

## Estratègies per a la millora de la regularitat de pas dels autobusos

Pere Clemente Martin

Miquel Àngel Estrada Romeu, Leif Thorson Bofarull

Infraestructura del Transport i Territori (ITT)

Transports

4 de maig de 2008



## I. RESUM

La tendència de la societat occidental a consumir un volum creixent de recursos s'ha de limitar. Les persones que habiten a les ciutats necessiten desplaçar-se per a portar a terme la seva vida. Tot i això, últimament s'observa una tendència creixent per part dels ciutadans i de certs estaments polítics a buscar solucions a aquests problemes.

El percentatge de recursos energètics que es dediquen als transports és cada cop més gran i, per tant, és un dels aspectes en els quals es pot incidir amb resultats rellevants. Els mitjans de transport públic han de poder cobrir un ventall de necessitats molt gran perquè no és sostenible que el transport privat sigui la primera opció a escollir.

Concretament els autobusos poden ser un dels mitjans amb més possibilitats per a poder-ho fer degut a la flexibilitat de les seves línies. Tot i això, també presenten problemes. Entre aquests, destaca el fenomen de l'aparellament, en el qual dos autobusos de la mateixa línia es troben, i té com a conseqüència demores i la falta de regularitat de pas. Per aconseguir aquesta regularitat es poden usar diverses estratègies d'operativa de la línia

La dificultat que té portar a terme experiments reals amb passatgers i trànsit fa que una manera assequible de fer els experiments sigui a partir dels models teòrics. En aquesta tesina es pretén fer un estudi de diferents estratègies a partir d'un model teòric per avaluar-ne les prestacions i saber quina d'elles és la més adequada. Les estratègies es modelitzen, se'n fan simulacions i se n'avaluen els resultats. La principal conclusió que se n'extreu és que l'estratègia més òptima per resoldre problemes d'aparellament, tot i que no sempre serà possible la seva aplicació, consisteix en saltar-se certes parades al mateix temps que s'estén la fase en verd dels semàfors. Per altra banda, per a portar a terme aquestes estratègies és necessari el funcionament coordinat dels Sistemes d'Ajuda a l'Explotació dels autobusos i els Centres de Control de trànsit.



## ii. SUMMARY

Nowadays, there is a growing trend towards resource consuming that should be limited. People living in cities need to move by using different means of transport (either private or public). Moreover, there is an increasing concern about the possible solutions to the environmental problems related with transportation.

The energetic resources assigned to means of transport are increasing. In order to stop the unsustainable trend of using the private transportation, public transportation would have to cover a wide range of needs.

The bus has a big range of possibilities because the flexibility of its lines. However, it could have also some disadvantages. One of these problems is called bunching. It consists in the coincidence of two buses in the same stop, and it usually causes delays and lack of interval regularity.

Experiments in real life time are hardly impossible to develop, and so as to solve it, theoretical models are used. The main objective of this document is to study different route strategies and to establish which of them is the most suitable to reduce the bunching. The conclusion of the study shows that not stopping at bus stops is the best strategy. In addition, it is important to develop a coordinated system between the buses control center and the traffic control center to work easily and in a more effective way.



### **iii. AGRAÏMENTS**

Des d'aquí vull enviar els meus sincers agraïments a totes les persones que han fet possible la realització d'aquesta tesina. Començant pels tutors, Miquel Estrada i Leif Thorson, per a ajudar-me a definir-la i trobar el camí a seguir, en César per l'ajuda prestada. Continuant pels companys i amics que he fet durant els anys d'estudis que hem passat junts.

Vull agrair també el suport que m'ha donat la meva família, especialment als meus pares i a les meves germanes. I finalment a l'Elisenda que ha estat sempre al meu costat incondicionalment.

Moltes gràcies a tots vosaltres.





<b>1 INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJECTIUS</b> .....	<b>5</b>
<b>3 ESTAT DE L'ART</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1 Funcionament d'una línia d'autobusos</b> .....	<b>7</b>
3.1.1 Disseny del recorregut.....	7
3.1.2 Freqüència.....	8
3.1.3 Operativa .....	9
<b>3.2 Factors que condicionen l'operativa de la línia</b> .....	<b>10</b>
3.2.1 Tipus de vehicles.....	10
3.2.2 Parades .....	12
3.2.3 Semàfors .....	14
3.2.4 Carril bus .....	15
3.2.5 SAE.....	15
3.2.6 CCT .....	16
3.2.7 Coordinació SAE i CCT .....	16
<b>3.3 Avaluació d'un sistema de transport</b> .....	<b>17</b>
<b>3.4 Models de funcionament de línies d'autobusos</b> .....	<b>19</b>
<b>4 MODEL DE SEGUIMENT EN LÍNIA</b> .....	<b>23</b>
<b>4.1 Formulació bàsica del problema</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2 Variables del sistema</b> .....	<b>25</b>
4.2.1 Interval .....	25
4.2.2 Nombre de parades.....	26
4.2.3 Nombre de parades màxim .....	26
4.2.4 Longitud entre parades.....	26
4.2.5 Pertorbació .....	27
4.2.6 Vehicle que sofreix la pertorbació .....	27
4.2.7 Velocitat .....	27
4.2.8 Taxa d'arribada de passatgers .....	27
4.2.9 Temps mínim de Lay-Over en capçalera .....	27
4.2.10 Temps mínim descans conveni .....	28
4.2.11 Factor d'ajust interval.....	28
4.2.12 Temps unitari de pujada .....	28
4.2.13 Temps unitari de baixada .....	28
4.2.14 Nombre d'interseccions .....	28
4.2.15 Temps de cicle.....	28
4.2.16 Capacitat.....	28
4.2.17 Permetre recuperar temps en semàfor .....	29
4.2.18 Increment de temps de verd per al pas de l'autobús .....	29
4.2.19 Temps en verd.....	29

<b>5 ESTRATÈGIES D'EXPLOTACIÓ .....</b>	<b>31</b>
5.1 Regular només davant.....	31
5.2 Regular només darrere .....	32
5.3 Regular davant i darrera .....	33
5.4 Regular no para.....	34
<b>6 METODOLOGIA D'ANÀLISI .....</b>	<b>35</b>
6.1 Utilització del model de regularitat .....	35
6.2 Generació d'escenaris de modelització .....	35
6.3 Perfils de càrrega.....	36
6.3.1 Perfil 4.....	36
6.3.2 Perfil 5.....	37
6.3.3 Perfil 6.....	38
6.3.4 Perfils 8.....	38
6.3.5 Perfil 9.....	39
6.3.6 Perfil 10.....	40
6.4 Execució del model.....	40
6.5 Agrupació de resultats i anàlisi estadístic .....	41
<b>7 VARIABLES CONSIDERADES.....</b>	<b>43</b>
7.1 Paràmetres de les mètriques.....	43
7.1.1 Coeficient de variació .....	43
7.1.2 Temps destinats a cada operació .....	43
7.1.3 Velocitat comercial .....	44
7.2 Creació de l'indicador de prestacions .....	45
7.2.2 Funcions de valor dels paràmetres de les mètriques.....	47
<b>8 RESULTATS.....</b>	<b>49</b>
8.1 Anàlisis del temps.....	51
8.1.1 Temps ponderat - Perfil de càrrega.....	54
8.1.2 Temps ponderat - Temps de pertorbació .....	55
8.1.3 Temps ponderat – Interval.....	56
8.1.4 Temps ponderat – Parada en la que es produeix la pertorbació .....	57
8.1.5 Temps ponderat – Autobús afectat .....	58
8.1.6 Temps ponderat - Temps de Lay-Over .....	59
8.2 Anàlisis del Coeficient de Variació .....	60
8.2.1 Coeficient de variació – Perfil de Càrrega .....	62
8.2.2 Coeficient de variació – Temps de pertorbació .....	63
8.2.3 Coeficient de variació – Interval de pas .....	64
8.2.4 Coeficient de variació – Parada en la que es produeix la pertorbació .....	65
8.2.5 Coeficient de variació – Autobús afectat .....	66

8.2.6 Coeficient de variació – Lay-Over .....	67
<b>8.3 Velocitat comercial .....</b>	<b>68</b>
8.3.2 Velocitat comercial – Perfil de càrrega .....	71
8.3.3 Velocitat comercial – Temps de pertorbació .....	72
8.3.4 Velocitat comercial – Interval de pas.....	73
8.3.5 Velocitat comercial – Parada en la que es produeix la pertorbació .....	74
8.3.6 Velocitat comercial – Autobús afectat .....	75
8.3.7 Velocitat comercial – Temps de Lay-Over .....	76
<b>8.4 Indicador de prestacions.....</b>	<b>77</b>
8.4.1 Indicador de prestacions – Perfil de càrrega.....	78
8.4.2 Indicador de prestacions – Temps de pertorbació .....	79
8.4.3 Indicador de prestacions – Interval de pas.....	80
8.4.4 Indicador de prestacions – Parada en la que es produeix la pertorbació .....	80
8.4.5 Indicador de prestacions – Autobús afectat .....	81
8.4.6 Indicador de prestacions – Temps de Lay-Over .....	82
<b>9 CONCLUSIONS I FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ .....</b>	<b>83</b>
<b>10 REFERÈNCIES.....</b>	<b>85</b>
<b>ANNEXOS.....</b>	<b>87</b>

<b>Taula I. Taxa de càrrega i descàrrega segons el sistema de validació. Font: Kittelson&amp; Associates (2003).....</b>	<b>14</b>
<b>Taula II. Taxa de càrrega i descàrrega segons el nombre de portes disponibles. Font: Kittelson&amp; Associates (2003) .....</b>	<b>14</b>
<b>Taula III. Valor del temps .....</b>	<b>17</b>
<b>Taula IV. Nivell de servei en funció del Cvh.....</b>	<b>18</b>
<b>Taula V. Resum de les combinacions simulades.....</b>	<b>36</b>
<b>Taula VI. Conjunt de Coeficients de Variació que obtindrem.....</b>	<b>43</b>
<b>Taula VII. Valors de comparació segons les relacions entre elements. ....</b>	<b>45</b>
<b>Taula VIII. Matriu de comparació de l'indicador de prestacions. ....</b>	<b>45</b>
<b>Taula IX. Valors de CIA en funció de l'ordre de la matriu. ....</b>	<b>46</b>
<b>Taula X. Pesos de l'indicador de prestacions.....</b>	<b>46</b>
<b>Taula XI. Producte dels paràmetres de càrrega de cada perfil utilitzat. ....</b>	<b>49</b>

<b>Figura 1. Cues d'autobusos en carril bus. ....</b>	<b>3</b>
<b>Figura 2. Autobús dotat de rampa d'accés per persones de mobilitat reduïda .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 3. Parada amb marquesina. ....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 4. Diagrama teòric de fase en l'espai <math>(\Delta t, \gamma \lambda)</math> per <math>L=2-5</math> on <math>\lambda=0,2</math>, <math>\mu=0,1</math> i <math>\gamma=\delta</math>. Les corbes representen les línies d'estabilitat neutral. Per sota d'aquestes, el flux d'autobusos homogeni és estable i per sobre d'aquestes es torna inestable. Font: Nagatani (2001).....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5. Esquema del sistema. Font: Estrada et Al. (2007).....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 6. Croquis de l'estratègia Regular Només Davant.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 7. Croquis de l'estratègia Només Darrere .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 8. Croquis de l'estratègia Davant i Darrera. ....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 9. Croquis de l'estratègia no para a les parades. ....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 10. Perfil de càrrega 4. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 11. Perfil de càrrega 5 .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 12. Perfil de càrrega 6 .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 13. Perfil de càrrega 8. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 14. Perfil de càrrega 9. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 15. Perfil de càrrega 10. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 16. Funció de valor per al Coeficient de Variació.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 17. Funció de valor per a la velocitat comercial. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 18. Funció de valor per al temps ponderat.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 19. Mitjanes dels temps ponderats amb totes les dades sense filtrar.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 20. Mitjanes dels temps ponderats amb les dades filtrades.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 21. Mitjanes dels temps destinats a cada operació en funció de les estratègies utilitzades, sense filtrar les dades. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 22. Mitjanes dels temps de cada operació en funció de l'estratègia 3.NoPara, sense filtrar les dades. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 23. Mitjanes dels temps de les operacions en funció de les estratègies, amb les dades filtrades.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 24. Mitjanes dels temps de les operacions en funció de les estratègies. ....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 25. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i perfils de càrrega. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 26. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i temps de pertorbació.....</b>	<b>56</b>

<b>Figura 27. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i intervals de pas i amb el nombre d'estratègies simulades en cada cas...</b>	<b>57</b>
<b>Figura 28. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i la parada on es produeix la pertorbació.</b>	<b>58</b>
<b>Figura 29. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i l'autobús afectat.</b>	<b>59</b>
<b>Figura 30. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i Lay-Over.</b>	<b>60</b>
<b>Figura 31. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de les estratègies i les dades sense filtrar.</b>	<b>61</b>
<b>Figura 32. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de les estratègies amb les filtrades.</b>	<b>61</b>
<b>Figura 33. Mitjanes dels coeficients de variació en cada cycle calculat en funció de les estratègies.</b>	<b>62</b>
<b>Figura 34. Mitjanes dels coeficients de variació en funció dels diferents perfils i les estratègies.</b>	<b>63</b>
<b>Figura 35. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de l'estratègia aplicada i del temps de pertorbació.</b>	<b>64</b>
<b>Figura 36. Mitjanes dels coeficients de variació en funció dels diferents perfils i les estratègies.</b>	<b>65</b>
<b>Figura 37. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de la parada on es produeix la pertorbació perfils i les estratègies.</b>	<b>66</b>
<b>Figura 38. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de l'autobús que sofreix la pertorbació i les estratègies.</b>	<b>67</b>
<b>Figura 39. Mitjanes dels coeficients de variació en funció del Lay-Over aplicat i les estratègies.</b>	<b>68</b>
<b>Figura 40. Mitjanes de la velocitat comercial de l'autobús 1 al final de cada semicycle.</b>	<b>69</b>
<b>Figura 41. Mitjanes de la velocitat comercial de l'autobús 1 al final de cada cycle complet.</b>	<b>70</b>
<b>Figura 42. Mitjanes de la velocitat comercial de l'autobús 1 al final de cada cycle complet.</b>	<b>71</b>
<b>Figura 43. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de cada perfil.</b>	<b>72</b>
<b>Figura 44. Mitjanes de la velocitat comercial en funció del temps de pertorbació.</b>	<b>73</b>
<b>Figura 45. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de l'interval.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 46. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de la parada on es produeix la pertorbació.</b>	<b>75</b>
<b>Figura 47. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de l'autobús afectat.</b>	<b>76</b>

<b>Figura 48. Mitjanes de la velocitat comercial en funció del Lay-Over. Indicador de prestacions.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 49. Mitjanes dels valors que prenen els índex.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 50. Mitjanes dels indicadors segons les estratègies.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 51. Mitjanes dels indicadors segons els perfils.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 52. Mitjanes dels indicadors segons el temps de pertorbació. ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 53. Mitjanes dels indicadors segons els intervals de pas. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 54. Mitjanes dels indicadors segons la parada on es produeix la pertorbació.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 55. Mitjanes dels indicadors segons l'autobús afectat. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 56. Mitjanes dels indicadors segons el temps de Lay-Over. ....</b>	<b>82</b>





# 1 INTRODUCCIÓ

Avui per avui la realitat de les ciutats i de les persones que hi desenvolupen part de la seva vida comporta una necessitat de mobilitat molt alta i molt diversa. Cada cop més, la població mundial tendeix a viure en grans urbs, abandonant la vida rural i dispersa. Aquest és un model de convivència compacta que pot permetre un estalvi energètic global si està ben gestionat. Per fer-ho, cal donar resposta a les diferents necessitats que té cada ciutadà i per altra banda, el ciutadà ha de buscar solucions particulars entre l'oferta disponible.

Entre les diferents possibilitats de transport urbà que hi ha actualment ens trobem que l'únic que pot resoldre simultàniament, per a molts ciutadans, el problema dels múltiples desplaçaments és el transport públic. Tot i això, per convertir-se en una bona alternativa, el primer que ha d'aconseguir és arribar a tot el territori obtenint prestacions adequades per als ciutadans. Anant més enllà, podem afirmar que l'objectiu principal del transport públic no ha de ser només aconseguir ser una alternativa sinó el d'aconseguir ser la millor opció, la primera que es plantegin els ciutadans, i la que finalment triïn, tot i les mancances que té actualment.

El transport públic, en totes les seves vessants o variants, ha de permetre al ciutadà guanyar en qualitat de vida i fer possibles els desplaçaments amb llibertat i amb tot un seguit de paràmetres als quals els usuaris donen importància, com poden ser: la fiabilitat, la seguretat, la rapidesa, i el confort.

Els màxims responsables de la congestió dels carrers són els usuaris del transport privat que infrautilitzen els recursos disponibles i maximitzen per tant l'ocupació de l'espai públic amb benefici particular. La necessitat de compartir l'espai públic, la rigidesa de l'urbanisme i la congestió obliguen a gestionar les línies públiques de transport en superfície amb gran habilitat, per a poder oferir un servei públic de qualitat.

El transport privat s'ha de convertir en l'opció alternativa i s'ha de contemplar només per a les persones que no tenen oferta de transport comparable en prestacions i servei amb el transport públic. La congestió dels carrers causa molèsties als usuaris de la via, però també a tots els que no ho són degut als efectes que genera, com la pol·lució, el soroll, la incertesa en els temps de desplaçament o la dificultat per atendre emergències.

El servei de transport públic ha de facilitar l'accés a totes les persones i a tot el territori urbà. Per a obtenir una millora del servei públic pot ser que s'hagi de sacrificar part dels recursos que utilitzen els usuaris del transport privat, com pot ser disponibilitat d'ocupació del sòl o temps d'ús del mateix.

El creixement de la població, l'augment del cost dels carburants i la major conscienciació social referent a temes ambientals fan pensar que anem cap a situacions futures de majors demandes de mobilitat en transport públic. Per aquest motiu és imprescindible abordar la gestió dels transports per aconseguir la optimització dels recursos. És necessari que s'estudiïn sistemes per a millorar les prestacions ja existents, sense haver d'augmentar considerablement els recursos necessaris.

Dins de les diferents ofertes de transport urbà actuals, l'autobús té una sèrie d'avantatges respecte als altres, com poden ser la flexibilitat de les línies, l'accessibilitat, l'adaptació al territori, la facilitat de creixement de les línies, etc.... Vist que l'autobús és un bon sistema per a transportar gent dins d'un entorn urbà, s'ha de veure quines dificultats té per a poder desenvolupar la seva tasca amb normalitat. Per una banda, els avantatges que suposa l'autobús, passen sovint a segon pla a causa dels problemes que té en quant a qualitat de servei, principalment, per la dificultat d'oferir una regularitat acceptable en una explotació per interval. Aquesta és deguda a que hi ha una interacció amb la circulació general i la regulació semafòrica. En principi aquests són condicionants en què, com a gestors de línies d'autobús no podríem actuar. Però que degut a les millores tecnologies disponibles actualment, es pot conèixer en temps real la posició de tots els autobusos i també el seu grau d'ocupació. Hi pot haver comunicació entre el centre de control d'autobusos i cada un dels autobusos, així com també és possible actuar sobre la regulació semafòrica a través del centre de control de trànsit en moments puntuals. Tot i la possibilitat existent de portar a terme aquestes actuacions, caldria primer avaluar si és realment efectiu realitzar aquests esforços i avaluar també en quin sentit s'ha d'actuar.

En el funcionament de les línies d'autobús hi ha un fenomen conegut com a bunching (també conegut com aparellament). De fet, és un mal funcionament del sistema, inherent al mateix. Aquest fenomen està provocat per l'alentiment d'un autobús pel motiu que sigui. Com que el flux de passatgers és continu en el temps, i el temps de parada és proporcional al nombre de passatgers que han d'encotjar-se, l'autobús destina més temps del que hauria destinat a fer la mateixa operació si hagués arribat amb anterioritat. I així va disminuint la seva velocitat comercial progressivament ja que cada vegada ha de recollir més passatgers dels que li pertocarien.

Simultàniament, l'autobús que el segueix es troba en la situació inversa: cada vegada que arriba a una parada hi ha un nombre inferior de passatgers a recollir, fet que provoca que el temps que destina a les operacions en parada sigui més petit que el que li pertocaria. Així, va augmentant la seva velocitat comercial fins que arriba un punt en que atrapa l'autobús que el precedeix. És una situació relativament habitual i no es regularitza fins que no s'arriba a un origen o final de línia, on es poden tornar a regularitzar els intervals de pas dels autobusos. De totes maneres, sempre amb la limitació que els conductors d'autobús han de descansar uns minuts mínims per conveni. En altres paraules, aquest fenomen es produeix degut a la relació que hi ha entre el temps de parada i el nombre de passatgers que s'encotxen.

Per a intentar reduir el fenomen del bunching s'han d'estudiar diferents estratègies de gestió de la línia, que van lligades amb les diferents tecnologies disponibles actualment, i avaluar-les des de tots els punts de vista.



**Figura 1. Cues d'autobusos en carril bus.**

Aquestes estratègies estan lligades a modificar les velocitats dels autobusos provocant així que els intervals de pas entre autobusos siguin el més regulars possibles. Com que els intervals de pas aniran lligats al nombre de passatgers que han d'encotjar-se s'estarà intervenint en el punt clau per a minimitzar els efectes de l'aparellament. També un altre punt a tenir molt en compte serà l'extensió dels temps de verd dels semàfors, per així poder reduir la demora un cop ja s'hagi produït i fent d'aquesta manera que no es vagin incrementant els passatgers a recollir, ja que van lligats de manera proporcional a la demora.

Així doncs, aquestes mesures, que seran explicades en profunditat més endavant, consistiran a reduir la velocitat d'algun o alguns autobusos, o bé a aconseguir augmentar la velocitat d'altres, també fent actuacions en el sistema de regulació semafòrica. Per a prendre la decisió d'aplicar una o altra estratègia d'actuació s'haurà de valorar en quins casos és més efectiu fer un tipus d'actuació o altra. Per aquest motiu es faran una sèrie de simulacions amb combinacions de paràmetres per a poder discriminar els casos que tenen comportaments similars.

La caracterització d'una línia d'autobús és molt diversa i hi intervenen un nombre de factors molt gran. Per tal de reduir el nombre de variables a combinar s'escullen aquelles que podien ser més significatives per al nostre estudi.

En el capítol es farà tres una revisió de l'estat de l'art i del funcionament de les línies d'autobusos, i en el capítol quart s'explicarà el model de seguiment en línia s'usarà. Per altra banda, les modificacions que s'introduiran en el model es comentaran en el capítol cinc per a aplicar les estratègies d'explotació que es consideraran. La metodologia d'anàlisi es detallarà al capítol sisè i les variables considerades es revisaran al capítol set. Els resultats obtinguts es resumiran al capítol vuit i les conclusions s'efectuaran al novè capítol. El conjunt de les referències emprades es trobarà al capítol deu, i finalment el capítol onze constarà dels annexos corresponents.

## 2 OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquesta tesina és avaluar diferents estratègies de gestió d'una línia d'autobusos, mitjançant un model de simulació de seguiment de vehicles en línia. La finalitat és reduir els efectes de les incidències que pateixen i afecten la regularitat del servei.

Tradicionalment les línies d'autobús s'han gestionat de manera intuïtiva, segons criteris empírics i l'experiència dels gestors de les mateixes. Tota aquesta informació és valuosa, però per poder avaluar diferents mètodes de funcionament, sense haver de posar-los en pràctica (fent simulacions), s'ha cregut convenient elaborar un document de caràcter tècnic que en faci un recull i avaluï cada una de les solucions. Aquest és un punt de partida que es pot aprofitar per aprofundir més en el seu estudi i també augmentar les possibles estratègies.

Un altre objectiu és avaluar el funcionament d'una línia d'autobusos en termes de la regularitat del temps de pas entre autobusos, els temps de trajecte, espera i en parada que hi destinarem i la velocitat comercial aconseguida. Amb el conjunt de simulacions pretenem trobar conjunts de situacions que tinguin un comportament similar i avaluar el guany que es produeix en cada una d'elles.

Amb tot això, i parlant en termes generals, es pretén fer una revisió dels models existents i veure quin és el més adient per estudiar la regularitat.

Les estratègies que s'estudien requereixen d'informació en temps real de l'estat de les línies. Un altre objectiu és comprovar que hi ha tecnologies que permeten fer aquest seguiment i l'aplicació de les estratègies.

L'últim objectiu és facilitar el terreny per futures línies d'investigació i en l'aprofundiment d'alguns aspectes que no s'han pogut tractar de manera més extensa degut a les limitacions pròpies d'un treball d'aquesta índole.



## 3 ESTAT DE L'ART

### 3.1 *Funcionament d'una línia d'autobusos*

Per a poder entendre com funciona una línia d'autobusos es començarà explicant el seu funcionament general des de diversos punts de vista. Aquesta és la millor manera de tenir una visió general del problema a resoldre. També és la manera de poder entendre quines són les variables que hi actuen i de quina forma estan lligades les unes amb les altres. Així es podrà comprendre el model teòric usat en la programació i quines simplificacions es fan. També per quin motiu es poden fer aquestes simplificacions i no d'altres.

La planificació d'una línia d'autobusos s'articula en tres fases diferenciades: la planificació estratègica (disseny del recorregut), planificació tàctica (disseny de freqüències) i finalment la planificació operacional (construcció d'horaris i assignació de recursos).

Aquesta tesina tractarà la fase operacional, en concret el compliment de l'horari segons la seva regularitat.

#### 3.1.1 Disseny del recorregut

El complex procés de disseny i planificació d'una línia d'autobusos comença per una planificació del recorregut i el nombre de parades de la mateixa. Aquests aspectes es poden dimensionar des de diferents punts de vista, per exemple, un estudi de les necessitats de transport de la població a través del territori intentant afavorir el major nombre de gent. També es pot fer a partir d'una línia existent, allargant-la per un o els dos extrems; aquest fet és habitual en una fase de creixement d'una urbs.

El disseny del recorregut és fonamental per un correcte funcionament de la línia, tot i que com ja s'ha comentat anteriorment les línies d'autobusos tenen relativa flexibilitat, un error en aquesta fase de disseny tindria uns costos econòmics elevats. En el sentit que si es fes un disseny no òptim, i a posteriori de la posada en marxa del sistema es cregués convenient fer un canvi de recorregut, seria possible modificar-lo sense que les conseqüències fossin traumàtiques. En el cas més problemàtic s'haurien de traslladar les marquesines, i posar la informació dels canvis a mans del passatgers afectats. Si el canvi de la línia comportés un canvi de recorregut i es fes per altres corredors ja existents, s'hauria també de posar la informació a disposició dels viatgers, però només afegint a la retolació de les parades el nom de la línia corresponent ja seria suficient.

L'altre variable que determina el disseny del recorregut de la línia és la cobertura i accessibilitat del servei. És a dir, quin és el potencial de gent a qui es pot donar servei en funció del lloc de pas de la línia i si hi ha facilitat per arribar a accedir al servei, tant per temes de l'autobús, marquesina, com per l'accessibilitat dels carrers adjacents.

La planificació i gestió d'una xarxa d'autobusos són processos complexos que posen de relleu la necessitat de trobar un equilibri o balança entre el temps d'espera i el cost de viatge dels passatgers i el cost operacional associat a l'operador. La planificació d'una xarxa d'autobusos ha de trobar un equilibri entre aquests costos oposats en tres fases principals. La primera fase, que és la que estem comentant en aquest apartat, és el procés estratègic. Està basat en la identificació de les millors rutes per a cobrir el territori afectant l'accessibilitat del passatger i els quilometratges de l'operador. Un gran nombre de contribucions científiques han estat desenvolupades amb models definits per Lampkin, W (1967), Newell, G.F. (1979), Ceder, A. (1986). En recents contribucions d'altres autors com Pattnaik, S. B. (1998) i Tom, V.M (2003) han creat models per a minimitzar el cost total pels passatgers i l'operador. mitjançant la implementació d'intel·ligència artificial (Algorismes genètics i d'altres de metaheurístics)

Altres aspectes a tenir en compte en la planificació d'un recorregut seran la proximitat a les cotxeres, la disponibilitat de carril bus propi i les característiques del mateix (amplada, segregació física o pintada...), la disponibilitat de situar l'origen i final en un lloc on s'hi puguin estacionar amb facilitat el nombre d'autobusos necessaris, la disponibilitat d'espai per a situar sanitaris a disposició dels conductors, la facilitat dels autobusos per circular per carrers amb pendents pronunciats o corbes de radi petit, el pas per vies molt estretes o amb un alt índex de cotxes aturats a la calçada, la interacció amb les interseccions siguin semafòriques o no...

Tots aquests aspectes no seran objecte d'estudi en aquesta tesina, però tenen una influència directa amb el servei que podrà oferir la línia i per tant en totes les variables que intervindran en el nostre model teòric. Principalment afectaran a la velocitat de circulació i també en la quantitat de passatgers que potencialment podem beneficiar.

### 3.1.2 Freqüència

Hi ha una segona fase de planificació en el que s'haurà de decidir el mode de funcionament, és a dir la freqüència de circulació. La freqüència és el nombre de vegades que passa un autobús per unitat de temps. Es calcula per a sincronitzar-la amb la demanda esperada d'una línia. El dimensionament d'una flota d'autobusos vindrà marcat per la demanda que tinguem o la oferta que vulguem oferir, en funció dels recursos que disposem al moment d'iniciar la mateixa i els recursos que podrem anar obtenint al llarg de la vida de la línia.

En aquest sentit, un augment de la freqüència de pas o de la cobertura redueix el cost d'espera o accés dels passatgers però també implica un augment dels recursos necessaris per a operar la ruta. El més habitual és calcular la freqüència per a servir la ruta a partir del potencial de passatgers i la capacitat de la infraestructura.



### 3.1.3 Operativa

La fase de planificació operacional és la que determinarà el nombre d'autobusos necessaris per a complir amb les freqüències establertes en la fase tàctica.

Fins a l'actualitat hi ha hagut una extensa recerca en aquests camps desenvolupats per Daganzo, C. F. (1997), on algunes es proposen algunes fórmules compactes per tal d'estimar la flota necessària i el temps mitjà d'espera dels passatgers.

Per a realitzar els càlculs de la demanda hi ha hagut aportacions com Ortuzar (2001) i per a la determinació dels autobusos necessaris en un escenari estàtic el manual de referència més complet és el realitzat per Kittelson & Associates (2003).

Per a l'operativa d'una xarxa també hi haurà una molts factors que hi influiran. El que s'haurà de decidir és quin tipus de recursos hi dediquem i de quina manera es farà.

Per a prendre aquestes decisions es calcularà el temps de cicle d'una línia ( $T_c$ ), que serà la suma del temps de recorregut ( $t_r$ ), més el temps de parada ( $t_p$ ), més el temps de descans ( $t_d$ ).

$$T_c = t_r + t_p + t_d \quad (1)$$

El temps de recorregut depèn de la longitud i la velocitat del recorregut i tindrà a veure amb la reserva de carril bus, els sistema de semàfors.

El temps de parada depèn del sistema i tecnologia de validació de bitllets, del nombre de portes, de la demanda.

El temps de descans depèn del que s'hagi acordat amb el conductors.

Si es defineix la freqüència de la línia com l'invers de l'interval de pas ( $h$ ):

$$f = \frac{1}{h} \quad (2)$$

Un cop s'hagin determinat el temps de cicle ( $T_c$ ) en una línia d'autobusos i la seva freqüència ( $f$ ), s'avaluarà el nombre de vehicles necessaris o flota, definit per la variable  $F$ .

$$F = f * T_c \quad (3)$$

O el que és el mateix:

$$F = \left[ \frac{\sum_s \left[ \frac{L}{v} + t_i + t_p \right] + 2T_{L-O}}{h} \right]^+ \quad s = 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

El nombre d'autobusos on  $t_i$  és la mitjana del temps perdut a les interseccions controlades per semàfors,  $t_p$  és el temps dedicat a les parades,  $T_{L-O}$  és temps de Lay-Over a la parada inici ( $s=1$ ) o final ( $s=N/2$ ) de la ruta i  $[\cdot]^+$  representa l'enter superior del quocient.

Un cop s'hagin determinat el nombre d'autobusos caldrà comprovar que realment amb el tipus de vehicle i la freqüència escollida serem capaços de transportar tota la demanda.

## 3.2 Factors que condicionen l'operativa de la línia

### 3.2.1 Tipus de vehicles

El tipus d'autobús afectarà el funcionament de la línia en molts aspectes. Aquí el que ens interessa sobretot és entendre una mica com afectarà a la gestió de la línia, és a dir el temps que destinarem a cada una de les fases de les operacions. Per a obtenir una classificació dels diferents tipus d'autobusos es pot consultar Vuchic, V. R (1981).

Començarem comentant que la capacitat del vehicle és rellevant degut a que un autobús amb més capacitat permetrà portar més passatgers, però també haurà de ser un vehicle més llarg i per tant tindrà més dificultat per a passar per certs corredors. Per altra banda també necessitarem menys autobusos per a poder donar la mateixa capacitat de transport, però a canvi de disminuir la freqüència de pas dels mateixos. És a dir que donaríem millor servei amb més autobusos de menor perquè tindríem intervals de pas inferiors a igualtat de capacitat de la línia. No farem cap anàlisi de costos dels mateixos però a priori sembla més costós tenir un nombre més gran d'autobusos i de menor capacitat.

També la configuració dels seients afectarà la capacitat del mateix, si hi posem una configuració sense seients o amb molts pocs (estil autobusos dels aeroports) augmentarà la capacitat de transport però estarem discriminant part de la població que necessita disposar de seients per a poder viatjar amb condicions de seguretat i confort adequades.

Els altres factors que intervindran en el temps de les operacions són les prestacions dinàmiques dels autobusos. El funcionament habitual en un autobús, després d'haver efectuat les operacions de càrrega i descàrrega en una parada i tancar les portes, és accelerar al màxim a uns  $1,2 \text{ m/s}^2$  fins assolir la velocitat màxima de la via, habitualment 50 km/h en vies urbanes i frenar fins a arribar a la intersecció amb el semàfor en vermell o la següent parada. Per tant la velocitat mitjana en una trajecte entre parades depèn de la capacitat d'accelerar i frenar del vehicle i de la velocitat màxima permesa a la via. Aquí hi ha poc marge d'actuació, perquè si aconseguíssim vehicles amb millor prestacions dinàmiques el confort i seguretat dels viatgers quedaria minvat, i augmentant la velocitat màxima permesa a la via perdríem un dels objectius que perseguim, que és la pacificació de les ciutats per a millorar la qualitat de vida de tots els ciutadans.

El temps unitari per a les operacions de càrrega i descàrrega tenen una gran dispersió i variabilitat degut a que hi intervenen molts factors. Uns dels més rellevants són el nombre de portes, l'amplària de les mateixes, la seva disposició, la velocitat de funcionament, si hi ha diferenciació entre de pujada i baixada, la diferència del terra de l'autobús amb el terra de la parada, el sistema de control del moment de tancar les obertures, rampa d'accés per a persones de mobilitat reduïda... En tots aquests punts s'hi pot actuar en el sentit desitjat, però abans de l'adquisició dels vehicles.



**Figura 2. Autobús dotat de rampa d'accés per persones de mobilitat reduïda**

Un dels factors que també afectarà les nostres operacions és el tipus de sistema de bitllets. Per tal d'agilitar l'operació de càrrega és convenient un sistema de marcatge en parada, estil metro, aquest és un sistema poc estès, ja que si bé es guanya en aquest sentit es perd la flexibilitat i adaptabilitat que tenen les línies d'autobusos, i el seu cost és molt superior que una marquesina tradicional o bé un pal de parada. El més habitual és posar a disposició dels usuaris abonaments de viatges limitats o il·limitats en el temps, tant amb sistemes mecànics, òptics, magnètics o electrònics que simplifiquin el marcatge. D'aquesta manera alliberem el conductor de la feina de venda de bitllets.

Si es disposa de sistemes d'ajuda a l'explotació (SAE), s'hi pot integrar un mòdul per a conèixer en temps real l'ocupació de l'autobús. També a partir d'aquesta informació es podria preveure la demanda que s'està produint i fer actuacions al respecte, com podria ser per exemple, que si un autobús arriba a un tant per cent elevat d'ocupació més gran que el que el precedeix i el que el segueix, o un grau d'ocupació elevat (80% per exemple), fer-hi actuacions en el sentit de disminuir el nombre de gent a les properes parades, a l'estil de les estratègies que es comenten en aquesta tesina.

### 3.2.2 Parades

Les parades poden tenir diferents graus i prestacions. Començant pel més senzill que seria un pal on s'hi indica la o les línies d'autobusos que hi fan parada i també informació del recorregut de les mateixes, horaris de funcionament i intervals de pas aproximats. Aquest seria el nivell mínim de prestacions que haurien de tenir les parades. A partir d'aquí s'hi poden afegir prestacions en tots els aspectes. Començant per bancs per a seure la gent durant l'espera, marquesina de protecció i resguard, sistemes d'informació del temps d'arribada dels autobusos, plànols complets de totes les línies i dels diferents mitjans de transport que hi enllacen. Aquests aspectes no millorarien la velocitat de les operacions però sí el confort i la informació per part dels viatgers.

Per a millorar la velocitat d'aquestes operacions com ja s'ha comentat per sobre en l'apartat anterior, es pot disposar de parades tancades amb control de bitllets estil metro. Aquest tipus de parades tenen un cost elevat i també una gran ocupació de sòl, fet que fa que no sempre sigui possible aquesta disposició. Altres maneres és disposar d'andanes elevades a la parada, per tal de reduir al mínim la distància vertical i horitzontal entre el terra de l'autobús i el de la parada.

Si es disposa d'espai suficient també es pot fer la parada segregada de la via, fet que potser no influirà en la línia que es pari en aquella parada, però sí que facilitarà la circulació d'altres autobusos d'altres línies que utilitzin el mateix corredor o també dels vehicles que estan autoritzats a circular pel carril bus.

Si la parada és compartida per diferents línies d'autobusos es pot donar el cas que hi hagi cua d'autobusos que es disposen a efectuar les seves operacions a la mateixa parada. Una de les opcions és convertir-la en una parada doble, on es puguin efectuar al simultàniament les operacions en dos autobusos diferents. D'aquesta manera s'eviten les demores no degudes a la mateixa línia.



**Figura 3. Parada amb marquesina.**

Per al càlcul del temps en parada ( $T_p$ ) s'usa la definició de Kittelson & Associates (2003):

$$T_p = P_a t_a + P_b t_b + t_{oc} \quad (5)$$

On tenim que

$T_p$  = mitjana dels temps en parada (s)

$P_a$  = nombre de viatgers que baixen per la porta més ocupada (p)

$t_a$  = taxa de baixada de viatgers (s/p)

$P_b$  = nombre de viatgers que pugen per la porta més ocupada (p)

$t_b$  = taxa de pujada de viatgers (s/p)

$t_{oc}$  = temps d'obertura i tancament de portes (s)

Els valors de les taxes de pujada i baixada segons el sistema de validació de bitllets:

Situació	Taxa de servei (s/p)	
	Rang observat	Valor recomanat
	<b>Càrrega</b>	
Pre pagament*	2.25-2.75	2.5
Bitllet senzill	3.4-3.6	3.5
Canvi exacte	3.6-4.3	4.0
Bitllet amb banda magnètica	4.2	4.2
Targeta electrònica	3.0-3.7	3.5
	<b>Descàrrega</b>	
Porta davantera	2.6-3.7	3.3
Porta posterior	1.4-2.7	2.1

\*inclou viatges gratuïts, abonaments, transbords gratuïtes i pagament a la sortida.  
 Cal afegir 0.5 s/p als valors de càrrega quan els passatgers van dempeus.  
 Cal extreure 0.5 s/p als valors de descàrrega amb autobusos de terra baix.

**Taula I. Taxa de càrrega i descàrrega segons el sistema de validació.  
 Font: Kittelson& Associates (2003)**

Si es vol saber la taxa en funció del nombre de portes:

Nombre de portes disponibles	Taxa de servei per defecte (s/p)		
	Càrrega*	Descàrrega davantera	Descàrrega posterior
1	2.5	3.3	2.1
2	1.5	1.8	1.2
3	1.1	1.5	0.9
4	0.9	1.1	0.7
6	0.6	0.7	0.5

\*S'assumeix que no es pot pagar dins l'autobús.  
 Cal incrementar els temps en un 20% quan hi ha passatgers dempeus.  
 Per autobusos de terra baix reduir els temps de càrrega en un 20%, les descàrregues davanteres en un 15% i les descàrregues posteriors en un 25%.

**Taula II. Taxa de càrrega i descàrrega segons el nombre de portes disponibles. Font: Kittelson& Associates (2003)**

### 3.2.3 Semàfors

Els semàfors normalment es trobaran en les interseccions amb altres carrers, i el fet que estiguin sincronitzats afectarà en gran mesura el funcionament de la línia. Es pot aconseguir una millora en la velocitat de pas dels autobusos si la seva sincronització és adequada al seu interval de pas, però a costa de la velocitat dels vehicle privats que circulen per la mateixa via.

Una de les opcions que tenim és sincronitzar la via per a vehicles privats i que el temps de verd s'incrementi en cas que l'autobús tingui demora acumulada. Per a aconseguir aquest fenomen haurem de disposar d'algun sistema que determini que l'autobús porta demora, un altre que determini la posició de l'autobús i un altre que canviï el funcionament temporal del cicles semafòrics per a permetre el pas en aquella intersecció.

### 3.2.4 Carril bus

El autobusos urbans poden circular per la calçada barrejats amb la resta de vehicles, però hi ha maneres més eficients per a millorar el seu funcionament. S'ha de tenir en compte que la major part de les demores que es produeixen a les línies d'autobusos, són degudes a la congestió del trànsit. La millor manera d'obtenir una separació del trànsit de vehicles privats i de vehicles de transport públic és crear carrils d'ús exclusiu per a autobusos.

Per a crear aquesta via diferents graus de segregació i que en definitiva tindran diferència en quant als costos que comporta la seva creació. La que és en costos la més barata i que està àmpliament implantada és la de pintar el carril bus a la calçada, permet el pas de vehicles privats perquè no hi ha segregació física i que aquests el creuin per exemple per a entrar a les finques i aparcaments. També provoca que si s'efectuen accions il·legals, com pot ser les aturades per part dels transportistes o vehicles privats, el que en surt perjudicat és l'autobús.

Per a evitar encara més les interferències amb el trànsit corren també es pot construir un carril segregat físicament per una petita mitjana. Aquesta limitació física dificulta que vehicles que no estan permesos a circular-hi ho facin. Evidentment els costos d'aquestes obres són molt més elevats que si només es pinta al terra el carril.

Amb aquestes varietats també es poden fer combinacions, és a dir que si en una part del corredor no es produeixen normalment interrupcions per interferències amb altres tipus de vehicles no caldrà efectuar millores en el carril, però si en un altre tram del mateix corredor és habitual que es produeixin interrupcions degudes a altres usuaris de la via es pot adequar per a evitar-ho.

### 3.2.5 SAE

El Sistemes d'Ajuda a l'Explotació (SAE) són de gran utilitat a l'hora de gestionar una xarxa de línies d'autobusos. Per mitjà de la incorporació de tecnologies de localització, de Sistemes d'Informació Geogràfica (GIS) i comunicacions mòbils es poden proporcionar un ventall de funcions de control gestió i regulació del servei i informació als passatgers.

Els SAE's aplicats a una línia d'autobusos permeten oferir informació en temps real i també una recol·lecta de les dades per a un posterior anàlisis i així millorar la gestió de la mateixa.

El nucli principal d'aquest sistema és el sistema de localització per satèl·lit (GPS) unit a un sistema de transmissió de dades per mitjà d'un sistema de comunicacions, generalment ràdio. Així ens proporciona la possibilitat de disposar d'una eina mitjançant la qual es coneix la posició dels recursos (habitualment vehicles) i les incidències que es produeixen, sobre una cartografia GIS. El SAE es complementa amb sistemes d'informació a l'usuari tal com panels a l'interior o exterior dels vehicles i informació a l'usuari via web

### **3.2.6 CCT**

Les grans ciutats disposen de sistemes de control del trànsit per a gestionar el mateix, el seu funcionament es basa en obtenir informació de l'estat del trànsit per mitjà de càmeres de control repartides per les principals vies, així com també mesuradors de flux de vehicles com poden ser espines magnètiques.

A part de conèixer l'estat trànsit la seva funció és regular-lo mitjançant principalment els semàfors, també es pot gestionar a través de la policia local de trànsit. El conjunt de semàfors està coordinat des d'aquest centre de control i tenen una coordinació integral que permet la optimització de l'ús del temps i espai disponible a la ciutat.

Des d'aquest centre de control es pot actuar sobre cada un dels semàfors del sistema de forma puntual per a donar prioritats en algun dels sentits, com per exemple si es produeix una emergència i es requerida la presència de bombers es pot donar preferència de verd a tots els carrers que composaran la ruta dels vehicles d'emergència, des del parc fins al punt on es produeix l'emergència.

Pel que fa als autobusos s'hauria de fer una coordinació del Centre de Control d'Autobusos amb el Centre de Control de Trànsit per donar preferència semafòrica als autobusos en cas de demora.

### **3.2.7 Coordinació SAE i CCT**

Avui en dia, la major part de les ciutats disposen de CCT i també la major part de les xarxes d'autobusos tenen en funcionament SAE. El problema principal és que no hi ha una comunicació entre els dos sistemes i no es pot fer una sincronització semafòrica en temps real. Degut a que els dos centres estan gestionats cadascun d'ells per organismes diferents i hi ha d'haver voluntat per arribar a acords de col·laboració. Per a que sigui possible un funcionament adequat, els acords de col·laboració i coordinació entre els dos centres han d'establir sota quina preceptes o condicionants es pot actuar i també en quin sentit es fa l'actuació, és a dir, quin és el temps que es podria allargar un cicle semafòric.

En concret la ciutat de Barcelona té prevista la col·laboració i coordinació entre Transports Municipals de Barcelona(TMB) que és l'empresa que gestiona la xarxa d'autobusos més important de la ciutat i l'Ajuntament de Barcelona, amb la construcció d'un CCT comú.



### 3.3 Avaluació d'un sistema de transport

Hi ha moltes maneres d'avaluar un sistema de transport. Exposarem les que es descriuen a Kittelson & Associates (2003), i veurem per què serveix cada una d'elles. A partir d'aquí mostrarem quins són els paràmetres que hem usat i els motius de la seva elecció. Hi ha dos grans grups d'avaluació: els costos operacionals i les prestacions.

Els costos operacionals són els que ha de suportar l'operador i són la suma dels costos de la via, dels autobusos (estàtics, pel moviment i de personal), de les parades, dels sistemes de prioritat semafòrica i dels sistemes d'informació.

El que es tractarà en aquesta tesina són les prestacions obtingudes i només es farà breus referències als costos operacionals.

Mesura del rendiment del trànsit: factor quantitatiu o qualitatiu usat per avaluar un aspecte particular del servei de trànsit.

Qualitat del servei: rendiment conjunt mesurat o percebut del rendiment del servei des del punt de vista del passatger.

Mesura del servei: valor quantitatiu que millor descriu un aspecte particular dels servei de trànsit i representa el punt de vista del passatger. També és conegut com mesura de l'efectivitat.

Nivells de servei: designa rangs de valors per a una mesura del servei particular, des de "A" (el més alt) fins a "B" (el més baix), basat en la percepció del passatger d'un aspecte particular del servei de trànsit.

La percepció del temps: Els passatgers perceben els temps de diferent manera segons en quina fracció de viatge es trobin- segons estiguin caminant, esperant a una parada, circulant amb el vehicle, i el temps de transferència entre mitjans de transport diferents. Kittelson & Associates (2003) documenta els resultat d'un nombre d'estudis sobre la importància relativa del temps. Un valor de 2, per exemple, indica que un minut d'una part del viatge en concret (per exemple el temps d'espera) és percebut pels passatgers com el doble de molest que un minut dins el vehicle.

	Temps en vehicle	Temps caminant	Temps d'espera inicial	Temps de transferència
<b>Mitjana</b>	1.0	2.2	2.1	2.5
<b>Interval</b>	1.0	0.8-4.4	0.8-5.1	1.1-4.4

**Taula III. Valor del temps**

Per a mesurar la fiabilitat que té el sistema s'usarà el coeficient de variació de l'interval de temps entre autobusos a les parades. Es calcula de la següent manera:

$$Cvh = \frac{\text{desviació estàndard de les desviacions d'interval}}{\text{mitjana del temps programat}} \quad (6)$$

Les desviacions d'interval es mesuren com interval l'actual menys l'interval programat. Tal i com es mostra a la següent taula, el coeficient de variació d'interval es pot relacionar amb la probabilitat  $P$  que donat un interval entre vehicles  $H_i$  estaran fora de l'interval donat en més de la meitat del temps programat.

LOS	cvh	P (hi > 0.5 h)	Comentaris
A	0.00-0.21	≤1%	Servei ofert com un rellotge
B	0.22-0.30	≤10%	Vehicles una mica demorats
C	0.31-0.39	≤20%	Vehicles sovint demorats
D	0.40-0.52	≤33%	Intervals de pas irregulars, amb alguns aparellaments
E	0.53-0.74	≤50%	Aparellaments freqüents
F	≥0.75	>50%	La major part dels vehicles aparellats

**NOTA: S'aplica a rutes amb intervals de pas de 10 minuts o menys.**

**Taula IV. Nivell de servei en funció del  $Cvh$ .**

Un NDS (Nivell de servei) "A" significa un funcionament molt puntual, amb uns intervals molt regulars. Al nivell "B" la majoria de vehicles es troben fora del programat per pocs minuts, però la probabilitat d'estar fora de l'interval de funcionament programat per més de la meitat del temps d'interval previst és encara baixa. El nivell "C" els vehicles sofreixen incompliments freqüents, amb uns quants intervals més grans o més petits que el que es pretén oferir. Els intervals entre vehicles al nivell "D" són bastant irregulars, amb més d'un de cada tres vehicles fora d'horari. L'aparellament d'autobusos és freqüent al nivell de servei "E", i el nivell de servei "F" comporta que la major part dels vehicles es troben aparellats.

La qualitat del servei reflecteix la percepció de les prestacions de la línia des del punt de vista dels passatgers .

Per a poder avaluar el funcionament d'una línia d'autobús és important saber des de quin punt de vista l'estem observant. No és el mateix el punt de vista de l'usuari, que el del conductor, que el del gestor de la línia. En aquest sentit s'ha de trobar una manera que valori per sobre de tot el punt de vista de l'usuari.

Per a fer l'avaluació dels resultats prendrem una combinació d'aquestes mesures i d'altres que estan explicades a l'apartat sobre mètriques d'avaluació.

### **3.4 Models de funcionament de línies d'autobusos**

Tot i el gran nombre de línies d'autobusos que hi ha circulant pel món i el gran nombre de passatgers, hores i quilòmetres recorreguts hi ha un nombre molt petit d'estudis i models de comportament dels mateixos. Farem un petit recull dels estudis publicats fins al moment.

Per a investigar el comportament de les línies d'autobusos hi ha hagut propostes de diferents autors. Per una part es pot dir que és un sistema d'uns quants cossos on interaccionen autobusos i passatgers, i està directament relacionat amb el flux dinàmic en una direcció. Hi ha models que no tenen en compte els passatgers i per tant tergiversen els resultat quan els passatgers són un element clau en el procés.

L'organització i control d'una línia d'autobusos és un procés dinàmic on interaccionen autobusos i els passatgers que s'esperen. Quan un autobús es demora en un tram de la seva ruta, aquest efecte local de la fluctuació s'escampa cap al total de la flota, causant alternativament aparellament i majors intervals entre autobusos i el temps d'espera dels passatgers. Algunes recents tecnologies fan possible el seguiment de la posició dels vehicles i s'han convertit a una eina potencial per a controlar la flota en un sistema de transport públic. A més a més, la informació derivada de les noves tecnologies pot alimentar algorismes computacionals per tal d'avaluar els efectes de les demores en els autobusos i minimitzar les alteracions en els intervals del conjunt del sistema.

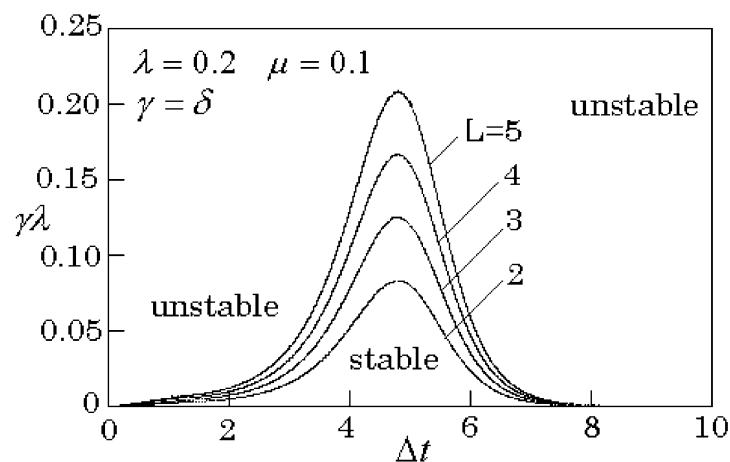
La confiança amb els modes de transport públic és un dels valors més importants per tal d'assegurar la seva competitivitat contra l'estès ús del vehicle privat a les grans ciutats La tercera fase està enfocada a l'horari de l'autobús i a l'acompliment dels intervals de pas i de les freqüències determinades a la fase tàctica. Hagani, A. (2003) fa una revisió d'algunes de les tècniques de programació per a comparar els defecte i virtuts.

Tot i així, les tres fases de planificació estan basades en el funcionament estàtic i no abasta aquests problemes operacionals que apareixen quan un o més autobusos arriben a les parades en temps diferents dels teòric. Aquest problemes constitueixen un vertader repte per als operadors ja que afecten directament el rendiment del total dels autobusos de la línia, el temps d'espera dels passatgers a les parades i la fiabilitat del sistema.

S'ha fet recerca per descriure la dinàmica i el rendiment cíclic de les operacions del sistema d'autobusos però petites contribucions poden fer superar el problema.

.Turnquist, M. A. (1981) i també Rossetti, M. D. (1998) proposen estratègies per a millorar la fiabilitat dels sistemes d'autobusos tant com el rendiment del sistema mesura. Ambdues estan basades en el temps límit que reté l'autobús al punt de control durant un cert temps abans de continuar amb la ruta. Dessouky, M. (2003) proposa un conjunt d'estratègies en temps real per a coordinar el moviment d'autobusos seguint les seves rutes en funció de les tecnologies de comunicació, seguiment i comptabilitat de passatgers. L'anàlisi està aplicat a una gran terminal per a sincronitzar les arribades amb les sortides de serveis complementaris de transport públic usant les dades del seguiment. Es mostren alguns mètodes de predicció del temps d'arribada d'autobusos, i són més precisos per a línies amb llarg recorregut.

Nagatani, T (2001) estudia el comportament de  $M$  recurrents autobusos en una línia circular d'autobusos amb moltes parades amb una alteració del seu temps en un autobús concret. Un funcionament convencional d'una línia fase es bifurca en tres noves fases: aparellament, regular y fase oscil·latòria. Alguns valors característics de les variables clau del sistema es donen per identificar el límit entre fase oscil·latòria i fase regular.



**Figura 4. Diagrama teòric de fase en l'espai  $(\Delta t, \gamma\lambda)$  per  $L=2-5$  on  $\lambda=0,2$ ,  $\mu=0,1$  i  $\gamma=\delta$ . Les corbes representen les línies d'estabilitat neutral. Per sota d'aquestes, el flux d'autobusos homogeni és estable i per sobre d'aquestes es torna inestable. Font: Nagatani (2001)**

Finalment, Adamski, A. (1998) desenvolupa una eina de simulació de suport per al control dinàmic de les sortides dels autobusos. Assumeix una probabilitat en la distribució de la taxa d'arribada de passatgers a les parades i aporta tot el conjunt de les equacions cinemàtiques de les trajectòries dels autobusos.

Aquest article analitza algunes estratègies per a reduir el temps total de viatge dels passatgers (dins el vehicle i el temps d'espera) així com la variació en els intervals mitjançant el control dinàmic dels autobusos. Quan els autobusos arriben a les parades més tard que l'horari previst, l'operativa de semàfors allarga la fase verda per permetre l'autobús passar la intersecció sense parar. A la vegada, la velocitat de l'autobús precedent i següent segons l'autobús retardat és reduïda per tal de mantenir l'interval fixat.

Per aquest motiu, totes les parades estan concebudes com a punts de control on les trajectòries dels autobusos són seguides amb tecnologies d'informació i comunicació. Un dels objectius d'aquest article és considerar els les parades origen i final com a punts de control. Depenent del temps lliure a aquestes parades (excloent el mínim temps de descans per conveni) el sistema ordinari d'operacions pot superar les alteracions o s'han de fer correccions a les estratègies. S'han portat a terme un conjunt de mesures de millora per a comparar les estratègies proposades amb l'escenari actual. D'acord amb els seus anàlisis, el grup d'escenaris augmentant la solució actual serà identificat.

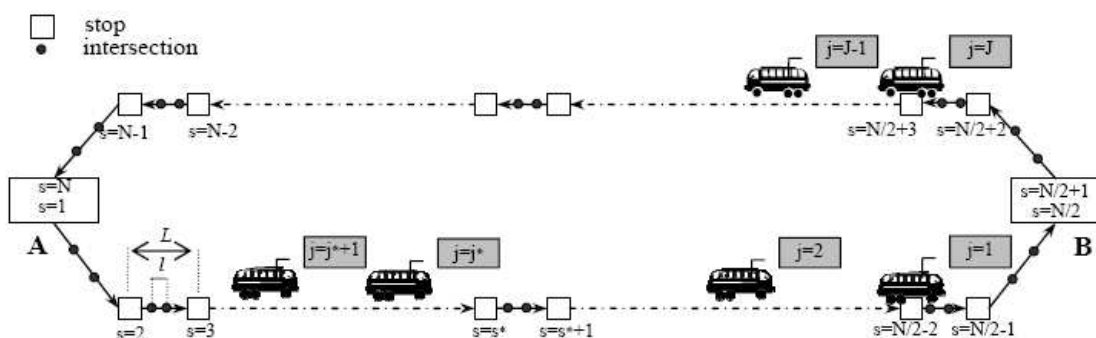


## 4 MODEL DE SEGUIMENT EN LÍNIA

El model que usarem està basat en l'article Estrada et al. (2007). Així mateix, la base inicial i els paràmetres de desenvolupament, caracterització i anàlisi provenen de Kittelson & Associates (2003).

A part del model bàsic de funcionament, s'hi introduiran unes modificacions que reflectiran les estratègies d'exploració que s'usaran. Les estratègies consistiran en una variació de les velocitats dels autobusos que envolten el que està demorat per intentar reduir la irregularitat global de la línia, o també en estendre el temps del cicle semafòric en verd per a permetre el pas d'un autobús que està demorat.

El model numèric a utilitzar per a reproduir el funcionament de les línies d'autobusos està desenvolupat per a reproduir estratègies abordant la variació dels intervals i els efectes oscil·latoris. Les parades d'autobús les etiquetem de  $s=1,2, \dots, N$  on  $N$  és un nombre parell i considerem que el parell de parades  $(1,N)$  i  $(N/2, N/2+1)$  són les mateixes i són els punts d'inici i final de cada línia. La distància entre una parada i la següent és igual a  $L$ , excepte quan  $s=N/2$  i  $s=N$ , on la distància és igual a 0 (és el final de cada línia). Cada autobús està etiquetat per un número  $j=1,2,\dots,J$  i viatgen de 1 cap a  $N$  parant a totes les parades. Es considera que l'autobús  $j = j^* + 1$  és l'autobús que segueix l'autobús  $j = j^*$ . La ruta segueix un carrer principal amb un conjunt d'interseccions regulades per semàfors controlades per un Centre de Control de Trànsit (CCT). Totes les interseccions semaforitzades tenen el mateix temps de cicle ( $T_c$  segons) i el mateix temps de fase en verd ( $\Delta t_v$  segons). La distància entre interseccions és igual en totes elles i igual a  $l$ . Es pren la distància entre la primera intersecció i la primera parada com a  $x_0$  metres, i es considera que és el punt on comença el corredor de la línia. També es considera que la sincronització dels semàfors al llarg del recorregut aconseguirà una onada verda adaptada per a la circulació de vehicles privats.



**Figura 5. Esquema del sistema. Font: Estrada et Al. (2007)**

## 4.1 Formulació bàsica del problema

Un cop ja s'han determinat el nombre de passatgers que pugen i baixen a cada parada i s'ha calculat el nombre d'autobusos necessaris el model se centra en l'anàlisi de la variació del temps de pas a cada parada. Aquesta variació es produeix perquè s'introdueix una alteració en el servei en forma de pertorbació o temps de demora d' $U$  unitats de temps a un autobús en concret. El model analitza les prestacions del sistema i el comportament dels passatgers degut a la pertorbació que s'ha induït. El temps d'arribada  $t_j(s)$  de l'autobús  $j$  a la parada  $s$  ve donat per la següent equació.

$$t_j(s) = t_j(s-1) + \max(\gamma B_j(s-1); \delta A_j(s-1)) + \frac{L}{v_j(s-1)} + \sum_p t_{red,p} \delta(s, s-1, p) \quad (7)$$

Si es considera un vehicle amb portes d'accés diferenciades per a la càrrega i la descàrrega, el segon terme de l'equació representa el temps que es dedica a una parada de l'autobús  $j$  a la parada  $s-1$ . El model negligeix el temps d'aclarida a la parada.

Per a determinar el nombre de passatgers s'usaran les següents equacions:

$$B_j(s-1) = (t_j(s-1) - t_{j-1}(s-1)) \frac{q_{AB} b_{s-1}^*}{60} + D_{j-1}(s-1) \quad (8)$$

$$A_j(s-1) = \sum_i \frac{B_j(i) t_{i,s-1}^*}{b_i^*} \quad i = 1, \dots, s-1 \quad (9)$$

On  $B_j(s-1)$  representa el nombre de passatgers que pugen a una determinada parada i  $A_j(s-1)$  el nombre de passatgers que hi baixen. Com es pot veure en l'equació el nombre de passatgers que pugen és variable en funció del temps de pas entre dos autobusos consecutius.

Per a veure el nombre de passatgers que es troben en una parada determinada a l'autobús s'usarà la següent equació.

$$M_j(s) = M_j(s-1) + B_j(s-1) - A_j(s-1) \leq C \quad s = 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

On  $C$  és la capacitat en nombre de passatgers dels autobusos. Si aquesta desigualtat no es compleix vol dir que s'ha superat la capacitat del mateix i cert nombre de passatgers es quedaran a la parada esperant el següent autobús que es calcularà amb:

$$D_j(s-1) = M_j(s-1) + B_j(s-1) - A_j(s-1) - C \quad (11)$$



El tercer terme de l'equació (7) valora el temps necessari per al recorregut entre la parada  $s-1$  i la parada  $s$  amb velocitat  $v_j(\cdot)$ . Més endavant, quan s'exposin les diferents estratègies es veurà que la velocitat de l'autobús  $j$  es modificarà en funció de l'interval entre dos autobusos consecutius. Finalment el quart terme de l'equació (7) avalua el temps destinat a les  $p$  interseccions semafòriques que es troben al corredor entre les parades  $s-1$  i  $s$ . Per tant les variables que s'han vist es poden avaluar en termes de l'equació (12) i l'(13).

$$\bar{\delta}(s, s-1, p) = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists n^* \in \mathbb{N} \\ t_{green,p} + T_c n^* \geq \frac{x_p - x_{p-1}}{v_j(s-1)} + t_j(s-1) + \max(\gamma B_j(s-1); \delta)_{j(s-1)} + t_{red,p-1} \\ \geq t_{green,p} + \Delta t_g + T_c(n^* - 1) \\ 0 & \text{en altres casos} \end{cases} \quad (12)$$

$$t_{red,p} = \begin{cases} t_{green,p} + T_c n^* - \left( \frac{x_p - x_{p-1}}{v_j(s-1)} + t_j(s-1) + \max(\gamma B_j(s-1); \delta)_{j(s-1)} + t_{red,p-1} \right) & \text{si } \bar{\delta}(s, s-1, p) = 1 \\ 0 & \text{en altres casos} \end{cases} \quad (13)$$

Si  $p=1$  es considerarà  $t_{red,p-1}=0$  i  $x_{p-1}=x_{s-1}$ . Es representa la posició de la intersecció  $p-1$  com  $x_{p-1}$  i la posició de la parada  $s-1$  com  $x_{s-1}$ .

Per avaluar l'interval de pas real entre dos autobusos consecutius al moment de sortida des de la parada ( $s-1$ ) s'usarà l'equació (14). S'usarà per a controlar i modificar la velocitat de la flota per a mantenir un interval de pas el més homogeni possible i minimitzar el temps total de recorregut i d'espera dels passatgers.

$$\Delta t_j(s-1)_{sortida} = t_j(s-1) - t_{j-1}(s-1) + \max(\gamma B_j(s-1); \delta A_j(s-1)) - \max(\gamma B_{j-1}(s-1); \delta A_{j-1}(s-1)) \quad (14)$$

## 4.2 Variables del sistema

Com tot sistema hi ha unes variables que regeixen el funcionament del mateix. Anem a explicar cada una d'elles i veure com afecten al funcionament del mateix. Les veurem expressades en termes de les equacions explicades del model que s'ha usat per a realitzar els càlculs.

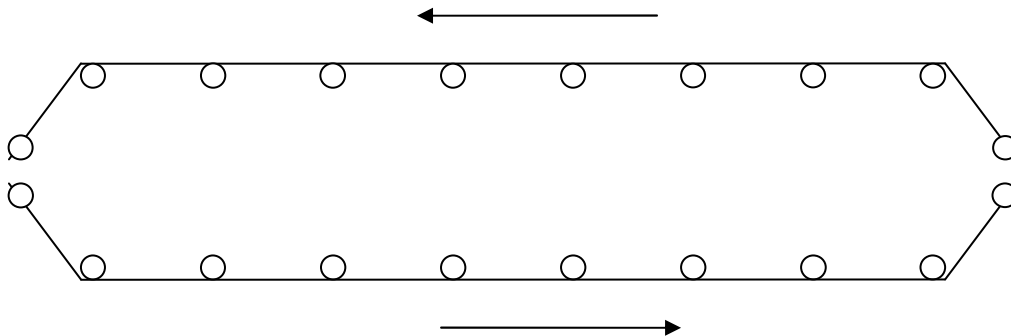
Es veurà també quin són els valors que s'agafaran per a realitzar tots els càlculs i si són de les variables que s'han pres uns quants valors per a realitzar les combinacions.

### 4.2.1 Interval

És el temps de sortida entre dos autobusos consecutius autobusos des de capçalera i s'expressarà en minuts. És un dels paràmetres claus en el funcionament d'una línia, ja que és l'invers de la freqüència de la línia. En termes de les equacions és  $h$ . Serà una de les variables en què actuarem i la provarem amb següents valors: 5, 6, 7, 8, 9, 10, i 11 minuts.

### 4.2.2 Nombre de parades

Defineix el nombre de parades d'anada de la línia. El nombre de parades del tram de tornada és el mateix nombre que les d'anada. Es numeraran començant per la primera (parada origen) i el número 1. En totes les equacions es pren com a  $N$ . La parada  $N$  i la  $N + 1$  és la mateixa (parada destí), però determinada com la última del sentit anada o la primera del sentit tornada. La parada 1 i la  $2*N$  també és la mateixa. Per a fer l'estudi es pren un nombre de parades de 20, és a dir 20 d'anada i 20 més de tornada per a fer un total de 40 parades a estudiar.



### 4.2.3 Nombre de parades màxim

És el nombre de parades màxim que s'usarà per a fer els càlculs i per tant no té relació amb el les equacions del model teòric sinó només amb el nombre d'iteracions que farà el programa de Visual Basic. Els càlculs s'aturaran quan el primer autobús arribi a la parada de càlcul màxim que haguem definit. Per aquest estudi s'usarà un nombre de 400 parades, és a dir 10 cicles complets per al primer autobús. L'anàlisi dels resultats es farà des de la parada 40 fins a la 320. S'han descartat les primeres 40 parades per permetre el que diríem el temps d'escalfament del problema i que tots els autobusos de la flota ja estiguin en circulació. També es descarten els dos últims cicles perquè així no hi ha problemes d'anàlisi amb els autobusos que van acabant el seu cicle i es queden a cotxera.

### 4.2.4 Longitud entre parades

És la distància de recorregut entre parades consecutives, usarem la mateixa distància entre totes les parades, a excepció de les ja esmentades  $N$  i la  $N+1$  tal que  $\text{dist}(N, N+1) = 0$ . I també les  $2*N$  i la 1 tals que  $\text{dist}(N, 1) = 0$ . En les equacions es pren com a  $L$ . S'agafa el valor de 300m que és una distància considerada normal en línies de recorregut urbà.

#### 4.2.5 Pertorbació

És el temps durant el qual l'autobús afectat per la pertorbació no avança, es queda al mateix lloc. La pertorbació podria estar definida per qualsevol tipus d'alteració del trànsit per exemple, un vehicle aturat al carril bus, un problema amb el funcionament de les portes, haver de donar preferència a un vehicle d'emergències etc.. Introduïm una pertorbació al sistema per accentuar una mica el problema i així veure el seu comportament. Si no poséssim la pertorbació potser també es produiria aparellament però no de forma tan acusada, i seria deguda a les demores produïdes a l'efectuar les parades. En les equacions es mostra com a  $U$ .

#### 4.2.6 Vehicle que sofreix la pertorbació

Com que hem numerat els autobusos correlativament des del primer que surt fins al darrer (el darrer vehicle que tenim és el nombre total d'autobusos de la línia, també anomenada flota) és el vehicle que sofrirà la pertorbació abans descrita. A priori creiem que no hauria d'afectar gaire els resultats si és un o altre el que pertorbem, degut a que el comportament d'una línia és circular i un cop ja està en funcionament no hi hauria d'haver gaire diferència entre un autobús i un altre.

#### 4.2.7 Velocitat

És la velocitat de circulació de l'autobús entre parades i interseccions expressada en m/s. En termes de les equacions serà  $v_j(s)$  perquè depèn de l'autobús i del punt on es trobi. Té en compte la fase d'acceleració i de frenada de l'autobús essent una velocitat mitjana entre parades i/o interseccions. Es pren un valor genèric de 6,2 m/s en tots els casos i s'anirà modificant en cada punt i autobús en funció de l'estratègia es decideixi.

#### 4.2.8 Taxa d'arribada de passatgers

Aquest paràmetre fa referència al flux d'arribada de gent, el definim per a cada sentit de la línia. És el nombre de passatgers que arriben per hora en el total del sentit (pax/hora). Quan el multipliquem pel percentatge de passatgers de cada parada pel temps obtindrem el nombre de passatgers que pugen a una parada en concret. En les equacions pren el nom de  $q_{AB}$  en el sentit d'anada i  $q_{BA}$  en el de tornada.

Per a fer les simulacions s'usaran dos valors diferents. Per al tram d'anada usarem un valor de 1000 persones/hora i per al sentit de tornada agafarem un valor de 500 persones/hora.

#### 4.2.9 Temps mínim de Lay-Over en capçalera

Temps que fem esperar un autobús en capçalera abans de tornar a circular. Per relacionar-lo amb el model s'usarà el nom  $T_{L-O}$ . Els valors usats les simulacions han estat de 1, 2 i 3 min.

#### **4.2.10 Temps mínim descans conveni**

Temps de descans mínim en què l'autobús s'ha d'aturar en capçalera, per al descans del conductor. El valor que hem usat en totes les simulacions ha estat de 4 min.

#### **4.2.11 Factor d'ajust interval**

És un factor que pren valors entre 0 i 1. Serveix per a definir com es restablirà el temps desitjat entre dos autobusos consecutius. Si el factor s'ajusta a 1 es recuperarà e l'interval desitjat a la següent parada, però produirà una reducció significativa de la velocitat. Per altra banda, si pren el valor de 0, es mantindrà la velocitat propera a la desitjada, però serà necessari un gran nombre de parades per a reduir la desviació produïda. En el model s'usarà el nom  $f_a$ . Prendrem el valor de 0,1 i és un factor adimensional.

#### **4.2.12 Temps unitari de pujada**

És el temps que destina una persona en mitjana en pujar a l'autobús. Els factors que afectaran aquest paràmetre seran el tipus d'obertures, el sistema de validació de bitllets, la proximitat del nivell del terra de l'autobús i el nivell de la parada, el grau d'ocupació del vehicle, el tipus de persona...El model prendrà el nom de  $\gamma$ . Per a realitzar els càlculs usarem un valor de 2,7 segons/persona.

#### **4.2.13 Temps unitari de baixada**

És el temps que destina una persona en mitjana en baixar a l'autobús. Els factors que afectaran aquest paràmetre seran el tipus d'obertures, la proximitat del nivell del terra de l'autobús i el nivell de la parada, el grau d'ocupació del vehicle, el tipus de persona...El model prendrà el nom de  $\delta$ . Per a realitzar els càlculs usarem un valor de 2,0 segons/persona.

#### **4.2.14 Nombre d'interseccions**

És el nombre d'interseccions que afectaran al nostre model de funcionament. Hem escollit 76 interseccions que corresponen a dues interseccions entre cada una de les parades. A cada intersecció se situarà un semàfor.

#### **4.2.15 Temps de cicle**

És el temps complet d'un cicle semafòric, és a dir, la suma del temps de totes les fases (verd + taronja + vermell). Expressat en segons. El temps de cicle que hem pres és de 100 segons.

#### **4.2.16 Capacitat**

És la capacitat de l'autobús en nombre de persones (pax). Per a tenir una idea els autobusos simples tenen una capacitat aproximada de 75 persones i un d'articulat d'unes 180. El nom de la capacitat que usarà el model és de C.

Només hem fet l'estudi per autobusos amb capacitat de 75 passatgers, sumant les places assegudes i dretes.

#### **4.2.17 Permetre recuperar temps en semàfor**

Aquest serà factor discret el que permetrà allargar el temps de cicle en els casos que la estratègia a usar ho faci possible. Pot representar que es permet allargar el temps de cicle (si pren el valor de 1) o que no es permet allargar el temps del mateix (si pren el valor de 2). El posarem sempre en què si permetem allargar el temps de cicle.

#### **4.2.18 Increment de temps de verd per al pas de l'autobús**

És el temps que permetem allargar el cicle de verd per a permetre el pas de l'autobús. Prendrem el valor de 5 segons que és un temps de compromís, ja que pot permetre algunes millores, però no afectarà gaire els usuaris que circulin en direccions perpendiculars al corredor en estudi.

#### **4.2.19 Temps en verd**

Temps en verd del cicle semafòric. El prendrem amb un valor de 50 segons que significa que és una via amb certa preferència respecte les perpendiculars ja que del total 100 segons en tenim la meitat destinat al verd i la resta a repartir entre ambre i vermell. n el model es pot prendre un valor diferent per a cada intersecció  $t_{green,p}$ , però per a simplificar es prendrà igual a totes les interseccions amb el nom de ( $t_{verd}$ ).



## 5 ESTRATÈGIES D'EXPLOTACIÓ

Com ja s'ha comentat amb anterioritat les línies d'autobusos s'han gestionat de manera intuïtiva i empírica. Sobretot degut a la aleatorietat de les incidències no ha permès un estudi científic de l'operativa del servei.

De fet fins que no hi ha hagut maneres de gestionar-les en temps real i l'únic punt on es podia actuar era en la sortida dels autobusos des de cotxera o des de l'inici o final d'una línia. Això es podia fer tan amb horaris prefixats com en intervals respecte el que anava sortint. Però durant tot el trajecte no hi havia manera de poder fer cap actuació, degut primer a la falta d'informació de l'estat de la línia i dels autobusos que hi circulen i segon a la impossibilitat de comunicar's-hi.

En cas de disposar de tecnologies o mitjans (SAE basat en GPS) per a poder conèixer l'estat de la línia s'ha de trobar la manera de poder-hi influir en el sentit desitjat, és a dir, millorar algun dels aspectes que defineixen el seu funcionament. I també saber quina és la millor manera d'actuar-hi. En funció de l'estratègia que s'esculli necessitarem per a poder aplicar-la més o menys tecnologia i més o menys formació als conductors. També s'hauria de transmetre informació als passatgers, per exemple si un autobús alenteix el seu pas per a millorar la regularitat total de la línia podria ser entès per part dels passatgers que es troben en aquell moment a l'autobús que l'estan perjudicant, en benefici d'una majoria, però en definitiva qui rep les molèsties és ell.

Degut a les tecnologies disponibles actualment es pot conèixer en temps real la posició de cada un dels autobusos i també fins i tot el seu grau d'ocupació. Amb aquest conjunt d'informacions es pot prendre una decisió d'actuació i comunicar-la al conductor mitjançant ràdio o missatges per GPRS al sistema de comandament de l'autobús.

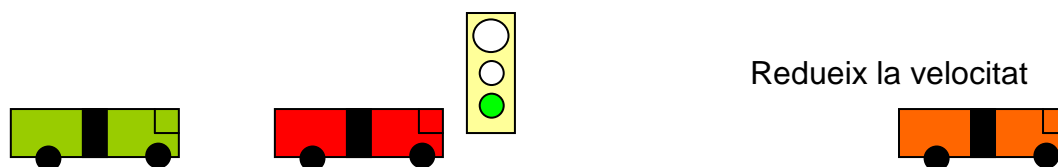
Dins les actuacions que per a millorar el funcionament de les línies d'autobusos simularem i aplicarem que les anomenarem estratègies d'explotació. En aquestes estratègies s'actuarà sobre la velocitat dels autobusos i també sobre el semàfors que afecten el recorregut.

A continuació explicarem cada una de les diferents estratègies contemplades, el seu funcionament i com s'hauria d'aplicar. Identificarem cada una d'aquestes estratègies amb un número.

### **5.1 Regular només davant**

Una de les estratègies possibles és la de modificar la velocitat de l'autobús que precedeix el que es va retardant combinada amb l'extensió de la fase en verd dels semàfors. A priori aquesta estratègia podria semblar dolenta ja que reduint la velocitat de l'autobús sembla que també reduïm la qualitat dels servei, però d'aquesta manera afectem també la dispersió dels intervals de pas, que com hem dit és un dels factors que afecten al nivell de servei. De fet ho avaluarem després amb dades diferents i simulacions.

Amb aquesta estratègia el que pretenem és intervenir amb l'autobús precedent, és a dir que si l'autobús afectat és el  $j$ , intervindrem la velocitat de l'autobús  $j-1$ . El que pretenem és que l'autobús precedent (el  $j-1$ ) reculli part dels passatgers que en realitat correspondria recollir a l'autobús afectat. D'aquesta manera intentarem reduir el temps en les operacions de càrrega i descàrrega per així aconseguir reduir la diferència entre els autobusos.



**Figura 6. Croquis de l'estratègia Regular Només Davant.**

Per a determinar quan s'ha d'actuar, anem comprovant a cada parada els intervals de pas entre autobusos i si el retard és superior a un llindar, s'intervé en la velocitat. Per a fer la simulació aquest llindar ha estat 1 seg., això vol dir que per cada mínima pertorbació ja s'actua sobre algun autobús. A la pràctica és un llindar molt petit, ja que significaria avisar al conductor perquè redueixi la seva velocitat o allargui el temps en parada en 1 seg., fet que és impossible de controlar amb un marge tant petit i potser seria convenient usar un llindar superior.

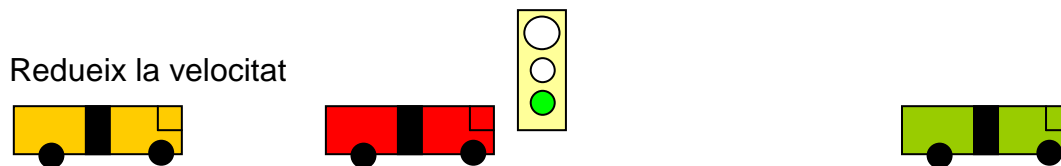
El temps de verd dels cicles semafòrics s'incrementa en 5 segons només si l'autobús afectat té la possibilitat de creuar la intersecció. Així es minimitzen les alteracions amb els carrers perpendiculars.

Les pertorbacions en aquest cas es transmeten també aigües amunt, usant llenguatge hidràulic, degut a l'actuació que realitzem. Si no es fes cap actuació les pertorbacions només es transmeten aigües avall.

## **5.2 Regular només darrere**

Com ja s'ha comentat amb anterioritat una de les estratègies possibles és la de modificar la velocitat de l'autobús que segueix el que es va retardant. Degut a la naturalesa dels sistema, l'autobús que segueix augmentaria la seva velocitat i el que es pretén és reduir la seva velocitat. Per mitjà d'aquesta estratègia, el que es pretén és forçar l'interval de pas, que com hem dit és un dels factors que afecten al nivell de servei. Aquesta estratègia també es combina amb l'extensió de temps de verd del semàfor de l'autobús que pateix retard. Així aquest augmentaria la seva velocitat i recolliria menys passatgers dels que li pertocarien.





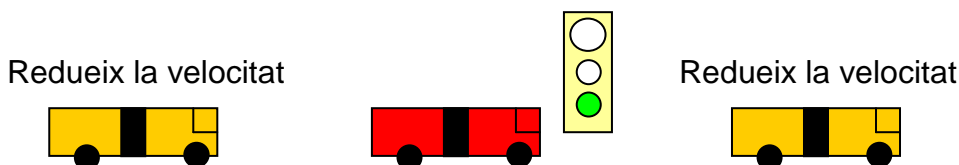
**Figura 7. Croquis de l'estratègia Només Darrera**

El funcionament és el següent, quan es localitza l'autobús que sofreix retard per algun motiu anomenat autobús  $j$  llavors anem a l'autobús anomenat  $j+1$  i reduïm la seva velocitat de circulació. Comprovarem que un autobús està retardat controlant l'interval de pas en cada parada.

Aquí no hi ha transmissió de les pertorbacions aigües amunt, i el que s'intenta és esmorteir l'efecte de les mateixes. Amb el factor d'ajust d'interval (que es troba entre 0 i 1) decidim quina recuperació de l'interval de pas es produirà.

### 5.3 Regular davant i darrera

Vist les dues primeres estratègies es proposa una nova estratègia que consisteix en la combinació de les dues anteriors i pretén extreure'n el millor de les dues. De fet aquí s'actuarà en els dos autobusos que envolten el que està afectat, tant el precedent com el que segueix.



**Figura 8. Croquis de l'estratègia Davant i Darrera.**

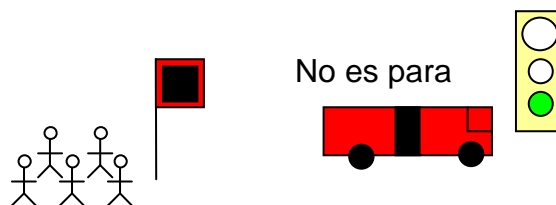
Per a portar a terme la següent estratègia es localitza l'autobús que està retardat i s'alenteixen els dos autobusos que estan més a prop seu. aquí també es combina amb l'extensió del temps en verd del semàfor.

Aquí afectem la línia en total, ja que les pertorbacions es transmeten tant aigües amunt com aigües avall.

## 5.4 Regular no para

L'objectiu de la present estratègia consisteix en intentar que les demores produïdes per un excés de demanda no afectin a la línia. El que pretén és reduir al màxim el temps dedicat a les parades i si un autobús pateix demora respecte el temps efectuarà parada, no recollirà ni deixarà passatgers. Així tenim un temps en parada zero i obtenint per tant interval més reduït motiu pel qual a la següent parada el nombre de gent a recollir serà menor i el nombre de gent a baixar, tot i ser superior, perquè serà el de dues parades, no sol ser el més determinant. Aquesta estratègia també contempla l'extensió del temps en verd del cicle per a intentar mitigar al màxim els efectes de les pertorbacions.

Aquesta estratègia és molt agressiva pel que fa als usuaris ja que per una banda si un passatger ha de baixar a una parada determinada i l'autobús porta demora acumulada es trobarà que no podrà baixar en aquella parada, no ho podrà fer fins la següent. També, un viatger que vulgui pujar a un autobús a la parada, si aquest es troba també en una situació de demora no podrà pujar-hi i s'haurà d'esperar al següent.



**Figura 9. Croquis de l'estratègia no para a les parades.**

Com es podrà veure amb els resultats serà una mesura molt efectiva des de pràcticament tots els punts de vista, però a nivell usuari afectat per l'actuació serà molt poc acceptat, i per tant no sempre serà una estratègia de fàcil aplicació, sobretot per les queixes d'alguns usuaris que només tenen la seva visió particular i personal del funcionament d'una línia.

## 6 METODOLOGIA D'ANÀLISI

Per a fer l'estudi d'un gran ventall de problemes serà convenient l'ús d'eines informàtiques. L'objectiu és tenir una gran varietat de problemes que representin les diferents situacions que existeixen a les ciutats.

A continuació s'explicarà a metodologia usada.

### 6.1 Utilització del model de regularitat

Es prendrà com a base el model explicat al capítol 4. S'ha programat el model en llenguatge de programació de Visual Basic. Per a cada una de les estratègies es faran les modificacions pertinents al model.

Per a realitzar els càlculs s'han usat alternativament els recursos informàtics que disposa l'ETSECCPB, a les aules informàtiques, i que estan equipades amb els següents equips:

PC clònic amb processador Intel Core 2 a 1,86 Ghz, 2 Gb de RAM i 250 Gb de disc dur.

PC APD, amb processador Pentium IV a 3,2 GHz, 1 Gb de memòria RAM, 160 GB de disc dur i monitor de 17 polzades.

PC clònic amb processador Intel Pentium IV 3,2 Ghz, 512 Mb de RAM i 120 Gb de disc dur i monitor de 17 polzades.

El temps de càlcul de cada una de les simulacions ha estat d'aproximadament uns 5 segons, és a dir que en total el temps de càlcul per a obtenir els resultats ha estat d'unes 50 hores.

L'escola també disposa d'eines de càlcul intensiu, però no disposen del programari necessari per a fer servir Visual Basic.

Cada simulació feta extreu un fitxer de text de resultats del qual s'obtenen els temps, ocupacions, velocitats de cada autobús en cada tram o parada. Posteriorment s'ha analitzat cada un d'aquests fitxers per a obtenir els resultats.

### 6.2 Generació d'escenaris de modelització

Per a cobrir el gran nombre i varietat de línies que existeixen, i veure els factors que afecten més la regularitat dels autobusos es generaran escenaris que siguin representatius de moltes línies d'autobusos. Cada escenari vindrà definit per unes variables d'entrada. Per a la creació d'aquest conjunt d'escenaris prendran uns valors d'algunes variables com a fixes per a totes les simulacions i en les que es s'han considerat significatives d'estudi (perfils de càrrega, temps de pertorbació, interval de pas, parada pertorbació, autobús afectat i Lay-Over) se'n prendran alguns valors que cobreixin la diversitat que hi ha.

Per a poder fer un estudi complert ens caldrà abastar totes les opcions dins l'àmbit requerit, és a dir el de línies d'autobusos urbans amb freqüències de pas habituals, amb perfils de càrrega diferents i sotmeses a pertorbacions no superiors a l'interval de pas en diferents parades i afectant diferents autobusos.

El que tenim és un gran nombre de combinacions possible en què resumim els valors a calcular a la següent taula:

<b>Perfils de càrrega</b>	<b>Temps pertorbació(min)</b>	<b>Interval (min)</b>	<b>Parada pertorbació</b>	<b>Autobús afectat</b>	<b>Lay-Over (min)</b>
<b>P1</b>	1	5	3	1	1
<b>P2</b>	2	6	10	3	2
<b>P3</b>	3	7	18	5	3
<b>P4</b>	4	8	30	7	
<b>P5</b>		9			
<b>P6</b>		10			
<b>P7</b>		11			

**Taula V. Resum de les combinacions simulades.**

Obtenint un total de  $7 \cdot 4 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3 = 9408$  escenaris als quals hi aplicarem a cada un d'ells les 4 estratègies. Obtenint un total de 37632 problemes simulats.

També amb Visual Basic s'han programat mòduls del programa principal que permeten generar diferents perfils de càrrega, i la creació de les combinacions que representen cada un dels diferents escenaris.

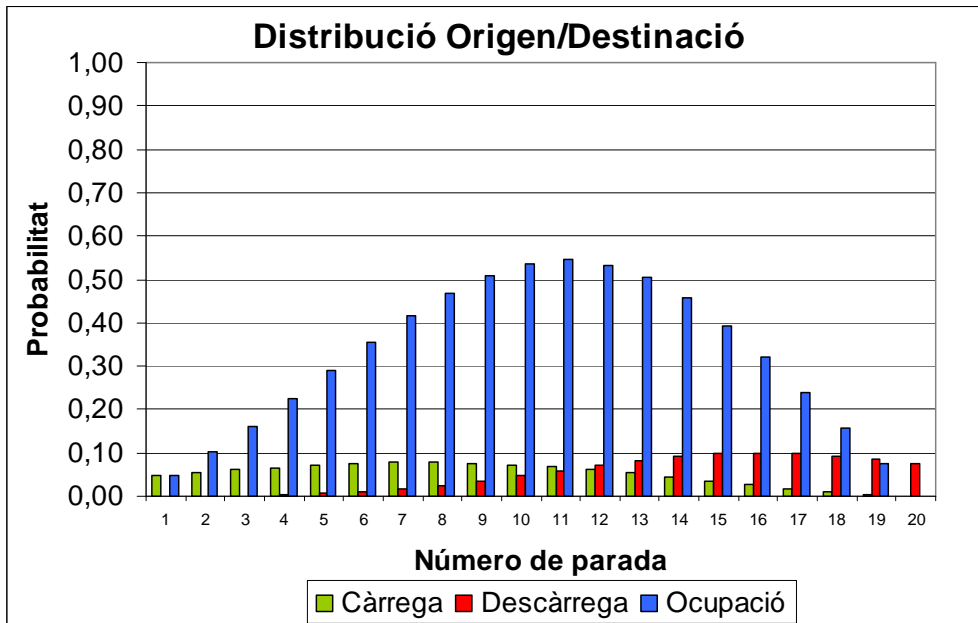
### **6.3 Perfils de càrrega**

No totes les línies d'autobusos es comporten igual pel que fa al ritme d'arribades de passatgers. N'hi ha que tenen un repartiment més igualitari al llarg de tot el recorregut, en canvi d'altres tenen un perfil més esbiaixat cap a un dels extrems. Fins hi tot moltes línies d'autobusos tenen comportaments diferents segons les hores o els dies de funcionament.

Per a cobrir les diferents possibilitats presentarem els sis diferents perfils, que pretenen cobrir una varietat suficientment àmplia de les diferents possibilitats

#### **6.3.1 Perfil 4**

El perfil usat en aquest cas és d'una línia amb un comportament bastant continu, amb una lleugera esbiaixada cap a la destinació final. La punta d'ocupació si no es produeix cap pertorbació es troba a la meitat de la línia i voreja el 55%.

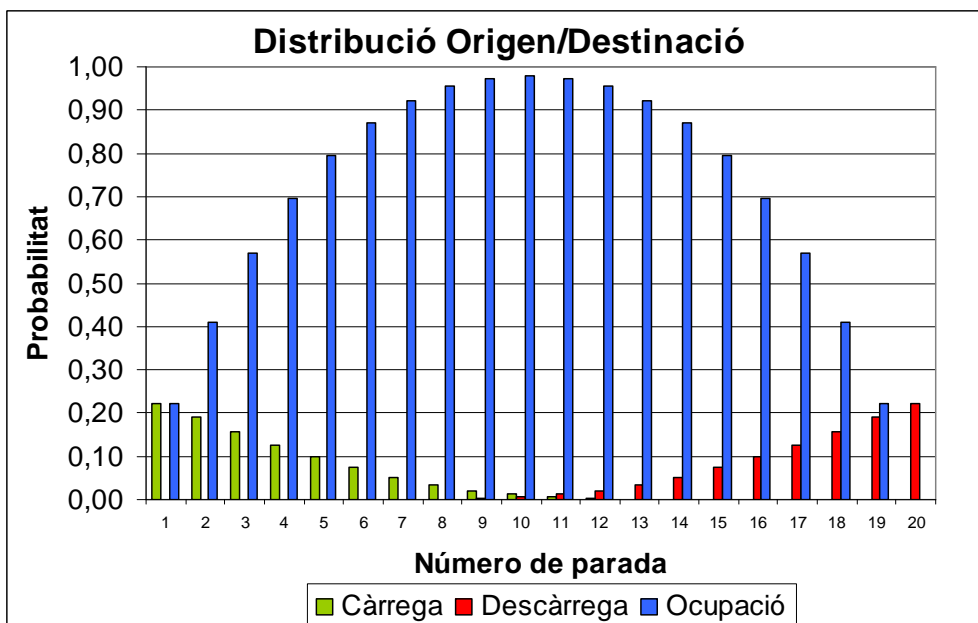


**Figura 10. Perfil de càrrega 4.**

**6.3.2 Perfil 5**

El perfil que usarem serà el d'una línia en què la major part de la gent va des de l'origen al final. Podria tractar-se d'una línia que el seu origen és un barri residencial i la destinació una zona amb els llocs de treballs, o des d'un punt de molta a demanda a un punt amb molta demanda. Aquest perfil presenta una ocupació pràcticament plena a la meitat de la línia, motiu pel qual tenim garantides esperes de gent per petita que sigui la pertorbació que hi introduïm.

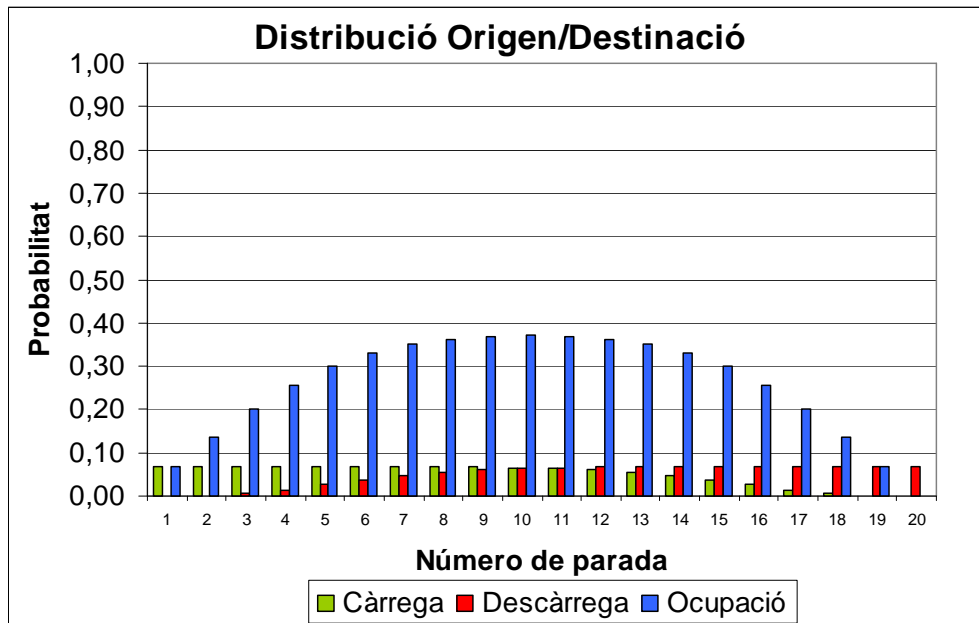
El perfil 5 serà el següent:



**Figura 11. Perfil de càrrega 5**

### 6.3.3 Perfil 6

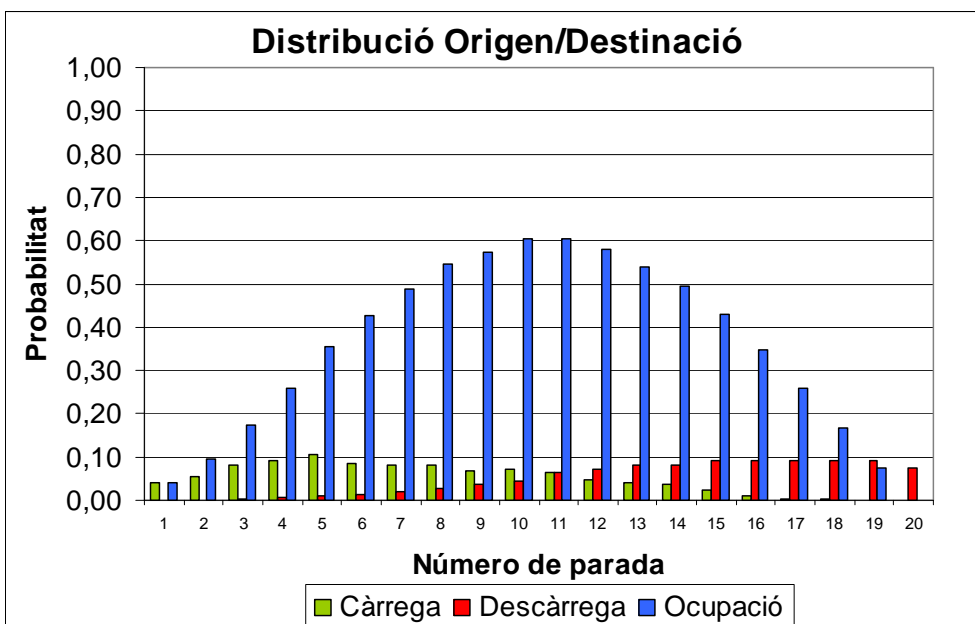
Aquí presentem el perfil més continu que hem usat, amb unes arribades molt constants a l'inici de la línia però amb una tendència decreixent a partir de la meitat de la línia, i viceversa per les descàrregues. Degut a aquesta distribució tindrem ocupacions relativament baixes tot al llarg de la línia, amb una punta que no arriba al 40%.



**Figura 12. Perfil de càrrega 6**

### 6.3.4 Perfils 8

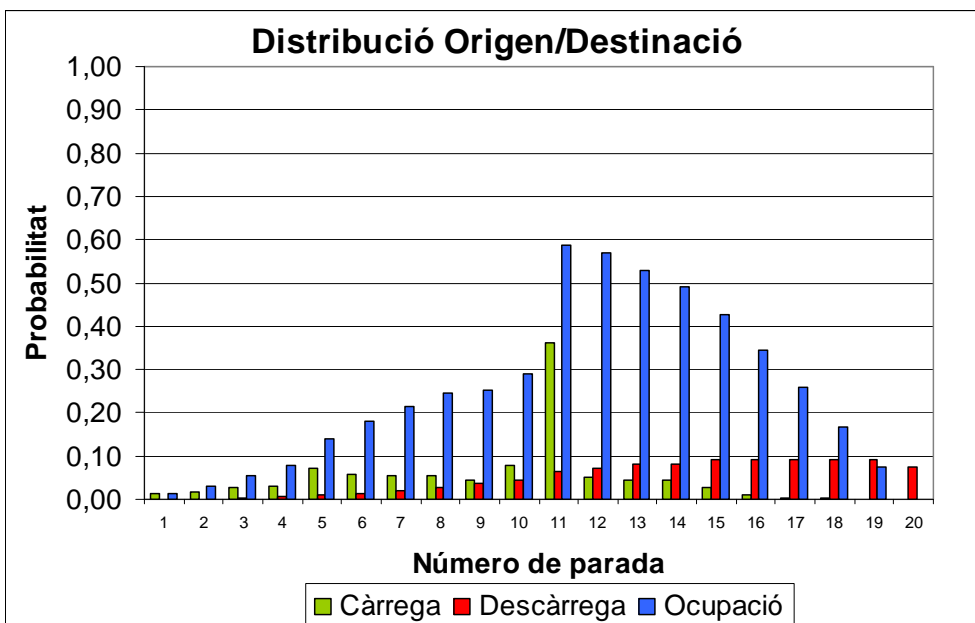
El següent perfil té també una distribució bastant uniforme, però amb un màxim de càrregues a la parada número 5 i la distribució de les descàrregues diriges sobretot a la segona meitat del recorregut. Presenta un màxim d'ocupació a la meitat de la línia i superant per poc el 60%.



**Figura 13. Perfil de càrrega 8.**

### 6.3.5 Perfil 9

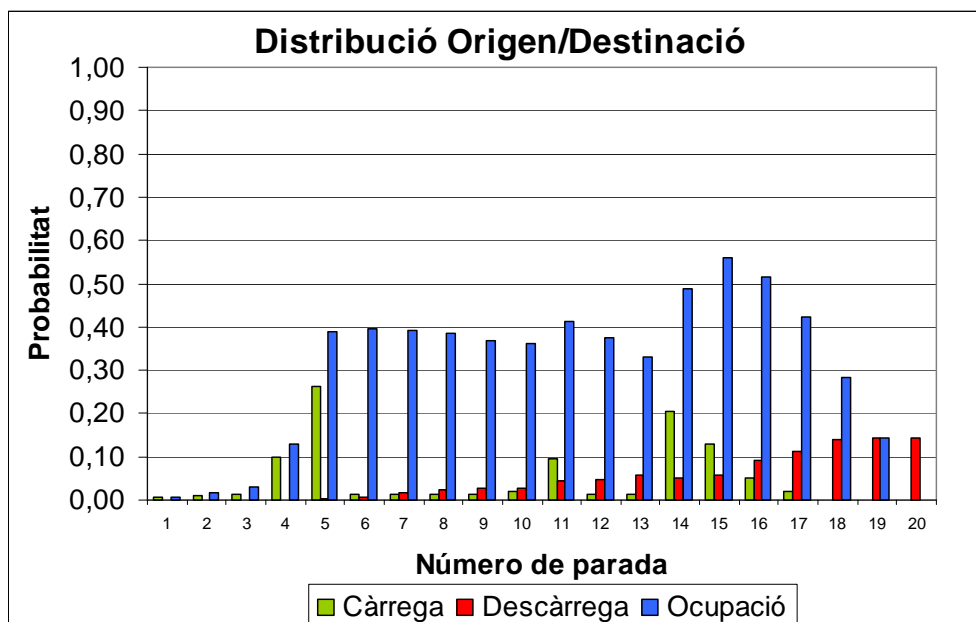
El perfil següent representaria una línia que té una interconnexió amb un altre mitjà de transport justa a la meitat de la línia, on en una sola parada es concentren més del 30 % de les arribades. Per tant és de preveure que serà la parada que hi destinarà més temps i a partir de la qual l'ocupació presenta un màxim proper al 60%.



**Figura 14. Perfil de càrrega 9.**

### 6.3.6 Perfil 10

Aquest perfil és el que presenta una distribució menys uniforme de tots els que hem utilitzat i també intenta representar la interconnexió amb altres línies de transport o una estació de transferència, en concret la primera es trobaria entre les parades 4 i 5 i l'altra entre les 14 i 15, on amb aquestes quatre parades recullen més del 70% del total de passatgers.



**Figura 15. Perfil de càrrega 10.**

## 6.4 Execució del model

En cada un dels diferents escenaris s'han realitzat els càlculs per a completar un total de 10 cicles de funcionament, dels quals per a fer els corresponents anàlisis només es tindran en compte els cicles que compresos entre el segon i el vuitè.

S'extreu el primer cicle de càlcul per a evitar problemes d'escalfament del problema, degut a que encara no es troben tots els autobusos en circulació. A partir del segon cicle ja hi haurà tots els autobusos en funcionament dins del sistema. El dos últims cicles també s'exclouen de l'anàlisi per un motiu semblant, perquè ja hi ha autobusos que es van quedant a cotxera i les perturbacions dins el model es transmeten de manera no real degut a la manca d'aquests autobusos.



## **6.5 Agrupació de resultats i anàlisi estadístic**

Finalment i a partir d'un altre mòdul programat es llegeix cada un dels fitxers de text de resultats obtenint-ne els paràmetres que s'estudien. Després es fa un bolcat de les dades a una fulla de càlcul d'Excel per així poder fer una agrupació de resultats segons els criteris desitjats en cada cas i crear les figures de resultats amb facilitat.



## 7 VARIABLES CONSIDERADES

Un cop s'han fet totes les simulacions tenim una quantitat molt gran de dades que s'han de tractar i avaluar. Ens interessa sobretot un paràmetre que ens valori l'objectiu perseguit, és a dir la regularitat en el temps d'arribada dels autobusos a cada parada. Tot i que aquest és un dels objectius principals no hem de descuidar altres paràmetres que ens avaluaran el funcionament de la línia, en aquest sentit ens referim a què no podem forçar una regularitat absoluta a costa d'uns temps d'espera o de trajecte molt grans, perquè perdrem una de les prestacions també volgudes.

### 7.1 Paràmetres de les mètriques

#### 7.1.1 Coeficient de variació

El paràmetre que prendrem per mesurar de la regularitat dels autobusos en parada és el coeficient de variació definit com:

$$C_V = \frac{\text{desviació estàndard entre intervals}}{\text{mitjana}} = \frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t} \quad (15)$$

Aquest paràmetre es pot calcular de diferents maneres, en funció del nombre de parades que considerem. És habitual calcular-lo per una sola parada i tots els autobusos que hi passen, és a dir tota la flota. Però per a tenir una mesura més global farem un càlcul de la mateixa mesura però pel conjunt de parades de cada cicle i per tots els autobusos i també una altra que ens valori tots els cicles desitjats, és a dir del cicle 2 al cicle 8 i també per tots els autobusos i totes les parades. Obtenint un total de 8 valors de  $C_V$  per a cada simulació realitzada.

$C_{V1}$	$C_{V2}$	$C_{V3}$	$C_{V4}$	$C_{V5}$	$C_{V6}$	$C_{V7}$	$C_{VTotal}$
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	--------------

**Taula VI. Conjunt de Coeficients de Variació que obtindrem.**

#### 7.1.2 Temps destinats a cada operació

A partir de les dades de sortida del programa de simulació també podem obtenir els temps d'arribada de cada un dels autobusos a les parades.

També ens interessa conèixer el temps integrat per persones, i això ho obtindrem multiplicant el temps destinat a cada operació pel nombre de persones que hi ha a cada una d'elles. Tenim tres operacions bàsiques, que són:

Temps de trajecte per tots els passatgers:

$$TT = \sum_{i=1}^N t_t \quad (16)$$

Temps d'espera per a tots els passatgers

$$TW = \sum_{i=1}^N t_w \quad (17)$$

Temps en parades per a tots els passatgers

$$TS = \sum_{i=1}^N t_{st} \quad (18)$$

Cada un d'aquests valors també l'obtindrem de cada cicle i per tant obtindrem de cada simulació un total de 21 valors, que surten dels 7 cicles considerats i pels tres tipus de temps diferents a considerar.

A partir d'aquí també podrem obtenir la suma dels temps i també la suma dels temps ponderada segons els valors del temps recomanats per Kittelson& Associates (2003). Definint el temps ponderat com a:

$$T\Sigma T = \sum_{i=1}^N T_r + \sum_{i=1}^N T_w + \sum_{i=1}^N T_{st} \quad (19)$$

$$TPT = \sum_{i=1}^N t_t + 2,2 * \sum_{i=1}^N t_w + \sum_{i=1}^N t_{st} \quad (20)$$

### 7.1.3 Velocitat comercial

Un altre dels paràmetres que usarem és la velocitat comercial del recorregut complet, és a dir, el quocient de la distància total recorreguda ( $d$ ) entre el temps destinat per un autobús a recórrer tota la línia (des de la parada 1 a la 20 i també de la 21 a la 40). Aquí no es té en compte el temps destinat a descans ni al Lay-Over a la parada origen final de línia ni tampoc es té en compte el temps de les persones que circulen a l'autobús. En el cas d'estudi és de 38 parades x 300 m.

$$V_c = \frac{\text{Distància total recorreguda}}{\text{Temps de cicle}} = \frac{d}{T_c} \quad (21)$$

Per a simplificar l'anàlisi només l'avaluarem pel l'autobús etiquetat amb el número 1, així obtindrem per a cada simulació un total de 14 velocitats comercials, dues per cada cicle d'on també podrem extreure la velocitat comercial mitjana pel total dels 7 cicles.

## 7.2 Creació de l'indicador de prestacions

Per a fer un anàlisi complet amb totes les dades agregades podem definir un indicador que ens permetés integrar les diferents mètriques en una de sola i així poder considerar la idoneïtat d'una estratègia de manera clara senzilla i intuïtiva, que tingués en compte, tant la regularitat, com el temps ponderat, com la velocitat comercial. Per a fer-ho usarem el mètode AHP (Analytic Hierarchy Process).

Per crear l'indicador de prestacions s'ha de ponderar els valors obtinguts amb cada paràmetre. Per fer aquesta ponderació associarem un pes a cada paràmetre amb el mètode AHP (Analytic Hierarchy Process). Utilitza fonaments matemàtics per prioritzar entre elements a partir de comparacions per parells. Proposa modelar les situacions mitjançant jerarquies o arbres. El model jeràrquic és simple, els elements únicament es relacionen amb el del seu mateix nivell jeràrquic i les relacions van en un únic sentit, per tant la informació que s'ha d'aportar en forma de comparacions és petita.

Els valors que s'han d'introduir a la matriu de comparació vénen donats per la següent taula:

Escala Numèrica	Escala Verbal
1	Igual importància.
3	Importància moderada d'un element sobre l'altre.
5	Importància forta d'un element sobre l'altre.
7	Importància molt forta d'un element sobre l'altre.
9	Extrema importància d'un element sobre l'altre.
2,4,6,8	Valors intermedis entre dos judicis adjacents.

**Taula VII. Valors de comparació segons les relacions entre elements.**

La Taula VIII mostra la matriu dels paràmetres considerats per les relacions entre els diferents paràmetres. Es pot observar que tots els elements de la diagonal són la unitat, ja que és la relació entre el mateix paràmetre. També es pot observar que els elements simètrics són els inversos. Cal remarcar que amb aquest mètode la classificació es realitza a parells entre els paràmetres considerats.

	Regularitat	Temps ponderat	Velocitat comercial
Regularitat	1,00	2,00	6,00
Temps ponderat	0,50	1,00	2,00
Velocitat comercial	0,17	0,50	1,00

**Taula VIII. Matriu de comparació de l'indicador de prestacions.**

Segons el model AHP es normalitza aquesta matriu i s'obté un pes per cada paràmetre. S'haurà de comprovar que el resultat és suficientment vàlid; per això es planteja una mesura de la desviació dels judicis dels valors que es denomina índex de consistència  $\mu$ . Definit per l'expressió:

$$\mu = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (22)$$

on  $\lambda_{\max} = \lambda_1$  que és l'autovalor principal de la matriu d'ordre n.

$$\mu = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3,0257 - 3}{2} = 0,0128 \quad (23)$$

Finalment s'ha d'obtenir la ràtio de consistència que es defineix com:

$$CR = \frac{\mu}{CIA} \quad (24)$$

on *CIA* (Índex de consistència aleatori) serveix com a referència per comparar la consistència de les respostes obtingudes. Si el valor de *CR* és menor que 0,1 es consideraran vàlides les respostes i el resultat de prioritats que es calcula a partir d'elles. El valors del *CIA* s'extreuen de la següent taula:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>CIA</b>	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452

**Taula IX. Valors de CIA en funció de l'ordre de la matriu.**

La consistència de la matriu de la Taula IX és de  $0,024 < 0,1$  per tant la considerem com a bona. Després d'aplicar el mètode hem obtingut els pesos exposats a la 0.

Indicador de prestacions	Pes
<b>Regularitat</b>	0,613
<b>Temps ponderat</b>	0,269
<b>Velocitat comercial</b>	0,118
<b>Total</b>	1

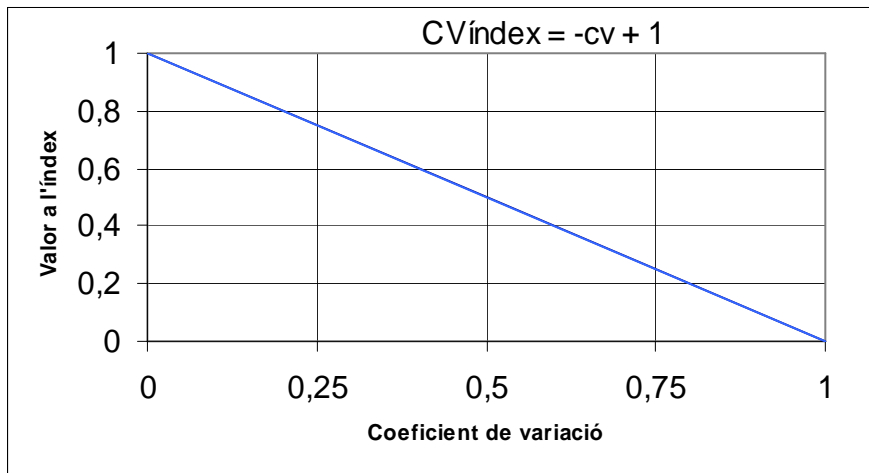
**Taula X. Pesos de l'indicador de prestacions.**

En definitiva obtindrem un Indicador de prestacions definit com:

$$IP = PesCV * CV_{index} + PesTPT * TPT_{index} + PesVC * VC_{index} \quad (25)$$

## 7.2.2 Funcions de valor dels paràmetres de les mètriques

Per a poder fer el producte d'aquests valors el primer que hem de fer és generar les tres funcions de valor referides a cada paràmetres de la mètrica. De cada un dels paràmetres en definirem una de lineal decidint entre els seus rangs de validesa. Així tenim per al paràmetre coeficient de variació de valor 0 un valor a l'índex màxim, és a dir 1; i per valors del paràmetre 1 en el nostre índex seria 0. Si el coeficient de variació és major que 1 també li donarem el valor de l'índex 0.

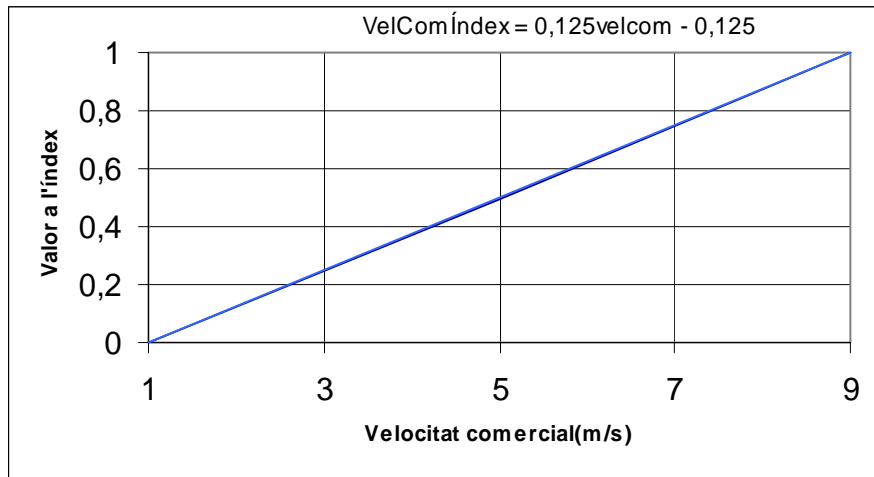


**Figura 16. Funció de valor per al Coeficient de Variació.**

I es podrà calcular fàcilment amb la següent equació:

$$CV_{índex} = -CV + 1 \quad (26)$$

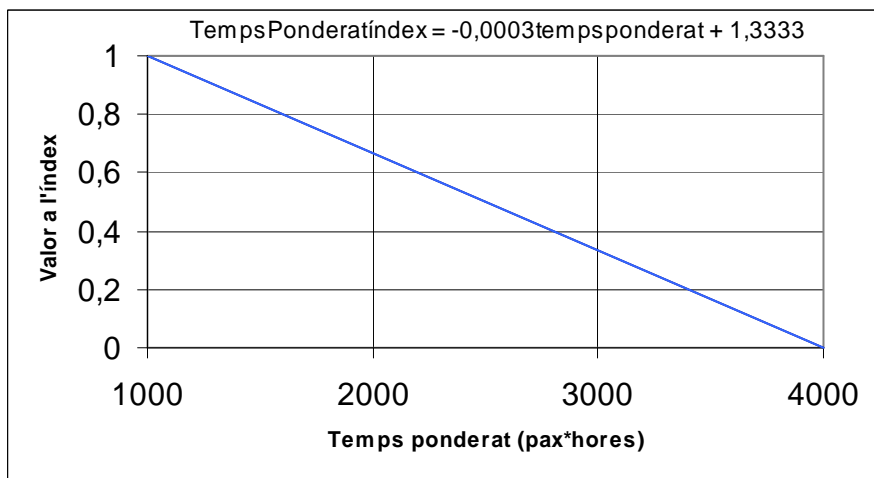
Per a la creació de la funció de valor de la velocitat comercial considerarem que si la velocitat comercial és inferior a 1 m/s s'obté un valor a l'índex de 0, ja que és la velocitat que es considera que es desplacen les persones caminant, i ho valorarem amb un 1 si s'obté i una velocitat comercial de 9 m/s, que és fins i tot superior a la mitjana dels vehicles particulars a la majoria de les ciutats.



**Figura 17. Funció de valor per a la velocitat comercial.**

$$VelocitatComercial_{índex} = 0,125 * VC - 0,125 \quad (27)$$

Després d'observar el conjunt de les dades de resultats considerem que si el temps ponderat en el total dels set cicles calculats és 1000 pax\*hores li donarem un valor de 1 i si és 4000 o superior un valor de 0.



**Figura 18. Funció de valor per al temps ponderat.**

$$TempsPonderat_{índex} = -0,0003 * TempsPonderat + 1,3333 \quad (28)$$



## 8 RESULTATS

Un cop realitzades les simulacions es fa una anàlisi dels resultats. El conjunt de dades a tractar a estat molt gran. Bona part dels escenaris simulats s'han hagut de descartar, degut a inestabilitats dels sistema. S'haurà de determinar en quins casos s'han produït aquestes inestabilitats. En aquest punt cal assenyalar que aquest serà un factor clau per a poder analitzar en profunditat les dades obtingudes.

Les situacions d'inestabilitat es produeixen quan ja no hi ha manera de esmorteir les irregularitats que es produeixen. De fet no ens interessa trobar una situació inestable, ja que significa que no es pot fer res per a poder corregir els desviaments dels intervals.

En aquest aspecte Nagatani (2001) proposa tot un seguit de regions on el sistema es torna inestable. Tot i que no podem relacionar directament els resultats aconseguits per aquest investigador amb els nostres escenaris degut a que una de les simplificacions que fa és l'homogeneïtat del flux d'arribada de gent a les parades, és a dir que el nombre de gent que puja a un determinat autobús és proporcional a l'interval de pas. De fet, si no hi hagués pertorbació induïda la demanda, el ritme tant de pujades com de baixades seria igual a totes les parades. Això és una aproximació podríem dir molt de laboratori, i que per relacionar-ho amb dades d'una línia real hem de tornar a fer aproximacions.

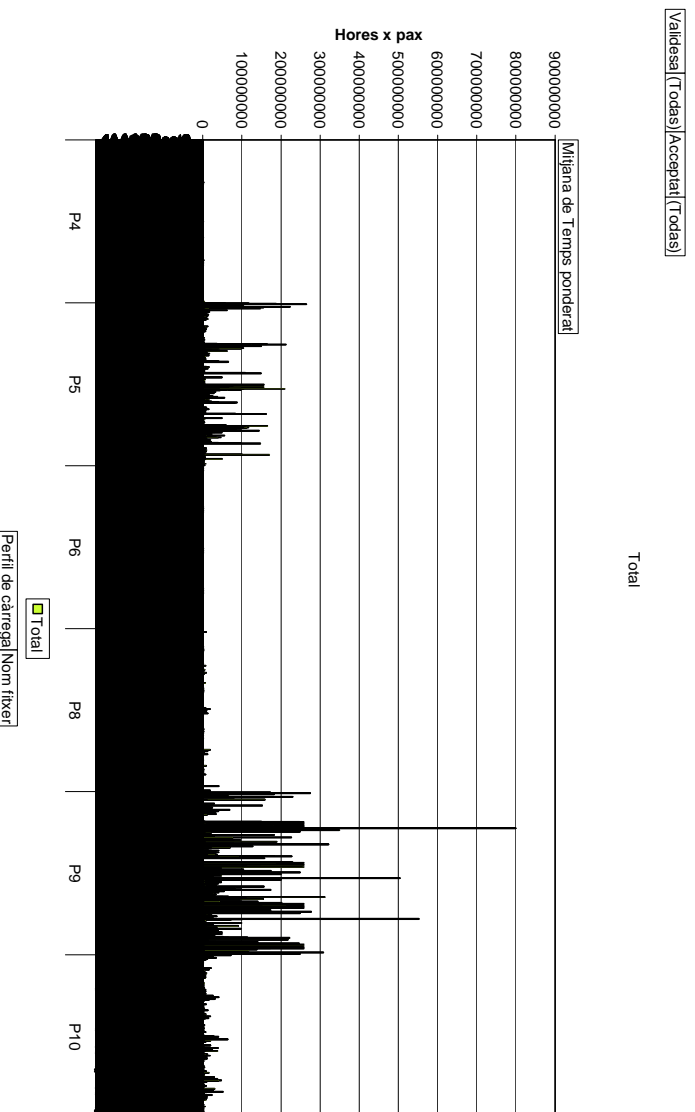
Si s'intenta aplicar els seus paràmetres als nostres escenaris s'obtenen uns valors que no s'ajustaran al que realment està passant degut a la manca d'homogeneïtat de les dades d'entrada que hem usat. Així si en aquest estudi conclou que en funció de certs paràmetres de línia (tant d'operativa d'autobusos com de demanda de passatgers) podem saber si ens trobarem un funcionament estable o inestable, no es pot aplicar amb tota confiança a un sistema real degut a la idealització que ha realitzat. En el nostre cas, si intentem discriminar quins són els perfils que ens donaran regions més grans d'estabilitat ens trobem amb el següent cas:

	<b>Perfil4</b>	<b>Perfil5</b>	<b>Perfil6</b>	<b>Perfil8</b>	<b>Perfil9</b>	<b>Perfil10</b>
$\lambda\gamma$	0,09	0,07	0,10	0,08	0,10	0,20

**Taula XI. Producte dels paràmetres de càrrega de cada perfil utilitzat.**

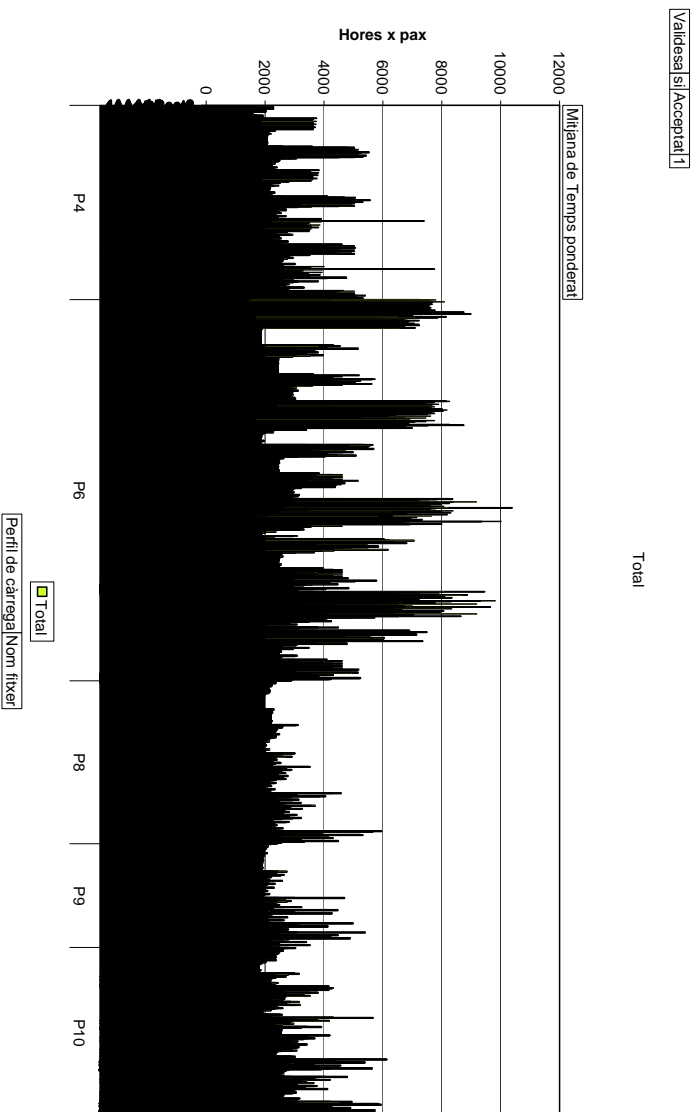
Per tant, observant la Figura 4 es veu que amb la distància entre parades que hem escollit i els valors de cada perfil tenim moltes situacions d'inestabilitat, però en realitat no és realment així, ja que no existeix una relació directa entre les dades d'entrada dels dos models de càlcul i les simplificacions realitzades en cada un d'ells els posa en situacions allunyades. Aquesta discrepància de resultats és degut com ja hem dit a la no homogeneïtat de les nostres dades d'entrada i per tant no podem aplicar-les directament. Però si que en podem tenir una idea del seu comportament. En aquest sentit podem i després d'observar les dades, es pot veure que hi ha simulacions on els valors dels diferents temps avaluats són molt grans en relació a la resta i per a filtrar les dades s'ha usat un criteri senzill per diferenciar de quins s'ha produït inestabilitat.

Per a filtrar les dades s'ha procedit a eliminar tots els resultats els quals el temps d'espera per persones sigui el doble del temps de circulació per ocupació. Així veiem en la següent figura tot el conjunt de resultats on hi ha un cert nombre de simulacions el qual el temps que han destinat al conjunt de les operacions de recorregut, càrrega i descàrrega i en parades ha superat àmpliament la mitjana, per tant s'ha procedit a no considerar-los ja que s'han produït en una zona inestable.



**Figura 19. Mitjanes dels temps ponderats amb totes les dades sense filtrar.**

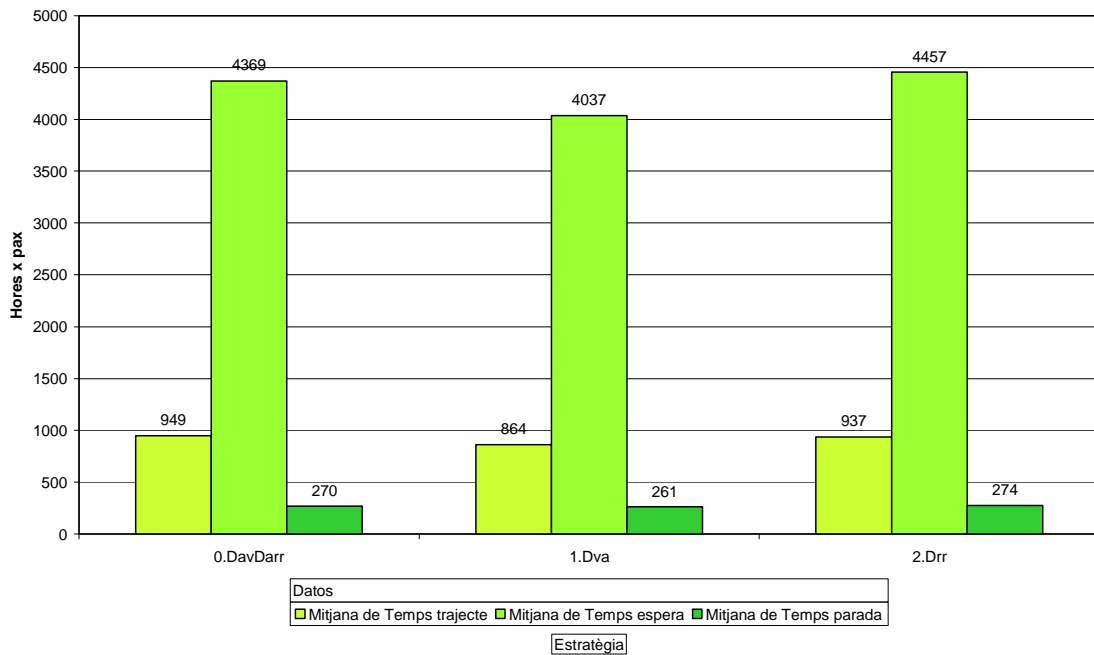
Un cop ja s'han filtrat les dades es pot comprovar la varietat de resultats, però tots ells es troben dins un interval raonable i per tant s'han acceptat.



**Figura 20. Mitjanes dels temps ponderats amb les dades filtrades.**

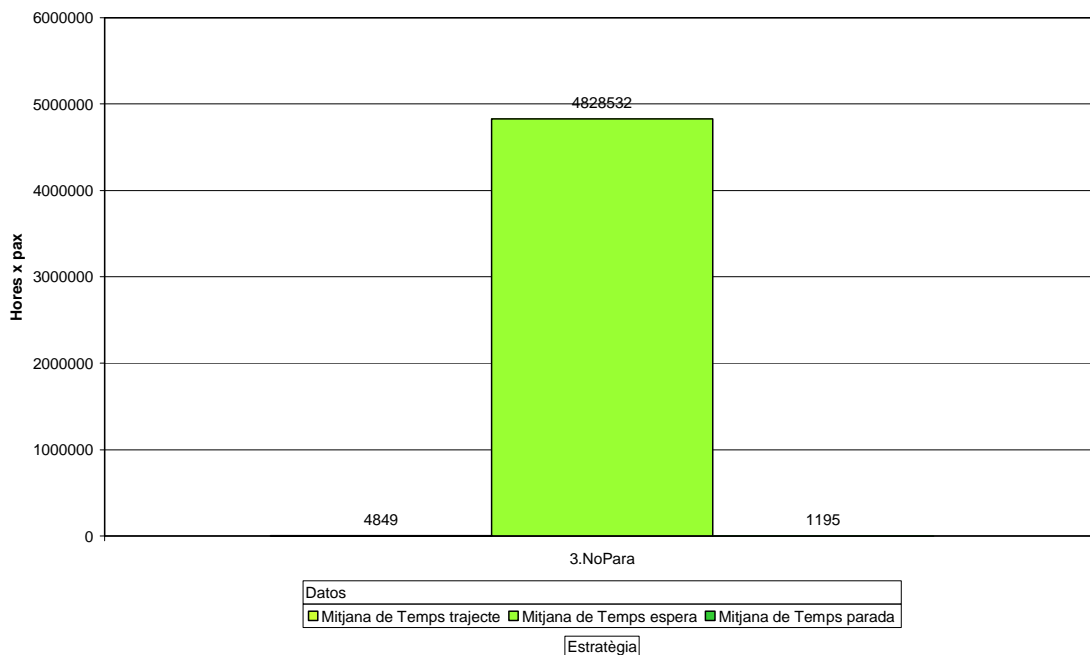
## 8.1 Anàlisis del temps

Tot seguit mostrarem els resultats del conjunt de totes les simulacions fetes aplicant totes les estratègies excepte la de no parar a les parades, on podem observar que la mitjana dels temps d'espera és molt superior (de l'ordre de quatre vegades aproximadament) al temps de trajecte. Indicant-nos una situació clarament inestable o de no funcionalitat total.



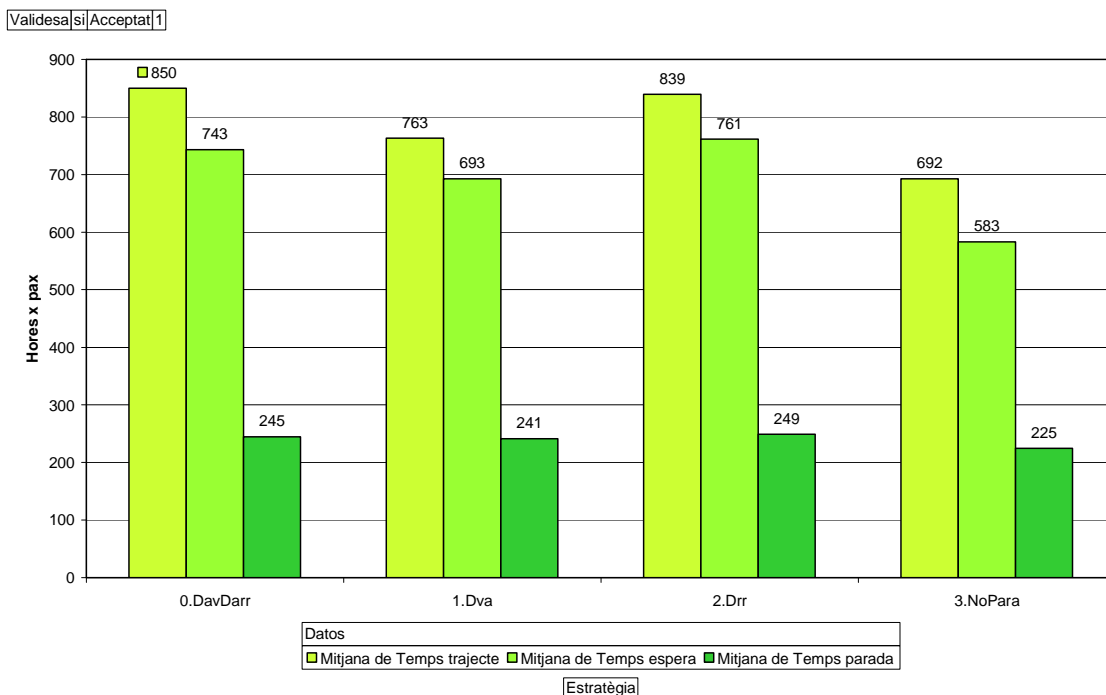
**Figura 21. Mitjanes dels temps destinats a cada operació en funció de les estratègies utilitzades, sense filtrar les dades.**

Si veiem el mateix gràfic però només amb l'estratègia de no parada a les parades quan l'autobús es troba ple, ens trobem en una situació paradoxal, ja que arriba un punt en que se satura la línia i ja no recull a més persones, i per tant el temps d'espera és de l'ordre de mil vegades més gran que el temps de circulació. Podem entendre que no es pot operar una línia d'autobusos sota certes condicions, degut a que les pertorbacions s'han amplificat, provocant un bunching generalitzat, o un col·lapse del sistema.



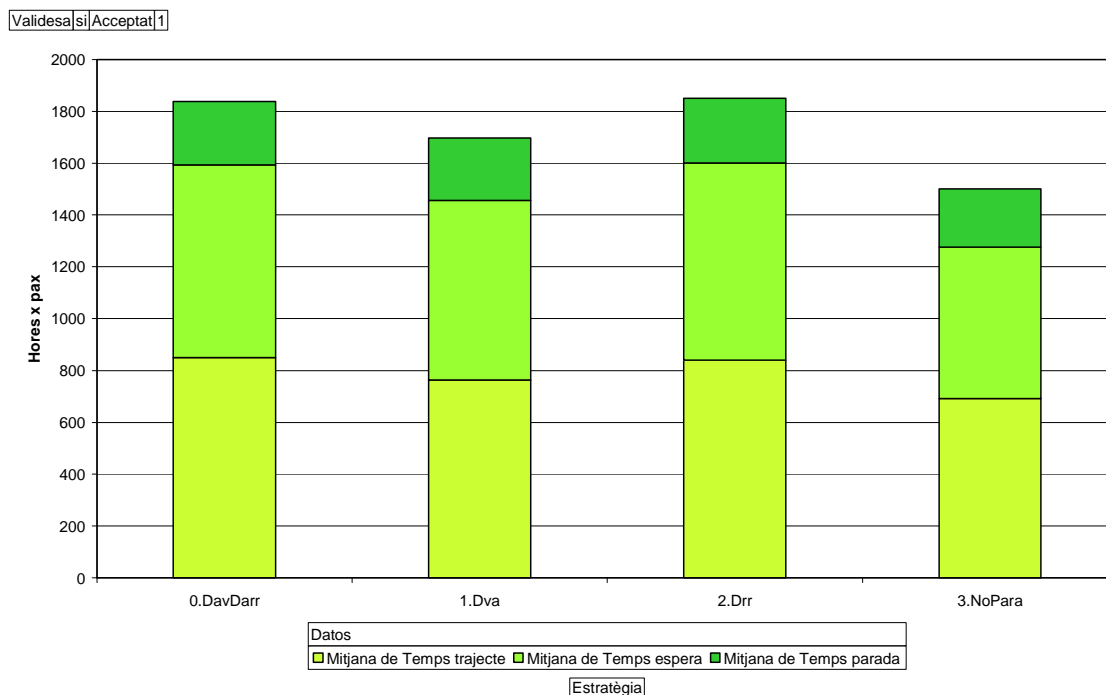
**Figura 22. Mitjanes dels temps de cada operació en funció de l'estratègia 3.NoPara, sense filtrar les dades.**

En canvi si filtrem les dades i n'extraïem les que el seu temps d'espera és superior al doble del temps de circulació o trajecte obtenim uns primers resultats que ja ens poden anar apuntat cap quina de les estratègies pot obtenir bons resultats en termes de temps.



**Figura 23. Mitjanes dels temps de les operacions en funció de les estratègies, amb les dades filtrades.**

I també observant la suma de la mitjana dels temps sense ponderar també:



**Figura 24. Mitjanes dels temps de les operacions en funció de les estratègies.**

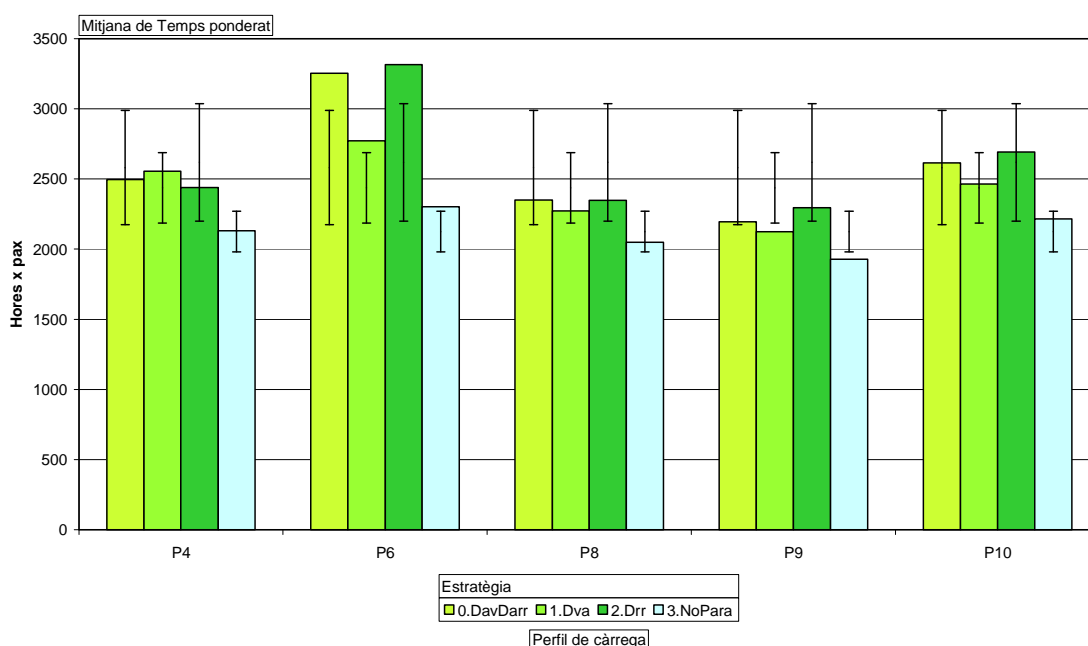
### 8.1.1 Temps ponderat - Perfil de càrrega

Si fem un anàlisi del temps ponderat, en funció dels paràmetres que hem anat variant podrem veure com es comporta cada una d'elles. Aquí podem veure que el sistema serà molt sensible en funció del perfil de càrrega que tingui la línia en qüestió, és a dir que per portar el mateix nombre de gent tindrem temps total molt diferents. Això és degut a que tot i que el nombre de gent total que hem de transportar en tots els perfils utilitzats és el mateix, són completament diferents les distàncies a recórrer i és clar que a més distància a recórrer més temps de circulació.

La clara guanyadora és la estratègia de no parar a les parades (3.NoPara), tot i que no sempre serà possible aplicar aquesta estratègia degut a la incomprensió que pot produir a les persones que s'estan esperant. També podem observar que segons el perfil tipus de perfil que tinguem és millor usar un tipus o d'altre d'estratègia. Així podríem resoldre que amb un perfil tipus 4 seria millor aplicar l'estratègia 0.DavDarr o bé la 2.Drr que la 1.Dav, en canvi en el perfil tipus 6 la situació és a la inversa.

També podem observar la desviació estàndard a l'1% de la mitjana del temps ponderat segons cada estratègia, i es pot veure que la que presenta menys dispersió és l'estratègia 3.NoPara. Reafirmant-se com la que millors resultats presenta en aquest sentit, ja que vol dir que té un comportament semblant en tot tipus de perfils de càrrega, en canvi les altres estratègies es veuran més afectades segons el tipus de perfil que tingui la línia en concret. De fet si per algun motiu no es pogués aplicar l'estratègia òptima (3.NoPara) hauríem d'esbrinar quin tipus de línia és la nostra per a escollir la millor estratègia de les altres tres, perquè si només ho mirem en funció del temps ponderat, depèn del perfil obtindrem millors prestacions amb l'estratègia 1.Dva i en canvi si ens trobéssim davant d'un perfil del tipus P4 seria més adient usar un dels altres dos tipus d'estratègies proposats.

Validesa | si | Acceptat | 1



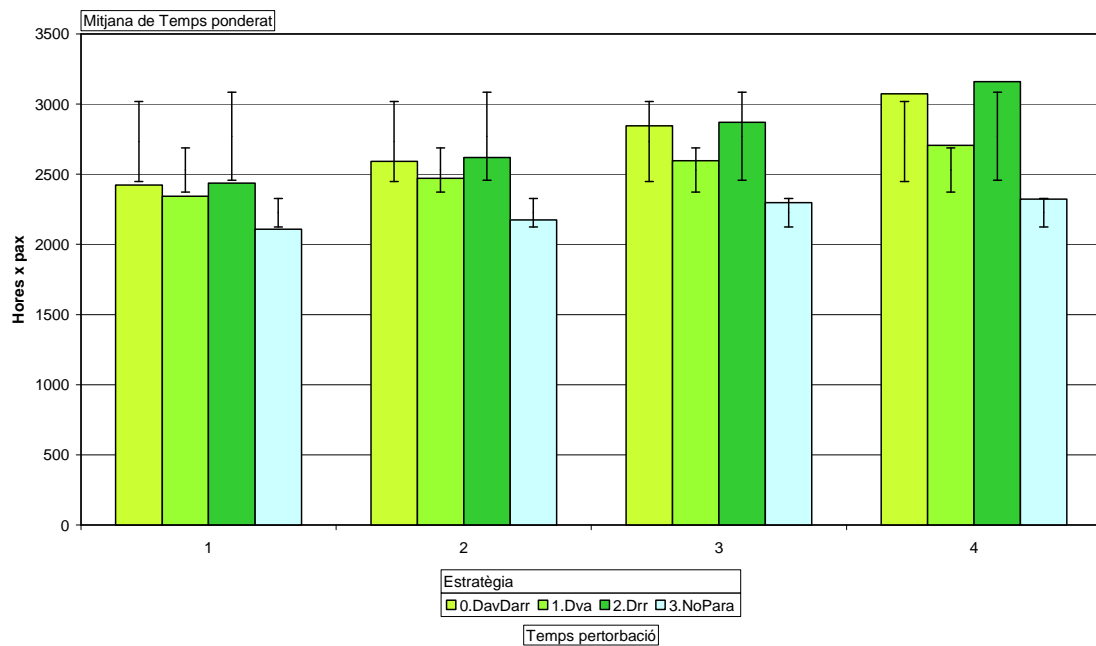
**Figura 25. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i perfils de càrrega.**

### 8.1.2 Temps ponderat - Temps de pertorbació

Si fem la comparació de les diferents estratègies en funció de la durada de la pertorbació, es pot veure el cost tant gran que té en termes de temps una pertorbació al servei. Així podem veure que produint-se una sola pertorbació d'un minut, o una de quatre minuts, el que es produeix és un increment molt gran del temps mitjà ponderat, recordem que és el temps dels mitjà destinat als set cicles d'estudi i les seves unitats són hores x persones.

També es veu que l'estratègia que torna a donar millors resultats és la 3.NoPara, ja que és capaç d'esmoreir la pertorbació i no resultar gaire afectada.

Validesa | si | Acceptat | 1



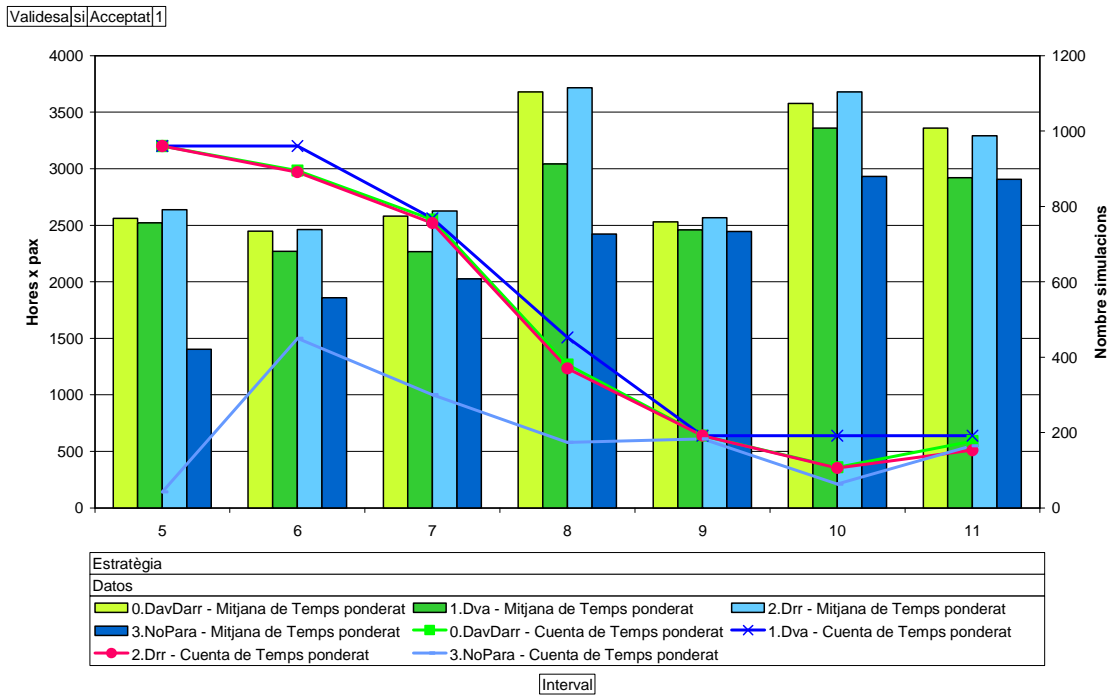
**Figura 26. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i temps de pertorbació.**

### 8.1.3 Temps ponderat – Interval

Aquí podem observar un comportament peculiar, ja que la mitjana del temps de la que a priori és la millor estratègia que és la de 3.NoPara, obté uns resultats substancialment molt millors que les altres tres, però també hem de dir que aquests són els resultats un cop filtrades les dades i si observem les línies ens indiquen el nombre de simulacions que hem tingut en compte per a fer els càlculs, i és clar que el que ha passat és que han sortit uns resultats molt esbiaixats, degut a que l'estratègia de no parar a les parades amb línies d'alta freqüència (5, 6, 7 min. d'interval) o té bon comportament o té un comportament molt dolent, i la transició d'un comportament estable a un altre d'inestable presenta un equilibri molt precari. Per això podríem dir els resultats que presentem a continuació s'han de mirar amb molt de compte.

Si observem el comportament de les línies de freqüència més baixa veiem que la tria ha estat similar i la comparació llavors és més factible i podem resumir com en les comparacions anteriors que en termes del temps ponderat tenim una estratègia més bona que és la 3.NoPara.



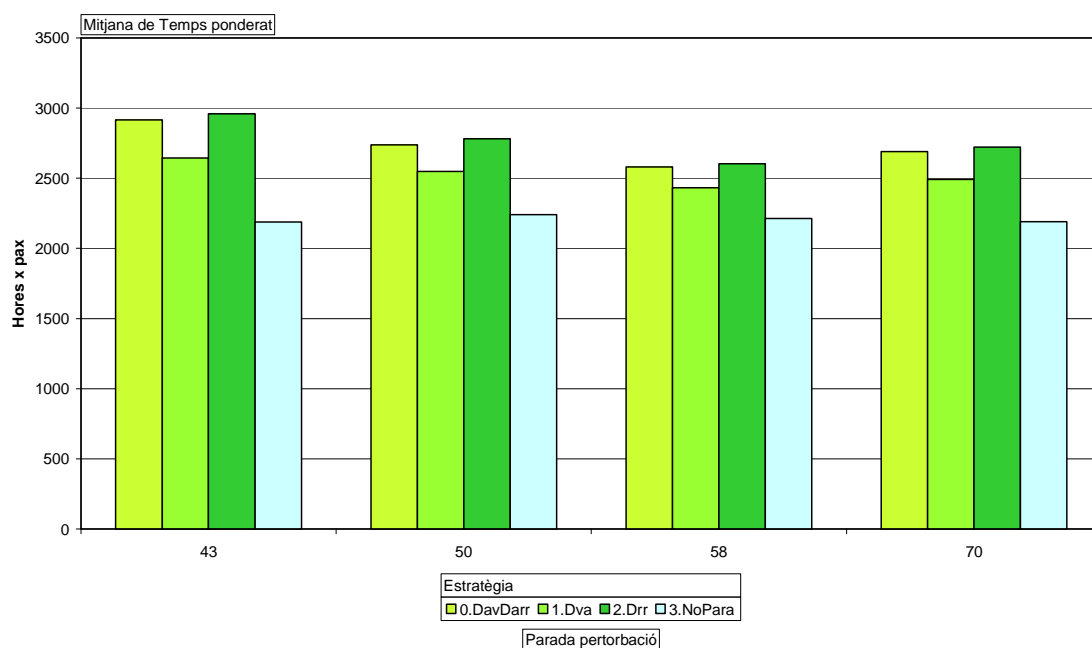


**Figura 27. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i intervals de pas i amb el nombre d'estratègies simulades en cada cas.**

#### 8.1.4 Temps ponderat – Parada en la que es produeix la pertorbació

Aquí comparem el temps segons les quatre parades on es produeix la pertorbació. Les parades escollides representen cada una un punt de línia diferent, en el sentit que la parada 43 és al principi de la línia, la 50 a la meitat del trajecte d'anada, la 58 al final del trajecte d'anada del primer cicle i la parada 70 és a la meitat del trajecte de tornada del primer cicle. Es pot observar que sí que té importància el punt on es produeixi la pertorbació. Si aquesta es produeix més a prop d'un punt de control (origen o final de línia) el sistema és més capaç d'absorbir les variacions i reduir els efectes de la mateixa. podem veure també que la que presenta menys sensibilitat respecte al lloc on es produeixi és la 3.NoPara. Per tant, des del punt de vista del gestor de la línia, com que no pot preveure amb certesa on es produiran les pertorbacions en cas de produir-se, obtindrà temps menors aplicant l'estratègia 3.NoPara.

Validesa|si|Acceptat|1

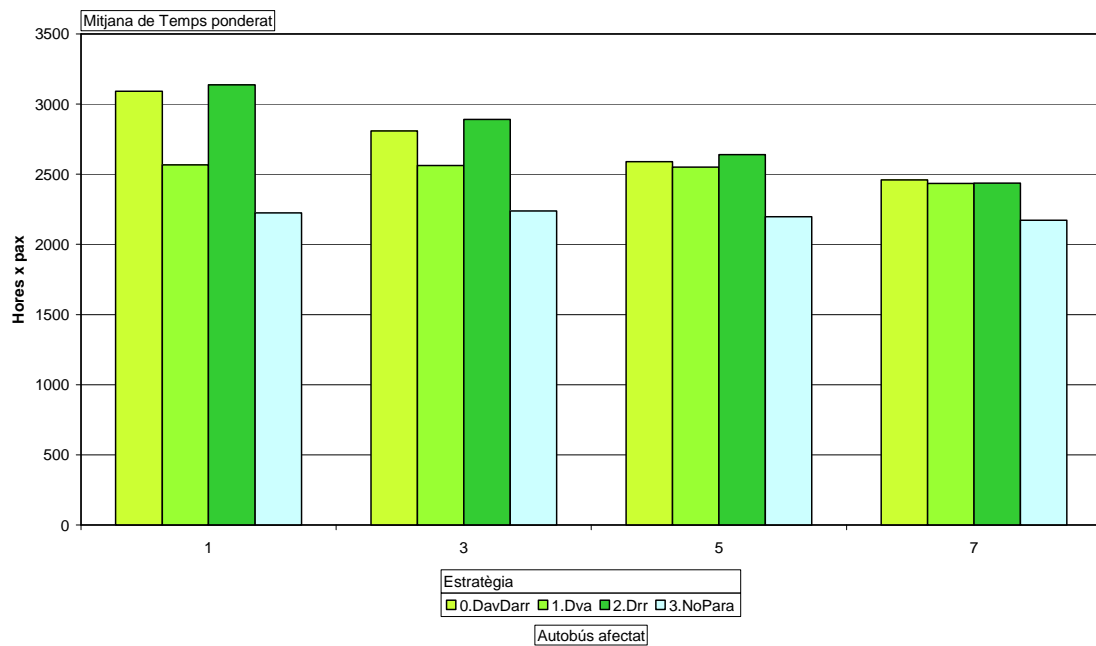


**Figura 28. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i la parada on es produeix la pertorbació.**

### 8.1.5 Temps ponderat – Autobús afectat

El funcionament del sistema, que és un sistema cíclic, ens hauria de fer veure que l'etiquetatge de l'autobús afectat no hauria de tenir cap importància ni provocar diferències de temps ponderat. Però com es pot extreure de l'observació del següent gràfic sí que hi tindrà a veure. No tant aplicant les estratègies 1.Dva i 3.NoPara, on les diferències són mínimes, com sí en les altres dues.

Validesa|si|Acceptat|1

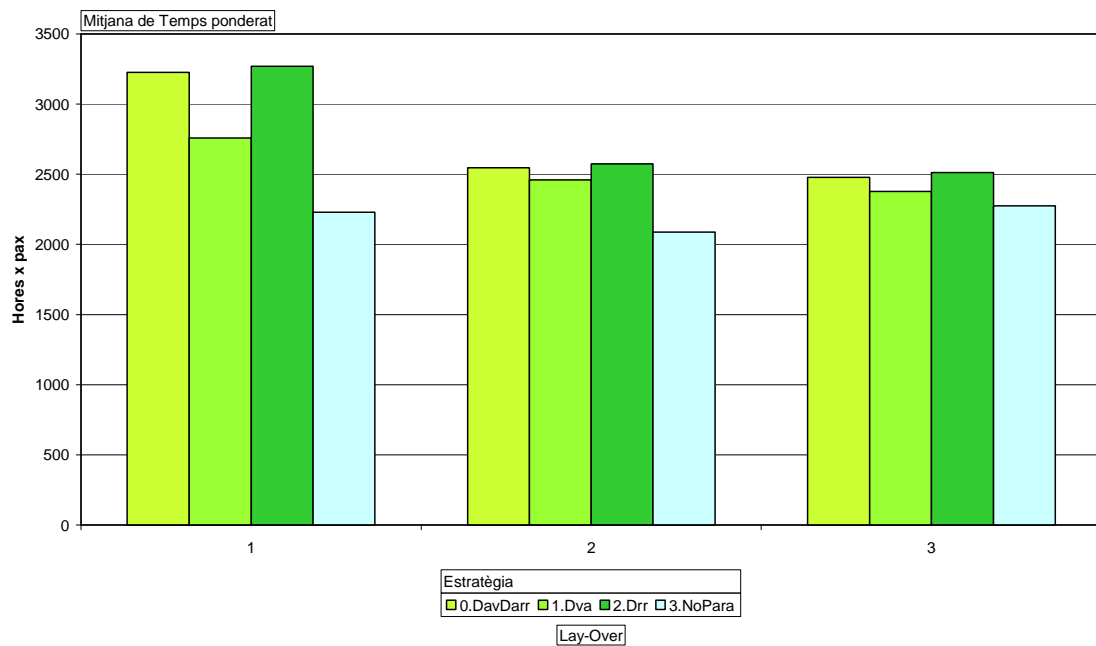


**Figura 29. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i l'autobús afectat.**

### 8.1.6 Temps ponderat - Temps de Lay-Over

Aquí es pot veure que amb temps més gran de Lay-Over la resposta del sistema serà més bona, clarament degut a que el Lay-Over és com un coixí de temps que tenim a l'origen de cada cycle i en cas necessari s'usa per a esmorteir les demores que tenen cada un dels autobusos.

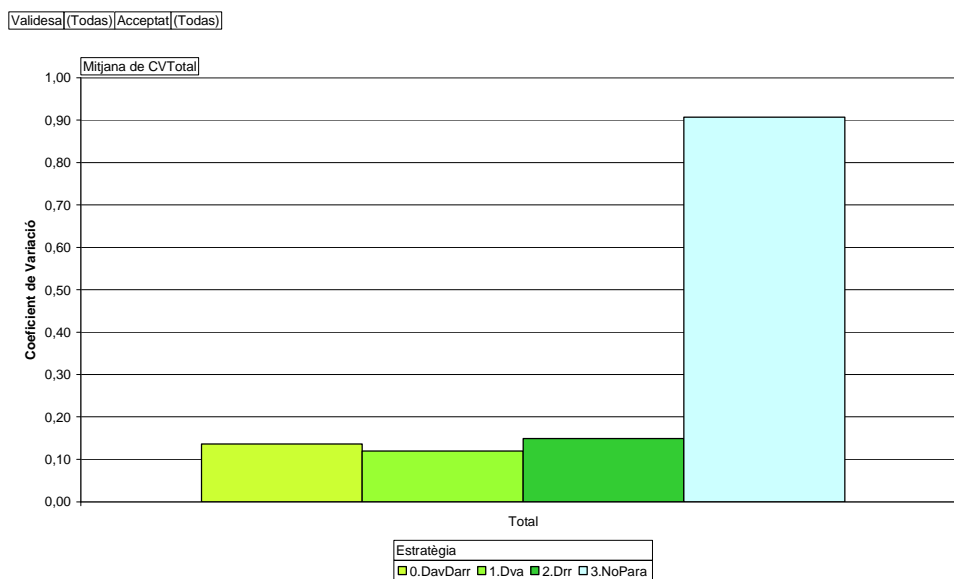
Validesa|si|Acceptat|1



**Figura 30. Mitjanes dels temps ponderats, classificats per estratègies i Lay-Over.**

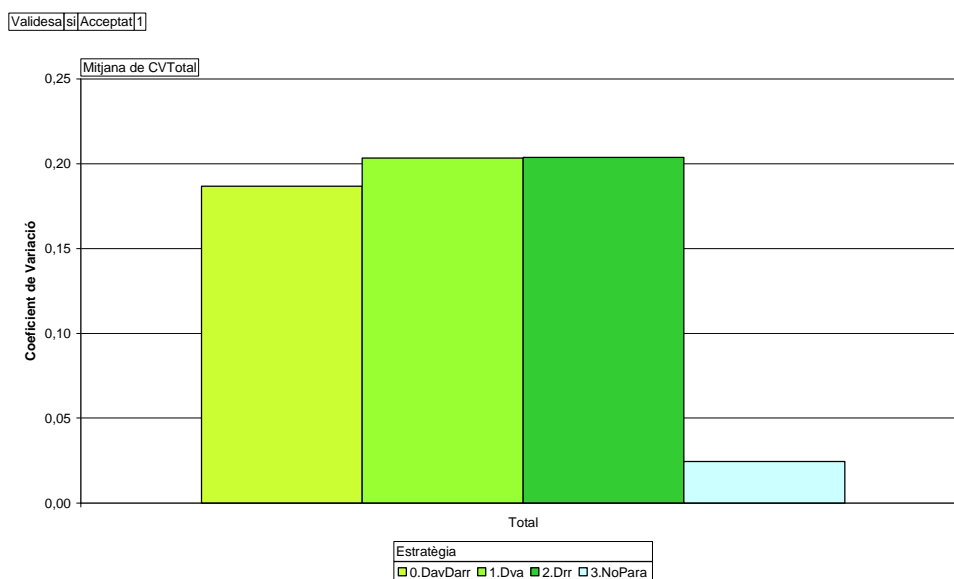
## 8.2 Anàlisi del Coeficient de Variació

Recordar sobretot que el CV serà la mesura que ens servirà per a determinar la regularitat dels intervals de pas. Primer mostrarem el conjunt de les dades sense filtrar per a comprovar que realment és necessari realitzar el mateix amb els mateixos termes que amb anterioritat. Podem observar que l'estratègia 3.NoPara presenta un funcionament del autobusos molt irregular



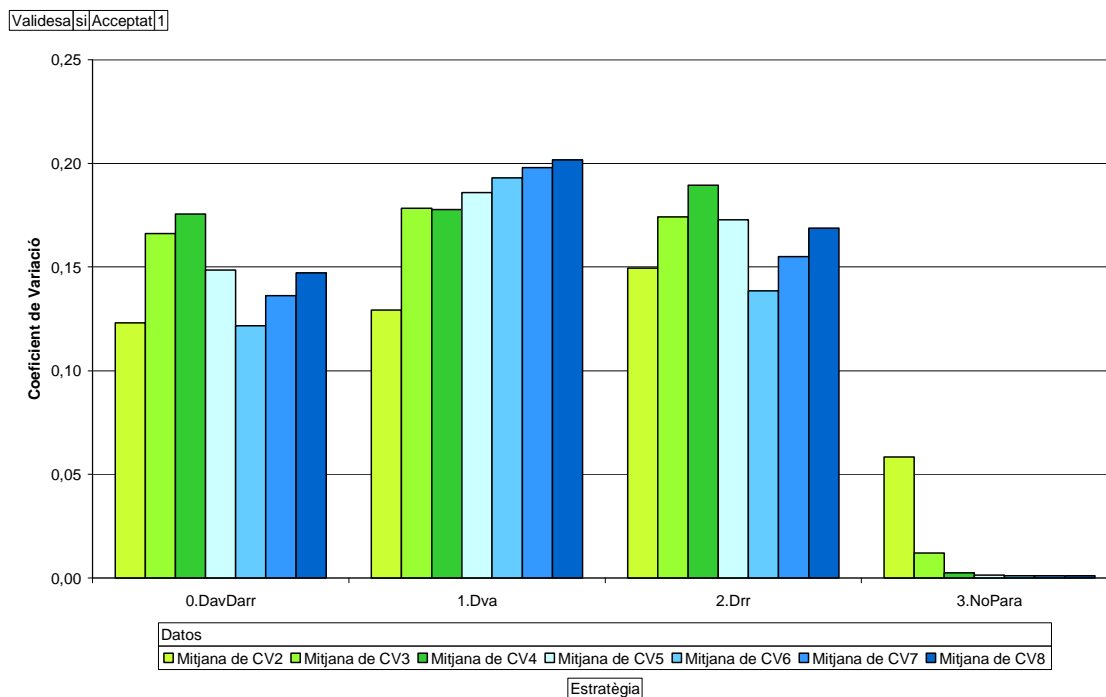
**Figura 31. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de les estratègies i les dades sense filtrar.**

Però si tornem a escollir bé les dades a analitzar observarem com es giren els papers i podem comprovar que en termes globals de CV i que ens presentarà millor regularitat serà l'estratègia 3.NoPara.



**Figura 32. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de les estratègies amb les filtrades.**

Aquí es pot observar l'evolució que té el CV al llarg dels diferents cicles, i també es pot observar com amb l'estratègia 3.NoPara, a partir del segon cicle ja obté una regularitat més que notable, és a dir que aconseguix no reproduir al llarg del temps la pertorbació que s'ha produït.

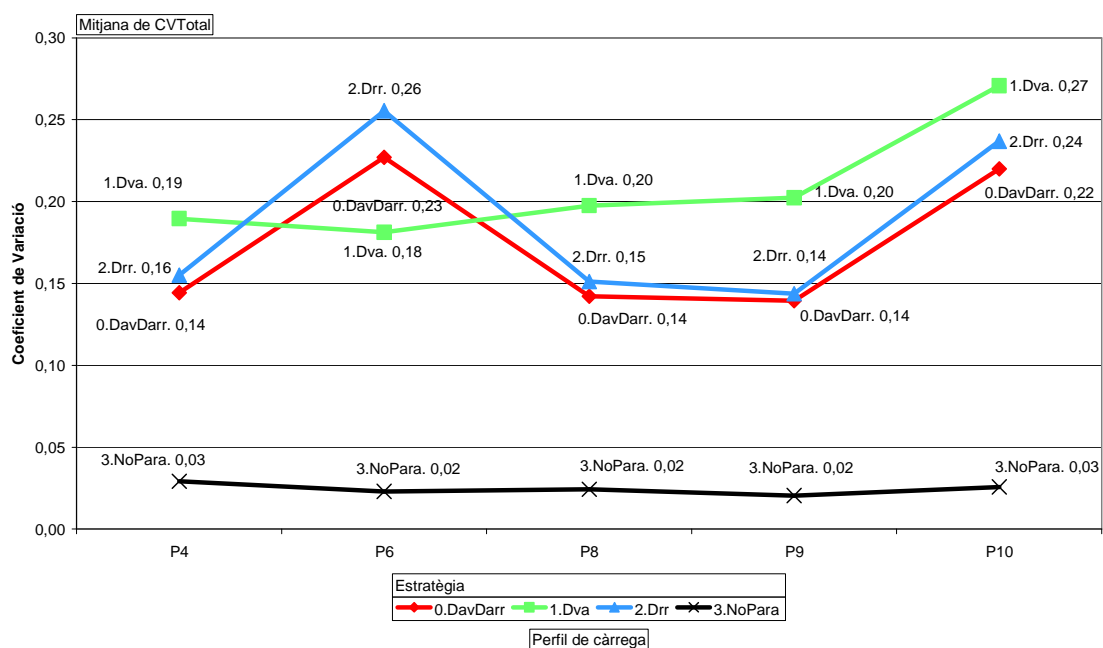


**Figura 33. Mitjanes dels coeficients de variació en cada cycle calculat en funció de les estratègies.**

### 8.2.1 Coeficient de variació – Perfil de Càrrega

A l'observar el coeficient de variació segons els perfils de càrrega utilitzats podem veure que l'estratègia 3.NoPara és la que presenta millor regularitat i que no es veu tant pel tipus de perfil que hi intervingui. En canvi les altres estratègies a més de tenir pitjor regularitat (tot i que amb valors acceptables), sí que presenten variacions segons els perfil introduït. Així podem observar que les estratègies 0.DavDarr i 2.Drr tenen un comportament similar, presentant resultats millors que l'estratègia 1.Dva en tots el perfils excepte en el perfil P6, on l'estratègia que obté millors resultats (exceptuant la 3.NoPara) és la 1.Dva, possiblement degut a aquest perfil presenta una demanda i descàrrega molt similars a totes les parades i la propagació de les pertorbacions, que si no hi féssim cap actuació es transmetrien aigües avall, les aconseguim disminuir en global pel fet de distribuir-les també aigües amunt. Per tant podríem dir que per línies de perfil molt constant no seria una mala opció en termes de regularitat.

Validesa | si | Acceptat | 1



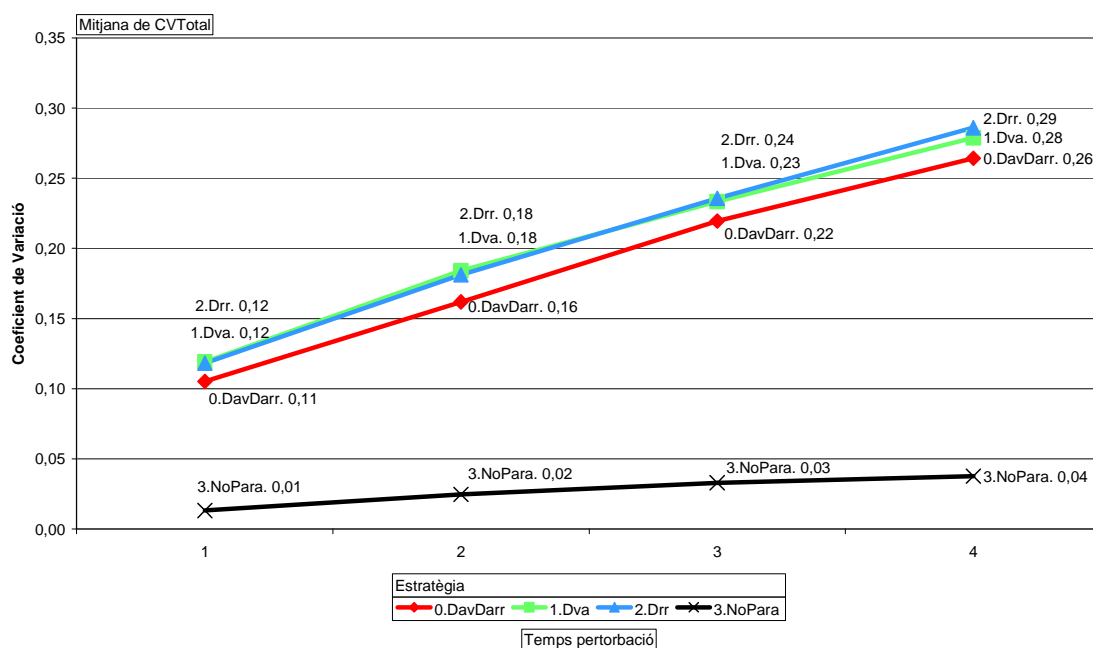
**Figura 34. Mitjanes dels coeficients de variació en funció dels diferents perfils i les estratègies.**

### 8.2.2 Coeficient de variació – Temps de pertorbació

Un dels factors que marca una tendència més clara en la regularitat del intervals de pas és la durada de la pertorbació que hem induït, així es pot veure una relació lineal amb la durada de la mateixa. Com en els casos anteriors es poden veure lleugeres diferències en les estratègies que s'aturen en totes les parades i per tant no seria determinant usar un tipus o un altre.

Aquesta relació tant directa és senzilla d'entendre, degut a que si la pertorbació dura més, l'afectació en els intervals és més gran.

Validesa | si | Acceptat | 1



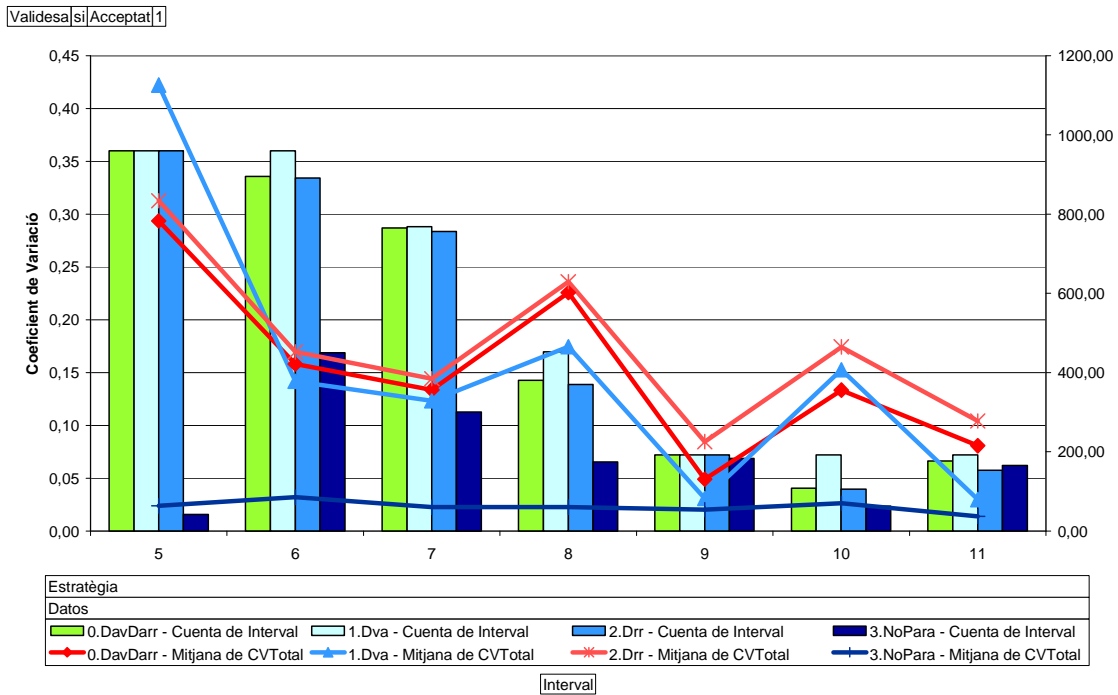
**Figura 35. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de l'estratègia aplicada i del temps de pertorbació.**

### 8.2.3 Coeficient de variació – Interval de pas

Aquí es pot veure una lleugera tendència de la obtenir millors valors de regularitat en funció d'interval de pas més grans, és lògic aquest comportament, perquè la relació pertorbació – interval de pas serà més petita.

En aquesta comparativa també hem d'anar en compte a l'hora de treure'n conclusions, ja que el nombre de simulacions que hem acceptat presenta diferències molt grans entre cada un dels interval de pas simulats. Així tenim que el nombre de simulacions acceptades a estat molt petit amb l'estratègia 3.NoPara i interval 5, en comparació a les altres estratègies, i en general, hem acceptat menys simulacions fetes amb aquesta estratègia segons el valor de l'interval.



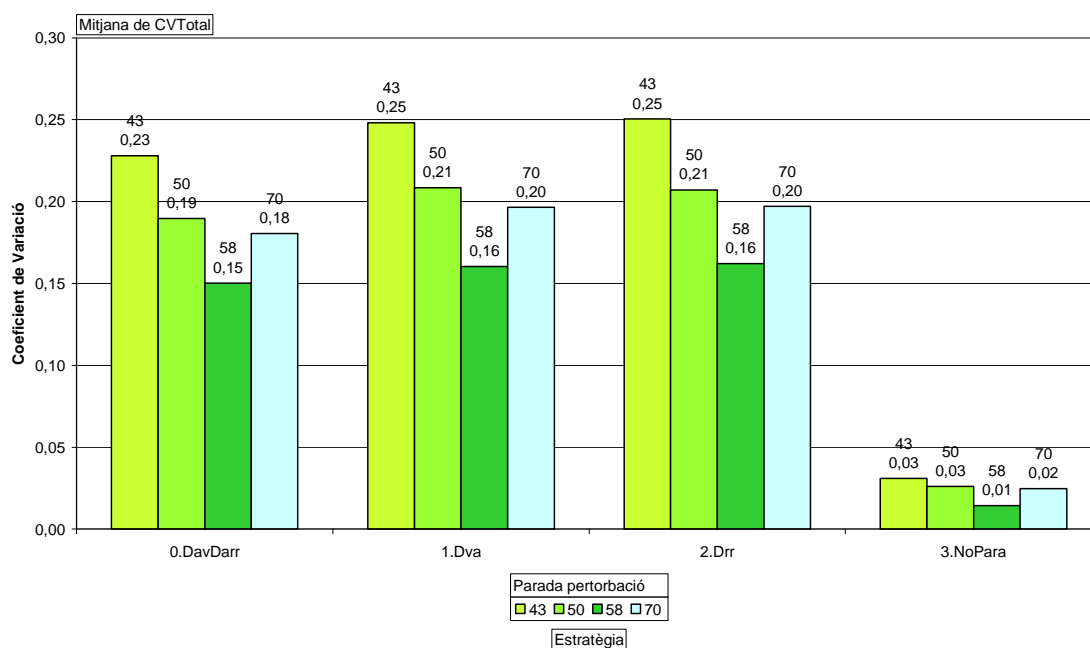


**Figura 36. Mitjanes dels coeficients de variació en funció dels diferents perfils i les estratègies**

### 8.2.4 Coeficient de variació – Parada en la que es produeix la pertorbació

La parada on es produeix la pertorbació també resulta determinant pel que fa a valors de regularitat, com ja hem explicat anteriorment cada una de les parades intenta representar un sector de la línia, així tenim que si la pertorbació es produeix a prop d'un punt origen o final, mirat des d'aigües avall, és més fàcil d'esmoreir-la. Si observem les diferències entre la parada 50 i la 70, que és troben cadascuna al punt mig entre l'origen i el final però cadascuna en un sentit oposat a la de l'altre, veiem que al trajecte d'anada es veu una mica més afectat, això es degut a que la taxa total de gent d'anada és el doble que en el sentit de tornada, i per tant no hi haurà tantes limitacions a l'hora de realitzar els moviments en les estratègies.

Validesa|si|Acceptat|1



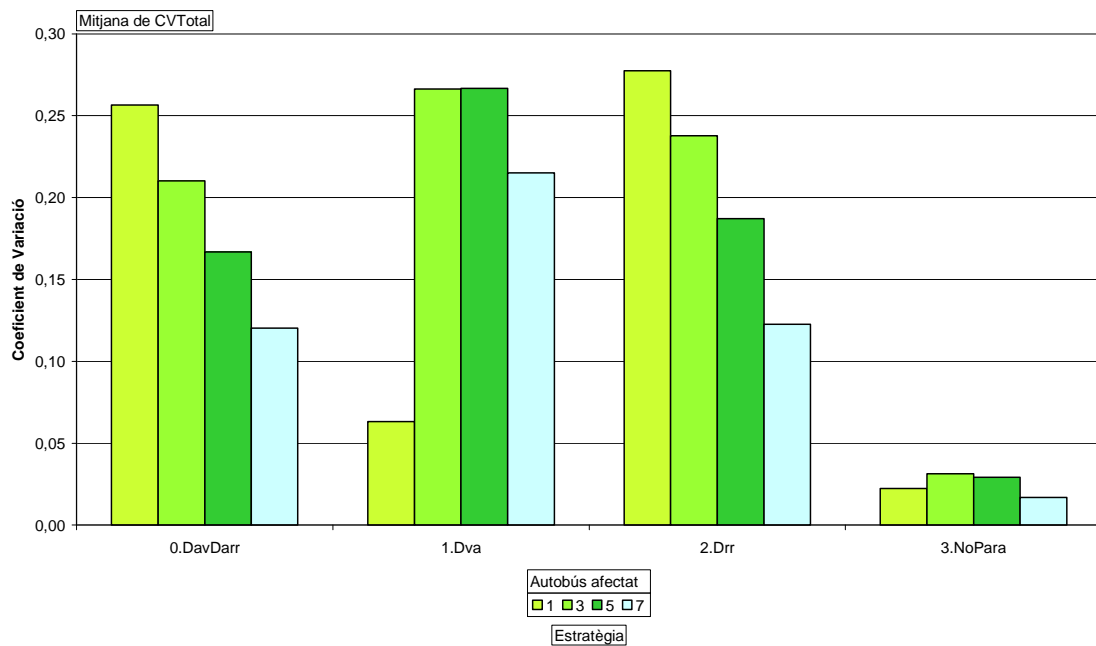
**Figura 37. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de la parada on es produeix la pertorbació perfils i les estratègies.**

### 8.2.5 Coeficient de variació – Autobús afectat

Tot i que no ens hauria d'afectar en els resultats l'autobús que té una pertorbació, veiem que sí que és representatiu, i amb comportaments diferents segons el tipus d'estratègia aplicada. així veiem que en l'estratègia 0.DavDarr

té un comportament molt similar a la 2.Drr i que es veuen menys afectades si la pertorbació es produeix en autobusos que surten més tard de cotxera.

Validesa | si | Acceptat | 1

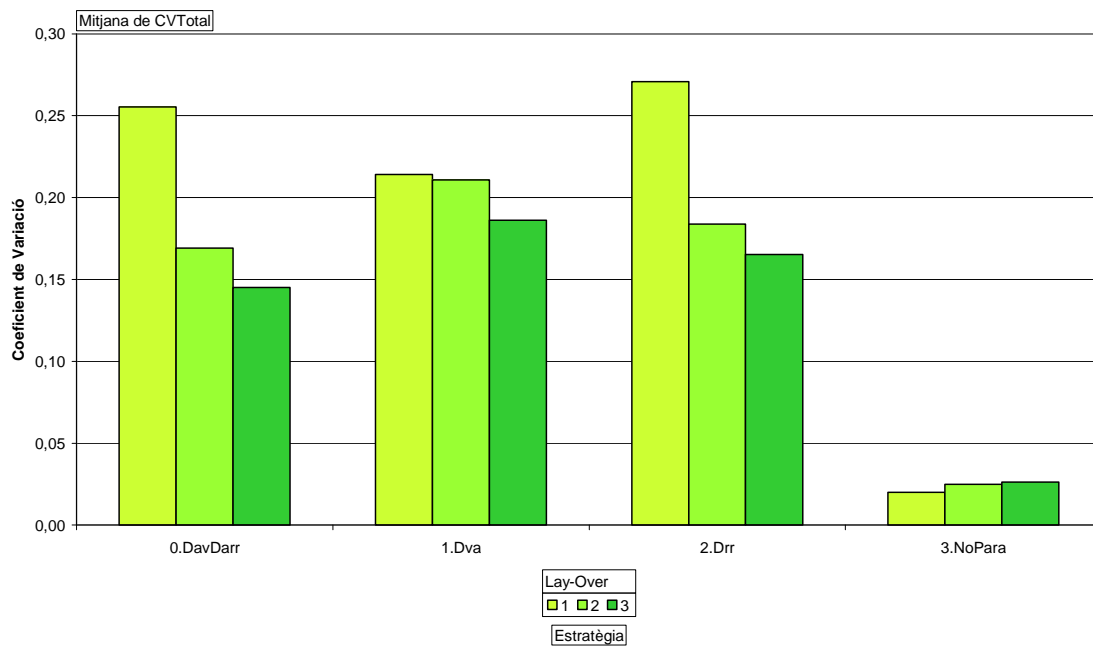


**Figura 38. Mitjanes dels coeficients de variació en funció de l'autobús que sofreix la pertorbació i les estratègies.**

### 8.2.6 Coeficient de variació – Lay-Over

Aquí també es poden veure resultats sorprenents ja que si per una banda tenim que les tres estratègies que es paren a totes les parades milloren, ni que sigui lleugerament, els resultats amb Lay-Over superiors. En canvi amb l'estratègia que obté millors resultats com en pràcticament tots els casos, veu com s'incrementa, també lleugerament, el seu coeficient de variació.

Validesa | si | Acceptat | 1



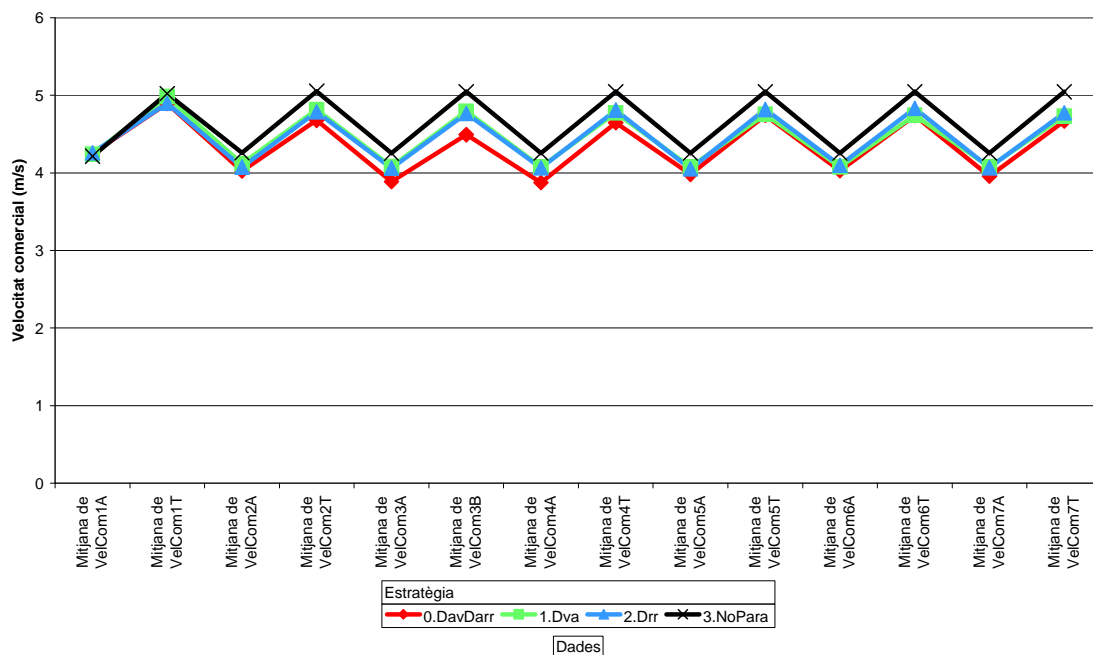
**Figura 39. Mitjanes dels coeficients de variació en funció del Lay-Over aplicat i les estratègies.**

### 8.3 Velocitat comercial

Un dels paràmetres de gran importància per un mitjà de transport, és evidentment el temps destinat a realitzar el trajecte complet. En aquest sentit es defineix la velocitat comercial com el quocient de la distància recorreguda entre temps comprès des del moment de pujar al vehicle fins al moment de baixar del mateix.

Aquí observem les diferents mitjanes de les velocitats comercials que s'obtenen en cada trajecte complet d'inici final, començant pel primer cicle anada i acabant per l'últim cicle tornada., com es pot veure les velocitats en els cicle de tornada és superior als d'anada, degut a que el nombre de gent que intervé en les operacions és inferior i per tant el temps en les operacions de càrrega i descàrrega també és inferior.

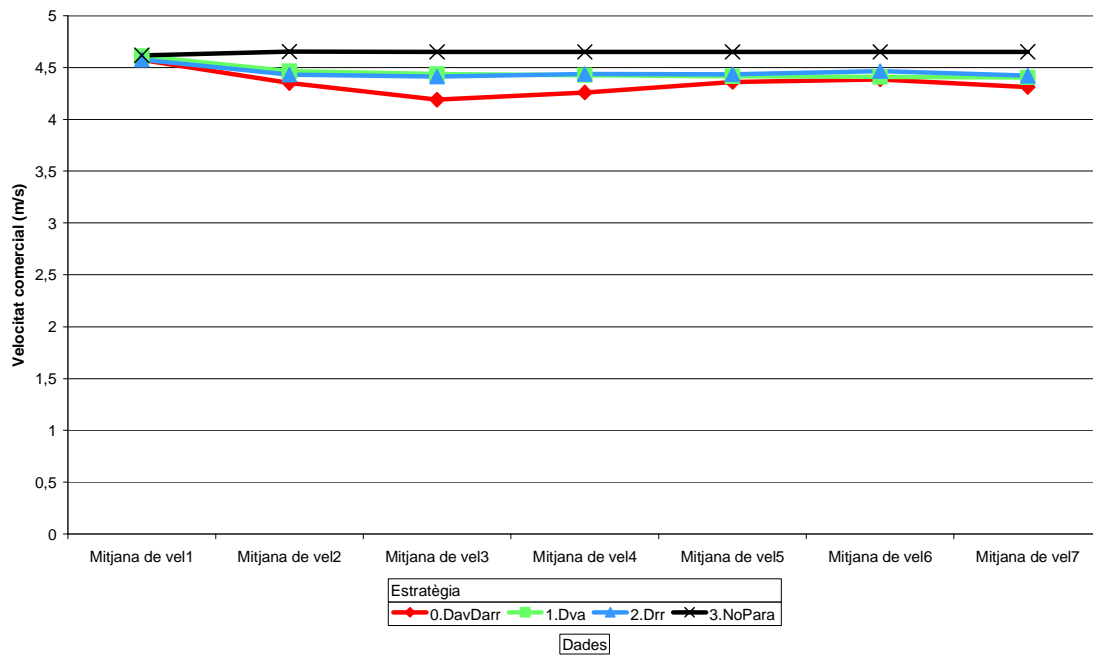
Validesa: si Acceptat: 1



**Figura 40. Mitjanes de la velocitat comercial de l'autobús 1 al final de cada semicicle.**

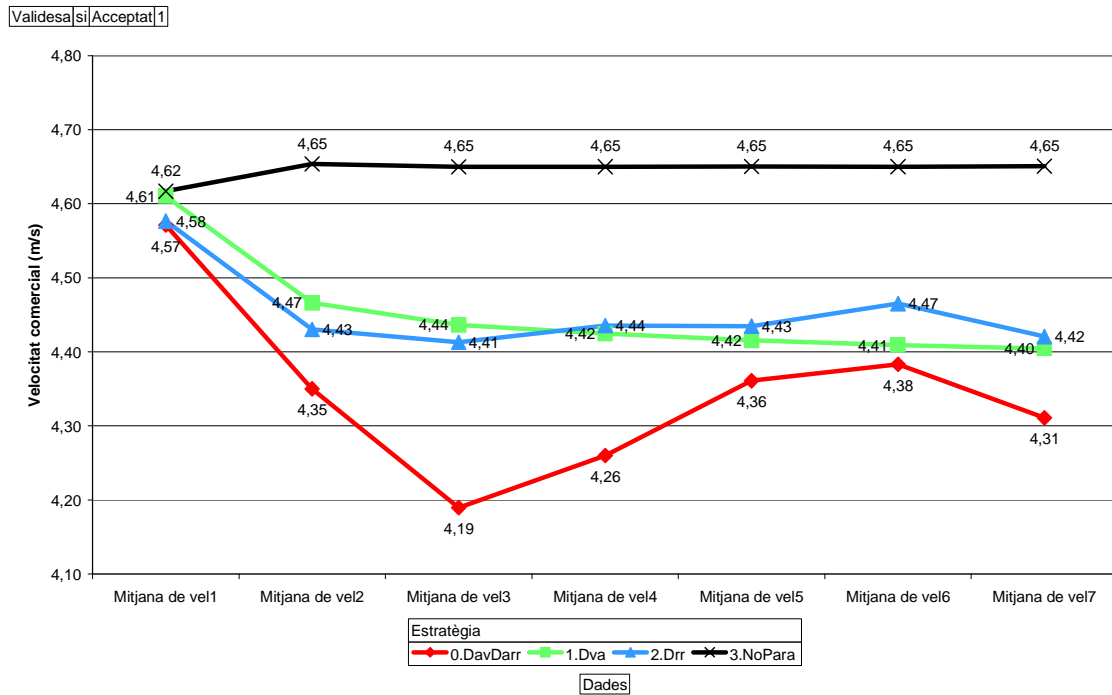
Si observem els mateixos resultats, però en comptes de calcular la velocitat per cada semicicle, prendrem la velocitat comercial mitjana del cycle complet. Amb aquesta escala d'eixos no es veu una diferència molt gran de velocitat entre els diferents cycles i que la velocitat sembla que s'estabilitza després d'uns quants cycles.

Validesa|si|Acceptat|1



**Figura 41. Mitjanes de la velocitat comercial de l'autobús 1 al final de cada cycle complet.**

Però si fem un canvi a l'escala de l'eix de la velocitat comercial veurem en més detall, que la pertorbació que en tots els casos sempre s'ha produït al primer cycle, continua afectant el funcionament del sistema, només si apliquem l'estratègia 3.NoPara s'aconsegueix una velocitat estable al llarg dels cycles. Amb les altres, la pertorbació es va reproduint i no aconseguim establir-se als valors màxims de la línia. Tenint en compte que la velocitat de circulació entre parades l'havíem fixat en 6,2 m/s, s'aconsegueix una velocitat comercial més que notable.

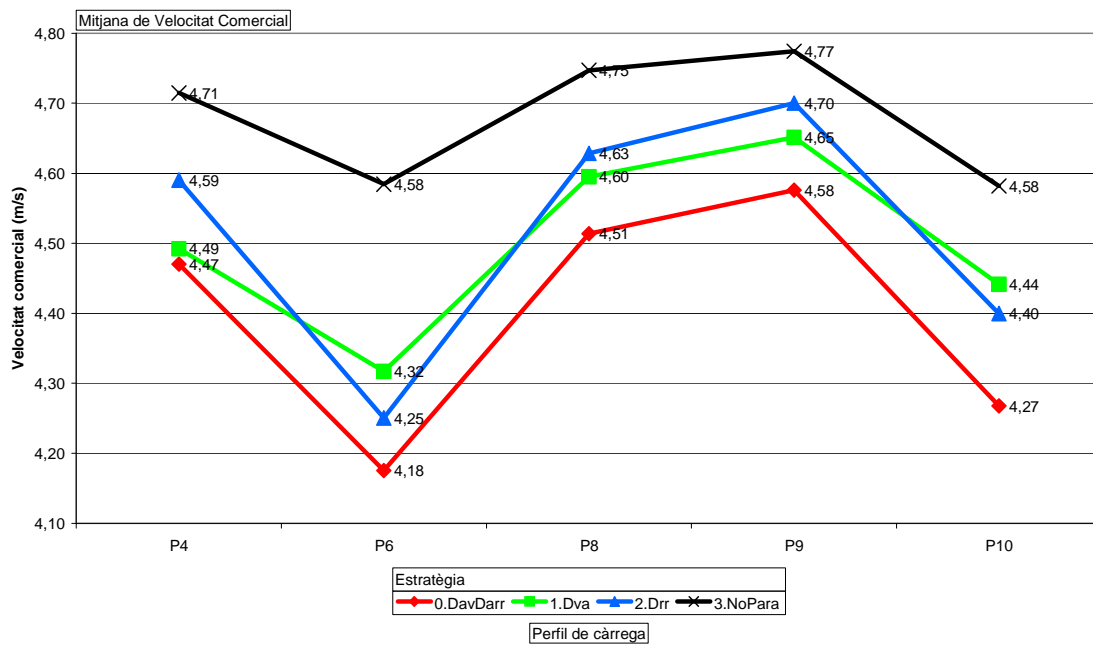


**Figura 42. Mitjanes de la velocitat comercial de l'autobús 1 al final de cada cycle complet.**

### 8.3.2 Velocitat comercial – Perfil de càrrega

Si observem la velocitat comercial en funció de cada perfil, es pot veure una relació bastant directa en funció de la càrrega de cada perfil. És a dir que en perfils més que estan més propers a límit de la seva capacitat i els que tenen parades amb demandes punta s'aconsegueixen velocitats més baixes, degut a que els temps en les parades s'incrementen. Comparant les diferents estratègies entre si s'observa que aplicant l'estratègia 3.NoPar s'obtenen les velocitats més altes, i que aplicant la 0.DavDarr s'obtenen les més baixes en tots els casos. Si haguéssim de discernir entre la 1.Dva i la 2.Drr, hauríem de veure en quin perfil ens trobem i el de la línia que sigui més semblant al que hem utilitzat aquí.

Validesa: si Acceptat: 1



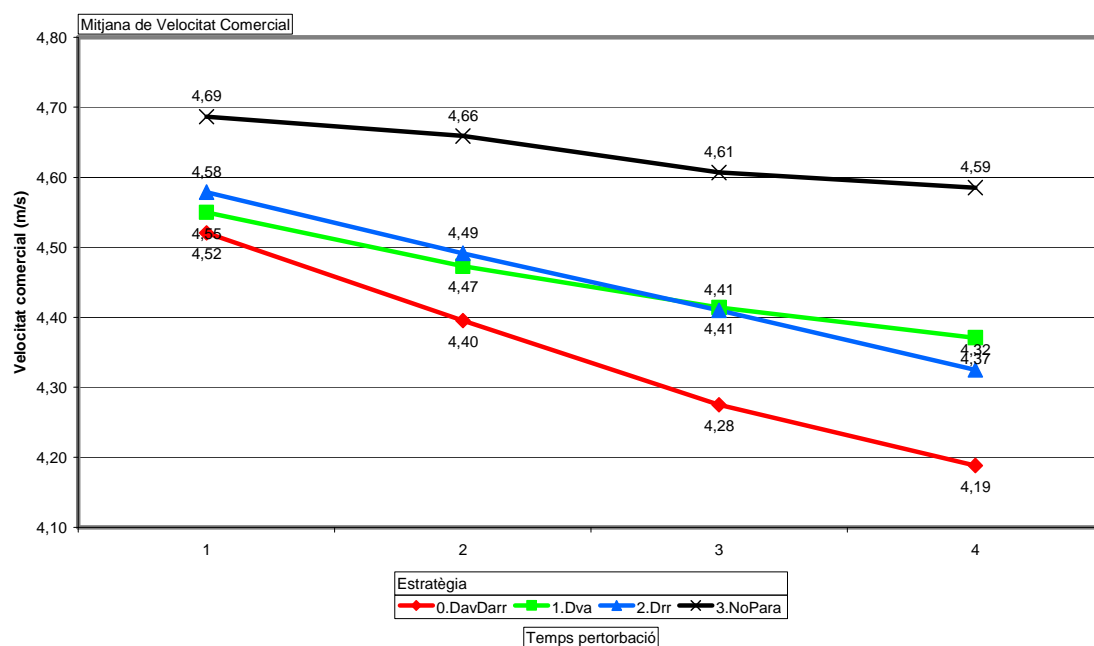
**Figura 43. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de cada perfil.**

### 8.3.3 Velocitat comercial – Temps de perturbació

Si comparem les diferents velocitat que s’obtenen en funció de dels temps de perturbació ens trobem amb uns resultats d’allò més lògics, confirmant la intuïció i veient que si la perturbació té més durada les velocitats són més petites.



Validesa: si Acceptat: 1

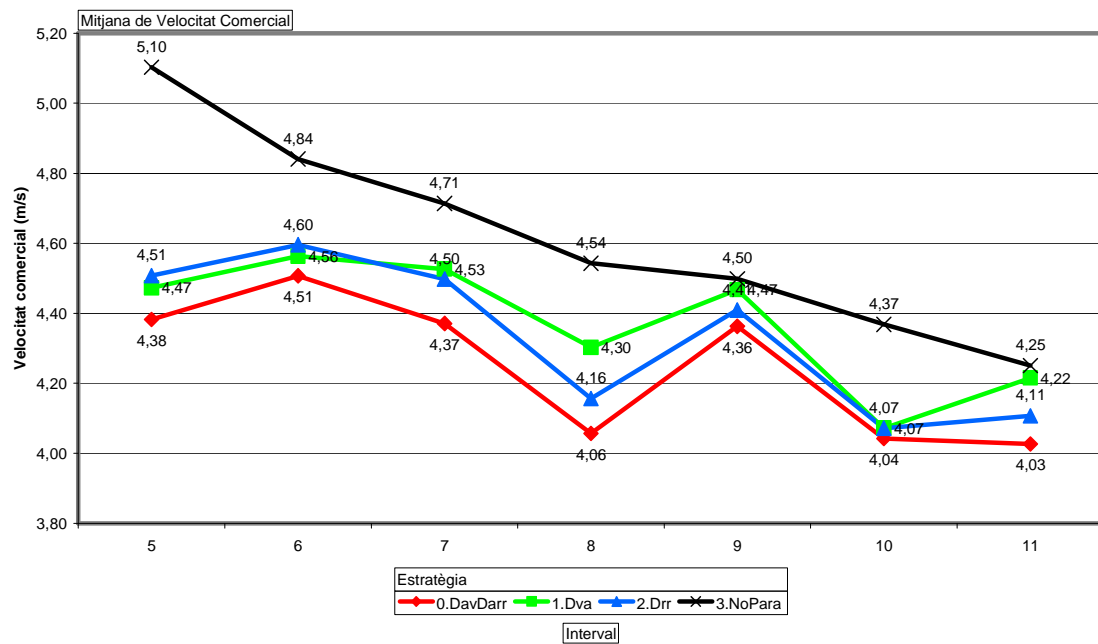


**Figura 44. Mitjanes de la velocitat comercial en funció del temps de pertorbació.**

### 8.3.4 Velocitat comercial – Interval de pas

La velocitat comercial es veu en termes generals incrementada per intervals de pas més petits, en totes les estratègies. La que té aquesta tendència més marcada és la 3.NoPara, ja que les altres presenten una velocitat no tant sensibles als intervals de pas, però amb alguns valors que es desmarquen d'aquesta tendència general. Així es pot veure com per intervals de pas de 9 minuts s'obtenen velocitats més altes que si els intervals de pas són de 8 minuts o 10 minuts. Pot ser degut a una coincidència amb la sincronització dels semàfors, que estan optimitzats per al pas de vehicles privats.

Validesa: si | Acceptat: 1

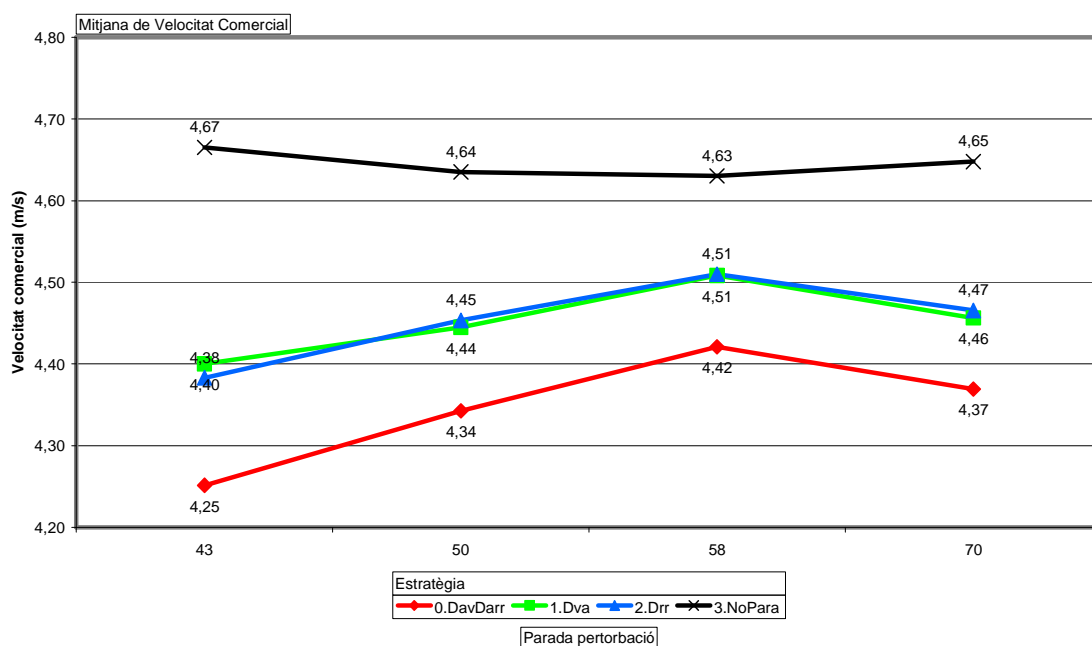


**Figura 45. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de l'interval.**

### 8.3.5 Velocitat comercial – Parada en la que es produeix la pertorbació

Com ja s'ha vist en la comparació del temps ponderat amb la parada en la que es produeix la pertorbació s'observen velocitats comercials més altes si les pertorbacions es produeixen més a prop d'un punt de control mirant des d'aigües avall. També podem comprovar que la parada 10 i 30 (respectivament la 50 i la 70) obtenen resultats equivalents, ja que es troben a la meitat de cada semicicle.

Validesa: si Acceptat: 1

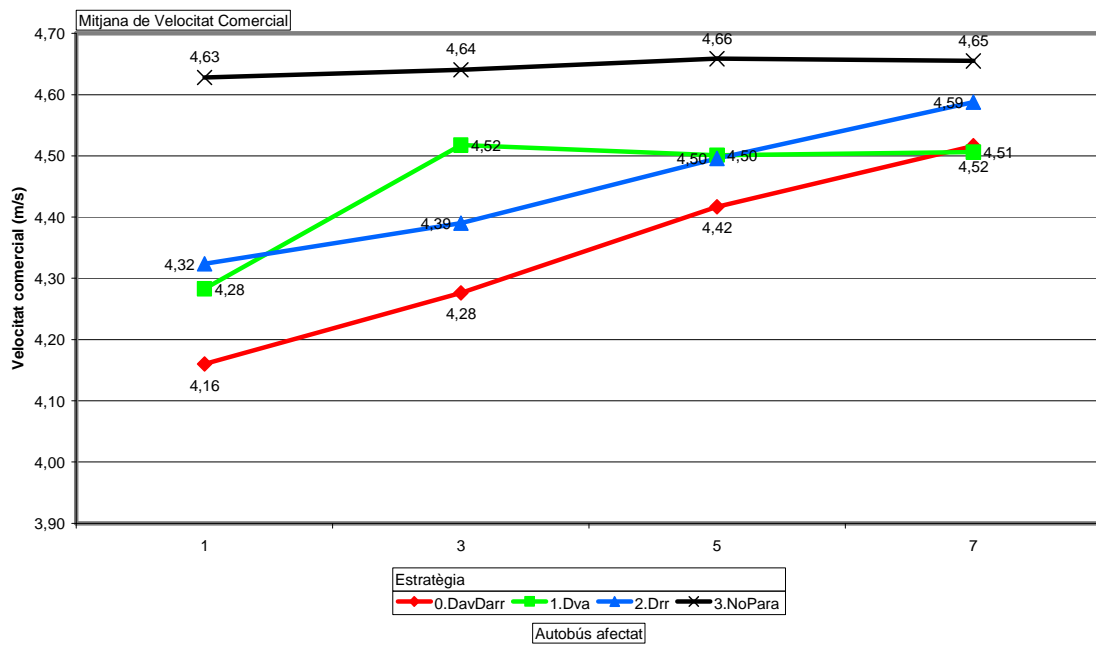


**Figura 46. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de la parada on es produeix la pertorbació.**

### 8.3.6 Velocitat comercial – Autobús afectat

Si l'autobús afectat és dels posteriors a sortir s'obtenen velocitats més altes, tot i que les diferències són molt petites. Podem dir també que l'estratègia menys sensible és la 3.NoPara, però també és destacable la no sensibilitat de l'estratègia 1.Dva que obté resultats molts similars sense tenir en compte a quin autobús és el que se li provoca la pertorbació. En termes generals la que aconseguix velocitats més baixes és la de 0.DavDarr.

Validesa: si | Acceptat: 1

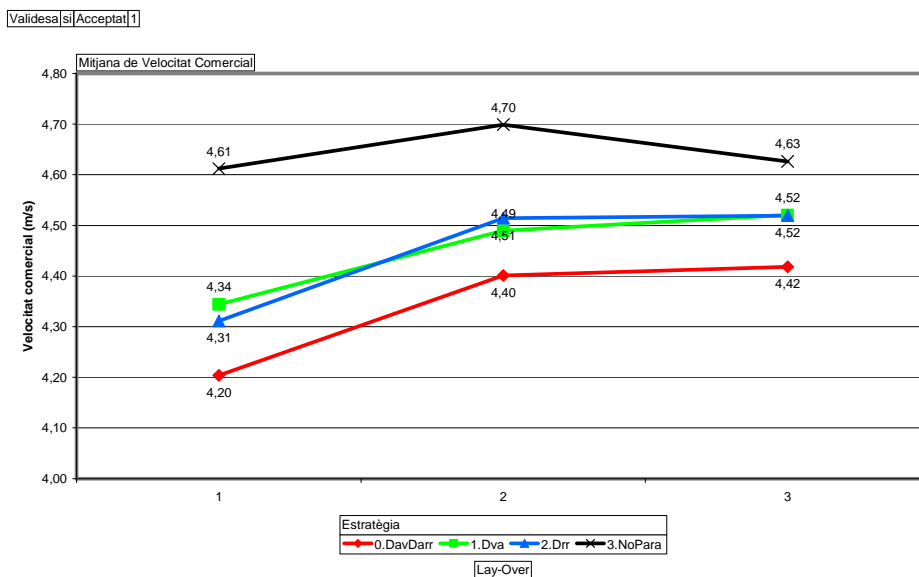


**Figura 47. Mitjanes de la velocitat comercial en funció de l'autobús afectat.**

### 8.3.7 Velocitat comercial – Temps de Lay-Over

El Lay-Over té poca importància en els resultats que s'obtenen i no es veuen diferències remarcables segons quin sigui la durada del mateix, pot ser degut a que hem agafat valors massa petits de Lay-Over.

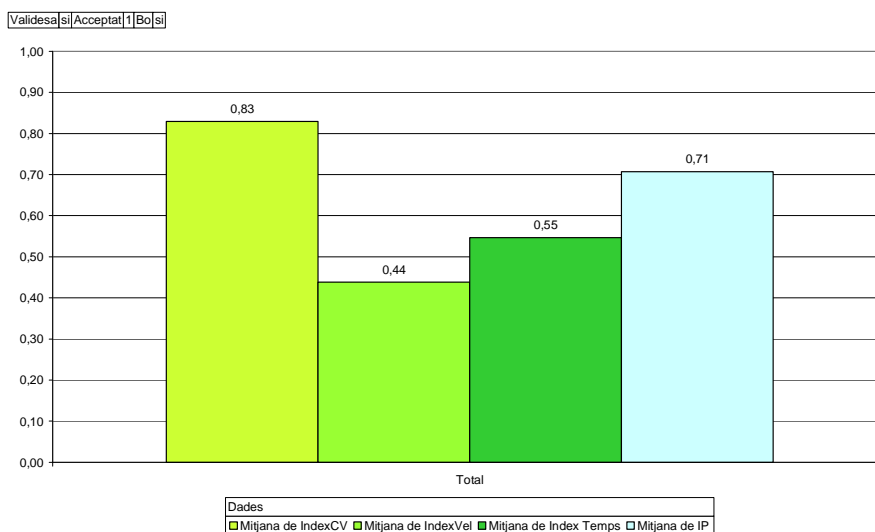
### 8.4 Indicador de prestacions



**Figura 48. Mitjanes de la velocitat comercial en funció del Lay-Over. Indicador de prestacions**

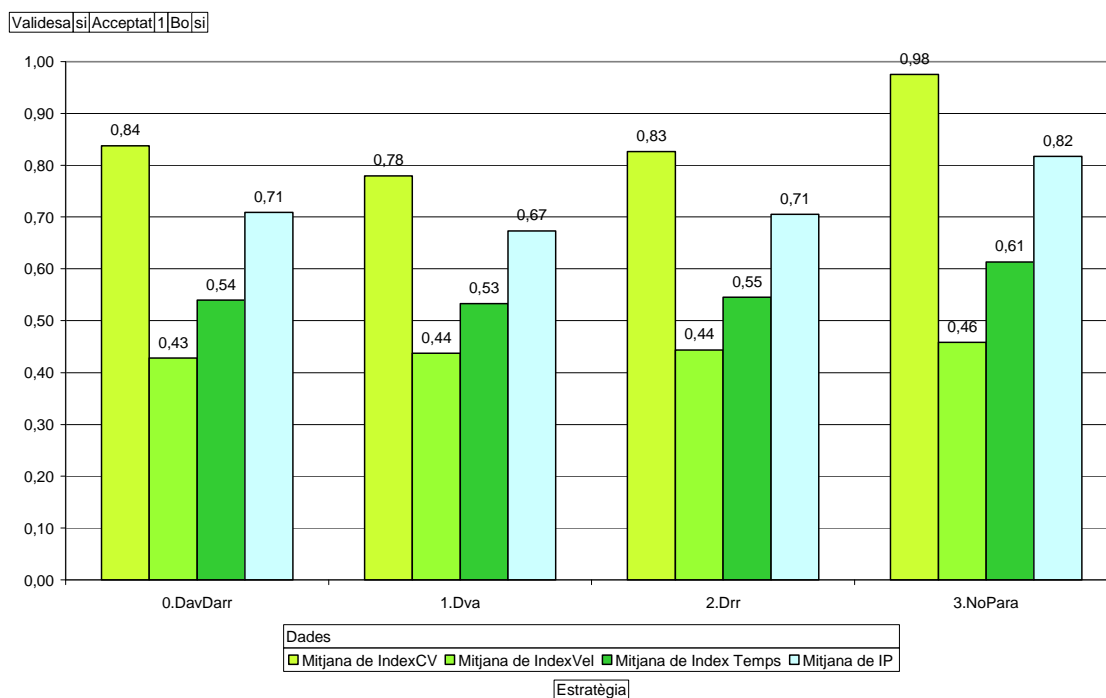
Per a obtenir un indicador que tingui en compte totes les variables considerades s'ha creat un indicador de prestacions. Si obtinguéssim un 1 en un d'aquest indicadors, es referiria a una escenari òptim, que obté el màxim de prestacions. Per entendre com es combina podem veure la següent figura, on es veu els valor que pern cada subíndex i un cop ponderats amb els pesos obtinguts pel mètode AHP.

Per a fer un resum general comentar que s'obtenen bons valors pel que fa a la regularitat, de fet les diferents estratègies anaven encaminades cap aquesta direcció, i no tant bons pel que fa als altres dos termes considerats.



**Figura 49. Mitjanes dels valors que prenen els índex.**

Si es fa una disgregació segons les diferents estratègies considerades, es pot veure que aproximadament tots obtenen índex de velocitat comercials similars, que tenen una mica més de diferències pel que fa a l'índex de temps ponderat i que on hi ha més diferències és en la regularitat. Així el que obté millors paràmetres de regularitat és l'estratègia 3.NoPara, tot i que com ja hem en repetides ocasions no sempre serà factible aplicar aquesta estratègia.



**Figura 50. Mitjanes dels indicadors segons les estratègies.**

#### 8.4.1 Indicador de prestacions – Perfil de càrrega

El que es pot extreure de la següent figura és que si decidim aplicar una estratègia per a obtenir una millora global no depèn del perfil de càrrega que tingui la nostra línia, és a dir, que en termes relatius la millora serà similar. Per tant si volem millorar en global no cal discriminar quina estratègia aplicarem però si volguéssim obtenir una millora en algun aspecte en concret s'hauria de comprovar què es el que volem millorar.

Validesa | si | Acceptat | 1 | Bo | si

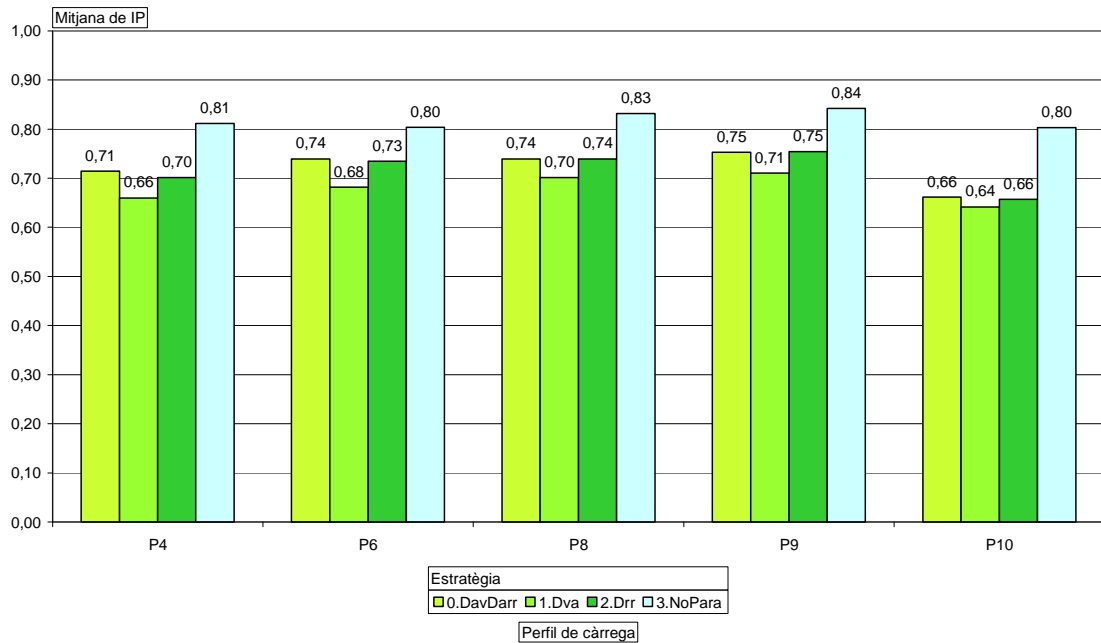


Figura 51. Mitjanes dels indicadors segons els perfils.

### 8.4.2 Indicador de prestacions – Temps de perturbació

Aquí es torna a veure que l'estratègia 3.NoPara és capaç d'esmorreir millor les perturbacions i no es veu gaire més afectada si la perturbació és més gran. En canvi les altres estratègies tenen una penalització superior en funció de la durada de la perturbació.

Validesa | si | Acceptat | 1 | Bo | si

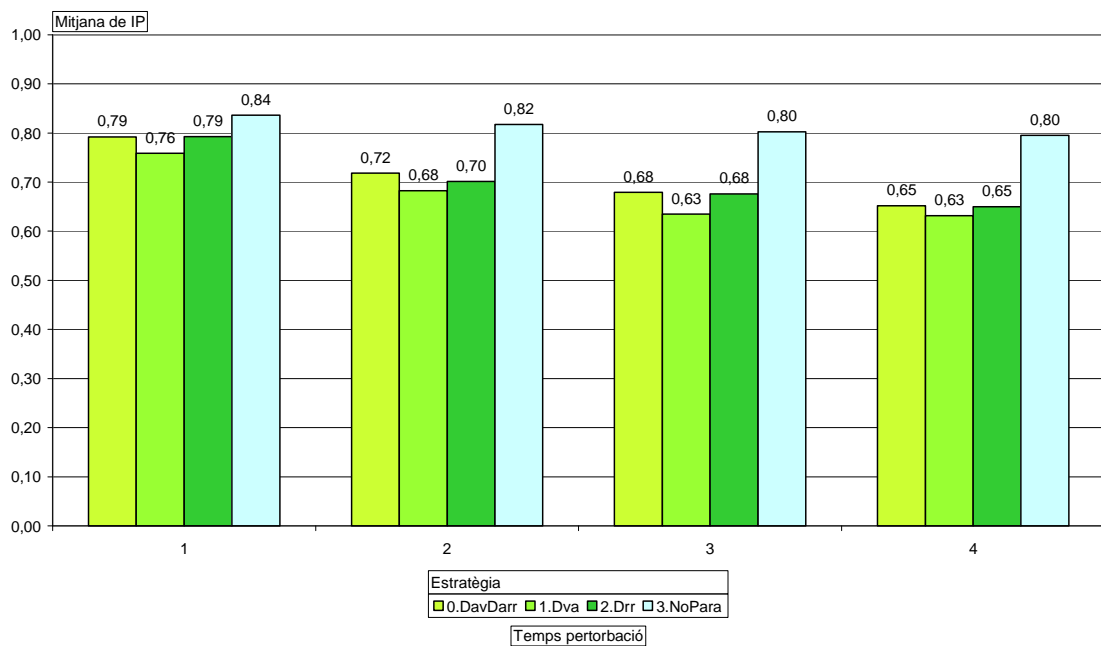
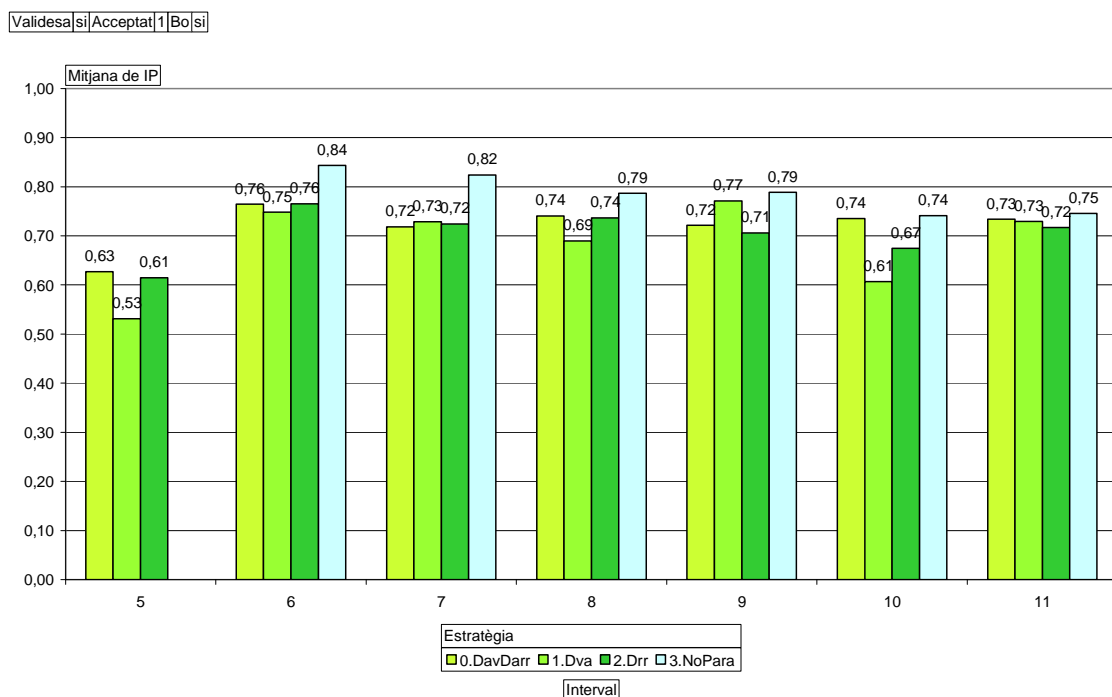


Figura 52. Mitjanes dels indicadors segons el temps de perturbació.

### 8.4.3 Indicador de prestacions – Interval de pas

Tot i que en termes generals si l'interval de pas és més petit s'obtenen millors valors en l'indicador. Aquest interval té un límit que es troba entre 5 i 6 minuts, ja que per valors d'interval més petits s'obtenen que aquest límit s'obtenen pitjors prestacions, degut a que un sistema amb freqüències més altes és també més inestable i per tant proper al col·lapse. També cal destacar que entre els sistemes que funcionen amb intervals de 10 minuts i 11 minuts s'obtenen millors prestacions en el segon, degut a la importància que té la regularitat en la formació de l'índex i com ja s'ha vist anteriorment s'obtenen millors valors de regularitat per intervals de pas creixents. Per tant podríem dir que en les línies entre 6 i 7 minuts d'interval de pas s'obtiniran millors prestacions.



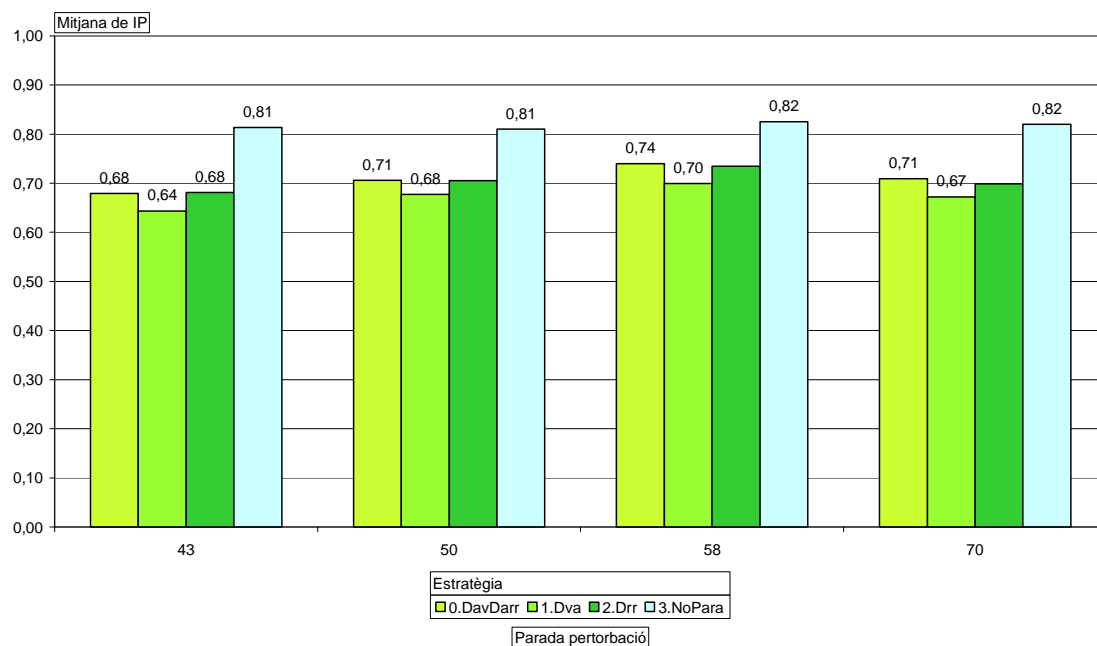
**Figura 53. Mitjanes dels indicadors segons els intervals de pas.**

### 8.4.4 Indicador de prestacions – Parada en la que es produeix la pertorbació

Abans s'ha vist que en funció de la parada que es veia afectada s'obtenien valors diferents dels paràmetres considerats, però en termes globals de prestacions no hi ha diferències segons la parada que s'afecta.



Validesa | si | Acceptat | 1 | Bo | si

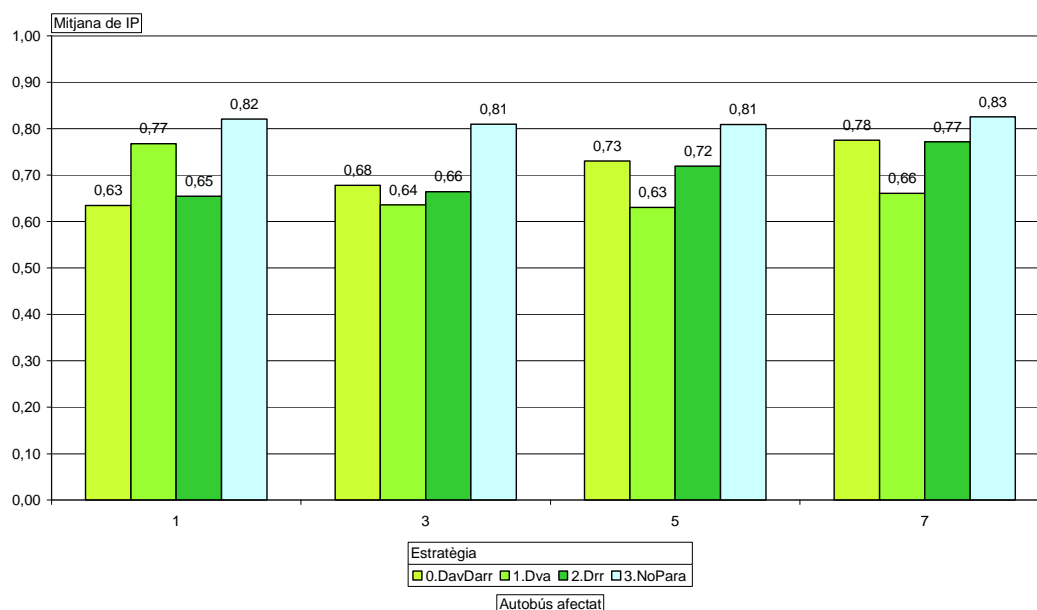


**Figura 54. Mitjanes dels indicadors segons la parada on es produeix la pertorbació**

### 8.4.5 Indicador de prestacions – Autobús afectat

Aquí es veuen diferències entre afectar un autobús del principi o un dels final, però aquesta diferència és deguda a que hi ha un biaix dels resultats, degut a que les parades amb freqüències més altes tenen un nombre d'autobusos més alts i aquestes són les que han presentat més inestabilitat.

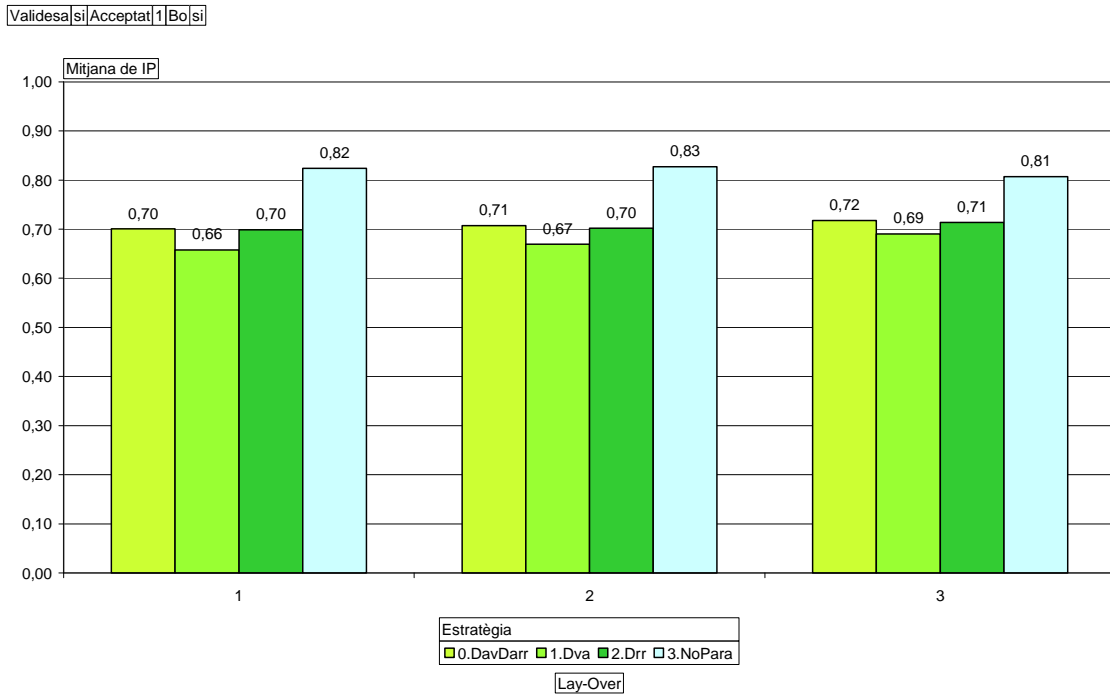
Validesa | si | Acceptat | 1 | Bo | si



**Figura 55. Mitjanes dels indicadors segons l'autobús afectat.**

### 8.4.6 Indicador de prestacions – Temps de Lay-Over

Si abans no havíem vist diferències entre els diferents temps aplicats segons cada un dels paràmetre, ara tampoc n'hi ha. I es tornen a obtenir valors de prestacions millors sempre per l'estratègia 3.NoPara. Segurament amb temps de descans superiors haguéssim obtingut diferències més significatives



**Figura 56. Mitjanes dels indicadors segons el temps de Lay-Over.**

## 9 CONCLUSIONS I FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ

La modelització i les simulacions per representar el comportament de línies d'autobusos és una eina molt potent per a obtenir resultats i ha estat escollida en aquesta tesina per analitzar quatre possibles estratègies. A continuació s'exposen les conclusions extrems dels resultats més rellevants.

Les tres estratègies que paren a totes les parades obtenen uns resultats molt similars. Els seus coeficients de variació mitjans oscil·len entre 0,16 i 0,22. Això les diferencia molt de l'estratègia en què els autobusos poden saltar-se algunes parades, que obté un coeficient mitjà de 0,02.

A nivell de temps ponderat i velocitat comercial, les diferències no són tan destacades, tot i que s'observa que l'estratègia de no parades és la que ens dona un temps ponderat més baix, de 2160,5 persones\*hora (un 10% inferior a les altres), i una velocitat comercial més alta, de 4,7 m/s (un 3% superior a les altres).

És important destacar que amb un indicador de prestacions adequat es poden valorar les prestacions que s'obtenen en cada simulació. Això està lligat íntimament amb el rendiment de cada estratègia. Com és d'esperar, l'estratègia de no parada també ha tingut un millor resultat en aquest paràmetre.

Així, l'estratègia que ha donat més bons resultats ha estat la que combina el no parar-se a les parades quan hi ha demores importants coordinadament amb l'increment del temps en verd dels semàfors.

Una conclusió que en podem extreure és que, per a obtenir unes bones prestacions, hi ha un cert nombre de passatgers que han de sacrificar el seu temps per obtenir una millora global.

Com és de preveure, no sempre serà possible aplicar aquesta estratègia. No com a conseqüència de dificultats tècniques, sinó per queixes dels usuaris. Per tant, si s'apliqués aquesta tècnica hi hauria d'haver un treball de sensibilització i informació als usuaris. Sempre és més comprensible sacrificar-se si se sap que és per una millora en global.

Una altra conclusió és que totes les estratègies són aplicables amb les tecnologies disponibles, i per tant, només seria qüestió de valorar en termes econòmics si és factible la seva implantació. De fet, ben segur que moltes de les xarxes en funcionament ja utilitzen les tecnologies comentades, però sense coordinació entre SAE i CCT, El que interessaria, doncs, seria que les utilitzessin coordinadament.

Per a línies d'investigació futures es proposa l'estudi de noves estratègies, i també el moment d'aplicació de les mateixes. Segurament és preferible que el moment d'aplicació de l'estratègia sigui abans de la producció de la demora, tot i que el caràcter aleatori de les pertorbacions ho dificulta. En canvi, sí que es podria fer si es té una demanda coneguda, degut a una punta per algun acte en concret.

En aquesta tesina s'ha considerat una demanda uniforme a les parades, que és una simplificació del comportament real dels viatgers. Per tant, per a futurs estudis, es podrien considerar demandes no uniformes de passatgers, és a dir variables en el temps.

També es proposa fer una anàlisi de la sensibilitat de l'increment de temps en verd del cicle semafòric i la seva interacció amb el trànsit perpendicular. Així com les interaccions amb altres línies d'autobusos els recorreguts dels quals s'intersectin.

Una altra estratègia que es pot estudiar consistiria en afegir un autobús buit enmig de la flota. Així es podria tenir una petita flota d'emergència en reserva situada en punts estratègics de la ciutat. Així si es produïssin situacions properes al col·lapse s'incrementaria puntualment la flota directament al punt on hi hagués més demanda.

També es pot estudiar si seria efectiu permetre l'avançament d'autobusos quan ja es troben en fase d'aparellament.

També es proposa estudiar el comportament de les persones davant les demores, en funció de la informació que tenen disponible. La gent davant de situacions de demores pot optar per un altre mitjà de transport, però si no sap que hi ha demora no ho podrà fer. S'hauria d'estudiar quines situacions és capaç de suportar l'usuari, tant si té informació de l'interval de pas, del seu estat de capacitat... del proper autobús, com si no la té.

En definitiva, és convenient aplicar estratègies d'explotació per a obtenir una millora en els paràmetres de prestacions de les línies d'autobusos.

## 10 REFERÈNCIES

- 1 Adamski, A. and A. Turnau. Simulation support tool for real-time dispatching control in public transport. *Transportation Research Part A*, vol. 32 (2), pp.73-87, 1998
- 2 Bowman, L. A., M. A. Turnquist. Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at transit stops. *Transportation Research*, Vol. 15A. No. 6. pp 465471, 1981
- 3 Ceder, A. and N. H. M. Wilson. Bus network design. *Transportation Research Part B*, vol. 20(4), pp. 331-344, 1986
- 4 Daganzo, C.F. *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*. Elsevier, New York, 1997
- 5 Dessouky, M., R. Hall, L. Zhang and A. Singh. Real-time control of buses for schedule coordination at a terminal. *Transportation Research Part A*, vol. 37, pp.145-164, 2003
- 6 Estrada, M., L. Thorson, M. Campos y F. Robusté. *Bus Headway Variations: Improving Bus Reliability And Passenger Travel Time In Dynamic Systems*. Proceedings of 11th World Congress on Transport Research. Berkeley. June 24-28, 2007. Arbitrat.
- 7 Evans, J.E. *Transit Scheduling and Frequency. Traveler Response to Transportation System Changes*. Transit Cooperative Research Program. Transportation Research Board, Washington, DC. 2003
- 8 Haghani, A., M. Banihashemi and K.H. Chiang. A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 37:4, pp. 301-322, 2003
- 9 Hill, S.A. Numerical analysis of a time –headway bus route model. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*, vol. 328 (1-2), pp. 261-273, 2003
- 10 Kittelson & Associates. *Transit Capacity and Quality of Service Manual. 2nd Edition*. Transit Cooperative Research Program. Transportation Research Board, Washington, DC, 2003
- 11 Lampkin, W. and P. D. Saalmans. The design of routes, service frequencies and schedules for a municipal bus undertaking: Case study, *Operation Research Quarterly*, vol. 18(4), pp. 375-397, 1967
- 12 Mathew, T V, S. Mohan. Transit route network design using frequency coded genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, vol. 129(2), pp. 186-195, 2003
- 13 Nagatani, T. Interaction between buses and passengers on a bus route. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*, vol. 296(3-4), pp. 320-330, 2001

- 14 Nagatani, T. Delay transition of a recurrent bus on a circular route. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*, vol. 297, pp. 260-268, 2001
- 15 Newell, G. F. Some issues relating to the optimal design of bus routes. *Transportation Science*, vol. 13(1), pp. 20-35, 1979
- 16 Ortuzar, J. de D., L.G. Willumsen. *Modelling Transport (3ª Edición Corregida)*. John Wiley and Sons, Chichester. 2001
- 17 Pastor Ferrando, J.P. Aplicación de las técnicas AHP i ANP, de análisis multicriterio de decisiones, a la selección y ponderación de criterios en las adjudicaciones de los contratos públicos de obra. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Proyectos de Ingeniería, Valencia, cap. III pp. 153-219, nov. 2006.
- 18 Pattnaik, S. B., S. Mohan and V. M. Tom. Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, vol. 124(4), pp. 368-375, 1998
- 19 Rossetti, M.D., T. Turitto. Comparing static and dynamic threshold based control strategies. *Transportation Research Part B*, vol. 32 (8), pp.607-620, 1998
- 20 Turnquist, M.A. Strategies for improving reliability of bus transit service. *Transportation Research Record* 818, pp. 25-29, 1981
- 21 Turnquist, M.A, L. A. Bowman. The effects of network structure on reliability of transit service. *Transportation Research Part B*, Vol. 148. pp. 79-86
- 22 Vuchic, V. R. Urban Public Transportation. *System and Technology*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. Estados Unidos. 1981

# 11 ANNEXOS

A1. Glossari

A2. Recull de dades





## **A1. Glossari**

$T_c$	<i>Temps de cicle</i>
$t_r$	<i>Temps de recorregut</i>
$t_p$	<i>Temps en parades</i>
$t_d$	<i>Temps de descans</i>
$h$	<i>Interval de pas (headway)</i>
$f$	<i>Freqüència de pas</i>
$F$	<i>Flota</i>
$t_t$	<i>Temps perdut en interseccions</i>
$T_{L-O}$	<i>Temps de Lay-Over</i>
$P_a$	<i>Nombre de viatgers que baixen per la porta més ocupada</i>
$t_a$	<i>Taxa de baixada de viatgers</i>
$P_b$	<i>Nombre de viatgers que pugen per la porta més ocupada</i>
$t_b$	<i>Taxa de pujada de viatgers</i>
$t_{oc}$	<i>Temps d'obertura i tancament de portes</i>
$L$	<i>Longitud entre parades</i>
$\Delta t_v$	<i>Durada del temps en fase de verd</i>
$U$	<i>Durada de la pertorbació induïda</i>
$B_j(s-1)$	<i>Nombre de passatgers que pugen a una determinada parada</i>
$A_j(s-1)$	<i>Nombre de passatgers que baixen a una determinada parada</i>
$C$	<i>Capacitat en nombre de passatgers dels autobusos</i>
$v_j(\cdot)$	<i>Velocitat d'un autobús a entre dues parades consecutives</i>
$t_{red}$	<i>Durada del temps en fase de vermell</i>
$q_{AB}$	<i>Taxa d'arribada de passatgers en el sentit AB</i>
$f_a$	<i>Factor d'ajust interval</i>
$\gamma$	<i>Temps unitari de pujada</i>
$\delta$	<i>Temps unitari de baixada</i>
$C_v$	<i>Coefficient de variació</i>
$d$	<i>Distància total recorreguda en una línia</i>
$\mu$	<i>Índex de consistència</i>
$CIA$	<i>Índex de consistència aleatori</i>
$CR$	<i>Ràtio de consistència</i>



## **A2. Recull de dades**

A continuació es presenten les dades de resultats, classificats per estratègies, perfils de càrrega, temps de pertorbació, Interval de pas, parada pertorbació, autobús afectat i Lay-Over.