compartit fonts de dades o inclús s'han derivat els uns dels altres. De fet, encara que no ho sigui pròpiament, algunes funcionalitats GIS d'Aimsun s'han emprat per deduir inputs pel model ideal. Cal remarcar, però, que el procés natural seria fer primer el model de probabilitat simplificat, que serveixi per prendre decisions estratègiques, i després potser validar els resultats amb la simulació microscòpica.

Per facilitar la organització de totes les variables, s'han dividit en tres grups: geometria, demanda i vehicle. A més, a la Figura 8.1 veiem quines són les fonts de dades de cada grup i quins inputs necessita cada tipus de model. A continuació anirem explicant cada grup, presentant primer els inputs del model microscòpic i després els de l'ideal. No es comentaran els inputs que prenen valors estàndard però sí que es comprovarà que tant els models ideals com el microscopi comparteixin els mateixos valors.

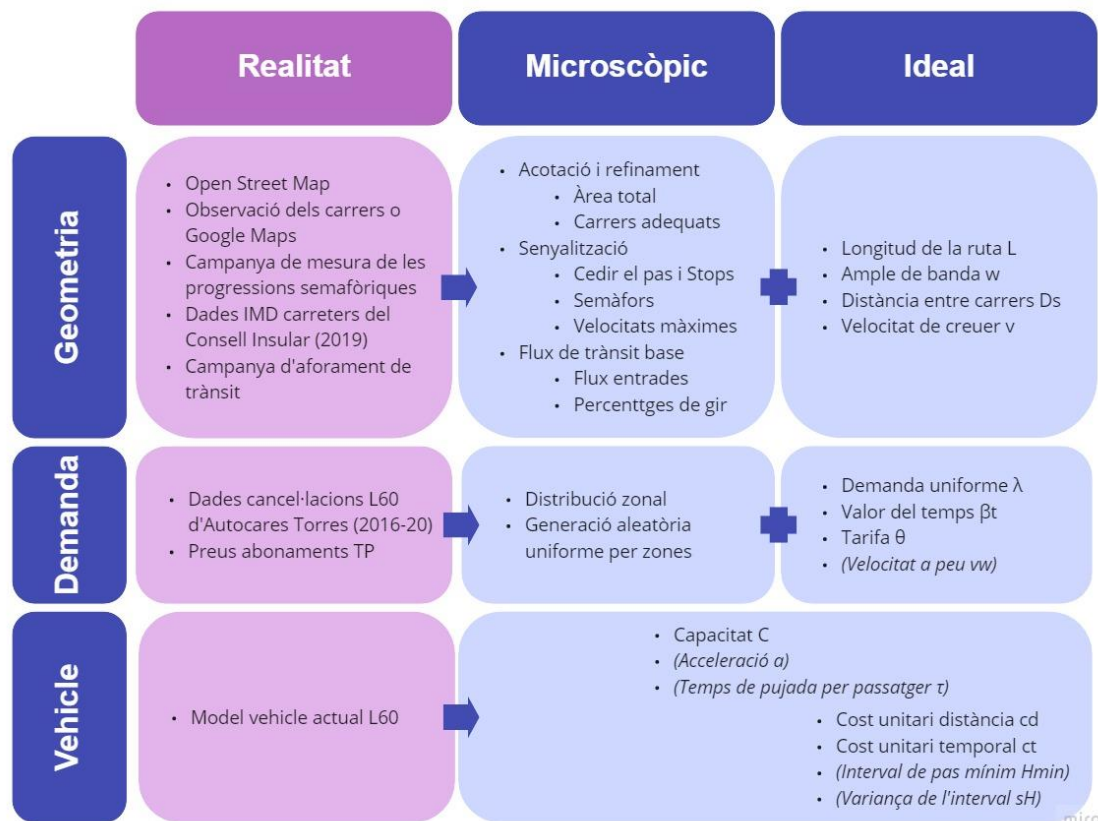


Figura 8.1: Esquema inputs pel model ideal i microscòpic.

8.1 Geometria

La primera part del model que cal definir és la geometria, l'espai on es simularà el servei. Aquest primer grup de variables es podrà descriure amb molt detall a la simulació microscòpica però serà el que necessiti una major abstracció a l'hora de caracteritzar el model teòric ideal. Recordem però, que un dels objectius d'aquest treball és intentar quantificar (o almenys descriure) les diferències entre ambdós tipus de modelització i així acotar les incerteses que apareixen quan s'utilitza un model ideal. Començarem presentant els diferents inputs per la simulació amb Aimsun i a continuació la seva idealització pel model ideal.

8.1.1 Model microscòpic

Per definir la geometria de base de la simulació s'ha partit de la cartografia lliure d'OpenStreetMap (OSM), que s'ha acotat, revisat i refinat a partir de diverses fonts d'informació i diverses visites de camp. L'objectiu d'aquesta part és intentar que la xarxa s'assembli al màxim a la realitat.

Acotació de l'àrea de simulació

De l'OSM obtenim un rectangle de terreny, amb tot tipus de carrers, camins i vies que cal acotar per aconseguir un espai mínimament confinat, d'interès per l'estudi i que pugui albergar bé tot el que es vulgui simular. En quant a l'extensió de l'àrea simulada, s'ha optat per limitar l'estudi a l'interior de la Ronda Nord al nord, fins el polígon industrial POICI a l'est i fins la xarxa de carrer (Canal Salat, Av. Josep Mascaró i Me-01) al sud. Amb aquesta primera limitació, quedarien fora de l'estudi les cases del Camí de Sa Farola, el barri del Camí de Sant Joan de Missa i la urbanització de Santandria, sent aquests dos últims potencials ampliacions del servei en un futur.

L'interior de la zona també exclourà algunes àrees, com els hortalers i cases de camp de la zona nord (als voltants del Camí de Son Salomó o al Camí de Sant Agustí) i el barri vell, en gran mesura per a vianants o de difícil accés per un autobús. Veiem una aproximació de la zona simulada a la Figura 8.2.



Figura 8.2: Zona aproximada de simulació.

A més, també s'han eliminat del model la xarxa de carril bici, vies per a vianants, pàrquings, vies de servei, carrers sense sortida on no es pugui donar la volta, camins, altres vies sense asfaltar i decoracions vàries que incloïa l'OSM i que no es necessiten pel bon funcionament del model.

Per últim, s'han eliminat les vies d'entrada a la xarxa que no tenien un mínim flux regular de trànsit, majoritàriament camins i entrades a propietats particulars.

D'aquesta manera, es vol limitar l'estudi a les zones de realment xarxa urbana compacta on hi pugui circular un autobús petit o aquelles vies necessàries per la simulació del trànsit com la Ronda Nord.

Revisió i senyalització

Un cop acotat el model, es passa a la revisió de la xarxa de carrers, via a via, intersecció a intersecció, comprovant que els sentits de circulació i girs permesos són correctes i inclouent tota la senyalització viària ja que l'OSM no la recull. Aquest darrer pas inclou introduir totes les senyals de stop i cedi el pas, els carrils auxiliars, dobles o reservats i les línies contínues. Aquesta feina es va fer amb l'ajuda de Google StreetView i comprovació de camp a les interseccions modificades recentment o que no estaven clares.

D'altra banda, també s'han de fixar les velocitats màximes de cada tipus de via. Això es fa creant cinc tipus de via i introduint les seves característiques, entre elles la velocitat. A la Figura 8.3 es presenta la divisió de la xarxa i a la Taula 8.1 les seves característiques.

Xarxa	Descripció	Velocitat màxima	Amplada de via
Primària	Principals carreteres d'àmbit intermunicipal	90 km/h	3.50 m
Secundària	Carreteres principals en travessia	50 km/h	3.25 m
Terciària	Principals carrers dins la ciutat	30 km/h	3 m
Residencial	Resta de carrers de la ciutat	30 km/h	3 m
Baixa velocitat	Carrers estrets o amb vorera a nivell	15 km/h	2.50 m

Taula 8.1: Tipus de xarxa i les seves característiques.



a) Xarxa primària



b) Xarxa secundària



c) Xarxa terciària



d) Xarxa residencial



e) Xarxa de baixa velocitat

Figura 8.3: Divisió de la xarxa per tipus de via.

Per últim tenim les interseccions semaforitzades que, per la quantitat de feina derivada de la seva caracterització, mereixen un apartat propi.

Un cop aplicats tots aquests canvis acabem amb la xarxa de carrers llesta per fer-hi la simulació. Trobem un resum/exemple d'alguns dels canvis que s'han anat enumerant a la Figura 8.5 i el resultat amb la xarxa completa a la Figura 8.6.

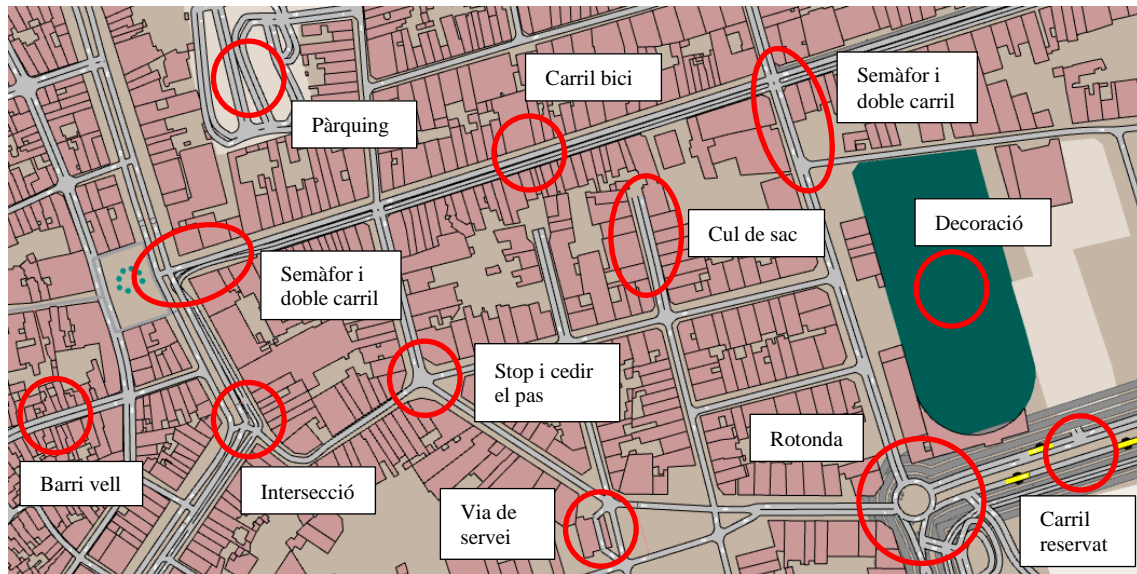


Figura 8.5: Exemple de refinament de la xarxa de carrers.



Figura 8.6: Xarxa final de carrers marcant les vies d'entrada.

Flux de trànsit

El darrer input d'aquesta secció, que ja està a cavall entre geometria i demanda, és l'estat de trànsit. En el nostre cas, com ens centrem en l'estudi del servei de transport públic, el flux de cotxes dins la ciutat suposa una capa més de realisme i afectarà principalment a les variacions de la velocitat de creuer a les diferents vies en funció de si estan més o menys col·lapsades. Per definir el trànsit de vehicles de la ciutat seguirem un model de fluxos, fixant el número de vehicles que entren a la ciutat i els percentatges de gir a cada secció.

Per la primera part, es necessiten saber els **fluxos d'entrada**, la quantitat de cotxes que circulen per les nou vies d'entrada del nostre model. El departament de mobilitat del Consell Insular de Menorca disposa de sis estacions d'aforament a les carreteres del terme municipal de Ciutadella, una permanent (10060, al km42 de la Me-01) i cinc primàries, com es veu a la Figura 8.7.

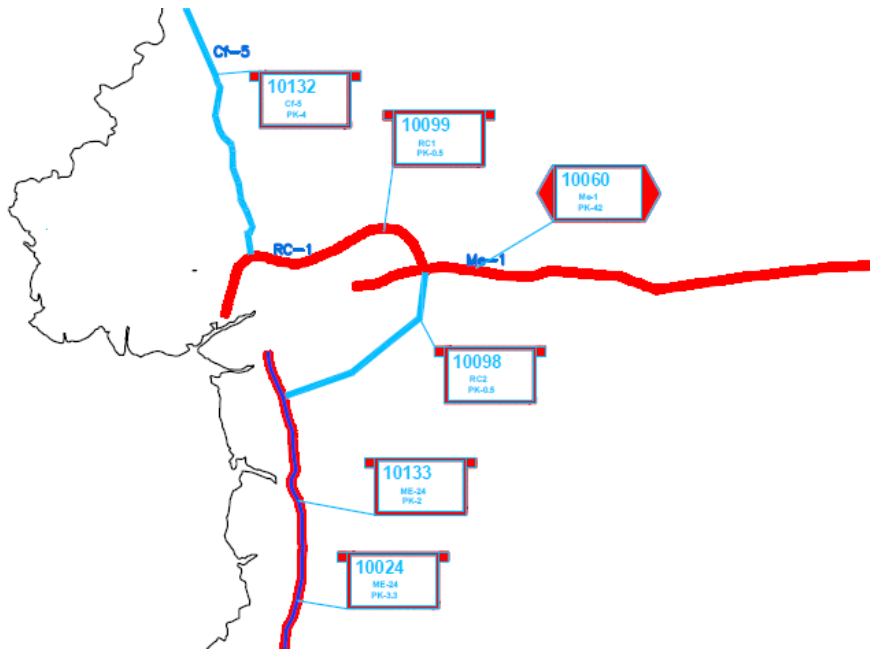


Figura 8.7: Estacions d'aforament de trànsit del Consell Insular. Font: (Consell Insular de Menorca, 2019)

De totes maneres i com era d'esperar, la localització d'aquestes seccions no coincideix amb les entrades definides. Així, s'ha optat per fer una petita campanya d'aforament als nou punts d'entrada i cinc punts de control i utilitzar la informació de l'estació permanent per deduir els coeficients necessaris i poder ajustar les mesures (preses en una hora, dia i mes concrets) a una IMD general.

Les dades de l'estació permanent que s'utilitzaran són del 2019, ja que les del 2020 es consideren atípiques al veure's condicionades per la pandèmia. Sempre que es parli de "dades d'estacions del Consell" s'estarà referint a (Consell Insular de Menorca, 2019)

Les mesures es van fer durant dos dies feiners (dilluns i dimarts) d'agost, en períodes de 10 minuts en els que es comptaven els vehicles en ambdós sentits. Veiem els punts de mesura a la Figura 8.8, agrupats segons siguin punts d'entrada (blau), punts de control interior (verd) o el punt de control exterior que coincideix amb l'estació permanent del Consell (vermell). Els valors mesurats es recullen a la Taula 8.2.

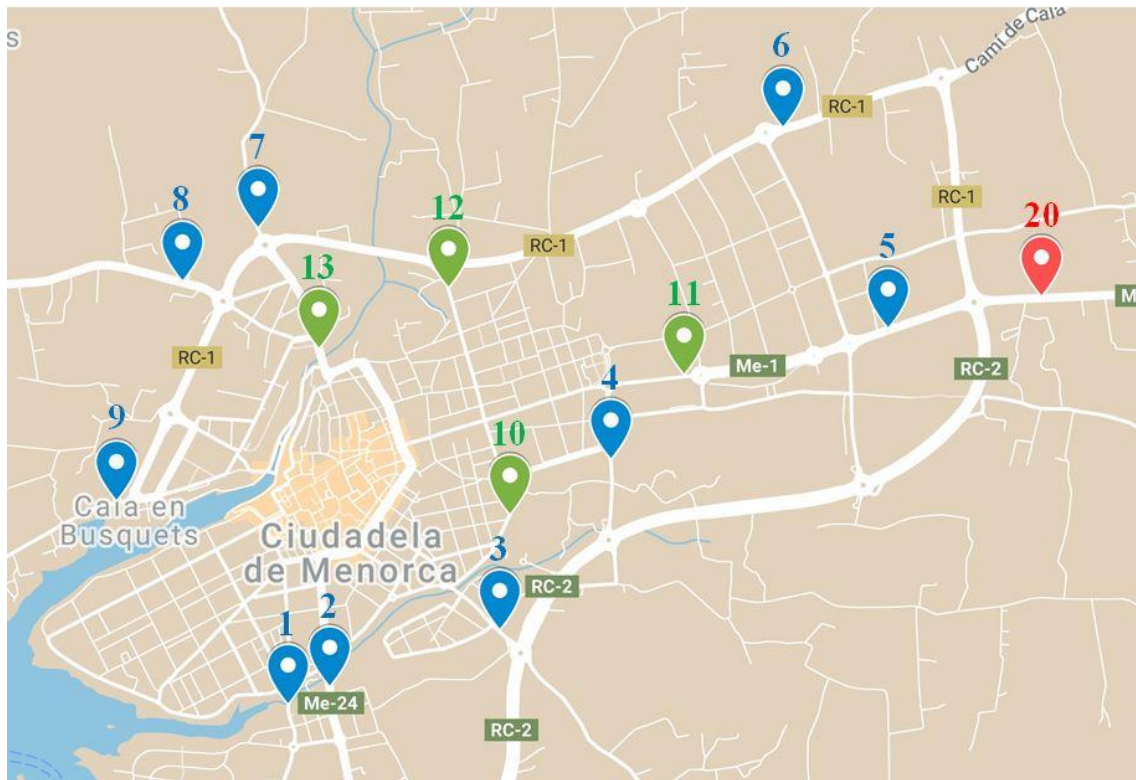


Figura 8.8: Seccions mesurades a la campanya d'aforament realitzada.

Secció	Descripció	Dia	Inici	Final	Vehicles
1	Carretera a Sa Caleta	16/08/2021	12:31	12:41	123
2	c/ de S'Ullastre (Me-24)	16/08/2021	12:43	12:53	105
3	Camí de St. Joan de Missa	16/08/2021	13:00	13:10	107
4	Av. Palma de Mallorca	16/08/2021	13:16	13:26	129
5	Me-01 POICI (km 43)	16/08/2021	13:46	13:56	113
6	RC1 (km 1.4)	17/08/2021	09:05	09:15	94
7	Carretera a Punta Nati (Cf-5)	17/08/2021	10:20	10:30	20
8	Carretera a Cala en Blanes	17/08/2021	10:32	10:42	227
9	Camí de Sa Farola	17/08/2021	10:44	10:54	26
10	c/ Sant Antoni M ^a Claret (Canal Salat)	17/08/2021	11:30	11:40	175
11	Me-01 Cavall (km 44)	16/08/2021	13:30	13:40	261
12	c/ Sant Antoni M ^a Claret (Nord)	17/08/2021	10:08	10:18	51
13	Camí de Son Salomó	17/08/2021	10:58	11:08	121
20.a	Me-01 Entrada (km 42.5)	16/08/2021	14:01	14:11	293
20.b	Me-01 Entrada (km 42.5)	17/08/2021	09:36	09:46	330

Taula 8.2: Mesures campanya aforament.

Ara cal calcular els coeficients de correcció per obtenir les IMD de les diferents seccions. Realment acabarem necessitant intensitats horàries per introduir a la

simulació fer el càlcul de IMD serveix per homogeneïtzar els valors, presos a hores diferents del dia. Recordem que aquests coeficients es calculen a partir de les dades de l'estació permanent a la Me-01. Considerem que, encara que les vies no siguin realment afins, aquesta estació és representativa de l'estat general del trànsit al llarg de tot l'any (no és una carretera que només tingui trànsit turístic). Calculem primer els coeficients de correcció mensual i setmanal:

$$L = \frac{IMD}{IMD_{agost}} = \frac{12524}{22988} = 0.545 \quad (8.1)$$

$$S = \frac{IMD_{agost}}{IMD_{laborable,agost}} = \frac{22988}{23778} = 0.967 \quad (8.2)$$

I la relació entre intensitat horària i IMD segons l'hora del dia (els valors de i mitja són interpolacions de les hores en punt):

$$H_i = \frac{IMD_{agost}}{IH_i} \quad (8.3)$$

Hora agost	IH [veh/h]	H [h/dia]
8:00	809	28.418
8:30	872	26.370
9:00	935	24.598
9:30	1084	21.198
10:00	1234	18.624
10:30	1355	16.970
11:00	1475	15.585
11:30	1455	15.796
12:00	1436	16.013
12:30	1328	17.308
13:00	1221	18.832
13:30	1149	20.011
14:00	1077	21.347
14:30	1000	22.979
15:00	924	24.880

Taula 8.3: Coeficients de correcció horària.

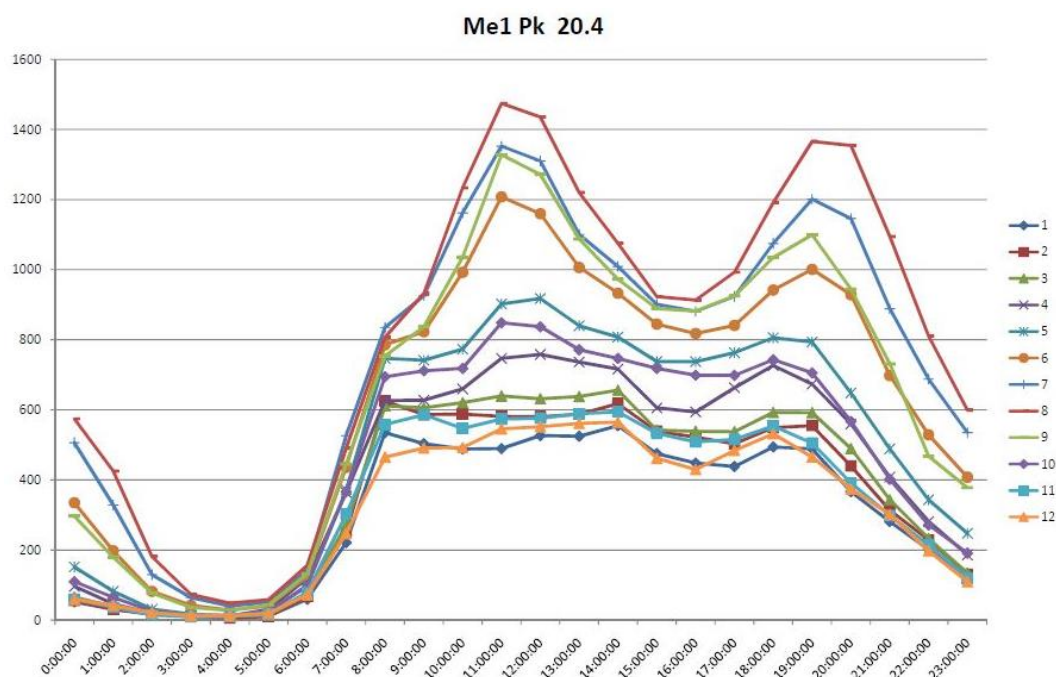


Figura 8.9: Variació de les intensitats horàries de trànsit per mesos. Font: (Consell Insular de Menorca, 2019)

Secció	Descripció	Vehicles mesurats	IH mesurada	IMD _{lab,ag}	IMD _{ag}	IMD
1	Carretera a Sa Caleta	123	369	6387	6175	3364
2	c/ de S'Ullastre (Me-24)	105	315	5932	5735	3125
3	Camí de St. Joan de Missa	107	321	6045	5844	3184
4	Av. Palma de Mallorca	129	387	7744	7487	4079
5	Me-01 POICI (km 43)	113	339	7237	6996	3812
6	RC1 (km 1.4)	94	282	6937	6706	3654
7	Carretera a Punta Nati (Cf-5)	20	60	1018	984	536
8	Carretera a Cala en Blanes	227	681	11556	11173	6087
9	Camí de Sa Farola	26	78	1216	1175	640
10	c/ Sant Antoni M ^a Claret (Canal Salat)	175	525	8293	8017	4368
11	Me-01 Cavall (km 44)	261	783	15669	15148	8253
12	c/ Sant Antoni M ^a Claret (Nord)	51	153	2850	2755	1501
13	Camí de Son Salomó	121	363	5657	5469	2980
20.a	Me-01 Entrada (km 42.5)	293	879	18764	18141	9883
20.b	Me-01 Entrada (km 42.5)	330	990	20986	20289	11054

Taula 8.4: IMD corregida pels punts mesurats.

Veient els resultats podem comparar-ne alguns amb dades reals d'estacions d'aforament del Consell. Concretament ens fixem amb la secció 6 (IMD=3654) enfront l'estació de la RC1 (IMD=3347) i la secció 7 (IMD=536) enfront l'estació de la Cf-5 (IMD=565) per veure que no hi ha unes diferències extremes. Potser les majors discrepàncies es troben al punt 20, d'on s'esperava una IMD=12524 i ambdós dies mesurats obtenim valors fins un 27% menors. Aquest fet recalca que la campanya d'aforament realitzada és una aproximació de la realitat, amb discrepàncies que poden rondar el 20-25% i que les dades s'accepten tenint el compte el seu paper dins la simulació i el nivell de precisió d'aquest treball en aquest aspecte.

Després d'aquest parèntesis important, un cop tenim les mesures corregides i estandarditzades a IMD, ja podem plantejar quin serà l'input de cotxes a la simulació microscòpica com un percentatge de la IMD. Si volguéssim fer un anàlisi en una situació extrema, introduiríem les intensitats horàries de l'hora 30, 50 o 100 ja que disposem també de les ràtios de l'estació permanent:

$$IH_{30} = 0.153 \cdot IMD \quad (8.4)$$

$$IH_{50} = 0.147 \cdot IMD \quad (8.5)$$

$$IH_{100} = 0.139 \cdot IMD \quad (8.6)$$

De totes maneres, el nostre anàlisi durarà més d'una hora i no ens interessa fixar-nos només en els casos més extrems. Així, per trobar un trànsit mitjà per tot el dia podem suposar que tota la IMD es reparteix en les 16 hores de "llum" (entre les 6:00 i les 22:00) i que a la nit no hi ha trànsit. Definim aquesta intensitat horària ideal com:

$$IH_{ideal} = \frac{IMD}{16} = 0.0625 \cdot IMD \quad (8.7)$$

No cal calcular els valors concrets d'intensitat per cada cas ja que al model podem introduir la IMD i aplicar-ne només un percentatge.

La segona part consisteix en definir els **percentatges de gir** a totes les interseccions interiors. No disposem de cap tipus d'informació més enllà de les quatre mesures de control interior presentades prèviament però es partirà de la hipòtesi de que la majoria del trànsit circula per les vies de les xarxes primària, secundària i terciària. Així, a cada intersecció es fixaven uns percentatges de gir en funció de quines vies estaven involucrades:

1. Si totes les vies són del mateix nivell (o totes prioritàries o totes residencials) els percentatges de gir són equilibrats.
2. Si es circula per la xarxa prioritària, la probabilitat de sortir-ne és d'un 5% a cada intersecció.
3. La probabilitat d'entrar a un carrer de baixa velocitat és d'un 2% a cada intersecció.
4. En casos on hi ha una direccionalitat molt marcada es prioritza continuar recte amb repartiments com 50/25/25.

Un cop definides les normes, s'apliquen i es fa una simulació per comprovar els resultats de flux a les seccions de control. Llavors, es realitzen modificacions més personalitzades per, tant amb les dades mesurades com el coneixement en primera persona del trànsit de la ciutat, refinar alguns dels girs. Aquesta part ja formaria més part del calibratge del model així que la deixem per més endavant. De totes maneres podem veure com han quedat els fluxos de manera qualitativa a la Figura 8.10.

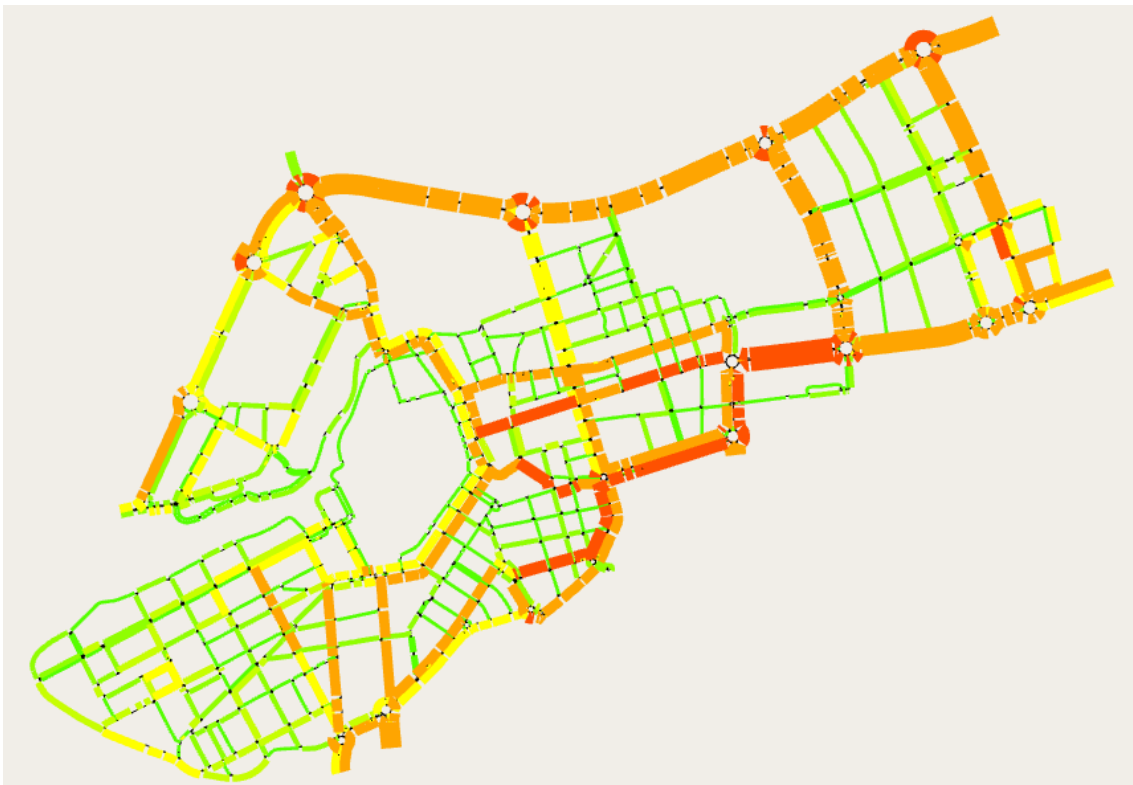


Figura 8.10: Visualització qualitativa del flux de trànsit base simulat.

8.1.2 Model ideal

Un cop definida la xarxa de carrers a utilitzar, l'estudiem per trobar la millor manera d'adaptar-la a la geometria emprada als models d'aproximacions contínues: un espai rectangular $L \cdot w$ amb espaiament entre carrers constant (D_s). Aquesta geometria pot semblar massa distant de la realitat però funciona bé per primeres aproximacions. De fet, una manera de visualitzar l'abstracció és imaginant aquesta zona rectangular com una banda o buffer al voltant de la ruta d'autobús, com a la Figura 8.11.

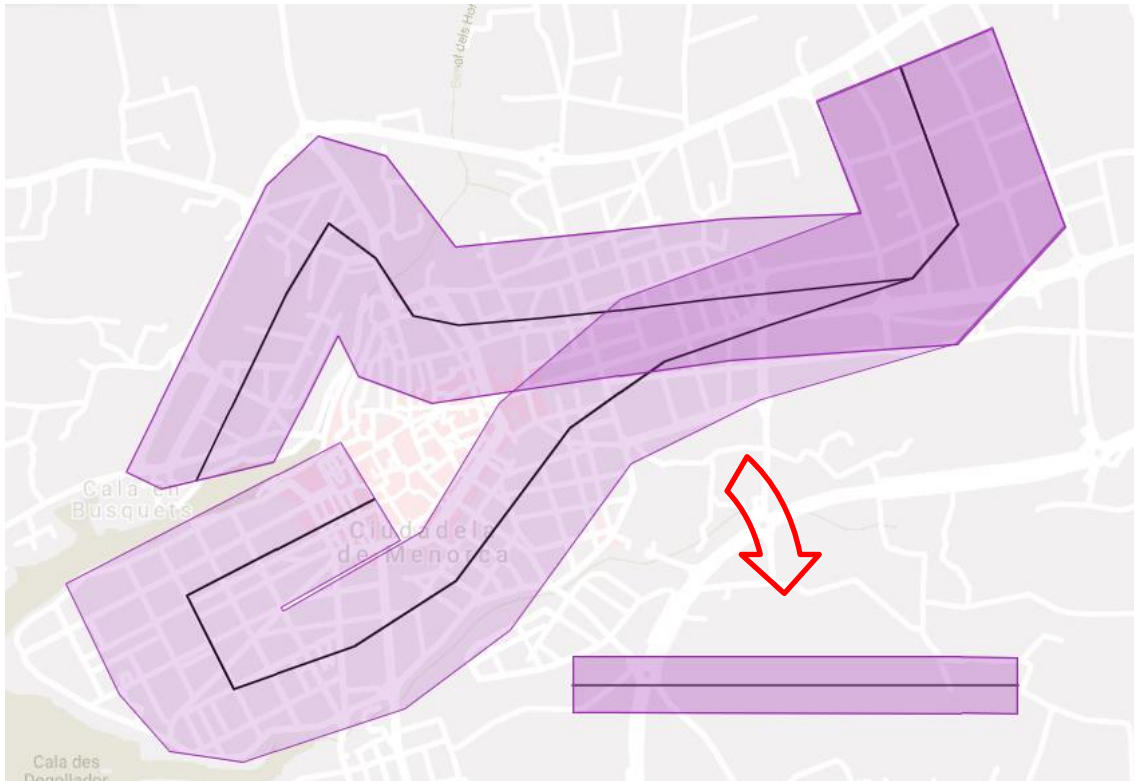


Figura 8.11: Idealització de l'àrea total.

Longitud i amplada (L i w)

En primer lloc, definirem el rectangle de simulació $L \cdot w$. Aquestes variables es definiran mantenint l'àrea total constant per assegurar que variables com la densitat de demanda no s'han d'ajustar a un espai d'àrea diferent.

Si treballéssim sobre una ciutat en blanc, el primer pas seria definir una ruta estàndard pel nostre bus convencional, passant per tota l'àrea d'interès, i utilitzar la longitud d'aquesta línia com L . En el nostre cas, com estudiem una ruta ja creada i que voldríem millorar o optimitzar, fixarem la longitud de la zona com la meitat de la longitud de la ruta completa (anada i tornada, ja que són una mica diferents). Obtenim aquesta informació del propi model Aimsun, on s'ha definit el recorregut actual, amb una distància total de $L_{bus} = 15.81 \text{ km} \rightarrow L = 7.9 \text{ km}$

Per l'amplada de la zona, simplement dividim l'àrea total $R = 2.158 \text{ km}^2$ (explicada més endavant) entre la longitud que acabem de definir i $w = \frac{R}{L} = 0.27 \text{ km}$.

Espaiament entre carrers (D_s)

Respecte l'espaiament entre carrers, recordem que es suposa constant i també es parteix de la hipòtesis de què totes les vies són ortogonals i de doble sentit. En el cas de Ciutadella, l'espaiament no és extremadament heterogeni, sí que es manté una certa ortogonalitat i moltes vies (que no totes) són de sentit únic. De totes maneres, s'ha de trobar un mètode de definir D_s que sigui realista i estàndard.

La solució plantejada es basa en mantenir la longitud total de carrers L_T constant i deduir D_s d'allà. A més, per combatre que no totes les vies són de doble sentit, es comptarà la longitud total de sentit (les vies de doble sentit es compten dos cops) i es dividirà entre dos sentits per via. Podem deduir la longitud total de la nostra xarxa ideal, i d'allà l'espaiament entre carrers com:

$$L_T = \frac{L}{D_s} \cdot w + \frac{w}{D_s} \cdot L = 2 \cdot \frac{Lw}{D_s} \rightarrow D_s = \frac{2Lw}{L_T} \quad (8.8)$$

Del model Aimsun obtenim la longitud total de via (només de la zona d'estudi i aplicant les correccions esmentades) com $L_T = 25.02 \text{ km}$ i per tant la longitud entre carrers és $D_s = 0.17 \text{ km}$.

Velocitat lliure (v)

Pel càlcul de la velocitat lliure s'han de tenir en compte no només els límits de velocitat de cada tipus de via, sino els retards deguts a interseccions, semàfors, congestió, etc., així com patrons de comportament i conducció dels usuaris a diferents punts de la xarxa viària. Des del punt de vista pràctic, és impossible tenir en compte tots els efectes per separat de manera fàcil així que aquesta variable es definirà a partir de mesures aleatòries.

El portal que millor reflexa el temps de viatge és Google Maps, ja que els seus càlculs de temps es basen en l'experiència de milions d'usuaris i els seus trajectes anteriors. D'aquesta manera aprofitarem aquest coneixement compartit per assignar un valor a la velocitat de creuer. Per fer-ho generarem 10 parells de punts origen-destí a l'interior de la zona d'estudi i després els introduïrem a Google Maps perquè calculi la ruta òptima i el temps de viatge.

Per generar parelles de punts aleatoris s'ha programat un petit codi de producció pròpia (amb inspiració de (Rodríguez-Sánchez, 2017)) on es generen punts aleatoris uniformement distribuïts dins una àrea poligonal que defineixi l'usuari. En passos posteriors es tornarà a utilitzar aquest codi.

A la Figura 8.12 veiem les parelles de punts aleatòriament generades i a la Taula 8.5 les distàncies i temps de viatge de les rutes òptimes entre aquests punts. Per duplicar fàcilment la mida de la mostra, s'han mesurat tant la ruta d'anada com la de tornada. A més, s'han exclòs les opcions que viatgessin per zones fora de la xarxa de carrers simulada.

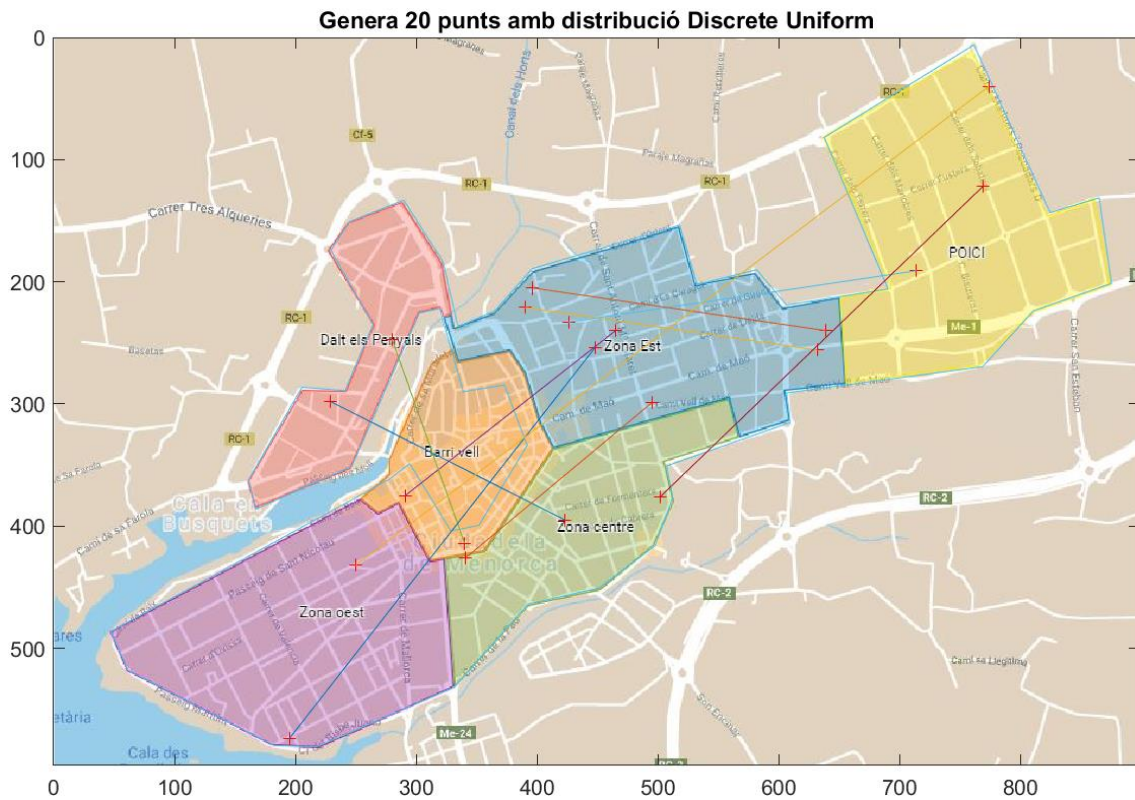


Figura 8.12: Parelles origen-destí aleatòries pel càlcul de v .

Trajecte	Distància (km)	Temps (min)	Trajecte	Distància (km)	Temps (min)
1	2.3	8	6	2	4
	2.5	8		2.3	5
2	3.7	8	7	2.5	8
	3.9	8		2.1	7
3	1.7	8	8	1.2	4
	1.5	7		2	4
4	2.3	8	9	4.2	7
	1.3	4		1.2	5
5	1.2	4	10	1.8	4
	2.4	8		2	4
TOTAL				44.1	123
Velocitat				21.5	km/h

Taula 8.5: Mesures trajectes aleatoris pel càlcul de v .

Apart de la ruta òptima, Google Maps també proporciona rutes subòptimes com alternativa. Aquestes s'han mesurat per tenir un segon valor de control i fent la mitjana de les 46 mesures, la velocitat surt a 20.1 km/h, un valor una mica inferior ja que inclou pitjors rutes però no allunyat del 21.5 que prendrem com a valor definitiu.

8.2 Demanda

Modelitzar la demanda no és una feina fàcil. Existeixen nombrosos mètodes de previsió i assignació de fluxos/mitjans de transport que suposen un estudi en sí mateix. Així, per aquest treball ens basarem amb les dades històriques de cancel·lacions de la L60 (dades de temps, parada i tipus de tarifa per cada pujada al servei) i d'allà obtindrem la demanda actual, sobre la qual no es farà cap tipus de prognòsis.

Es té sèrie de dades (Consell Insular de Menorca, 2021) des del març de 2016 però utilitzarem dades des del 7 de març de 2017 fins el mateix dia de 2020 (3 anys justos) on la demanda es manté bastant constant. Les dades del primer any es descarten per ser dades inicials i quasi un 20% inferiors i les dades a partir del març de 2020 es descarten per ser un període anòmal degut a la pandèmia de Covid-19.

8.2.1 Model microscòpic

Com ja hem dir, representar la demanda de la millor manera no és fàcil. Els simuladors per agents (com és Aimsun) acostumen a integrar eines més o menys complexes d'assignació zonal i de la demanda que necessiten de dades GIS de demografia, llocs de treball, llocs d'oci, costos de viatge, etc. Com en el nostre cas no tenim cap d'aquesta informació i partim de dades d'ús d'un servei real, plantejarem una zonificació pròpia de la ciutat, amb una certa demanda extreta de la L60.

Zonificació

Dividirem Ciutadella en sis zones amb característiques pròpies, una àrea similar i entre 3 i 5 parades actuals cadascuna. Per fer-ho s'ha partit d'un mapa de polígons Voronoi (Figura 8.13) per visualitzar quina era la parada més pròxima per cada illa de cases i, junt amb l'experiència pròpia, s'han definit les següents zones (Taula 8.6 i Figura 8.14).

Zona	Descripció	Àrea (km ²)
Zona Oest	Trama urbana i unifamiliars de c/ Degollador cap a l'oest	0.492
Barri Vell	Centre històric de la ciutat	0.219
Zona Centre	Trama urbana entre c/ Maó i c/ Degollador	0.29
Zona Est	Trama urbana de c/ Maó cap al nord	0.459
POICI	Polígon industrial	0.504
Dalt els Penyals	Zona alta a l'altre costat del port	0.194
TOTAL		2.158

Taula 8.6: Zonificació de l'àrea d'estudi.



Figura 8.13: Polígons de Voronoi pels punts de parada de la L60 (realitzat amb (Rodríguez-Sánchez, 2017))

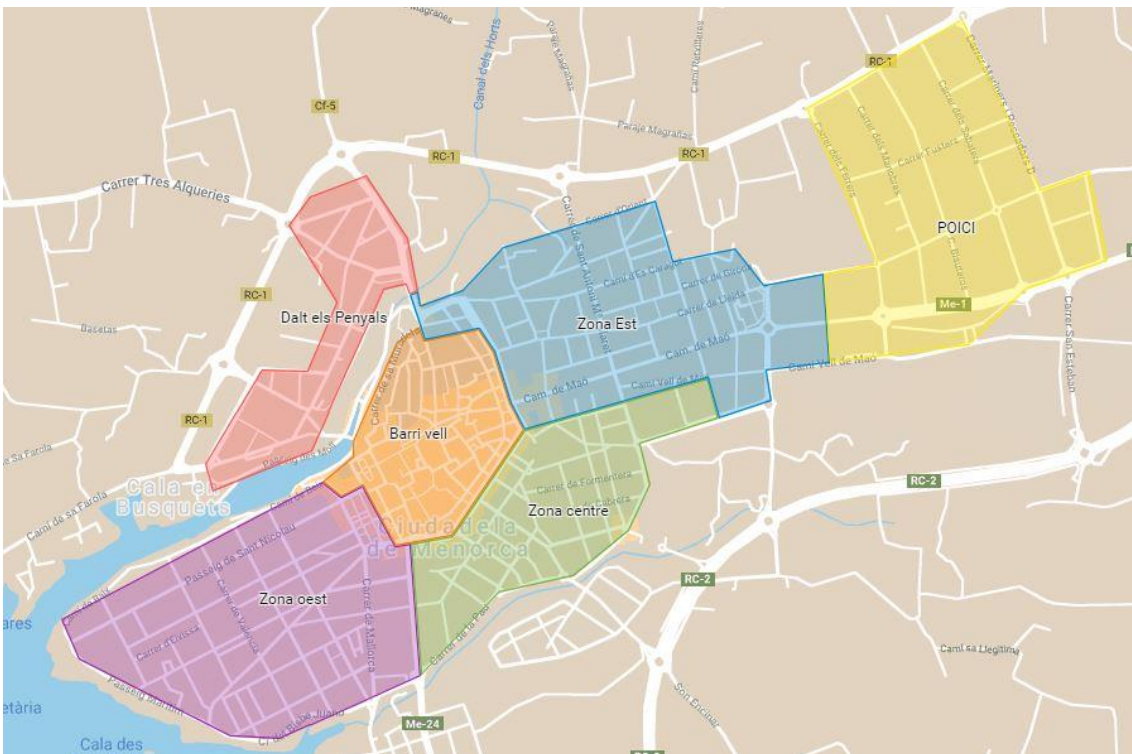


Figura 8.14: Zonificació de l'àrea d'estudi.

Per últim cal definir quines parades s'assignen a cada zona. Podem visualitzar-ho a la Figura 8.15. A la zona del barri vell (taronja) se li assigna un 50% de la demanda de les parades de Plaça dels Pins i Contramurada, 19 i 36, ja que aquestes es troben just a la frontera entre zones.

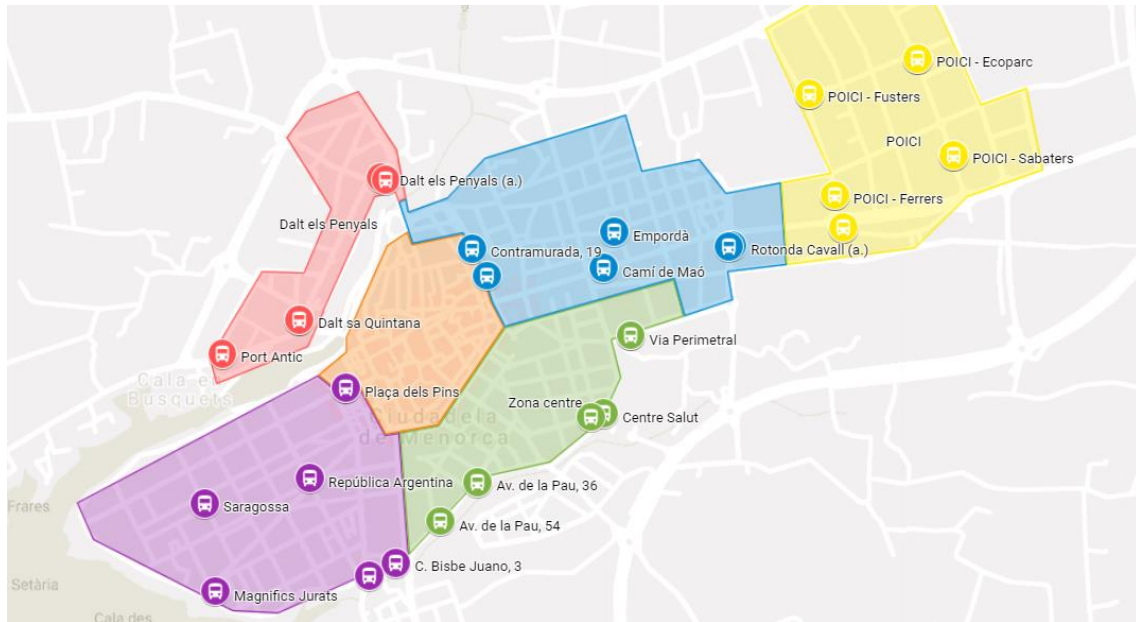


Figura 8.15: Parades corresponents a cada zona.

Demanda base

Un cop definides les zones anem a assignar la demanda base a cadascuna d'elles. Mirem primer com es distribueix la demanda entre parades i hores del dia per veure com pot variar aquesta demanda, no només entre zones, sinó a diferents moments del dia. Si observem la Figura 8.16 veiem tres nivells de demanda a moments diferents del dia:

1. **Hores punta (verd):** a les 7-8 i a les 14-15h dels dies feiners, una demanda alta. No es mostra a la figura, però la gran majoria d'aquesta demanda són usuaris de la T21 (menors de 21 anys) així que representa principalment estudiants que van a l'institut. Per aquesta raó, es considerarà la demanda de setembre a juny.
2. **Matins feiners (groc):** de les 8 a les 14h dels dies feiners, una demanda intermèdia.
3. **Tardes i dissabte (vermell):** de les 15h cap endavant els feiners i tot el dissabte, una demanda baixa. De fet, els horaris actuals post-pandèmia no ha restituit el servei de tarda més tard de les 15h.

	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	Total
Dll	2513	1470	1289	1246	1116	901	1142	2490	535		699	582	404	220	14607
Dm	2709	1646	1390	1309	1167	1057	1295	2324	815		849	621	467	152	15801
Dx	2402	1544	1223	1223	1053	927	1200	2505	500		746	572	438	220	14553
Dj	2507	1506	1210	1356	1184	901	1132	2280	531		834	599	378	187	14604
Dv	2373	1451	1222	1268	1095	862	1079	2384	464		874	501	379	208	14159
Ds		377	762	1053	794	710	366	141							4203
Total	12504	7994	7096	7455	6409	5358	6214	12124	2844		4001	2875	2066	987	77927

Figura 8.16: Passatgers totals (3 anys) segons hora del dia i dia de la setmana.

Així, definirem tres nivells de demanda uniforme (per zones) acord amb les distincions fetes prèviament. A la Figura 8.17 veiem com es distribueix la demanda al llarg de les parades de al línia pels tres escenaris proposats. Fixem-nos que l'hora punta està molt focalitzada a la parada Av.de St Pau, 36 (destí, institut) i la zona de Dalt sa Quintana, Empordà i Rotonda d'es Cavall (orígens). Pels altres dos casos la demanda és més uniforme, amb pics a c/ Saragossa i també Dalt els Penyals.

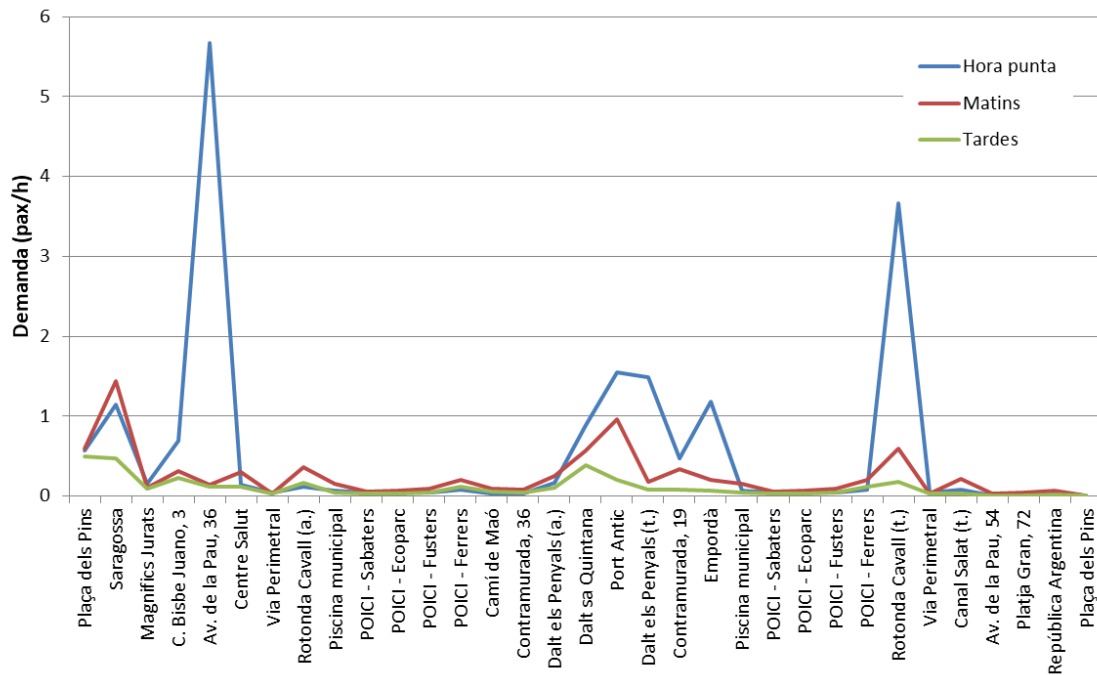


Figura 8.17: Demanda horària (pujades) per parades, pels tres escenaris definits.

Un cop tenim la demanda per parades cal agregar-la per adaptar-la a les sis zones definides. Per l'hora punta, separarem la demanda de les 7h i la de les 14h ja que es suposarà que les pujades de les 14h seran els destins de les 7h i viceversa. Presentem els usuaris per hora a la Taula 8.7, segons els escenaris definits. Notem que aquestes dades no tenen en compte l'àrea de les diferents zones.

Demanda (pax/h)	HORA PUNTA		MATÍ	TARDA
	7-8h	14-15h	8-14h	15-21h+Ds
Zona Oest	0.637	3.206	2.260	1.061
Barri Vell	0.478	0.408	0.508	0.309
Zona Centre	0.207	9.784	0.751	0.313
Zona Est	8.120	0.615	1.459	0.527
POICI	0.510	0.409	1.134	0.536
Dalt els Penyals	5.991	0.819	1.958	0.780
TOTAL	15.943	15.240	8.071	3.526

Taula 8.7: Demanda horària agregada per zones.

Aquestes dades s'utilitzaran pels càlculs externs d'origens i destins per la simulació microscòpica, seguint la metodologia explicada a l'apartat 10.

8.2.2 Model ideal

Demanda uniforme (λ)

Un cop fets els càlculs de demanda pel model microscòpic, el valor agregat de demanda uniforme pel model ideal és directe. Simplement afegim el paper de l'àrea i obtenim els següents valors, resumits a la Taula 8.8 :

		HORA PUNTA	MATÍ	TARDA
	Àrea (km ²)	Demanda (pax/km ² h)	Demanda (pax/km ² h)	Demanda (pax/km ² h)
Zona Oest	0.492	4.7	4.6	2.2
Barri Vell	0.219	2.4	2.3	1.4
Zona Centre	0.290	20.7	2.6	1.1
Zona Est	0.459	11.4	3.2	1.1
POICI	0.504	1.1	2.3	1.1
Dalt els Penyals	0.194	21.1	10.1	4.0
TOTAL	2.158	8.7	3.7	1.6

Taula 8.8: Valors de demanda uniforme (λ).

Tarifa (θ)

Actualment la tarifa és de 1.55€ per un bitllet senzill, preu que es pot veure reduït a 1.15€ amb la T10, 0.82€ amb la T40, 0.80€ amb la TMes (per majors de 65 anys) i que s'inclou dins la tarifa il·limitada de la T21 (per menors de 21 anys). El preu és independent a la distància recorreguda.

Per extreure una tarifa mitjana entre els usuaris, utilitzarem les dades agregades en el període d'estudi segons el tipus de bitllet comprat. Pels usuaris de la targeta T21, suposarem que fan 40 viatges al mes (20 dies lectius d'anar i tornar de l'institut). A la Taula 8.9 es resumeixen tots els passos seguits.

Títol	Preu/títol	Viatges/títol	Preu/viatge	Validacions	% Validacions	Preu ponderat
Senzill	1.55 €	1	1.55 €	16274	20.9%	0.324 €
T10	11.45 €	10	1.15 €	2699	3.5%	0.040 €
T21	17.65 €	40	0.44 €	22486	28.9%	0.127 €
T40	32.65 €	40	0.82 €	2185	2.8%	0.023 €
TMes	0.8 €	1	0.8 €	34283	44.0%	0.352 €
TOTAL				77927		0.87 €

Taula 8.9: Procés obtenció tarifa mitjana (θ).

Valor del temps (β_t)

El valor del temps és un paràmetre que depèn de la localització, l'edat, la intenció del viatge, etc. i s'ha de fixar amb d'estudis especials a partir de dades estadístiques. Per aquest treball prendrem les dades d'un estudi realitzat per La Caixa (Gutiérrez-Domènech, 2008) ja que proporciona un valor concret per les Illes Balears i que agrega de manera ponderada la resta de variacions que pugui sofrir el valor del temps. Així, en diners del 2007 tenim:

$$\beta_t = 8.2 \text{ €/h}$$

8.3 Vehicle

Els costos i característiques del vehicle són inputs comuns pels dos models així que es presentaran només un cop.

Actualment la L60 està operada per un mini bus Iveco A65C18/ WING. El vehicle consta de 14 seients i capacitat per 21 usuaris extra de peus. A més, permet la pujada d'una persona en cadira de rodes per la part posterior, on el terra està a nivell de carrer.

Apart del vehicle actual, es planteja la possibilitat de reduir-ne la mida per optimitzar costos però degut a la normativa de la comunitat autònoma sobre accessibilitat, el servei públic ha de permetre la pujada de persones amb mobilitat reduïda i no s'ha trobat un vehicle considerablement petit que tingui aquesta característica. En un principi s'havia pensat en vehicles similars a les furgonetes que fan transfers a l'aeroport però no compleixen la normativa.

Així, plantejarem la optimització amb un vehicle fixat amb els següents costos, presentats a la Taula 8.10 i explicats a continuació. L'estructura pel càlcul dels costos unitaris s'ha pres de l'Observatori de costos del transport de viatgers en autocar.

MNIBUS Iveco A65C18/ WING		
Capacitat	pax/veh	14+21
Factor de consum ⁽¹⁾	l/veh-km	0.190
Cost combustible ⁽²⁾⁽³⁾	€/veh-km	0.191
Manteniment ⁽²⁾	€/veh-km	0.095
Increment per costos indirectes i d'estructura ⁽²⁾	%	12.5%
Cost unitari per distància	€/veh-km	0.322
Cost temporal del conductor ⁽¹⁾⁽⁴⁾	€/veh-h	20.811
Cost de compra ⁽¹⁾	€/veh	180000
Cost amortitzat del vehicle ⁽¹⁾⁽²⁾	€/veh-h	4.152
Assegurances ⁽²⁾	€/veh-h	0.466
Costos fiscals ⁽²⁾	€/veh-h	0.173
Increment per costos indirectes i d'estructura ⁽²⁾	%	12.5%
Cost unitari temporal	€/veh-h	28.80
Hores anuals	h/any	3613
Kilòmetres anuals	Km/any	54195

Taula 8.10: Costos unitaris del vehicle.

Els exponents de la taula es refereixen a la font d'obtenció de les dades necessàries pel càlcul de cada valor o partida, segons:

- 1) Comunicació directe de valors aproximats però realistes per part de l'operador.
- 2) Observatori de costos del transport de viatgers en autocar (MITMA, 2021).
- 3) Històric de preus de combustible per comunitats autònomes (Portal web: Diésel o Gasolina, 2021).
- 4) Conveni col·lectiu pel sector del transport de viatgers a les Illes Balears (Conselleria de Treball, Comerç i Indústria de les Illes Balears, 2018).

Les hores i kilòmetres anuals s'han calculat específicament pensant amb la operació concreta de la L60, que està en servei 13 hores els dies feiners, 7 els dissabtes i cap els diumenges i festius. Cada hora de servei es fa un cicle complet, uns 15 km.

Pel que fa als **costos per distància**, tenim principalment combustible i manteniment. El preu del combustible s'ha calculat a partir de dades dels darrers 3 anys del preu del Diesel A+ a les Illes Balears, aplicant els descomptes presentats a la Taula 8.11. El consum és de 19 l per cada 100 km de mitjana.

	Unitats	Valor
Preu mitjà darrers 3 anys a les IB	€/l	1.315
Descompte comercial del 3%	€/l	0.039
IVA	%	1.21
Devolució per gasoil professional	€/l	0.049
Preu final	€/l	1.005

Taula 8.11: Càlcul del preu del combustible.

El manteniment s'ha simplificat a substitució de pneumàtics (vehicle de 6 rodes, 343.88 €/ud amb vida útil de 70000km) i consum de dissolució d'urea (190.78 €/any).

D'altra banda, els **costos temporals** provenen del cost del conductor, amortització del vehicle, assegurances i cost fiscal. El salari anual del conductor està fixat per conveni (37334.83 €/any) i les hores de treball també (1794 h). Així ens surt el salari per hora al voltant dels 21 €/h. La vida útil del vehicle que es considera son 12 anys, sense valor residual, i el preu de compra està entre 160000 i 200000€. Assegurances i costos fiscals prenen valors directes de l'observatori, per la mida de vehicle proposat (1683.74 €/any i 623.84 €/any respectivament).

9. Optimització: model ideal

Aquesta secció és on realment resollem el problema d'optimització. Hem explicat la teoria, creat un model i idealitzat la realitat i ara és el moment de veure quin és el sistema d'autobús òptim, des del punt de vista del mínim cost per la societat.

9.1 Inputs de l'optimització

A la Taula 9.1 i Taula 9.2 es resumeixen els valors dels inputs explicats a l'apartat anterior i necessaris per l'optimització.

	Nom	Símbol	Unitats	Valor
Geometria	Longitud de la ruta	L	km	7.9
	Amplada de la banda	w	km	0.27
	Distància entre carrers	D_s	km	0.17
	Velocitat de creuer	v	km/h	21.5
Vehicle	Capacitat del vehicle	C	pax	35
	Acceleració ^(*)	a	m/s^2	0.895
	Temps de pujada o baixada ^(*)	τ'	s/pax	5
	Cost unitari per distància	c_d	$€/km$	0.332
	Cost unitari per temps	c_t	$€/veh \cdot h$	28.80
	Variància de l'interval de pas ^(*)	s_H^2	h^2	0.003
	Interval de pas mínim ^(*)	H_{min}	min	3
Demanda	Densitat de demanda per hora	λ	$pax/km^2 - h$	Taula 9.2
	Valor del temps	β_t	$€/pax - h$	8.20
	Velocitat a peu ^(*)	v_w	km/h	2.5
	Tarifa	θ	$€/pax$	0.87

Taula 9.1: Inputs de l'optimització amb els models ideals.

(pax/km^2h)	HORA PUNTA	MATÍ	TARDA
TOTAL	8.7	3.7	1.6

Taula 9.2: Densitat de demanda pels tres escenaris.

9.2 Resultats i discussió sobre l'optimització

A partir dels inputs, apliquem la formulació presentada a l'apartat 3 iterant les variables de decisió (automatitzada amb VBA a un full de càlcul, annex 2) per trobar la configuració òptima. Es fa pels tres valors de demanda i tres serveis:

1. All stops: línia convencional que atura a totes les parades (simplement s'ha modificat el model convencional fent que $S_e = \left\lceil \frac{2L}{s} \right\rceil$).
2. Convencional: línia convencional que es salta parades.
3. DRT: línia a demanda.

Potser el lector es pregunta on està el model mixt o model alpha. Com era d'esperar pel trobat al capítol I, el model mixt no és òptim a cap dels escenaris proposats però el seu caràcter generalista permet que només amb un codi es pugui comparar tot l'espectre de solucions entre el model convencional i un DRT.

	Nom	Símbol	Unitats	All stops	Conven.	DRT
Decisió	Interval de pas	H	min	51	46.75	50
	Espaiament entre parades	s	km	0.31	0.01	-
	Percentatge de línia convencional	α	$[ad]$	1	1	0
	Cost total	Z_t	$€/h$	79.22	72.84	71.62
	Cost total per passatger	z_t	$€/pax$	10.04	9.23	9.07
Agència	Distància total viatjada en una hora	Q	km/h	18.6	20.3	20.4
	Mida de la flota	M	veh	1	1	1
	Velocitat comercial	v_c	km/h	18.6	20.4	20.4
	Cost total per l'agència	Z_a	$€/h$	35	36	36
	Cost d'agència per usuari	z_a	$€/pax$	4.43	4.56	4.56
Usuaris	Nre. de parades efectives en un cicle	S_e	$[ad]$	51	13	14
	Temps d'accés	A	min/pax	7.0	3.4	0
	Temps d'espera	W	min/pax	25.6	23.5	25.1
	Temps total dins el vehicle	$IVTT(l)$	min/pax	8.5	7.8	8.3
	Cost total pels usuaris	Z_u	$€/h$	44	37	36
	Cost per usuari	z_u	$€/pax$	5.58	4.69	4.56
Altres	Ocupació màxima	O	pax/veh	1.68	1.54	1.64
	Factor de cobertura	F_c	$\%$	0.20	0.19	0.19
	Coef. d'augment	k_o	$[ad]$	-	-	1.076

Taula 9.3: Resultats de l'optimització per demanda de matí.

Comencem mirant els **resultats del matí**, la franja horària més llarga i estable i la que s'acaba utilitzant pel dimensionament. Podem veure que el servei més barat per la societat és el DRT, amb un cost total de 71.62 €/h però que no suposa un descens significatiu respecte el servei convencional que es salta parades, amb un cost de 72.84 €/h. Destaquem que aquest servei convencional ha sortit amb un espaiament de 10m i, per tant, es tracta del servei fluid que ja s'havia comentat durant l'estudi analític i

que consisteix en mantenir la ruta fixa i flexibilitzar els punts de parada al llarg d'aquest carrer central. Aquest dos models, que realment són ambdós a la demanda, tenen costos pràcticament iguals tant per l'agència com per l'usuari, i suposen un 10% d'estalvi respecte una línia que realment s'aturés a totes les parades.

Així, les diferències entre el model DRT i el model convencional fluid resideixen principalment en costos d'implementació no considerats en el model. Aquests costos poden ser el software necessari per un DRT complet, la infraestructura viària per flexibilitzar els punts de parada, les campanyes de promoció i explicació dels nous serveis, etc. En molts casos aquests costos es menyspreen ja que al llarg termini, els estalvis en costos totals temporals són majors. En el nostre cas, per una xarxa petita i on els costos són tan similars, podria inclinar la balança cap un costat.

L'altre punt a destacar és realment la gran similitud entre els tres serveis, amb costos, ocupació, vehicles, factor de cobertura, etc. pràcticament iguals. Aquest fet ocorre en situacions de baixa demanda, on els costos realment no poden baixar més.

	Nom	Símbol	Unitats	All stops	Conven.	DRT
Decisió	Interval de pas	H	min	26.75	50.25	25.75
	Espaiament entre parades	s	km	0.22	0.01	-
	Percentatge de línia convencional	α	[ad]	1	1	0
	Cost total	Z_t	€/h	141.23	128.77	125.69
	Cost total per passatger	z_t	€/pax	7.61	6.94	6.77
Agència	Distància total viatjada en una hora	Q	km/h	35.4	18.9	40.2
	Mida de la flota	M	veh	2	1	2
	Velocitat comercial	v_c	km/h	17.7	18.9	20.2
	Cost total per l'agència	Z_a	€/h	69	35	71
	Cost d'agència per usuari	z_a	€/pax	3.72	1.89	3.82
Usuaris	Nre. de parades efectives en un cicle	S_e	[ad]	72	32	16
	Temps d'accés	A	min /pax	5.9	3.4	0
	Temps d'espera	W	min /pax	13.5	25.2	13
	Temps total dins el vehicle	$IVTT(l)$	min /pax	8.9	8.4	8.5
	Cost total pels usuaris	Z_u	€/h	72	94	55
	Cost per usuari	z_u	€/pax	3.88	5.07	2.96
Altres	Ocupació màxima	O	pax /veh	2.07	3.89	1.99
	Factor de cobertura	F_c	%	0.23	0.46	0.23
	Coef. d'augment	k_o	[ad]	-	-	1.091

Taula 9.4: Resultats de l'optimització per demanda d'hora punta.

Si mirem què passa en **hora punta**, segueix sent òptim el DRT, amb el convencional fluid no gaire enfora. Cal destacar les dues estratègies dels models per col·locar els increments de costos degut a una major demanda. El servei DRT duplica flota i mantén els costos dels usuaris baixos mentre que el convencional encara té marge i segueix operant amb un vehicle. Si ens fixem en els costos unitaris per passatger, el servei convencional està aprofitant les economies d'escala i, pujant mínimament el cost d'usuari (0.38€/pax), abarateix fins a 1.89 €/pax els costos per l'agència, la meitat que el servei DRT. Per demandes minúscules, no es noten les diferències d'operació, però a la que anem pujant la demanda el DRT ha de reduir el nombre de parades per cycle, i l'única manera de fer-ho és augmentant el nombre de vehicles i, per tant, els costos d'operació.

Destaca que aquest salt de nombre de vehicles és pel valor del temps, no per la capacitat, que es troba molt allunyada de les 35 persones. Això deixa entreveure que si la normativa ho permetés, un vehicle més petit seria suficient i més efectiu.

	Nom	Símbol	Unitats	Convencional all stop	Convencional	DRT
Decisió	Interval de pas	H	min	52	45.25	46.5
	Espaiament entre parades	s	km	0.24	0.01	-
	Percentatge de línia convencional	α	$[ad]$	1	1	0
	Cost total	Z_t	$€/h$	53.91	51.43	50.28
	Cost total per passatger	z_t	$€/pax$	15.80	15.07	14.73
Agència	Distància total viatjada en una hora	Q	km/h	18.2	21.0	21.0
	Mida de la flota	M	veh	1	1	1
	Velocitat comercial	v_c	km/h	18.3	21.0	21.0
	Cost total per l'agència	Z_a	$€/h$	35	36	36
	Cost d'agència per usuari	z_a	$€/pax$	10.26	10.55	10.55
Usuaris	Nre. de parades efectives en un cycle	S_e	$[ad]$	66	6	6
	Temps d'accés	A	min /pax	6.1	3.4	0
	Temps d'espera	W	min /pax	26.1	22.7	23.3
	Temps total dins el vehicle	$IVTT(l)$	min /pax	8.7	7.5	7.7
	Cost total pels usuaris	Z_u	$€/h$	19	16	15
	Cost per usuari	z_u	$€/pax$	5.57	4.69	4.40
Altres	Ocupació màxima	O	pax /veh	0.74	0.64	0.66
	Factor de cobertura	F_c	$\%$	0.09	0.08	0.08
	Coef. d'augment de la longitud DRT	k_o	$[ad]$	-	-	1.031

Taula 9.5: Resultats de l'optimització per demanda de tarda i dissabtes.

Per últim, el **cas de tarda i dissabtes** no és més que un servei de matí amb menys gent i extremadament sobredimensionat. Ja els costos d'operació són els mínims als que es pot arribar i baixar la demanda simplement puja el cost per usuari fins nivells insostenibles. Recordem que a 2021 el servei ja no opera durant la tarda i, amb un factor de cobertura del 8% podem deduir perquè.

En resum, el servei òptim és el servei a la demanda (DRT) però el convencional fluid li fa una merescuda competència. De fet, queden tant a prop en la optimització que factors externs fora dels costos directes podrien inclinar la balança cap a qualsevol dels dos sistemes. A l'apartat 11, un cop verificats els models, es discutirà quin és la línia escollida.

10. Verificació: model microscòpic

Un cop tenim els resultats dels model ideals, anem a validar-los amb el model microscòpic. Com es veurà a continuació, el procés de simulació és llarg i laboriós i per tant s'estudiaran només dos casos, amb dos objectius diferenciats:

1. Validació per l'escenari de matí: aquesta serà la validació estàndard, per l'escenari de disseny, amb l'objectiu d'avaluar la confiança dels models i trobar possibles millores. Es verificaran les principals variables d'operació amb dos models de demanda:
 - a. Demanda uniforme, per validar la bondat de les hipòtesis sobre la geometria.
 - b. Demanda per zones, per validar la bondat no només de la geometria sinó també de la hipòtesis de demanda uniforme.
2. Validació per l'escenari d'hora punta: on es simularà la ruta *many-to-one* (molts orígens, un únic destí) que s'espera dels estudiants que van a l'institut a les vuit del matí. L'objectiu no és tant validar els resultats del model ideal (al cap i a la fi el model ideal suposa un servei *many-to-many*) sinó comparar com reacciona un DRT en situacions punta respecte un servei convencional.

10.1 Procediment de simulació

Com era d'esperar, el procés de simulació i introducció dels inputs dins Aimsun Ride és una mica més complex que pel codi del model ideal. Gran part d'aquest procés ja s'ha explicat però ens falten dos passos: calibratge i distribució de punts.

Calibratge

El calibratge necessari per la nostra simulació és força petit. Principalment hem d'abordar dos problemes: els girs de l'estat de trànsit i la velocitat lliure.

Per acabar d'**ajustar els girs**, s'han observat les quatre seccions interiors incloses a la campanya d'aforament i s'han modificat comptades interseccions per reconduir el trànsit de manera adequada. També s'ha observat la possible creació de congestió mòbil, que generalment es troba a la intersecció del c/ de Maó amb c/ St. Antoni M^a Claret (semàfor) i la les avingudes (contramurada). Amb l'estat de trànsit es simulava la primera congestió bé però les avingudes tenien un trànsit més fluid del normal. El problema resideix en què aquesta segona congestió es deu sobretot a cotxes que busquen aparcament o estan estacionant i, com aquests processos no s'incorporen a la simulació, no es tindran en compte.

D'altra banda, tenim un petit desajust amb la **velocitat lliure**, ja que al calcular l'input del model ideal hem utilitzat dades reals de velocitat (incloent temps perdut a interseccions, semàfors, girs, etc.) però Aimsun requereix una velocitat desitjada realment lliure. Aquesta velocitat o s'ha de fixar per hipòtesis o s'ha de calibrar. Si un estudia molts vehicles (s'ha fet amb el flux de turismes en general) es poden fixar valors estàndard amb una certa desviació i cada agent prendrà una velocitat aleatòria dins un rang. En el nostre cas, com estudiem només un vehicle sota varis escenaris, necessitem una velocitat desitjada que no canviï entre iteracions. Per fer-ho es simularà la ruta sense parades (només viatjant pels carrers) a diferents velocitats desitjades (23, 24, 25...) fins que la velocitat agregada de tot el cicle sigui el valor actual de velocitat lliure (21.5 km/h). El valor de velocitat desitjada calibrat és 24.5 km/h.

Distribució d'orígens i destins

Aquesta és la part més laboriosa de tota la simulació. Hem de tenir en compte que necessitem modelitzar un DRT amb una eina que, com la resta, no té un "mode de transport a la demanda". L'estudi d'aquests serveis es fa també una mica a la demanda, modificant el software actual (optimitzat per transport públic convencional) per adaptar-lo a l'estratègia de ruta que proposi cada enginyer. En el nostre cas, pel nivell de feina que demanda aquest treball i la complicació que comporta, no s'ha entrat en modificacions del funcionament intern de la simulació, sinó que s'han emprat les funcionalitats actuals del software al nostre favor per treure els outputs desitjats.

D'aquesta manera, les feines de distribució d'orígens i destins així com la creació de la ruta s'ha fet de manera externa. Això ha estat possible perquè el nombre de punts que es barallaven era petit (14-16 punts). El **procediment** seguit consisteix en:

1. A partir de dades de demanda, es troba el nombre de persones en un cicle d'un vehicle DRT.
2. Amb un codi propi extern (Matlab a l'annex 4) es distribueixen punts o parelles de punts amb direccionalitat dins l'àrea d'estudi de manera aleatòria (uniforme).
3. Aquests punts (orígens i destins dels viatgers) es converteixen en parades de transport públic al mig de la via a Aimsun.
4. Es crea una ruta òptima que passi pels punts, tenint en compte passar abans per l'origen que el destí de cada parella de punts.
5. Aquesta ruta es simula com si fos un autobús convencional i es llegeixen les mètriques necessàries.

Anem a exemplificar aquest procés per una de les iteracions, per exemple una de DRT matí. L'interval és de 50 min i la demanda de 3.7 pax/km²h. D'aquí deduïm que hi haurà 7 passatgers en aquest cicle, 14 parades. Dibuixem l'àrea total al codi, diem

volem 7 parelles de punts i obtenim la Figura 10.1, on els viatges blaus van cap a l'est i els vermells cap a l'oest.

Hem de tenir en compte que aquestes imatges es generen de manera completament aleatòria però per assegurar que la demanda fos significativament homogènia (i tenint en compte que es faran poques iteracions) s'han descartat combinacions que no tinguin almenys un punt per zona o que incloguin viatges de menys de 500m (tres illes de cases). Si es dona un d'aquests casos es generen els punts des de zero.

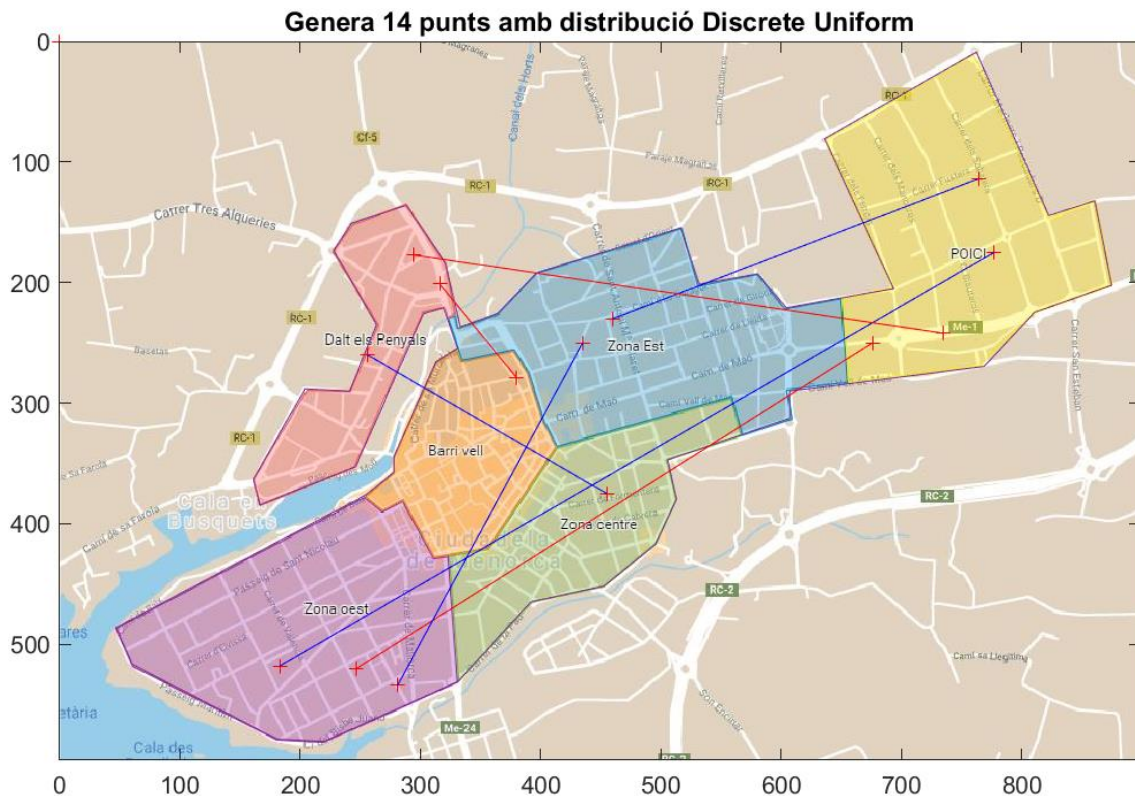


Figura 10.1: 7 parelles de punts per una simulació DRT homogènia de matí.

En el cas que la demanda no sigui homogènia sino per zones, es distribueixen els 14 punts de manera proporcional per cada zona en funció de la seva demanda. Un cop sabem quants punts necessita cada zona, es generen zona per zona, com podem veure a la Figura 10.2. Després es numeren i s'emparellen de forma aleatòria en un full de càlcul.

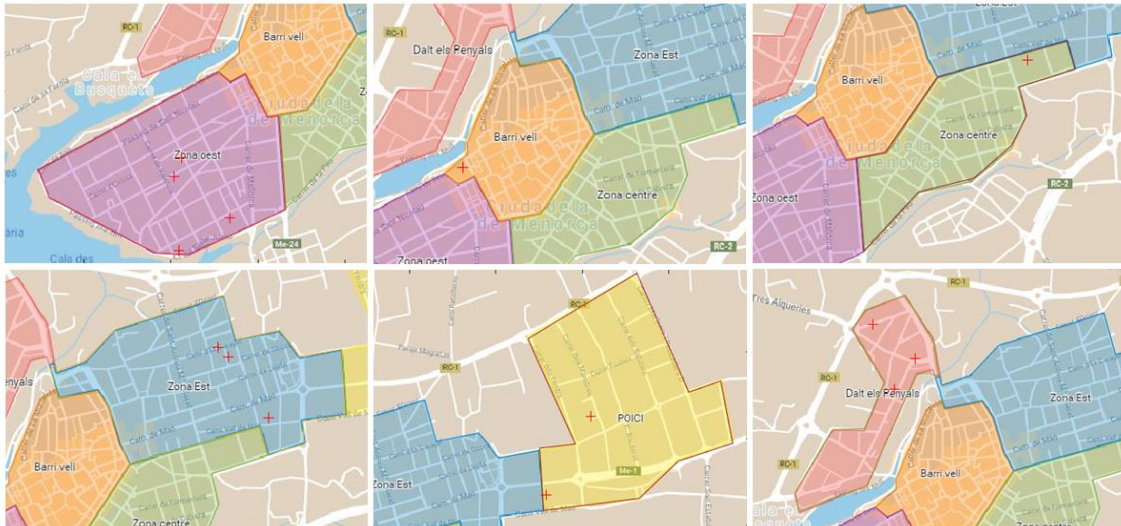


Figura 10.2: 14 punts distribuïts proporcionalment entre les zones per l'escenari de matí.

Per ambdues opcions, un cop es tenen els punts aparellats es crea una ruta òptima a mà. Són pocs punts i no hi ha gaire espai per la improvisació, però si es dóna el cas es prioritza la ruta que minimitzi el temps de viatge dels usuaris, sense que suposi desviacions de distància importants. Podem veure una ruta introduïda a l'espai de simulació en vermell a la Figura 10.3. Ara ja podem simular i obtenir resultats.



Figura 10.3: Recorregut del DRT en un escenari homogeni de matí.

Per últim, cal tenir en compte una **hipòtesis** amagada en aquest procés: hem suposat que a l'inici de cada cicle es coneixen tots els viatges a servir i que aquests poden ser servits en qualsevol moment dintre d'aquest cicle. Això pot ser realista per serveis amb poca demanda i usuaris que realment no tenen una hora d'arribada estricta (com podria ser el cas d'un dels nostres viatgers a mig matí). De totes maneres, s'ha fet la hipòtesis perquè si incloem temps de comanda aleatoris, estem afegint un segon input estocàstic (el primer era la ruta) i ja no sabríem en quin cicle entra cada viatge perquè arribi a temps. Considerar aquest efecte sense algorismes d'optimització específics (com podria ser el que utilitza Uber, però per vehicles compartits) és insostenible. Aquesta decisió el que provoca és perdre part del potencial anàlisi sobre el temps d'espera, que es farà només a partir de l'interval, sense qüestionar la pròpia forma de $W = H/2$.

10.2 Resultats i discussió

10.2.1 Escenari de matí

Aplicant el procediment descrit, obtenim resultats per les iteracions de matí, com veiem a les següents taules. Comencem simulant la línia actual convencional per contextualitzar una mica els futurs resultats. S'estudien el casos amb totes les parades programades (32), amb només les parades efectives per la demanda de matí (8 persones, 16 parades màxim) i sense fer cap parada. Podem veure que el temps perdut només en les 32 parades és d'uns 6:30 minuts però que no és proporcional al nombre de parades, ja que una parada més pot canviar el moment en què l'autobús arriba a un semàfor, a una cua de cotxes o a una rotonda plena.

D'altra banda, si comparem els resultats del model que es salta parades amb la línia micro que es salta parades, veiem que els resultats no són tan diferents, simplement amb una mica d'augment del temps de cicle en el model microscòpic, causat tant per la diferència en el nombre de parades com a la resta de fenòmens de la realitat que no s'inclouen al model ideal. Això ja ens indica que probablement les velocitats comercials siguin més altes al model ideal que a la realitat.

Iteració	32 stops	16 stops	No stops	Ideal conv. 13 stops
Temps cicle [m:s]	50:30	48:28	44:07	46:45
Longitud cicle [km]	15.82	15.82	15.82	15.80
Velocitat comercial (v_c) [km/h]	18.79	19.58	21.51	20.40

Taula 10.1: Resultats Matí serveis convencionals.

Un cop contextualitzat, mirem els resultats del DRT, primer amb la **demanda homogènia**. A partir d'ara s'aniran explicant comportaments però cal tenir sempre en compte que només s'han fet tres iteracions i que potser els valors mitjans estiguin una mica desviats, per bona o mala sort.

Iteració	Microscòpic demanda homogènia				Ideal DRT
	DRT 1	DRT 2	DRT 3	Agregat	
Temps cicle [m:s]	50:34	46:24	50:40	49:13	50:00
Longitud cicle [km]	15.99	14.00	15.68	15.22	17.00
Velocitat comercial (v_c) [km/h]	18.97	18.10	18.57	18.55	20.40
Coefficient d'augment (k_o) [ad]	1.01	0.89	0.99	0.96	1.08
IVTT Mig [m:s]	09:32	08:54	07:58	08:48	8:18
IVTT Màxim [m:s]	16:22	14:02	20:12	20:12	
IVTT Mínim [m:s]	01:18	02:09	03:10	01:18	
Desviació [m:s]	05:13	04:14	05:33	04:49	
Temps buit [m:s]	04:22	06:48	08:34	06:35	
Ocupació màxima	2	3	3	3	1.64

Taula 10.2: Resultats DRT Matí amb demanda homogènia.

Comencem amb els valors operacionals. El temps de cicle és molt similar, però si mirem com s'ha aconseguit trobem discrepàncies. Els models microscòpics fan rutes més curtes del previst, però a una velocitat més baixa. Aquestes rutes més curtes es poden deure a que no cal arribar sempre a l'extrem final de l'àrea de servei i per tant la longitud horitzontal base acostuma a ser menor que $2L$.

Respecte a la velocitat comercial, hem de pensar que per rutes més curtes la velocitat també baixa. Potser no sembla una deducció directa, però pensant-ho bé, una ruta més curta (amb el mateix nombre de parades) té menys temps a velocitat lliure, i per tant la velocitat comercial agregada es veu reduïda. Podem comprovar el comportament també a cadascuna de les iteracions individuals. D'altra banda, la baixada de la velocitat comercial també és deguda als efectes del trànsit no previstos al model ideal, com poden ser els petits retards als embussos creats pels semàfors. Sí que aquests retards es tenen en compte a l'hora de fixar una velocitat lliure pel model, però per casos com Ciutadella, on hi ha molt pocs semàfors, no tots els recorreguts emprats per donar un valor a la velocitat lliure hi passen, però sí totes les rutes d'autobús que escombren la ciutat.

Passant al temps dins el vehicle, veiem un valor agregat una mica superior (recordem que tenim una menor velocitat comercial) però el que sí aporta informació nova és la desviació. Aquests 8:48 min de temps poden ser molt competitius però sí ens movem entre viatges d'un minut i viatges de 20, ja no és tan perfecte. De manera general un

viatger pot esperar trajectes de 8:48 min, 5 minuts amunt 5 avall. Aquí ja entra el temps que estigui disposat a perdre cada passatger i la certesa de la informació que pugui oferir la línia quan l'usuari reserva el trajecte. En un servei com el de Ciutadella, amb un vehicle, l'usuari no té gaire poder de decisió, però en models multivehicle més grans és important deixar que l'usuari triï el temps que li vingui millor, traduint aquesta decisió en la tarifa.

Un altre paràmetre que s'ha trobat interessant és el temps que el vehicle viatja buit, en el nostre cas 6:35 min per cycle, un 13% del temps. De totes maneres aquest temps és menys problemàtic que el temps completament parat, perquè si el vehicle es mou és per realment servir un passatger i encara que no estigui facturant amb el trajecte persé, es fa per poder servir un futur passatger.

Per últim mirem la demanda crítica, superior a la prevista però igualment baixa per un vehicle de 35 places.

Iteració	Microscòpic demanda per zones				Ideal DRT
	DRT 1	DRT 2	DRT 3	Agregat	
Temps cycle [m:s]	01:02:14	48:44	59:13	56:44	50:00
Longitud cycle [km]	16.36	15.13	18.15	16.55	17.00
Velocitat comercial (v_c) [km/h]	15.77	18.63	18.39	17.60	20.40
Coefficient d'augment (k_o) [ad]	1.03	0.96	1.15	1.05	1.08
IVTT Mig [m:s]	15:08	12:24	10:12	12:35	8:18
IVTT Màxim [m:s]	23:47	24:04	28:07	28:07	
IVTT Mínim [m:s]	09:51	02:39	03:37	02:39	
Desviació [m:s]	05:51	07:36	08:22	07:17	
Temps buit [m:s]	05:40	02:05	08:32	05:26	
Ocupació màxima	4	3	3	3	1.64

Taula 10.3: Resultats DRT Matí amb demanda per zones.

D'altra banda, repetim l'anàlisi amb demanda no uniforme, sinó repartida segons la **demanda de les sis zones** de la ciutat. Els resultats que trobem a la Taula 10.3 principalment reflecteixen un descens encara major de la velocitat comercial.

Aquest efecte és causat per l'existència de zones més denses, que obliguen a que la ruta sigui més encargolada per poder passar per tots els punts en un mateix espai. Si hi pensem bé, si els punts estan prou espaiats, es té prou marge per dirigir la ruta en la bona direcció des de varis carreres enrere. En canvi, si tots els punts es troben a poca distància, i a més la xarxa de carrers és principalment unidireccional, és probable que s'hagin de fer *loops* o grans desviaments per poder passar per tots els punts. Aquest efecte potser es pot incorporar en el càlcul del coeficient d'augment, amb una

expressió similar a la que es té actualment però considerant els increments de *detour* en una xarxa unidireccional. Un segon efecte que ha tingut aquest augment de la ruta és que en les iteracions 1 i 3, la ruta ha hagut de passar dos cops per zones de semàfors, quan en general només s’hi passava una. Aquest fet es pot considerar mala sort amb les iteracions però, al cap i a la fi, com més voltes més probabilitats de passar per carrers on no vols passar.

Els efectes sobre la ocupació i el IVTT també s’expliquen de la mateixa manera, però xoca com simplement la concentració de viatges pot augmentar el temps dins el vehicle un 50%. És molt possible que amb més iteracions aquest valor no sigui tan exagerat.

Resumim tots els resultats anteriors amb la següent taula:

Iteració	Servei actual		Servei DRT		
	Realitat L60	Micro L60	Ideal (homogeni)	Micro λ homogènia	Micro λ per zones
Temps cicle [m:s]	55:00	48:28	50:00	49:13	56:44
Longitud cicle [km]	15.82	15.82	17.00	15.22	16.55
Velocitat comercial (v_c) [km/h]	17.26	19.58	20.40	18.55	17.60
Coefficient d’augment (k_o) [ad]	1	1	1.08	0.96	1.05
IVTT Mig [m:s]			08:18	08:48	12:35
IVTT Màxim [m:s]				20:12	28:07
IVTT Mínim [m:s]				01:18	02:39
Desviació [m:s]				04:49	07:17
Temps buit [m:s]				06:35	05:26
Ocupació màxima			1.64	3	3

Taula 10.4: Resum de diferents simulacions de matí.

Mirant tots els resultats alhora, traiem el missatge complet:

1. (*taronja*) Fixant-nos el servei actual, la simulació microscòpica infravalora la situació real en un 10%. Aquest fet és aplicable a totes les simulacions microscòpiques.
2. (*verd*) Fixant-nos en el servei DRT de demanda homogènia, el model ideal quadra bé amb la simulació microscòpica en el temps de cicle, però el model ideal té una longitud de cicle (i velocitat comercial) majors que la simulació microscòpica.

3. (*groc*) Fixant-nos en la simulació amb demanda per zones, quan la demanda deixa de ser homogènia, es produeixen increments del 15% en el temps de cicle i del 50% en el IVTT.

En **conclusió**, podem considerar que els models ideals no fan gens mal paper imitant la simulació microscòpica, sempre que es mantingui la hipòtesis de demanda homogènia. Hi ha possibles millores a l'hora de considerar la longitud total recorreguda i la velocitat comercial però el resultat agregat és bo. Així, les dues fonts d'incertesa són: que la simulació microscòpica infravalora els temps respecte la realitat i que la hipòtesis de demanda homogènia en DRT torna a infravalorar els temps respecte la demanda per zones.

10.2.2 Escenari d'hora punta

L'escenari d'hora punta ja no té aquest objectiu de verificar el model ideal sinó de forçar el DRT al màxim i intentar entendre l'equilibri entre eficiència i ocupació.

Per aquest escenari ens hem posat en el pitjor dels casos: l'hora punta. Quan optimitzàvem el servei amb els models ideals, ens apareixia que el DRT necessitava dos vehicles amb un interval de pas de 25.75 min. El problema està en què aquesta demanda d'hora punta no es concentra només en una franja de temps, sinó en un únic destí: l'institut. Així, si dupliquem els vehicles, quin estudiant agafarà el primer bus que arribi a les 7:30 a l'institut? Tothom voldrà anar en el que arriba a les 7:55, i això ens causa una situació en la que tots els estudiants no es concentren només en una hora, sino en un únic bus.

Així, s'ha proposat un escenari en el que:

- Tota la demanda horària es concentra en un únic autobús.
- Només es simularà la part de tornada, on els estudiants van pujant i finalment baixen a Av. De la Pau, 54 (la parada de la línia convencional més propera, sense tenir en compte el *detour*). La zona oest queda fora de la simulació i per tant es reduirà la demanda en concordança.
- La demanda es fa per zones i s'assignaran un total de 15 orígens (6 dalt els penyals, 8 a la zona est i 1 a POICI) o els respectius nombres d'usuaris a les parades convencionals.

Estudiant aquesta part de la ruta, que funciona com un alimentador, mirarem les diferències de puntualitat entre el servei convencional i el DRT (Taula 10.5).

Iteració	DRT 1	DRT 2	DRT 3	Agregat DRT	L60
Temps cicle [m:s]	29:12	40:01	32:34	33:56	21:48
Longitud cicle [km]	8.59	9.53	9.47	9.20	6.85
Velocitat comercial (v_c) [km/h]	17.65	14.29	17.44	16.46	18.84
Coefficient d'augment (k_o) [ad]	1.26	1.39	1.38	1.34	-
IVTT Mig [m:s]	17:00	24:52	20:36	20:49	13:58

Taula 10.5: Resultats feeder DRT i L60 Hora Punta.

Veiem que hi ha una diferència important entre el temps de cicle fixat (L60) i el del DRT. Aquesta diferència era esperable ja que s'ha de fer una ruta bastant més complicada amb el DRT que amb el servei convencional que, en hora punta, recull passatgers a quasi totes les parades. A més, amb una demanda tant concentrada (15 persones en tres zones) la longitud recorreguda pel DRT augmenta considerablement, de mitjana un 34%.

Així, es pot mantenir el DRT en hora punta, servint aquesta demanda màxima en un únic vehicle? La resposta és que depèn dels usuaris. Si la demanda és aleatòria, probablement no. El problema resideix principalment en què els usuaris volen arribar a una hora concreta al seu destí, i si el temps de ruta varia tant només per la distribució diferent dels orígens, no hi ha manera de garantir una hora d'arribada precisa.

Ara bé, en aquest cas concret on els usuaris són cada dia els mateixos, es pot proposar una ruta sinuosa però fixa, cada dia la mateixa, que reculli els estudiants de casa seva. Llavors la decisió està en què prefereixen els usuaris, si estalviar-se el temps d'accés o sacrificar 7 minuts més de mitjana dins el bus escolar. Sent un grup de població que no té problemes de mobilitat, és probable que es descartés el DRT en favor de la ruta tradicional.

En **resum**, una ruta DRT amb molta més demanda de la prevista suposa retards considerables. A més, un servei *feeder* fa que un viatge extra a mig camí suposi un augment del IVTT per molt usuaris i per tant els efectes de l'augment de demanda són majors.

11. Justificació del servei òptim

Un cop acabat el desenvolupament del cas pràctic cal, recollim quins són els fets que poden permetre la presa d'una decisió sobre quin servei s'ha d'implementar:

1. A nivell de cost total, **els serveis a demanda (DRT complet i servei fluid) tenen costos similars i òptims**. Un servei tradicional que fa totes les parades és un 10% més costós.
2. La **situació actual de la L60 ja és una línia que es salta parades**, encara que aquestes sí tinguin una localització fixada.
3. Un **servei DRT** necessitaria algun tipus de reforç o gestió de la demanda en **hora punta** per mantenir la regularitat.
4. Per situacions amb demanda no homogènia, s'ha vist que els **models ideals eren més optimistes que la realitat** en temps de viatge i que els serveis reals podien ser irregulars.

Veient aquests fets es conclou que, tenint en compte les potencials irregularitats del servei DRT complet i el canvi de concepció que suposaria per a la població, la modificació del sistema no estaria justificada all llarg de tot el dia. A les hores centrals del matí, sí que podria funcionar com una potencial millora de la qualitat del servei actual, no de la rendibilitat.

De totes maneres, la **proposta d'aquest treball** deixa de banda el DRT complet i recomana una flexibilització de les parades amb un **servei fluid** per, fent un recorregut similar a l'actua, reduir la distància d'accés a peu sense pràcticament incrementar el cost d'operació.

12. Pressupost d'operació del servei

Finalment, la millora proposada consisteix en una flexibilització de les parades, fent una passa cap al transport a la demanda però sense implementar un DRT many-to-many complet. Així, es presentarà un pressupost d'operació per aquest servei fluid, que no varia gaire del servei convencional, però a més es discutirà quines serien les partides extres necessàries per un DRT complet.

Comencem pels amidaments de la solució proposada, el **sistema de parada flexible**. Com no hi ha desviaments, la longitud total de cicle és la mateixa (15.8 km). L'interval de pas òptim pels tres escenaris de demanda oscil·lava entre els 45 i els 50 min, que per permetre descansos i compensar la infravaloració dels temps en els models s'arrodoneix a 60 min. L'horari es manté també igual i s'opera amb un únic vehicle. Pot semblar xocant però realment tenim un servei molt igual a l'actual, amb uns costos que com veurem a continuació també seran força similars.

La principal diferència respecte el servei tradicional és aquesta flexibilització de les parades. La manera més senzilla de proposar-la és que els usuaris cridin a l'autobús des de la vorera, com si fos un taxi, ja sigui des de les parades fixes o qualsevol altre punt de la ruta. Per facilitar l'operació molts serveis acaben optant per limitar aquests punts de pujada, per exemple, a les cruïlles, on hi sol haver més espai per fer la operació. D'aquesta manera, no tenim costos afegits d'infraestructura. L'única partida que si augmentarà de preu en aquest servei serà l'assegurança en exterior, ja que en molts casos cobreix exclusivament operacions de pujada i baixada en les parades. S'hauria doncs de negociar un nou preu que assegurés als viatgers pujant a qualsevol punt de la ruta. Tenim una aproximació del valor actual de l'assegurança, per 32 parades (una cada 500m). Posant-se en el pitjor dels cassos, el preu per parada es mantindria i, si tripliquem el nombre de potencials parades (cada 170m), es triplicaria la partida.

Com veiem a la Taula 12.1, el cost més important és el del personal de conducció de l'autobús, seguit per l'amortització del vehicle i els costos d'estructura. Tot plegat es poden aproximar els costos anuals per una única línia a 126000 € anuals².

² Les fonts i els càlculs per monetitzar les partides són els mateixos que pels costos unitaris del vehicle de l'apartat 8.3: (MITMA, 2021), (Portal web: Dièsel o Gasolina, 2021) i (Conselleria de Treball, Comerç i Indústria de les Illes Balears, 2018).

Partida	U.	Amidament	Cost unitari	Cost total
Cost combustible	km	57085	0.191	10899.36€
Cost associat del consum de dièsel A+ d'un mini bus a preu de mercat sense IVA i amb les devolucions per ús professional.				
Manteniment	km	57085	0.095	5426.03€
Cost per kilòmetre de manteniment d'un mini bus, tenint en compte desgast de pneumàtics, cost de lubricants, reparacions i altres costos de conservació.				
Cost temporal del conductor	h	3613	20.81	75189.93€
Salari per hora d'un conductor amb els corresponents costos de seguretat social, així com indica el conveni col·lectiu de les Illes Balears.				
Amortització del vehicle	any	1	15000	15000.00€
Partida d'amortització del cost de compra d'un mini bus nou de 35 places adaptat per PMR .				
Assegurances	any	1	5051.22	5051.22€
Conjunt d'assegurances associades a la operació de la línia, tenint en compte un augment significatiu per permetre la pujada i baixada de passatges en parades no establertes.				
Costos fiscals	any	1	623.84	623.84€
Costos fiscals anuals associats a una línia de mini bus, incloent visats, ITV, IAE, IVTM i revisió del tacògraf.				
Increment per costos indirectes i d'estructura 12.5%				14023.80€
Incloent comercialització, gestió, atenció al client i altres.				
			TOTAL	126214.18€

Taula 12.1: Pressupost general d'operació d'una línia convencional amb parades flexibles.

Podem proposar també quins altres costos afegits tindria la **implementació d'un DRT complet**. Apart dels ja esmentats, s'haurien de sumar els costos extres d'operació i una sèrie de costos menors d'inversió inicial. Desgraciadament no s'han trobat fonts per valorar aquestes partides, cada servei és un món i els sistemes es dissenyen també "a demanda" variant importantment el preu en cada cas. De totes maneres, això no treu que es presenti almenys una visió general dels costos extres d'aquest sistema, amb una sèrie de partides fixes d'inversió inicial (que no s'inclourien en un pressupost d'operació, Taula 12.2) i les equivalents partides d'operació (Taula 12.3). Principalment el cost més elevat i amb major variació és el propi software de gestió de rutes. Com aquest cost pot ser elevat, s'introdueix com la possible amortització de bé immaterial dins els costos d'operació.

Partida Inversió inicial	U.	Amidament	Cost unitari	Cost total
Sistema de gestió de rutes Sistema de càlcul de rutes, incloent software, equipament necessari a l'interior del vehicle i agrupació de la informació en una API per connectar amb la interfície d'usuari.	U	1	-	-
Web-app i interfície d'usuari Web-app o altre servei <i>frontend</i> on l'usuari pugui còmodament reservar i pagar un trajecte.	U	1	-	-
Campanya de publicitat i explicació del servei Publicitat al públic general per promocionar el nou servei i explicar el seu funcionament.	U	1	-	-
Jornades de formació a l'operador Formació a conductors i altre personal de l'empresa operadora per poder implementar el nou servei.	U	1	-	-

Taula 12.2: Partides extres sense valorar per a la inversió inicial d'un servei DRT many-to-many complet.

Partida	U.	Amidament	Cost unitari	Cost total
Amortització inversió inicial Amortització de la inversió inicial, principalment en el sistema de gestió de rutes.	any	1	-	-
Manteniment i servidors Manteniment tant del software de rerouting, l'API i la interfície d'usuari, així com els costos de servidors.	any	1	-	-
Costos de central telefònica Cost horari del servei de reserva telefònica de viatges.	h	3613	-	-

Taula 12.3: Partides extres sense valorar per a la operació d'un DRT many-to-many complet.

13. Conclusions del capítol II

Acabem aquest segon capítol resumint els principals resultats de l'anàlisi del cas pràctic.

Per una banda, com a productes de l'anàlisi s'han obtingut:

1. Un exemple del qual s'extreu la **metodologia per idealitzar la realitat** i crear els inputs necessaris tant pels models ideals com pel model microscòpic.
2. Un **model virtual de la ciutat de Ciutadella** apte per fer-hi tot tipus de simulacions per agents.
3. Un senzill **codi complementari per generar orígens i destins aleatoris** uniformement distribuïts en una zona.
4. Un **exemple de pressupost** per un cas real d'aplicació d'una línia amb parades flexibles.

D'altra banda, com a conclusions de l'estudi teòric en quan a la concordança entre resultats ideals i de la simulació microscòpica s'ha validat que:

5. En general, si es manté la **demanda homogènia el model ideal dona bons resultats**, tant pels valors operacionals com pel temps dins els vehicle. Les possibles millores en la longitud de ruta i la velocitat comercial tenen orígens localitzats i que es poden aplicar en una versió millorada de la formulació.
6. Pel cas de **demanda no homogènia, hi ha increments no previstos del temps de cicle**. Encara que la discrepància agregada sigui d'un augment del 10% en el temps de cicle, hi ha casos amb augments que superen el 30% i el temps de viatge perd molta competitivitat.
7. El **temps de viatge a l'interior del vehicle (IVTT)** només es verifica pel cas homogeni però és possible que amb més iteracions les discrepàncies actuals en el model per zones es redueixin.
8. Observant l'**escenari d'hora punta**, la sensibilitat del DRT és gran en situacions de major densitat de demanda, amb increments d'entre el 30 i el 90% en el temps de cicle.

Finalment, respecte el cas concret de Ciutadella, s'ha conclòs que:

9. El **servei recomanat és el convencional amb flexibilització de les parades**, aplicable de manera més fàcil que un DRT complet.

14. Cloenda del treball

Acabem aquest treball fent una mica de retrospectiva i repassant el compliment dels objectius proposats. A les seccions 6 i 13 hem presentat les conclusions concretes de cada capítol, i aquestes darreres paraules pretenen reflexionar sobre quin és el valor de tot plegat.

La mobilitat a la demanda és una proposta prometedora però falta feina perquè tregui tot el seu potencial. Evidentment el paper d'aquest treball no és decisiu ni molt menys en l'èxit d'aquest sistema de transport públic, però de la manera més clara possible s'han presentat eines i discussions sobre gran nombre dels reptes actuals del DRT. Dissenyar no és fàcil i molts cops s'obliden temes importants que al món real són deu cops més difícils de solucionar que a l'oficina. Per això s'ha estat ambiciós en l'abast d'aquest treball, passant per totes les passes de disseny estructural i validació, perquè si amb la discussió bibliogràfica, els models ideals, l'anàlisi de sensibilitat, l'estructura tarifària, la metodologia de definició d'inputs, l'optimització, la validació microscòpica i l'exemple de pressupost no és suficient, també es presenta una estructuració del procés de disseny que pot ajudar a enginyers i enginyeres amb més temps i recursos a posar en pràctica les seves idees de DRT.

Els objectius s'han complert però encara hi queda molta feina a fer. Confio en què aquest treball ajudi en forma i contingut al món del transport públic i que la mobilitat a la demanda ens apropi cap a un transport públic de més qualitat i a l'abast de tothom.

Gràcies per arribar fins aquí.

Pau Cardona Olives

Menorca, setembre 2021

Bibliografia i annexos

Bibliografia

- Ansari, S., Basdere, M., Li, X., Ouyang, Y., & Smilowitz, K. (2018). Advancements in continuous approximation models for logistics and transportation systems: 1996–2016. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107, 229-252.
- Barceló, J., & Casas, J. (2005). Dynamic network simulation with AIMSUN. A R. Kitamura, & M. Kuwahara, *Simulation Approaches in Transportation Analysis* (p. 57-98). Boston, MA: Springer.
- Brake, J., Mulley, C., Nelson, J. D., & Wright, S. (2007). Key lessons learned from recent experience with Flexible Transport Services. *Transport Policy*, 458-466.
- Chaudhry, M., & Ranjitkar, P. (2009). Capacity Analysis of Signalised Intersection using Micro- simulation. *32nd Australian Transport Research Forum*.
- Ciudadella, A. d. (4 / 10 / 2020). *Notícies Ajuntament de Ciutadella*. Recollit de <http://ajciudadella.org/Contingut.aspx?IdPub=51368>
- Clewlow, R., & Mishra, G. (2017). *Disruptive Transportation: The Adoption, Utilization, and Impacts of Ride-Hailing in the United States*. UC Davis, Institute of Transportation Studies.
- Consell Insular de Menorca. (2019). *Informe de dades de trànsit i IMD de la xarxa de carreteres de Menorca*. Comunicació personal.
- Consell Insular de Menorca. (2021). *Sèrie de dades de cancel·lacions de la L60*. Comunicació personal.
- Conselleria de Treball, Comerç i Indústria de les Illes Balears. (2018). *Texto articulado del convenio colectivo para el sector del transporte regular de viajeros por carretera de la comunidad autónoma de las illes balears para los años 2018 a 2020*. BOIB.
- Currie, G., & Fournier, N. (2020). Why most DRT/Micro-Transits fail – What the survivors tell us about progress. *Research in Transportation Economics*, 83.
- Daganzo, C. F. (2010). *Public Transportation Systems: Basic Principles of System Design, Operations Planning and Real-Time Control*. UC Berkeley.
- Derek Halden Consultancy. (2006). *How to plan and run flexible and demand responsive transport guidance*. Transport Research Planning Group, Scottish Executive Social Research.
- Diésel o Gasolina*. (2021). Portal web: Consultat el 21/08/2021, a <https://www.dieselogasolina.com/Estadisticas/Historico/46>
- Engels, D., & Ambrosino, G. (2004). Service typologies and scenarios (Rome). *Demand Responsive Transport Services: Towards the Flexible Mobility Agency*, ENEA, 55-73.

- Enoch, M., Potter, S., Parkhurst, G., & Smith, M. (2004). *INTERMODE: Innovations in Demand Responsive Transport*. Department for Transport and Greater Manchester Passenger Transport Executive.
- Estrada, M., Salanova, J. M., Medina-Tapia, M., & Robusté, F. (2020). Operational cost and user performance analysis of on-demand bus and taxi systems. *Transportation Letters*, 229-242.
- Gutiérrez-Domènech, M. (2008). *Quant costa anar a la feina? El cost en temps i diners*. Documents d'economia "la Caixa", NÚM. 11.
- HSL. (2016). *Kutsuplus - Final Report*. Helsinki Regional Transport Authority.
- König, A., & Grippenkov, J. (2020). The actual demand behind Demand-responsive transport: Assessing behavioral intention to use DRT systems in two rural areas in Germany. *Case Studies on Transport Policy*, 8(3), 954-962.
- MITMA. (2021). *Observatorio de Costes del Transporte de Viajeros en Autocar, Nº 33, Enero 2021*.
- Mulley, C., Nelson, J., Teal, R., Wright, S., & Daniels, R. (2012). Barriers to implementing flexible transport services: An international comparison of the experiences in Australia, Europe and USA. *Research in Transportation Business & Management*, 3-11.
- Robusté, F., & Pérez, J. (1999). Diseño del sistema tarifario integrado para la red de transporte público de Barcelona. *Urbana*, Vol. 4(25), 53-66.
- Rodríguez-Sánchez, P. (2017). PrintVoronoi Matlab code from <https://github.com/PabRod/PrintVoronoi>.
- Saidallah, M. (2016). A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators. *MATEC Web of Conferences*(81).
- Sulopuisto, O. (2016). Why Helsinki's innovative on-demand bus service failed. *Citiscopes*.
- TCRP. (1996). *Report 10: Fare Policies, Structures and Technologies*. Washington D. C.: National Academy Press.

Annex 1: Formulació model alpha amb demanda diferent

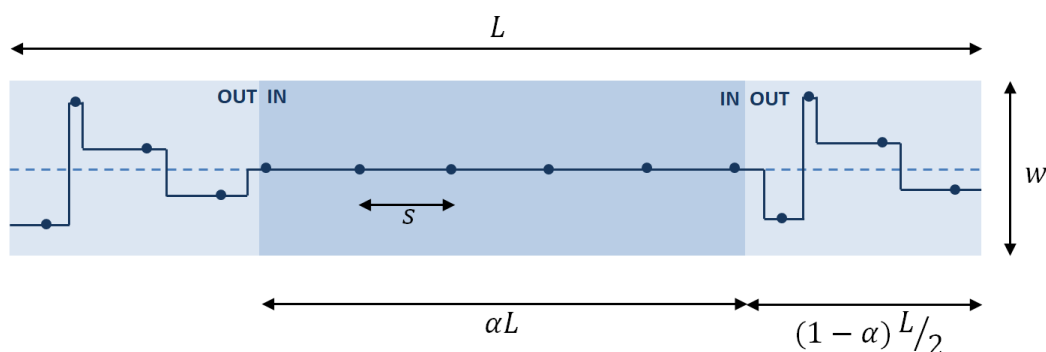
Al llarg del treball s'han utilitzat tres model ideals, tots tres sota la hipòtesis de demanda constant i homogènia en tota l'àrea de treball. En etapes de verificació s'ha vist que aquesta hipòtesis pot portar a una infravaloració de variables com el temps de viatge mitjà i , per tant, seria interessant incloure altres distribucions de la demanda. L'estudi complet de les potencialitats de flexibilitzar aquesta hipòtesis podria omplir un segon TFG sencer però, ja que en etapes inicials del desenvolupament del treball es va formular un model amb demanda diferent i la feina ja estava feta, s'ha trobat interessant presentar-la almenys en un annex.

Les raons per no incloure aquesta formulació en el cos del treball són clares:

1. Molts models fan la hipòtesis de demanda homogènia i avaluar la seva bondat era un punt important del treball.
2. El model plantejat a continuació integra tipus de servei amb valor de la demanda i , per tant, no és un model optimitzable en funció d'alpha (α).

Tota la feina posterior és original i amb les mateixes referències que el model alpha. No s'entrarà en detalls de deducció que ja s'hagin presentat en el cos del treball.

Dit això, partim del mateix esquema, però ara hi ha dos valors de demanda homogènia: un per l'exterior (λ_o) i un per l'interior (λ_i). La major part de la formulació és igual però definint quina de les dues demandes s'utilitza.



Mantenim els mateixos quatre tipus de viatges:

1. Viatges amb origen i destí a la zona interior (i,i)
2. Viatges amb origen a la zona interior i destí a l'exterior o vice versa (i,o)
3. Viatges amb origen i destí a la mateixa zona exterior (o,o)
4. Viatges amb origen a una zona exterior i destí a l'altra (o,i,o)

Llavors, com la demanda no és uniforme, comencem definint una **demanda total normalitzada**:

$$\lambda_T = \lambda_i \alpha + \lambda_o (1 - \alpha)$$

I definint la probabilitat de què un origen o destí es doni a les zones interior o exteriors:

$$P_i = \frac{\lambda_i \cdot \alpha}{\lambda_T}$$

$$P_o = \frac{\lambda_o \cdot (1 - \alpha)}{\lambda_T}$$

I per tant, la **probabilitat de que es doni cada tipus de viatge** es redueix a:

$$P_{i,i} = P_i^2$$

$$P_{i,o} = 2 \cdot P_i \cdot P_o$$

$$P_{o,o} = \frac{P_o^2}{2}$$

$$P_{o,i,o} = \frac{P_o^2}{2}$$

Homòlogament al model DRT, també ens cal definir el **coeficient d'augment per la longitud DRT (k_o)**:

$$k_o = \frac{l}{x} = 1 + wH\lambda_o \cdot \frac{w}{3} + \sum_{i=2}^{\infty} (i-1) \cdot 2D_s \cdot P\{i\} \geq 1$$

$$P\{i\} = \left(\frac{2D_s}{L}\right)^i$$

També definim el **nombre de parades efectives en un cicle convencional (S_e^*)**:

$$S_e^* = \min \left\{ \left[\frac{2L}{S} \right]^+, [2\lambda_i LwH]^+ \right\}$$

I el **nombre de parades efectives en un cicle (S_e)**:

$$S_e = \left[\alpha \cdot \min \left\{ \frac{2L}{S}, 2\lambda_i LwH \right\} + (1 - \alpha) \cdot 2\lambda_o LwH \right]^+$$

Per les variables de l'usuari, cada tipus de viatger té uns costos temporals, presentats com **temps d'accés (A)**, **temps d'espera (W)** i **in vehicle travel time (IVTT)** a la següent taula, que no pateix cap canvi respecte la formulació original:

	Accés (A)	Espera (W)	Temps total dins el vehicle (IVTT)
i, i	$A_{i,i} = \frac{s+w}{2 \cdot v_w}$	$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$	$IVTT_{i,i} = IVTT_i \left(\frac{\alpha}{3} L \right)$
i, o	$A_{i,o} = \frac{s+w}{4 \cdot v_w}$	$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$	$IVTT_{i,o} = IVTT_i \left(\frac{\alpha}{2} L \right) + IVTT_o \left(\frac{1-\alpha}{4} L \cdot k_o \right)$
o, o	$A_{o,o} = 0$	$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$	$IVTT_{o,o} = IVTT_o \left(\frac{1-\alpha}{6} L \cdot k_o \right)$
o, i, o	$A_{o,i,o} = 0$	$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$	$IVTT_{o,i,o} = IVTT_i (\alpha L) + IVTT_o \left(\frac{1-\alpha}{2} L \cdot k_o \right)$

On els *IVTT* interiors i exteriors sí inclouen la diferència segons demandes:

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + \frac{l \cdot S_e^*}{2L} \cdot \frac{v}{a} + \lambda_i w H \cdot \tau'$$

$$IVTT(l) = \frac{l}{v} + \frac{l}{k_o} \cdot \lambda_o w H \cdot \left(\frac{v}{a} + \tau' \right)$$

Un cop tenim les components del temps per cada tipus de viatge només cal agregar-les en funció de la probabilitat de cada viatge, obtenint:

$$A = \sum_j A_j \cdot P_j \quad \text{sent } j = \{i, i \mid i, o \mid o, o \mid o, i, o\}$$

$$W = \frac{1}{2} \left(\bar{H} + \frac{S_H^2}{\bar{H}} \right)$$

$$IVTT = \sum_j IVTT_j \cdot P_j \quad \text{sent } j = \{i, i \mid i, o \mid o, o \mid o, i, o\}$$

Les variables de l'agència segueixen la mateixa filosofia que el model alpha.

Per la **distància total viatjada en una hora (Q)**, sumem les distàncies en cicles interiors i exteriors (majorats per k_o):

$$Q = Q_i + Q_o = \frac{2L\alpha}{H} + \frac{2L(1-\alpha)k_o}{H}$$

La **velocitat comercial** (v_c) diferent per cada zona:

$$\frac{1}{v_{c,i}} = IVTT_i(1)$$

$$\frac{1}{v_{c,o}} = IVTT_o(1)$$

I la **mida de la flota** (M):

$$M = M_i + M_o = \left[\frac{Q_i}{v_{c,i}} + \frac{Q_o}{v_{c,o}} \right]^+$$

L'**ocupació màxima** (O) es fa utilitzant la demanda agregada:

$$O\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\lambda_T W L}{4} H$$

Per últim reformulem el **problema d'optimització** per incloure la demanda agregada i eliminar alpha com a variable de decisió, ja que canviar-la canviaria també la demanda total i això no té gaire sentit:

$$\min_{H,s} Z = Z_a + Z_u = (c_d Q + c_t M) + \beta_t \lambda_T L W \cdot (A + W + IVTT)$$

$$\text{amb } H \geq H_{min}, \quad s > 0$$

$$O \leq C$$

Com acabem de veure, amb comptats canvis s'aconsegueix una primera petita millora sobre la hipòtesis de demanda homogènia, però feines futures haurien de considerar moltes altres distribucions.

Annex 2: Codi VBA optimització model alpha

Es presenta el codi d'optimització pel model alpha considerant demanda diferent a les zones interiors i exteriors. S'han emprat diverses modificacions d'aquest codi, simplificant-lo per calcular models més simples, canviant les variables d'iteració, adaptant-lo per construir les gràfiques necessàries, etc. però amb ell es veu l'estil i el tipus de codi necessari per portar a terme l'optimització. El codi és completament funcional sempre i quan els inputs es trobin a les caselles adequades del full Excel.

```
Sub optAlpha_C()
    Sheets("input").Select
    Dim L, w, Ds, alph, lambIn, lambOut, varHead, minHead, C, velcruise, a,
    tau, costD, costT, fare, velWalk, beta As Double

    'LLEGIM ELS PARÀMETRES DEL SISTEMA
    L = Worksheets("input").Range("c4").Value 'Route length (km)
    w = Worksheets("input").Range("c5").Value 'Band width (km)
    Ds = Worksheets("input").Range("c6").Value 'Street spacing (km)

    'alph = Worksheets("input").Range("c7").Value 'Percentage of conv. line
(ad)
    lambIn = Worksheets("input").Range("c8").Value 'Demand density inside
(pax/km2-h)
    lambOut = Worksheets("input").Range("c9").Value 'Demand density outside
(pax/km2-h)
    varHead = Worksheets("input").Range("c10").Value 'Headway variance (h2)
    minHead = Worksheets("input").Range("c11").Value / 60 'Minimum headway (h)

    C = Worksheets("input").Range("c12").Value 'Capacity (pax)
    velcruise = Worksheets("input").Range("c13").Value 'Cruise speed (km/h)
    a = Worksheets("input").Range("c14").Value * 12960 'Acceleration rate
(km/h2)
    tau = Worksheets("input").Range("c15").Value / 3600 'Boarding time
(h/pax)

    costD = Worksheets("input").Range("c16").Value 'Unit distance cost (€/veh-
km)
    costT = Worksheets("input").Range("c17").Value 'Unit temporal cost (€/veh-
h)
    fare = Worksheets("input").Range("c18").Value 'Fare (€/trip)

    velWalk = Worksheets("input").Range("c19").Value 'Walking speed (km/h)
    beta = Worksheets("input").Range("c20").Value 'Value of time (€/pax-h)

    'ITERACIÓ alpha
    Zmin = 9999999999# 'Total cost (€/h)
    For ia = 0 To 20
        alph = ia * 0.05
        Worksheets("input").Range("y13").Value = alph

    'CARACTERÍSTIQUES GEOMÈTRIQUES
    alph1 = 1 - alph 'Definim aquesta variable per comoditat de codi
    lambTot = lambIn * alph + lambOut * alph1
    pin = (lambIn * alph) / (lambTot)
    pout = 1 - pin
    pa = pin * pin
    pb = pin * pout * 2
    pc = pout * pout / 2
    pd = pc

    sumatori = 0
    For i = 2 To 50
        sumatori = sumatori + (i - 1) * 2 * Ds * ((2 * Ds / L) ^ i)
```

```

Next

'ITERACIÓ s i H
H = 0 'Headway (h)
s = 0 'Stop spacing (km)

For i = 1 To 100
s = i / 100 '0.01-1 km
Worksheets("input").Range("y14").Value = s
  For j = 1 To 229
    H = minHead + (j - 1) / 240 '3-60 min
    Worksheets("input").Range("y15").Value = H

    'AQUÍ COMENÇA EL MODEL EN SI
    kout = 1 + w * H * lambOut * w / 3 + sumatori
    QIn = (2 * L * alph / H)
    QOut = (2 * L * alph1 * kout / H)
    Q = QIn + QOut
    Sea = 2 * L / s
    Seb = 2 * lambIn * L * w * H
    If (Sea <= Seb) Then
      Sec = Int(Sea) + 1
      Se = Int(alph * Sea + 2 * lambOut * alph1 * L * w * H) + 1
    Else
      Sec = Int(Seb) + 1
      Se = Int(alph * Seb + 2 * lambOut * alph1 * L * w * H) + 1
    End If
    vcIn = 1 / funcIVTTin(H, 1, L, w, lambIn, Sec, velcruise, a, taup)
    vcOut = 1 / funcIVTTout(H, 1, L, w, lambOut, kout, velcruise, a,
taup)

    vc = alph * vcIn + alph1 * vcOut
    m = Int((QIn / vcIn) + (QOut / vcOut) + 1)

    aa = (s + w) / (2 * velWalk)
    ab = (s + w) / (4 * velWalk) + (Ds) / (4 * velWalk)
    'ac = 0
    'ad = 0
    aUser = pa * aa + pb * ab '+ pc * ac + pd * ad
    wUser = (H + varHead / H) / 2

    la = L * alph / 3
    ivtta = funcIVTTin(H, la, L, w, lambIn, Sec, velcruise, a, taup)
    lbIn = L * alph / 2
    lbOut = L * alph1 * kout / 4
    ivttb = funcIVTTin(H, lbIn, L, w, lambIn, Sec, velcruise, a, taup)
+ funcIVTTout(H, lbOut, L, w, lambOut, kout, velcruise, a, taup)
    lc = L * alph1 * kout / 6
    ivttc = funcIVTTout(H, lc, L, w, lambOut, kout, velcruise, a,
taup)

    ldIn = L * alph
    ldOut = L * alph1 * kout / 2
    ivttdd = funcIVTTin(H, ldIn, L, w, lambIn, Sec, velcruise, a, taup)
+ funcIVTTout(H, ldOut, L, w, lambOut, kout, velcruise, a, taup)
    ivtt = pa * ivtta + pb * ivttb + pc * ivttc + pd * ivttdd

    O = lambTot * L * w * H / 4

    If (O <= C) Then
      costA = costD * Q + costT * m
      costU = beta * lambTot * L * w * (aUser + wUser + ivtt)
      Ztot = costA + costU
      Worksheets("input").Range("y16").Value = Ztot

      'MIREM SI HEM TROBAT UNA SOLUCIÓ MILLOR QUE LES ANTERIORS
      If (Ztot < Zmin) Then
        Zmin = Ztot

        Lopt = L

```

```

        Qopt = Q
        Mopt = m
        seopt = Se
        aopt = aUser
        wopt = wUser
        ivttopt = ivtt
        vcopt = vc
        costAopt = costA
        costUopt = costU
        sopt = s
        Hopt = H
        Oopt = O
        alphopt = alph

        Worksheets("input").Range("y19").Value = seopt
        Worksheets("input").Range("y20").Value = sopt
        Worksheets("input").Range("y21").Value = Hopt
        Worksheets("input").Range("y22").Value = Ztot
        Worksheets("input").Range("y23").Value = costUopt
        Worksheets("input").Range("y24").Value = costAopt
        Worksheets("input").Range("y25").Value = costAopt /
(lambTot * L * w)
        Worksheets("input").Range("y26").Value = Qopt
        Worksheets("input").Range("y27").Value = Mopt
        Worksheets("input").Range("y28").Value = vcopt
        Worksheets("input").Range("y29").Value = aopt
        Worksheets("input").Range("y30").Value = wopt
        Worksheets("input").Range("y31").Value = ivttopt
        Worksheets("input").Range("y32").Value = aopt + wopt +
ivttopt
        Worksheets("input").Range("y33").Value = Oopt
        Worksheets("input").Range("y34").Value = fare / (costAopt
/ (lambTot * L * w))
        Worksheets("input").Range("y35").Value = alphopt

        End If
    End If

    Next
Next
Next

Beep
End Sub


Public Function funcIVTTin(H, ltrip, L, w, lamb, Se, velcruise, acc, taup) As
Double
    funcIVTTin = ltrip / velcruise + (ltrip * Se * velcruise) / (2 * L * acc)
+ (ltrip * lamb * w * H * taup)
End Function


Public Function funcIVTTout(H, ltrip, L, w, lamb, kout, velcruise, acc, taup)
As Double
    funcIVTTout = ltrip / velcruise + (ltrip * lamb * w * H / kout) *
((velcruise / acc) + taup)
End Function

```


Annex 3: Mesura dels cicles semafòrics

Es resumeix la informació obtinguda en sis fitxes, una per cada intersecció.

Cruïlla A												
	<p>c/ Sant Antoni Mª Claret – c/ de Màrius Verdaguer</p> <p><u>Cicle:</u> 90 sec <u>Offset:</u> 0 sec</p> <p>Temps de groc: 3 sec</p> <p>Temps de verd:</p>											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Inici</th> <th>Durada</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A.1</td> <td>0</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>A.2</td> <td>30</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>A.3</td> <td>60</td> <td>24</td> </tr> </tbody> </table>		Inici	Durada	A.1	0	24	A.2	30	24	A.3	60
	Inici	Durada										
A.1	0	24										
A.2	30	24										
A.3	60	24										

Cruïlla B												
	<p>c/ Sant Antoni Mª Claret – c/ Pere Cortés</p> <p><u>Cicle:</u> 90 sec <u>Offset:</u> 72 sec</p> <p>Temps de groc: 3 sec</p> <p>Temps de verd:</p>											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Inici</th> <th>Durada</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B.1</td> <td>0</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>B.2</td> <td>35</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>B.3</td> <td>63</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table>		Inici	Durada	B.1	0	28	B.2	35	20	B.3	63
	Inici	Durada										
B.1	0	28										
B.2	35	20										
B.3	63	20										

Cruïlla C



c/ Sant Antoni M^a Claret – Camí de Maó –
Camí vell de Maó

Cicle: 90 sec Offset: 80 sec

Temps de groc: 3 sec

Temps de verd:

	Inici	Durada
C.1	0	20
C.2	25	16
C.3	54	14

Cruïlla D



Av. de la Constitució – Camí de Maó

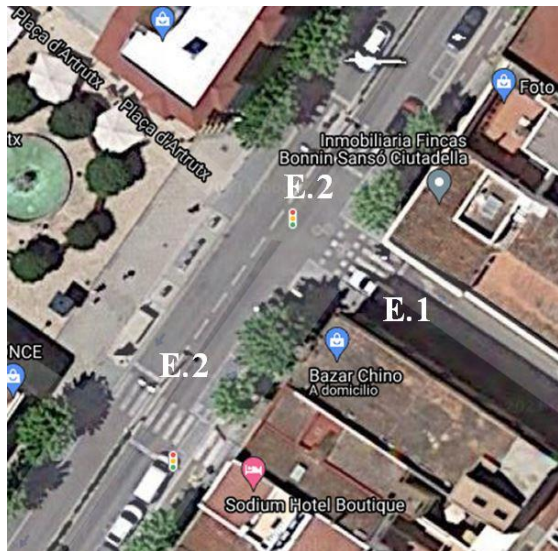
Cicle: 90 sec Offset: 16 sec

Temps de groc: 3 sec

Temps de verd:

	Inici	Durada
D.1	0	30
D.2	36	21
D.3	63	21

Cruïlla E



Av. de Jaume I – c/ de Mossèn Salord i Farnés

Cicle: 65 sec Offset: 0 sec

Temps de groc: 2 sec

Temps de verd:

	Inici	Durada
E.1	0	17
E.2	23	35

Cruïlla F



Av. Del Capitán Negrete – Camí d'es Degollador

Cicle: 65 sec Offset: 24 sec

Temps de groc: 3 sec

Temps de verd:

	Inici	Durada
F.1	0	15
F.2	21	35

Annex 4: Codi Matlab per generar punts aleatoris

Aquest és el codi per generar punts aleatoris en una zona poligonal irregular. Té principalment dos processos, un primer en el què es dibuixa el perímetre de la zona irregular i un segon en què es generen els punts, en aquest cas per parelles. Notem que el codi és funcional sempre hi quan es faci bé la referència a la "imatgeBase.JPG".

```
%%CODI PER GENERAR PUNTS ALEATORIS DINS UN ÀREA DIBUIXADA%%
clear
clc

% Carreguem i medim la imatge
map = imread("imatgeBase.JPG");

sizeY = size(map, 1);
sizeX = size(map, 2);

%Demanem el número de punts dins el polígon
numPointsIn = input("Quant punts voldràs? ");
distrib = 'Discrete Uniform'; %Consultar 'random' per les alternatives
%Notem que la distribució es fa pel total de l'espai, no només pel
polígon
%Això funciona per uniforme, per la qual aquest codi està dissenyat

%Mostrem la imatge base
figure;
image(map);
xlim([0 sizeX]);
ylim([0 sizeY]);
hold on;

%Marquem els vèrtexs per ordre
textTit = "Genera "+numPointsIn+" punts amb distribució "+distrib;
title(textTit)
button = 1;
counter = 1;
while(button == 1) % Botó dret acaba el loop
    [xi, yi, button] = ginput(1);
    if(button == 1) % El punt del botó dret no compta
        scatter(xi, yi, 'b*');
        xv(counter, 1) = xi;
        yv(counter, 1) = yi;
        counter = counter + 1;
    end
end
%Aquests són els vèrtexs del polígon
xv = [xv ; xv(1)];
yv = [yv ; yv(1)];

%Generem els punts aleatoris
while numPointsIn~=0
    x=zeros(numPointsIn);
    y=zeros(numPointsIn);
    for i=1:numPointsIn
        flagIsIn = 0;
        while ~flagIsIn
            x(i) = random(distrib,sizeX);
```

```

        y(i) = random(distrib,sizeY);
        flagIsIn = inpolygon(x(i),y(i),xv,yv);
    end
end

image(map)
plot(xv,yv,x,y,'r+')

%Si volem parelles de punts
dir = true;
for i=1:2:numPointsIn
    if dir == true
        plot(x(i:i+1),y(i:i+1),'r-')
        dir = false;
    else
        plot(x(i:i+1),y(i:i+1),'b-')
        dir = true;
    end
end

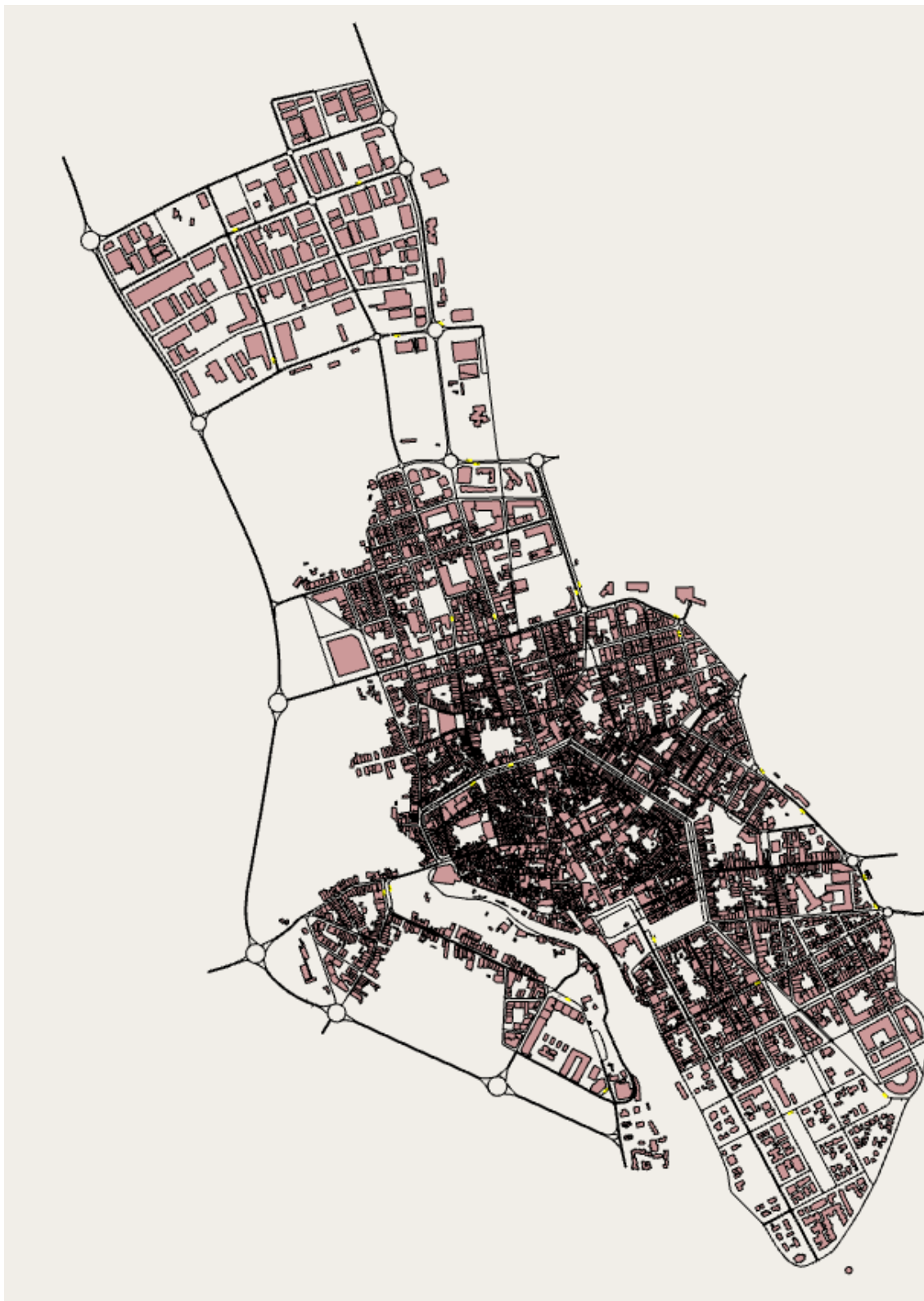
%Repetir la distribució sense necessitat de redibuixar
numPointsIn = input("Quants punts un altre cop? 0 per acabar: ");

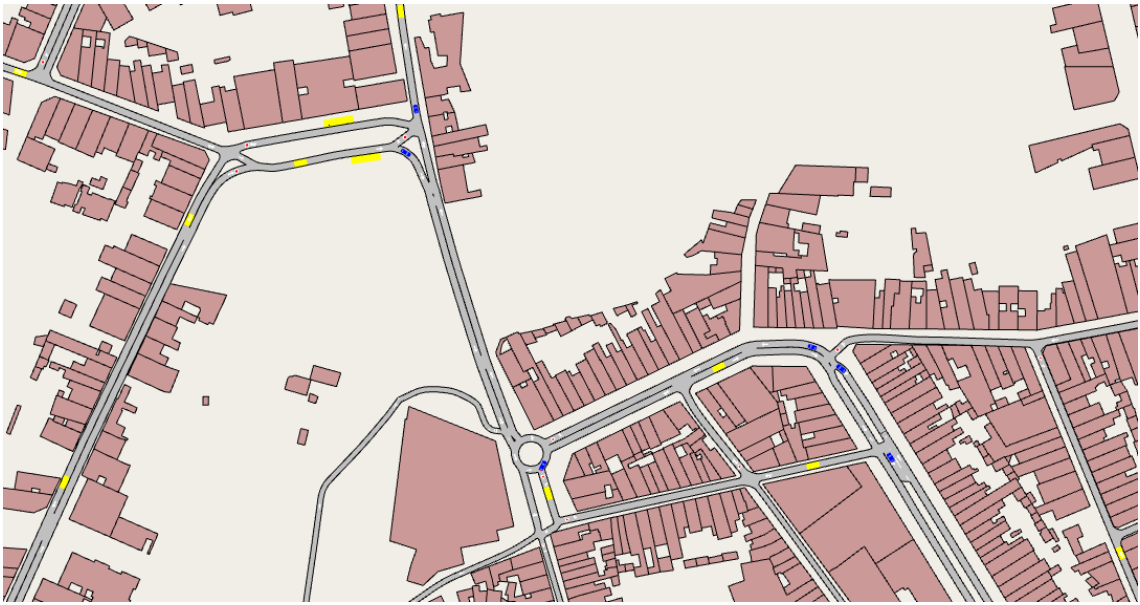
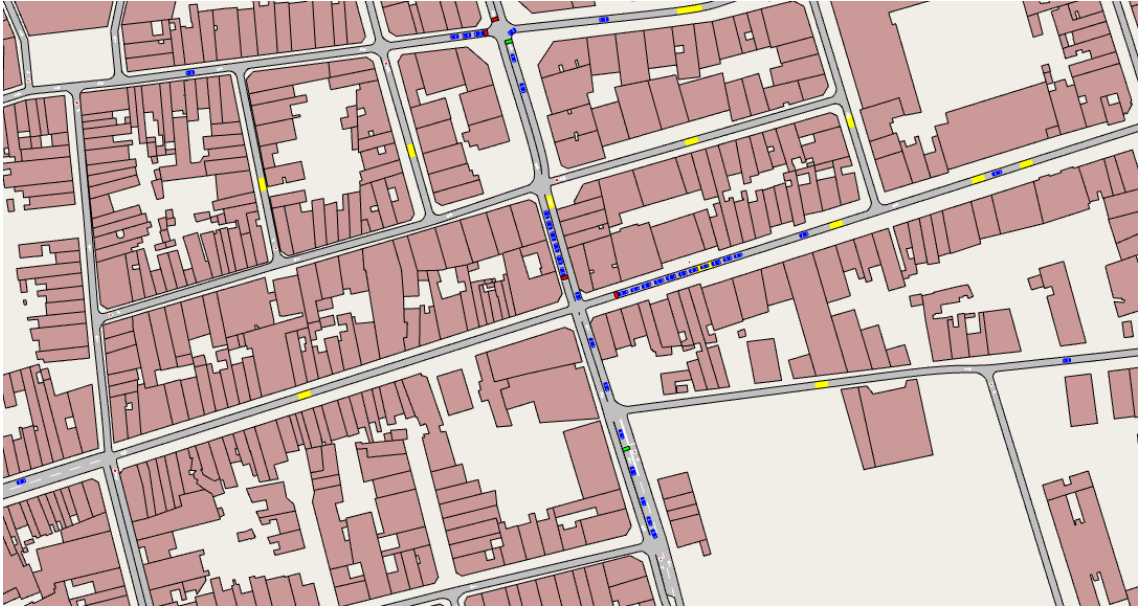
end

```

Annex 5: Xarxa final model Aimsun

En aquest darrer annex simplement es presenta un dels resultats finals de la simulació microscòpica com a exemple de la feina feta i el nivell de detall que requereix.







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

**DISSENY DE CORREDORS
HÍBRIDS DE TRANSPORT PÚBLIC
AMB PATRONS ESPACIALS
FLEXIBLES**

Treball realitzat per:
Pau Cardona Olives

Dirigit per:
Miquel Estrada Romeu

Grau en:
Enginyeria Civil

Menorca, 14 de setembre de 2021

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU