

MAIG 2017

Simulació de la mobilitat pel pas del tramvia per l'avinguda Diagonal (Francesc Macià – Pl. de les Glòries)

INFORME TÈCNIC



**Ajuntament
de Barcelona**

Centre d'Innovació del Transport (CENIT)

c. Jordi Girona, 1-3; Edifici C3 Planta S1 Despatx S120; 08034 Barcelona

Telèfon: (+34) 93 413 76 67; Fax: (+34) 93 413 76 75; <http://www.cenit.cat>

| | |
|------------------------------|--|
| Títol: | Simulació de la mobilitat pel pas del tramvia per l'avinguda Diagonal (Francesc Macià – Pl. de les Glòries) |
| Data: | 17 de maig de 2017 |
| Referència: | TRA-2016PR052 |
| Autors: | CENIT |
| Client: | Ajuntament de Barcelona |
| Paraules clau: | Connexió tramvia, mobilitat, regulació semafòrica, Av. Diagonal |
| Persones de contacte: | Francisca Rosell (francisca.rosell@upc.edu) Francisco Roderó (francisco.rodero@upc.edu); Sergi Saurí (sergi.sauri@upc.edu); Tel.: 93-4137667 |
| Fitxer: | Estudi Semafòric Connexió Tramvia - Informe Tècnic.docx |
| Resum: | <p>L'1 de març de 2016, l'Ajuntament de Barcelona i la Generalitat van signar el protocol de col·laboració per impulsar la connexió de les dues xarxes de tramvia, que estableix que l'Ajuntament determinarà el traçat de la unió del Trambaix i del Trambesòs en base als estudis tècnics presentats el 23 de març de 2016. Aquests estudis tècnics recomanen com a millor solució la connexió del tramvia en superfície per la Diagonal, en el tram comprès entre Francesc Macià i Glòries, que arribaria a tenir un total de 222.000 viatgers diaris i reduiria diàriament el pas de 12.500 vehicles pel tram central de l'avinguda Diagonal.</p> <p>Dins de les tasques subsegüents a aquests treballs previs cal l'anàlisi a nivell microscòpic de la mobilitat pel tram per on s'implantarà la nova connexió del tramvia. Més concretament, l'objectiu d'aquest document és l'avaluació de la mobilitat (tramvia, xarxa de bus, vehicles privats, bicicletes i vianants) amb la implantació del tramvia i la definició de la regulació semafòrica de l'Av. Diagonal entre Francesc Macià i el carrer Castillejos que permeti un òptim funcionament dels diferents modes de transport que hi conviuen. En els treballs s'han avaluat diferents escenaris de freqüències de pas, cicle semafòric i llargària del tramvia.</p> |

TAULA DE CONTINGUTS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducció..... | 1 |
| 2 | Formulació i eines emprades..... | 3 |
| 2.1 | Model matemàtic de la configuració semafòrica | 3 |
| 2.1.1 | Definicions..... | 4 |
| 2.1.2 | Model Matemàtic | 6 |
| 2.1.3 | Paràmetres..... | 7 |
| 2.1.4 | Optimització de la configuració semafòrica..... | 7 |
| 2.2 | Model de Simulació | 8 |
| 2.2.1 | Fases de la construcció del model..... | 8 |
| 2.3 | Arquitectura de la solució | 13 |
| 3 | Metodologia | 15 |
| 3.1 | Fase preliminar – preparació de l'entorn..... | 16 |
| 3.2 | Primera fase – Comparació diferents escenaris | 16 |
| 3.3 | Segona fase – Detall dels dos millors escenaris..... | 17 |
| 3.4 | Tercera fase – Ajustant l'escenari escollit | 17 |
| 4 | Resultats obtinguts | 19 |
| 4.1 | Hipòtesi | 19 |
| 4.2 | Primera fase – Comparació diferents escenaris | 22 |
| 4.2.1 | Resum de resultats..... | 22 |
| 4.2.2 | Conclusions Fase 1 | 25 |
| 4.3 | Segona Fase – Detall dels dos millors escenaris..... | 26 |
| 4.3.1 | Resum de resultats..... | 26 |
| 4.3.2 | Analitzant el comboi de 64 metres..... | 28 |
| 4.3.3 | Conclusions Fase 2 | 30 |
| 4.4 | Tercera Fase – Ajustant l'escenari escollit | 31 |
| 4.4.1 | Tramvia | 31 |
| 4.4.2 | Xarxa d'autobusos..... | 35 |
| 4.4.3 | Vehicle privat..... | 40 |

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 4.4.4 | Vianants | 45 |
| 4.4.5 | Bicicletes | 46 |
| 5 | Resum | 48 |
| | Equip de treball..... | 50 |
| | Referències | 51 |

TAULA DE FIGURES I TAULES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Segment de la Av. Diagonal objecte d'aquest estudi | 1 |
| Figura 2 - Esquema variables model optimització | 5 |
| Figura 3 -Modelització del problema de configuració semafòrica | 6 |
| Figura 4 – Imatges del plànol base..... | 9 |
| Figura 5 - Exemple xarxa viària amb Aimsun | 9 |
| Figura 6 - Exemple de gir a una cruïlla..... | 10 |
| Figura 7 - Exemple de gir amb combinacions de carrils..... | 10 |
| Figura 8 - Exemple mapa actual amb els grups semafòrics..... | 11 |
| Figura 9 - Exemple d'assignació dels grups semafòrics amb Aimsun..... | 11 |
| Figura 10 - Exemple de full amb el repartiment semafòric actual | 11 |
| Figura 11 - Exemple de repartiment de grups semafòrics amb Aimsun | 11 |
| Figura 12 - Esquema de l'arquitectura..... | 14 |
| Figura 13 - Diagrama dels escenaris analitzats | 16 |
| Figura 14 - Intensitat mitjana de flux de vehicles | 19 |
| Figura 15 - Parades del tramvia a la secció entre Francesc Macià i Castillejos | 20 |
| Figura 16 - Evolució Velocitat mitjana del tramvia | 23 |
| Figura 17 - Vel. mitjana i nivell de servei – Diferents escenaris | 24 |
| Figura 18 - Velocitat mitjana tramvia - Escenari 120"/4' | 27 |
| Figura 19 - Velocitat mitjana tramvia - Escenari 105"/3'30" | 27 |
| Figura 20 - Nivell de servei a les cruïlles - Escenari 120"/4' | 28 |
| Figura 21 - Nivell de servei a les cruïlles - Escenari 105"/3'30" | 28 |
| Figura 22 - Velocitat mitjana tramvia - Escenari 120"/3' amb comboi de 64m. | 29 |
| Figura 23 - Velocitat mitjana tramvia – Escenari 105"/3'30" amb comboi de 64m. | 30 |
| Figura 24 - Durada tems de verd + neteja cruïlla - Semàfors tramvia..... | 32 |
| Figura 25 - Diagrama espai/temps - Sentit Francesc Macià | 33 |
| Figura 26 - Diagrama espai/temps - Sentit Pl. Glòries | 33 |
| Figura 27 - Velocitat mitjana comercial tramvia amb la configuració semafòrica seleccionada | 34 |
| Figura 28 - Evolució velocitat mitjana per sentit de circulació amb la configuració semafòrica seleccionada | 35 |
| Figura 29 - Passeig de Gràcia - Via Augusta - Compartint espai | 36 |
| Figura 30 - Esquema semàfors tramvia - bus entre Via Augusta i Passeig de Gràcia..... | 37 |
| Figura 31 - Esquema mobilitat autobusos entre Via Augusta i Passeig de Gràcia | 37 |
| Figura 32 - Esquema mobilitat autobusos línies V11 i 55 (V19)..... | 38 |
| Figura 33 - Temps mig espera carrers on circulen autobusos..... | 39 |
| Figura 34 - Francesc Macià - Configuració dels grups semafòrics i rutes dels vehicles..... | 40 |
| Figura 35 - Calvet / Travessera – Configuració dels grups semafòrics..... | 41 |
| Figura 36 - Passeig de Sant Joan - Mallorca - Configuració dels grups semafòrics..... | 41 |
| Figura 37 - Evolució del nivell de servei a les cruïlles | 42 |
| Figura 38 - Boxplot nivell de servei a les cruïlles amb nivell de congestió alt..... | 43 |
| Figura 39 - Temps mig d'espera carrers transversals-comparativa simulació amb dades actuals..... | 44 |
| Figura 40 - Ocupació dels carrers en mitjana (metres)-comparativa simulació amb dades actuals..... | 45 |
| Figura 41 - Velocitat mitjana mínima de pas per als vianants (en m/s)..... | 46 |
| Figura 42 - Diagrama espai-temps bicicletes - Sentit Francesc Macià | 47 |
| Figura 43 - Diagrama espai-temps bicicletes - Sentit Pl. Glòries | 47 |

| | |
|--|----|
| Taula 1 - Components de l'arquitectura | 14 |
| Taula 2 - Repartiment de flux a Francesc Macià | 20 |
| Taula 3 - Nivell de servei a les cruïlles - Escala de valors | 22 |
| Taula 4 - Nivell de servei a les cruïlles - Diferents escenaris | 25 |
| Taula 5 - Interval de pas del tramvia a les parades | 34 |
| Taula 6 - Velocitat mitjana del tramvia | 34 |
| Taula 7 - Dades estadístiques de les línies V11, V15, V17, 22 i 55 (V19) | 39 |
| Taula 8 - Estadístiques nivell de servei..... | 43 |

1 Introducció

Motivació de
l'estudi

L'1 de març de 2016, l'Ajuntament de Barcelona i la Generalitat van signar el protocol de col·laboració per impulsar la connexió de les dues xarxes de tramvia, que estableix que l'Ajuntament determinarà el traçat de la unió del Trambaix i del Trambesòs en base als estudis tècnics presentats el 23 de març de 2016. Aquests estudis tècnics recomanen com a millor solució la connexió del tramvia en superfície per la Diagonal, en el tram comprès entre Francesc Macià i Glòries, que arribaria a tenir un total de 222.000 viatgers diaris i reduiria diàriament el pas de 12.500 vehicles pel tram central de l'avinguda Diagonal.

Amb aquest plantejament s'emmarca el present estudi, l'objectiu del qual és **l'avaluació de la mobilitat** (tramvia, xarxa de bus, vehicles privats, bicicletes i vianants) amb la implantació del tramvia i la definició de la **regulació semafòrica** de l'Av. Diagonal entre Francesc Macià i el carrer Castillejos que permeti un **òptim funcionament dels diferents modes de transport** que hi conviuen.

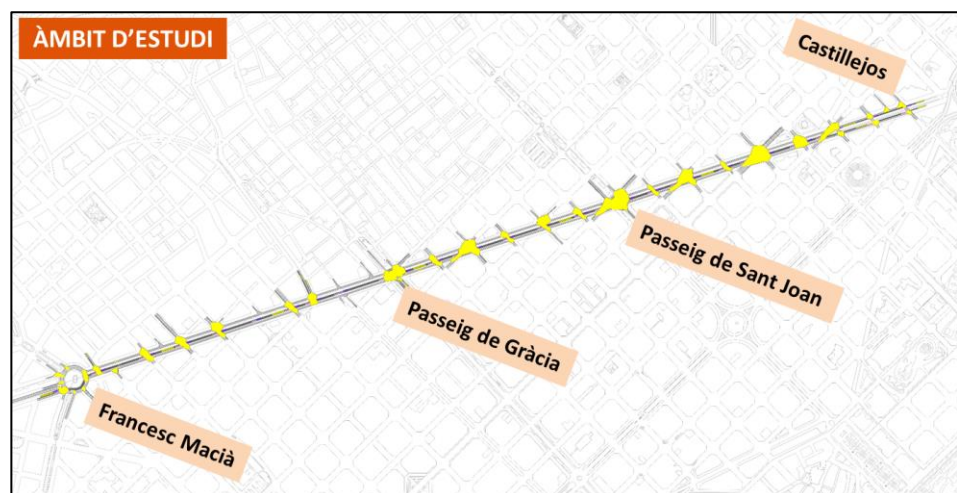


Figura 1 - Segment de la Av. Diagonal objecte d'aquest estudi

La Figura 1 mostra esquemàticament la secció de l'Avinguda Diagonal objecte del present treball, entre la plaça Francesc Macià i el carrer Castillejos. En color groc apareixen ressaltades les cruïlles analitzades, que determinen els límits de l'abast de l'estudi.

S'ha volgut donar un enfoc ajustat el més possible a les situacions reals del transit, i per això s'ha dissenyat un procediment que aporta el rigor matemàtic del model construït a mida i basat en valors deterministes, amb l'aleatorietat que la simulació permet afegir a tot el procés. Aleatorietat que ve donada per la variabilitat en el fluxos de vehicles, en els temps de recorregut del tramvia i en la durada del temps de parada del tramvia a les diferents estacions.

El document s'ha organitzat de la següent manera: en primer lloc, al capítol 2 s'expliquen les eines utilitzades per portar a terme els treballs realitzats, adaptades als requeriments de l'estudi. A continuació, al capítol 3 es detalla la metodologia utilitzada, dissenyada a mida de les necessitats de les tasques a fer. Al capítol 4 es presenten els resultats obtinguts. Finalment, al capítol 5 es fa un resum del que s'ha presentat al document.

2 Formulació i eines emprades

En aquest capítol s'expliquen de forma detallada els instruments que han facilitat la modelització de la mobilitat per l'eix de la Diagonal per on passa el tramvia. Són dos programaris: un desenvolupat a mida, basat en un model matemàtic d'optimització, i un programari de modelització a nivell micro del trànsit, *Aimsun*, de la companyia catalana *TSS-Transport Simulation Systems*, d'àmplia reputació a nivell mundial i ja fet servir anteriorment per altres estudis tant per part de l'Ajuntament de Barcelona com pel propi CENIT. El model matemàtic es basa en dades deterministes, valors mitjos obtinguts com a resultat de les simulacions, mentre que les simulacions aporten la variabilitat que reflexa millor la realitat de la circulació de vehicles.

2.1 Model matemàtic de la configuració semafòrica

Definició del model

L'objectiu nuclear de les tasques per modelitzar el pas del tramvia per la Diagonal ha sigut definir la coordinació semafòrica a la secció per aquesta avinguda, entre la plaça Francesc Macià i el carrer Castillejos, de manera que s'afavoreixi la circulació del tramvia sense que la mobilitat dels carrers transversals, per on es desplacen vehicles i autobusos, es vegi perjudicada. Es tracta, en definitiva, de cercar una sincronització semafòrica que permeti compatibilitzar una velocitat comercial competitiva del tramvia afectant el menys possible el tràfic transversal a la Diagonal, tant d'autobusos com de vehicles privats. En l'anàlisi s'ha inclòs, així mateix, els pas dels vianants i les bicicletes.

Per això, el punt de partida del model és la definició inicial de la xarxa de carrers i cruïlles de la zona afectada de forma simplificada, on s'ubiquen els punts de detenció de tramvia, vehicles i autobusos. Un únic punt de detenció per tipus de vehicle, carrer i sentit, tenint en compte que poden coincidir.

Per cada cruïlla es defineixen els seus grups semafòrics, i les dades associades: dependències, temps d'ambre, temps de neteja de la cruïlla, etc.

A partir de diferents articles publicats que presenten models per l'optimització dels senyals semafòrics (*Gartner et al. (1975)* o *Möhring et al. (2006)*, per exemple) i de

les metodologies descrites al *HCM2010*, es construeix un model matemàtic que reculli tant els temps d'espera del tramvia com el dels vehicles i autobusos, i que s'adapti a les característiques específiques d'aquesta zona de trànsit de la ciutat de Barcelona.

A continuació, es presenten les definicions de les variables i elements que es fan servir en el model matemàtic:

2.1.1 Definicions

Variables i
paràmetres

- \mathbf{N} = conjunt de nodes o cruïlles.
- (i,j) = arc amb origen a la cruïlla i i destí la cruïlla j . Cada arc es correspon amb el segment de la Diagonal comprés entre la cruïlla i i la cruïlla j ,
- \mathbf{A} = conjunt d'arcs = $A_1 \cup A_2$, on A_i , $i=1,2$ és el conjunt d'arcs a cada sentit.
- \mathbf{G}_j = conjunt de grups semafòrics del node j . \mathcal{G}_j és el conjunt de grups sense incloure el tramvia.
- Φ_{ij} = offset del tramvia; temps transcorregut entre l'inici de verd a la cruïlla origen de l'arc i l'inici de verd a la cruïlla destí de l'arc (el més proper a l'instant d'arribada del tramvia).
- γ_{ij} = instant d'arribada del tramvia a la cruïlla destí j des de la cruïlla origen i respecte de l'inici del cicle en vermell. És el temps que ha transcorregut des de l'inici de verd del grup semafòric del tramvia a la cruïlla origen i fins la seva arribada al punt de detenció de la cruïlla destí j . Es divideix en dos parts, γ_{ij}^r i γ_{ij}^v , la part corresponent al temps de vermell i la part corresponent al temps de verd, respectivament.
- r_j^g = temps de vermell del grup g a la cruïlla j . Inclou el temps d'ambre, el temps de neteja de la cruïlla i el temps perdut.
- r_j^t = temps de vermell del tramvia a la cruïlla j . Inclou el temps d'ambre, el temps de neteja de la cruïlla i el temps perdut.
- d_j^g = temps de neteja de la cruïlla del grup g a la cruïlla j .
- R_j = temps perdut de la cruïlla j
- t_{ij} = temps de recorregut del tramvia de l'arc (i,j) . Es un valor fixe per al model.
- \mathbf{C} = temps de durada del cicle
- \mathbf{TA} = temps d'ambre
- v_j^g = temps de verd al grup g de la cruïlla j
- w_j^g = factor de pes utilitzat a la funció objectiu, per al grup g de la cruïlla j .
- \mathbf{W} = factor de pes utilitzat a la funció objectiu per el temps d'espera del tramvia.

Els factors de pes \mathbf{W} i w_j^g s'afegeixen per poder prioritzar uns grups semafòrics sobre d'altres, si cal. En el cas concret del problema que s'ha resolt aquí no ha sigut necessari.

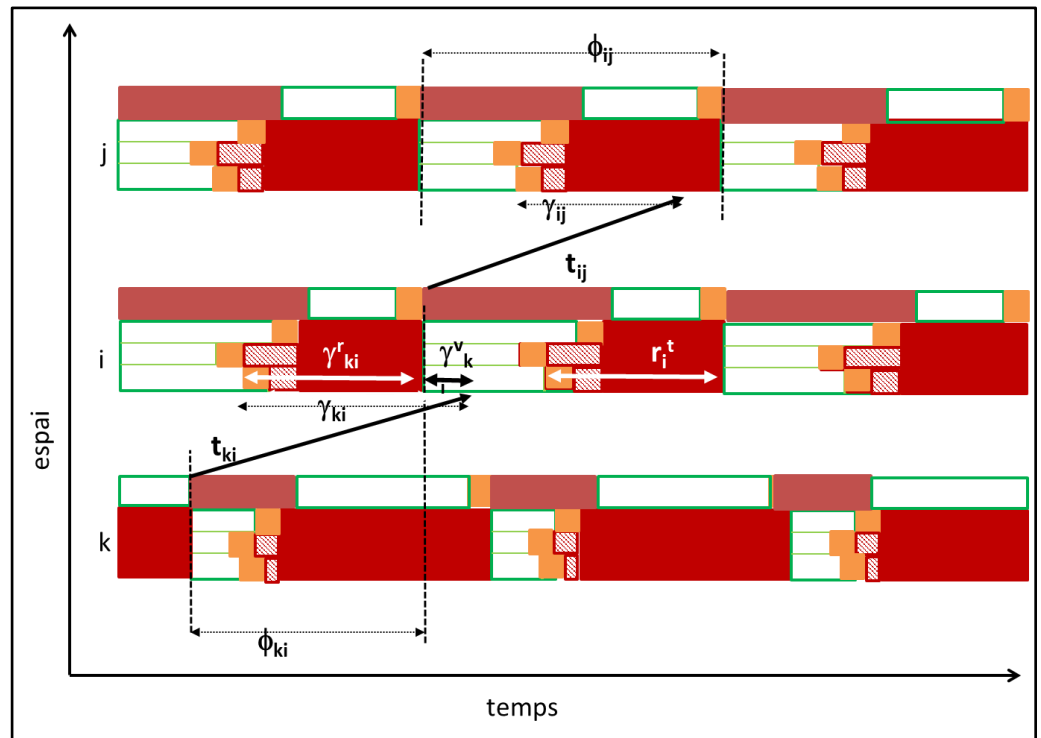


Figura 2 - Esquema variables model optimització

A la Figura 2 es representen d'una manera gràfica el que significa cadascuna de les variables que es fan servir. Cada bloc correspon a una cruïlla, totes consecutives. Les diferents files que formen cada bloc representen un grup semafòric i les seves fases verd/vermell/ambre/neteja cruïlla. La fila inferior de cada bloc és el grup semafòric del tramvia, la resta són altres grups (vehicles, autobús, bicicletes, etc). La fila superior correspon a un grup semafòric d'un carrer transversal a la circulació del tramvia.

2.1.2 Model Matemàtic

Funció objectiu i restriccions

| |
|---|
| <p>Funció objectiu</p> $\min_{r, v, \phi, \gamma, n} \frac{1}{2} \sum_{\substack{j \in N \\ g \in G_j}} w_j^g \cdot \frac{\mu_j^g \cdot (r_j^g)^2}{(\mu_j^g - \lambda_j^g) \cdot C} - W \cdot \sum_{(i,j) \in A} \gamma_{ij}^r \quad (1)$ |
| <p>Restriccions</p> $r_j^t = r_j^{t'}, \quad j \in N, \forall t \neq t' t, t' \in G_j \setminus \mathcal{G}_j \quad (2)$ $v_j^g = C - r_j^g, \quad j \in N, g \in G_j \quad (3)$ $t_{ij} + \gamma_{ki}^v + r_j^t - (\gamma_{ij}^r + \gamma_{ij}^v) = \phi_{ij}, \quad (i, j) \in A_s, (k, i) \in A_s, s \in \{1, 2\}, \quad (4)$ $t \in G_j \setminus \mathcal{G}_j$ $\sum_{i=1}^k (v_j^{g_i} + TA + d_j^{g_i}) = C - R_j, \quad j \in N, g_1, \dots, g_k \in G_j, \quad (5)$ <p>g_1, \dots, g_k tots de diferent fase</p> $v_j^g + d_j^g + TA = v_j^{g'} + d_j^{g'} + TA \quad j \in N, g, g' \in G_j, \quad (6)$ <p>g, g' de la mateixa fase</p> $\phi_{ij} + \phi_{ji} = n \cdot C, \quad (i, j) \in A \quad (7)$ $\gamma_{ij}^r \leq r_j^t, \quad (i, j) \in A, t \in G_j \setminus \mathcal{G}_j \quad (8)$ $\gamma_{ij}^r + \gamma_{ij}^v \leq C \quad (i, j) \in A \quad (9)$ $\text{trec. tram}_s = \sum_{\substack{j \in N \\ (i,j) \in A_s \\ t \in G_j \setminus \mathcal{G}_j}} (t_{ij} + (r_j^t - \gamma_{ij}^r) + \gamma_{ij}^v), \quad s = 1, 2 \quad (10)$ $\frac{\text{dist total}}{\text{vel màx}} \leq \text{trec. tram}_s \leq \frac{\text{dist total}}{\text{vel mín}} \quad s = 1, 2 \quad (11)$ $\gamma_{ij}^r \geq 0, \gamma_{ij}^v \geq 0$ $rmin_j^g \leq r_j^g \leq rmax_j^g \quad (12)$ $\phi_{ij} \in \mathcal{R}, n \in \mathcal{Z}$ |

Figura 3 -Modelització del problema de configuració semafòrica

El primer terme de la funció objectiu (1) recull el temps mitjà d'espera per part dels vehicles que accedeixen a una intersecció per un dels accessos. Es busca que sigui el més petit possible. Mentre que la segona part representa el temps de vermell que es troba el tramvia quan arriba al seu semàfor; en aquest cas el que es vol aconseguir es que sigui el més gran possible (el seu valor màxim és el temps de vermell del semàfor del tramvia), ja que si arriba al seu valor màxim vol dir que el tramvia es troba el semàfor verd en arribar a la cruïlla.

Pel que fa a les restriccions, a continuació es detalla que representen cadascuna d'elles:

- Amb (2) el que s'assegura és que els semàfors del tramvia per als dos sentits siguin iguals. A partir d'aquí es pot treballar amb una única variable de temps de vermell per al tramvia.
- (3) garanteix que el cycle es reparteix entre temps de verd i temps de vermell.

- (4) estableix la relació entre l'offset entre dos semàfors del tramvia a cruïlles consecutives, i les variables Ψ_{ij} i r_j^t (el temps de vermell del tramvia).
- (5) i (6) defineixen les dependències entre grups semafòrics de la mateixa cruïlla, (6) per als grups de la mateixa fase (es a dir, que poden estar verds de forma simultània) i (5) per als grups de fases oposades. Pel cas de Francesc Macià, es fa una adaptació de (6) per tal de treballar amb fases i subfases.
- (7) estableix la relació entre els offsets oposats de la mateixa cruïlla.
- (8) i (9) defineixen les relacions de les variables Ψ_{ij} amb el temps de vermell del tramvia i el temps de cycle.
- (10) i (11) marquen els límits de velocitat del tramvia.
- Finament, (12) defineixen els tipus de variables i els límits de cadascuna d'elles.

2.1.3 Paràmetres

Dades d'entrada

Un cop definit el model, el següent pas és construir els paràmetres i dades que es faran servir. En aquest cas, com a paràmetres principals s'han definit el temps de cycle, temps d'ambre, temps màxim i mínim de vermell per defecte, longitud total del recorregut del tramvia, velocitat màxima i mínima del tramvia.

Pel que fa a les dades, s'ha treballat amb tres grups de dades:

- Les cruïlles, cadascuna amb un temps perdut i un total de grups semafòrics associats.
- Els arcs, amb un temps de recorregut del tramvia, que inclou el temps a les parades.
- Els grups semafòrics, amb detall de la fase a la que pertany (i subfase en el cas de Francesc Macià), tipus de vehicle associat (tramvia, autobús, vehicle), temps de neteja de la cruïlla, capacitat màxima de la via associada, flux de vehicles d'arribada, temps màxim/mínim de vermell si no és el genèric, i factor de pes per la funció objectiu.

Les dades temps de recorregut dels arcs i flux d'arribada dels vehicles al punt de detenció, que poden ser variables, s'obtenen dels resultats de les simulacions. La resta són valors fixes que es defineixen al principi de tot el procediment.

2.1.4 Optimització de la configuració semafòrica

Amb el model definit, i les dades de configuració, cal doncs resoldre el problema de programació lineal entera-mixta que permetrà obtenir una configuració òptima dels semàfors per les dades que s'han fet servir. Per això s'ha desenvolupat un codi a mida en C, que fa servir IBM-CPLEX® per resoldre el problema d'optimització.

Com a resultat del problema, s'obté una configuració de semàfors per a cada cruïlla, i un offset respecte un punt inicial. En aquest cas s'ha pres com a punt de referència

els semàfors de Francesc Macià. Aquesta configuració és la que rebrà el simulador i amb la que es faran les simulacions, el resultat de les quals tornarà a alimentar el programa d'optimització.

2.2 Model de Simulació

Representació
virtual de la nova
proposta

En un estudi com aquest és molt important poder conèixer amb detall quin és el comportament dels vehicles a la xarxa, la seva interacció entre ells i amb el transport públic o la infraestructura, com ara els semàfors.

Aquest grau de precisió és possible obtenir-ho mitjançant entorns de simulació de trànsit que treballin a nivell microscòpic.

D'altra banda, donades les característiques especials de la zona d'estudi i de l'impacte que implica el pas del tramvia sobre l'escenari actual, també és útil poder disposar d'eines flexibles quant a la configuració dels diferents objectes que hi prenen part i escalables en funcionalitat per tal de poder abordar l'ampli ventall de singularitats que es poden trobar.

Així doncs, tal i com s'ha indicat a l'inici del capítol, s'ha optat per fer servir *Aimsun*: *Aimsun* ofereix un ampli conjunt de sortida de dades pel que fa als resultats de l'execució d'una simulació, alhora que permet ampliar i personalitzar funcionalitats a diferents nivells, com ara automatisme de tasques repetitives fent servir *scripting* amb el llenguatge *Python* o extensions més sofisticades en temps de simulació amb la seva API (*interfície de programació d'aplicacions*).

2.2.1 Fases de la construcció del model

Per tal de construir el model que permet representar tots els elements que hi formen part del sistema a simular s'han portat a terme les següents tasques:

Càrrega d'un plànol base

Per obtenir una referència geogràfica fiable a l'hora de crear els elements físics viaris (seccions) s'ha carregat de fons una plànol en format *shapefile* que conté els contorns de les illes de cases de la ciutat; un cop introduït a l'entorn de simulació l'estudi s'ha focalitzat al tram de l'Avinguda Diagonal comprés entre la plaça de Francesc Macià i el carrer Castillejos, amb una llargària total de 3,55km.

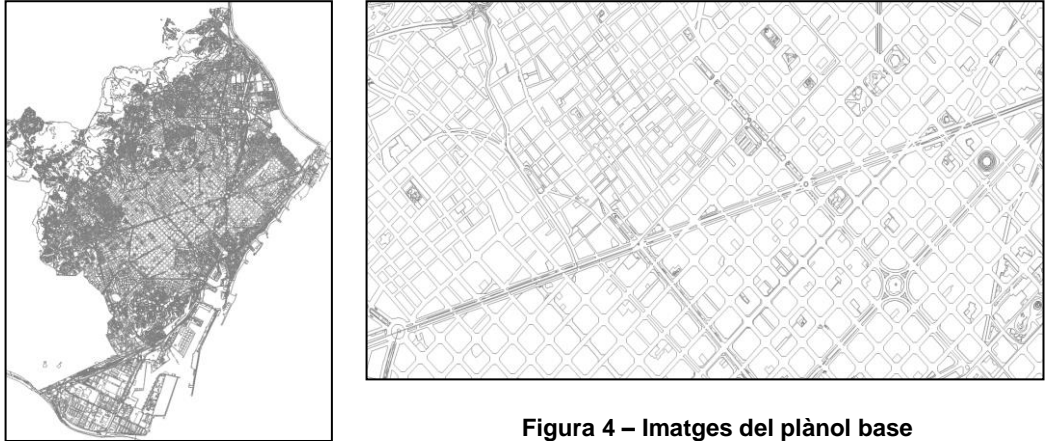


Figura 4 – Imatges del plànol base

Creació de les seccions viàries

Implementant el disseny de la xarxa viària del nou model

Definició de tots els objectes corresponents a les diferents seccions viàries que es preveu que hi haurà a l'escenari real un cop s'hagi fet efectiva la implantació del traçat del tramvia a l'àmbit d'estudi, on destaquen entre d'altres, les següents particularitats:

- Canvi de sentit del carrer Comte d'Urgell, fent que el flux de vehicles circuli direcció a la plaça de Francesc Macià.
- Circulació del vehicle privat a Avinguda Diagonal només habilitat pels laterals, deixant la part central de la secció només pel tramvia.
- Desapareix el gir del carrer de Marina cap al lateral muntanya de l'Avinguda Diagonal, desviant tot el flux cap al carrer Aragó, que amplia el número de carrils disponibles al tram comprés entre els carrers Marina i Sardenya.

La Figura 5 és un exemple de la xarxa viària analitzada, concretament entre els carrers de Pau Claris i Bruc:

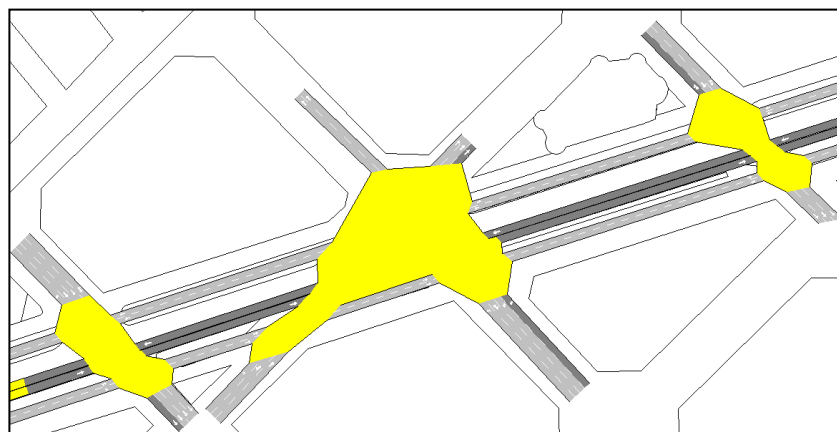


Figura 5 - Exemple xarxa viària amb Aimsun

Definició de les interseccions i girs

Un cop generades les seccions viàries es procedeix a definir les cruïlles o interseccions a partir dels girs permesos entre els diferents carrils de cada secció que hi conflueixen. D'aquesta manera es limita des de quins carrils d'una secció es pot

anar a una altra secció (o a determinats carrils d'aquella secció). Per facilitar la ràpida identificació de la cruïlla i dels resultats que s'obtenen de la mateixa s'associa un codi que coincideix amb el que fa servir internament l'Ajuntament de Barcelona.

Definint la mobilitat

La Figura 6 mostra, a la cruïlla 0322 (Roger de Llúria amb Rosselló), el gir des de Roger de Llúria cap al lateral costat muntanya de l'Avinguda Diagonal, en principi assignat al carril de més a l'esquerra a la secció origen i cap a qualsevol dels carrils de la secció destinació:

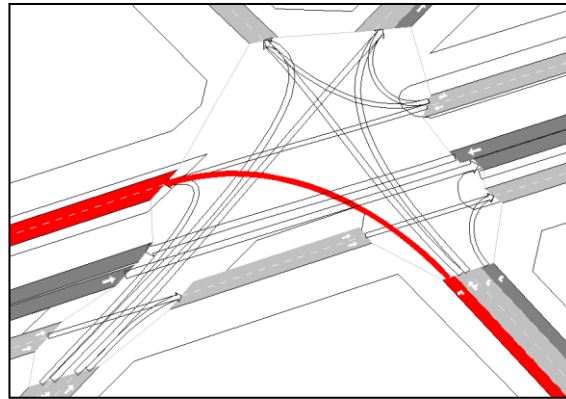


Figura 6 - Exemple de gir a una cruïlla

En determinades zones, s'ha hagut de refinar el comportament dels vehicles a un gir mitjançant l'editor avançat, que permet seleccionar quines combinacions de carrils origen i destinació finalment són vàlides dintre del conjunt de possibles. La Figura 7 mostra com entre els tres carrils origen i final, realment els vehicles circulen cap al carril que els hi correspon en el sentit de la marxa o, com a molt, canvien al del costat, però mai fan canvis de més d'un carril.

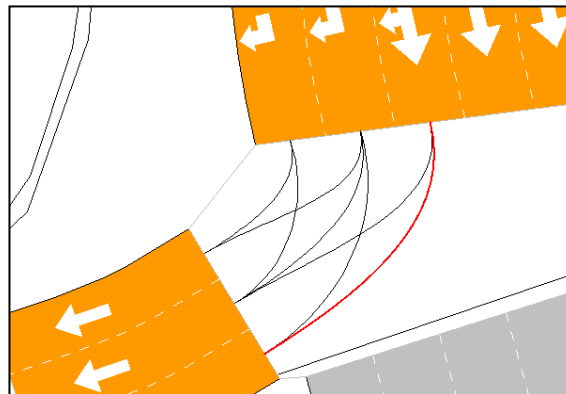


Figura 7 - Exemple de gir amb combinacions de carrils

Configuració d'un pla de control semafòric

Introduint els semàfors

Un cop es tenen tots els girs permesos, abans de procedir a definir res relatiu a la regulació semafòrica, s'han de generar els grups semafòrics de cada cruïlla. Novament, s'ha fet servir la nomenclatura actual d'identificació per part de l'Ajuntament de Barcelona sempre que era possible (hi ha grups que actualment no existeixen, com aquells que regulen el pas del tramvia).

Tal i com es pot apreciar a la Figura 8 i a la Figura 9, en el cas d'exemple de la cruïlla 0116 (carrer de Casanova amb carrer de Buenos Aires), a la part dreta de la Figura 9 es pot veure com el grup que permet l'accés des de Casanova s'identifica com G5, que és el mateix identificador que s'ha definit al model:

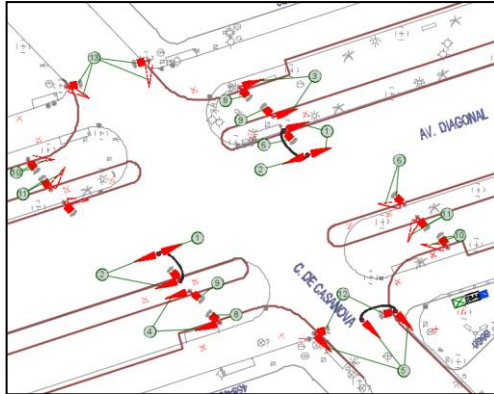


Figura 8 - Exemple mapa actual amb els grups semafòrics

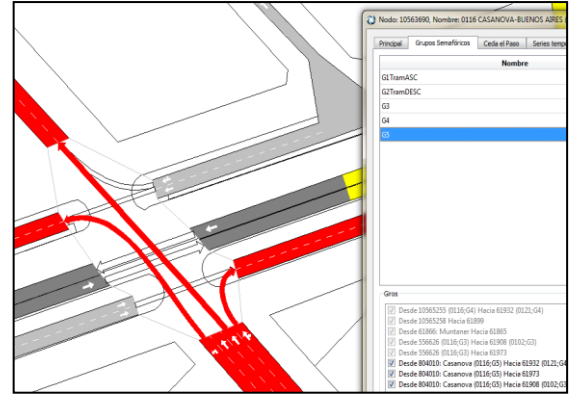


Figura 9 - Exemple d'assignació dels grups semafòrics amb Aimsun

Creats els grups ja es pot procedir a fer la definició del pla de control que es vulgui simular o, com en aquest cas, tenir els paràmetres necessaris per tal de poder fer assignacions diferents de temps per cada grup a cada rèplica simulada tal i com s'explica al corresponent apartat de metodologia. Per exemple, la Figura 10, mostra parcialment la definició real dels grups existents a la cruïlla 0121 (Avinguda Diagonal amb Muntaner) i la Figura 11 una adaptació de la mateixa intersecció però ja contemplant grups específics adaptats al nou entorn amb el pas del tramvia:

| | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Número d'equip: 0121 Localització: AV. DIAGONAL - C. DE MUNTANER Data de la lectura : 25-MAIG-2016 09:23:22 Tipus de regulador : CITY B 2.21 (20 110613) [PROT B 1.4] | | | | | | | | | | |
| | A | b | c | d | E | f | g | h | i | J |
| G1V | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| G2V | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| G3V | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| G4V | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| G5V | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

Figura 10 - Exemple de full amb el repartiment semafòric actual

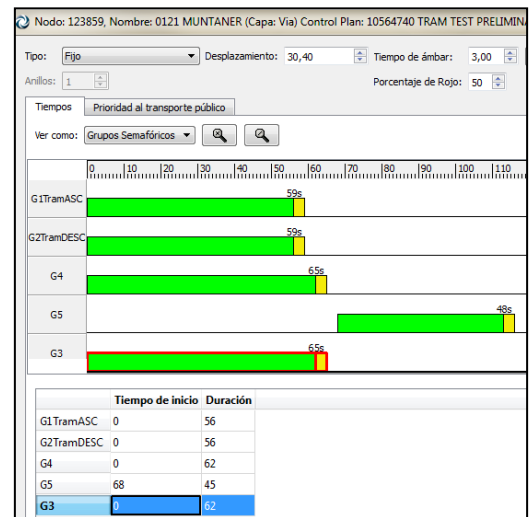


Figura 11 - Exemple de repartiment de grups semafòrics amb Aimsun

Introducció de les dades relatives a la demanda

Dades de la demanda pel model

La demanda del model s'ha materialitzat a partir de les següents accions:

- 1. Tipologia de vehicles.** Definició de las característiques físiques dels vehicles considerats, tant a nivell privat, com els associats a les diferents línies de transport públic, incloent també en aquest últim apartat, el tramvia. Aquestes característiques inclouen les dimensions, acceleració o velocitat màxima permesa, entre d'altres.
- 2. Vehicle privat.** Quant a la generació d'aquesta part de la demanda, s'han fet servir els anomenats estats de trànsit que defineixen per un interval de temps donat, quina intensitat de vehicles s'injecten per les seccions que representen entrades a la xarxa modelitzada i, per cada alternativa de gir, el percentatge de vehicles que fan servir cadascuna de les possibles.
- 3. Transport públic.** Pel que fa a cadascuna de les línies de transport públic, s'han definit les seccions que componen el traçat simulat a la zona d'estudi, especificant si és el cas, les parades comercials a realitzar conjuntament amb el seu temps i amb les freqüències de pas corresponents a l'interval horari de l'escenari.

Programació de funcionalitats addicionals

L'entorn *Aimsun* ofereix un conjunt ampli de possibilitats quant a sortides de resultats provinents de l'execució de simulacions. No obstant, degut, a determinades particularitats de l'estudi realitzat, s'han desenvolupat tot un conjunt de solucions a mida per donar suport a l'obtenció d'indicadors orientats a poder aconseguir els objectius plantejats.

Així doncs s'han estès les funcionalitats mitjançant la programació d'una *API* específica desenvolupada en llenguatge de programació interpretat com és *Python*. El propòsit és, entre d'altres, poder obtenir informació precisa sobre el comportament de tots els tramvies que hi circulen durant el període simulat, incloent el temps de viatge (i per tant, la velocitat) entre tot un conjunt de referències de pas a les línies de detenció dels semàfors i els intervals de pas per totes les parades d'ambdós sentits (*headway*),

Pel cas concret dels punts de referència, s'han definit un conjunt de polígons a mode de detectors, que donen suport a l'obtenció de dades sobre l'activitat que es duu a terme.

A més, s'ha generat codi específic per poder obtenir dades de les línies de bus convencional i de la NXB, de les intensitats als arcs que depenen directament d'una regulació semafòrica i dels nivells de servei de les cruïlles a partir de la base de dades de resultats d'*Aimsun*, però fent una traducció a un format a processar fàcilment per altres components de la solució global.

Automatització del procés, escenaris i rèpliques

Tal i com s'explica més detalladament a l'apartat que explica l'arquitectura de l'aplicació, s'ha generat un *script* dintre del propi entorn d'*Aimsun* que dona suport a l'automatització de certes tasques indispensables per poder executar lots de rèpliques minimitzant la interacció amb l'usuari.

Aquest codi controla el número de rèpliques realitzades en cada escenari i, mitjançant

un conjunt de fitxers a mode de senyals, finalitza l'execució o continua, tot generant sempre fitxers de resultats identificats de manera unívoca per poder portar a terme una anàlisi estadística estructurada del conjunt global.

Per cada rèplica, s'actualitza el pla de control semafòric segons el component d'optimització indiqui (en funció de la fase dins la metodologia), genera una nova llavor de generació de números aleatoris per assegurar que s'està simulant una situació diferent a l'anterior i s'inicia la simulació pròpiament dita durant la qual es cridarà a les funcionalitats esteses descrites anteriorment per, finalment, generar les sortides desitjades.

Generació de resultats

Indicadors

En finalitzar cada rèplica es generen tot un conjunt de fitxers que contenen determinats resultats de la simulació en un format específic i que serveixen com a dades d'entrada a la modelització matemàtica de la funció objectiu:

- **Temps de viatge.** Conté el temps emprat per totes les entitats tipus tramvia entre les diferents posicions de referència de les línies de detenció d'ambdós sentits.
- **Velocitats.** Conté les velocitats mitjanes experimentades per totes les entitats tipus tramvia entre les diferents posicions de referència de les línies de detenció d'ambdós sentits. A més, es calculen, a nivell de rèplica, els valors mínims, màxim, mitjà i desviació estàndard per tots dos sentits de circulació.
- **Freqüències de pas.** Emmagatzema tots els temps de pas per les parades comercials del tramvia als dos sentits.
- **Nivell de servei.** Per les 24 interseccions estudiades, conté el nivell de servei en base a la metodologia de càlcul del *Highway Capacity Manual*.
- **Intensitats.** S'obtenen les intensitats d'aquelles seccions que incideixen als grups semafòrics analitzats.
- **Transport públic:** Conté les velocitats obtingudes per les línies de bus (convencional i NXB) als traçats analitzats al model, incloent el temps a les parades.

2.3 Arquitectura de la solució

Per poder obtenir resultats respecte als diferents paràmetres de funcionament del context simulat per cadascun dels escenaris plantejats tal i com estableix la metodologia proposada, s'han combinat els diferents elements descrits anteriorment en una arquitectura que intenta obtenir el rendiment òptim a partir de l'aprofitament de les característiques específiques individuals.

Elements de l'arquitectura

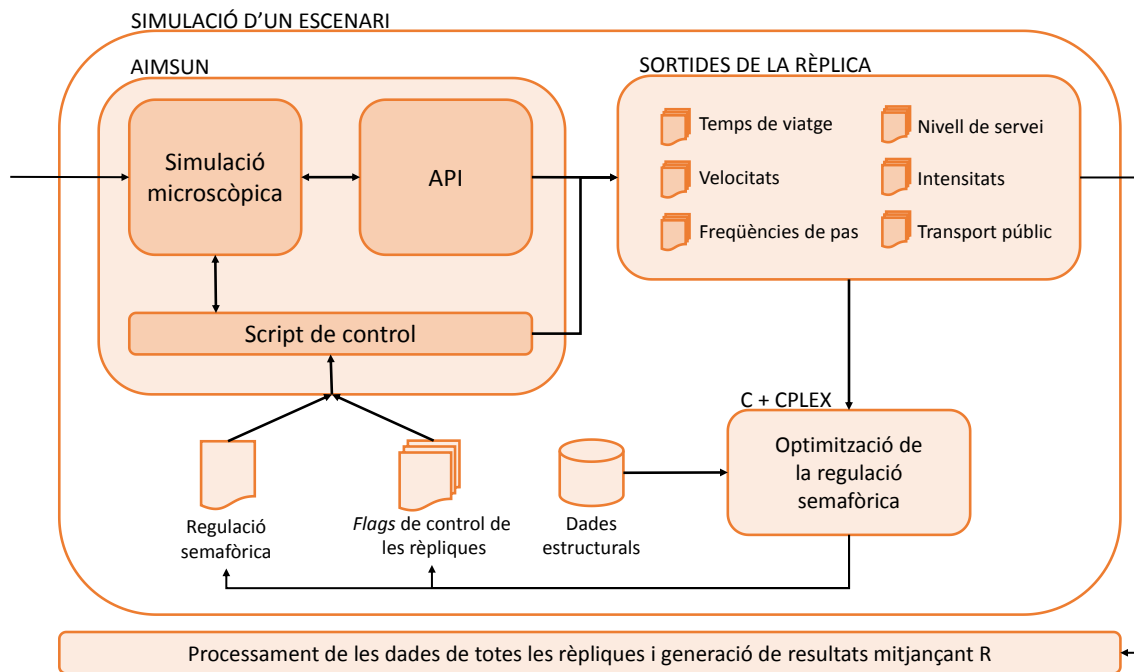


Figura 12 - Esquema de l'arquitectura

Amb l'esquema que es presenta a la Figura 12, el flux de la simulació d'un escenari comença per la primera rèplica, de la qual se n'obtenen tot un conjunt de resultats, ja sigui generades per l'API o pel propi *script* de control, que són importades (juntament amb altres dades estructurals) pel component que s'encarrega d'optimitzar la regulació semafòrica.

En funció del resultat de l'optimització i mitjançant un conjunt de senyals en forma de fitxers (*wait*, *stop* i *next*), l'*script* de control, que és qui els llegeix, també considerant el número de rèpliques efectuades, decideix si s'ha de parar el procés o continuar.

En cas de continuar, es llegeix el nou fitxer de regulació semafòrica acabat de generar (absolutament tots els fitxers que es creen durant el procés de simulació d'un escenari incorporen un identificador de rèplica) i es torna a repetir aquest procés iteratiu.

A mode de resum, la Taula 1 descriu els diferents components de l'entorn que s'ha fet servir per l'estudi:

| Component | Versió o descripció | Propòsit |
|----------------|-----------------------------|---|
| Aimsun | versió 7.0.4 (R25783 x32) | Simulació microscòpica de trànsit |
| Python | versió 2.7.8 | Programació funcions addicionals |
| IBM ILOG CPLEX | Optimization Studio v12.6.3 | Optimització de la funció objectiu |
| C | Llenguatge de programació | Modelització matemàtica |
| R | versió 3.2.0 | Processament de dades de sortida i generació de resultats |

Taula 1 - Components de l'arquitectura

3 Metodologia

En aquest capítol es detalla la metodologia utilitzada, dissenyada expressament per resoldre les necessitats específiques de la configuració dels semàfors a la zona definida.

Es pot resumir en els següents punts:

- **Calibració del model:** a partir de
 - ajustaments a les cruïlles més complexes,
 - temps de verd mínim als carrers transversals per garantir el pas dels vianants,
 - sincronització per facilitar el pas del bus al tram entre Via Augusta i Passeig de Gràcia.
- **Execucions** en lots de rèpliques del procés iteratiu **Simulació + Càlcul semàfors** per determinar les **millors configuracions de semàfors**. Cada rèplica aporta variabilitat a certs paràmetres que permeten abastar un rang més ampli de situacions possibles al món real.
- Aplicació de **criteris estadístics** per classificar les solucions obtingudes.
- Noves execucions a partir dels millors resultats per garantir **l'estabilitat i robustesa de les solucions**.

El procediment s'organitza en tres fases:

- Una primera fase on s'analitzen diferents escenaris possibles, en funció del temps de cicle i de la freqüència de pas del tramvia
- La segona fase, on s'estudien amb més detall els dos millors escenaris, a partir dels resultats obtinguts a la primera fase.
- Finalment, una tercera fase per aprofundir en l'escenari seleccionat, on es fan ajustos sobre la configuració de semàfors per millorar el temps de pas del tramvia i la fluïdesa del trànsit.

3.1 Fase preliminar – preparació de l'entorn

Sobre un escenari inicial es fa un estudi previ per ajustar i validar a nivell de simulació la cruïlla de Francesc Macià i d'altres complexes, com Passeig de Gràcia o Passeig de Sant Joan, la convivència Tramvia-Autobús a la secció compresa entre Passeig de Gràcia i Via Augusta, i per l'automatització de l'execució de múltiples rèpliques, configuració dinàmica entre elles i generació de resultats. També serveix per ajustar els paràmetres d'entrada del procés d'optimització.

3.2 Primera fase – Comparació diferents escenaris

En aquesta fase, partim d'un conjunt d'escenaris sobre els que es treballarà. Aquests escenaris queden recollits a la Figura 13, i són els següents:

- **Escenari 120''/4'**: temps de cicle de 120'' i freqüència de pas de tramvies de 4'. És l'escenari que es fa servir per la fase preliminar. El temps de cicle de 120'' és el que està implantat a la part alta de la Diagonal.
- **Escenari 120''/3'**: temps de cicle de 120'' i freqüència de pas de tramvies de 3'. Aquest escenari és molt semblant a l'anterior pel que fa a la configuració de semàfors, ja que l'interval de pas no li afecta, però té impacte en el comportament del tramvia, en particularitat quant a la regularitat de pas, ja que la freqüència no és múltiple del cicle. Però es considera important analitzar-lo per les implicacions a nivell operatiu i de demanda.
- **Escenari 96''/3'12''**: temps de cicle de 96'' i freqüència de pas de tramvies de 3'12''. El temps de cicle de 96'' és el més estès a la ciutat de Barcelona i el que està implantat a la part del Besós de la Diagonal.
- **Escenari 105''/3'30''**: temps de cicle de 105'' i freqüència de pas de tramvies de 3'30''. S'inclou com a solució entre la de cicle més curt (96'') i més llarg (120'').

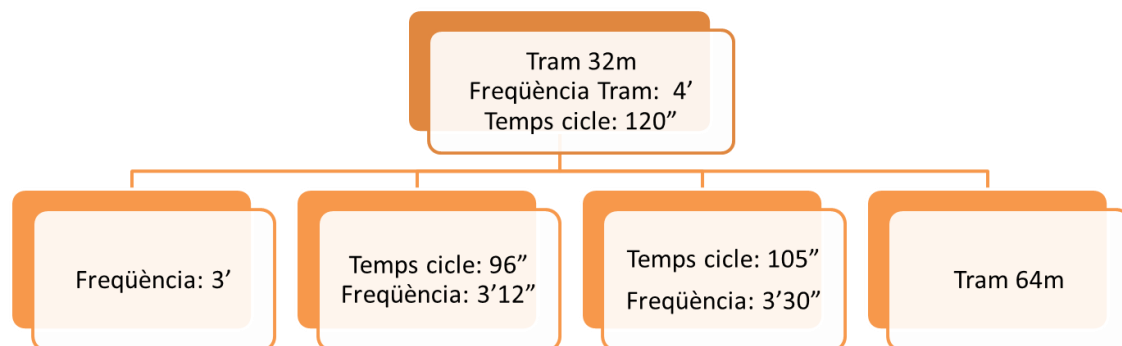


Figura 13 - Diagrama dels escenaris analitzats

S'executen les simulacions per cada escenari, per validar el comportament:

- Bateria de simulacions amb **configuració de semàfors variable**, obtingudes mitjançant el model matemàtic, a partir de les dades generades per la simulació.
- A les simulacions es fan servir **temps a les parades i flux de vehicles aleatori**.
- S'assigna una freqüència de sortida de tramvies en funció de l'escenari.
- S'obtenen d'indicadors del comportament durant l'hora punta de 8h-9h del matí.

Amb els resultats obtinguts, i els indicadors, es fa una comparativa per tal de valorar els escenaris i fer una primera selecció. Dels quatre escenaris inicials es passa a dos, que es tornaran a analitzar amb més detall.

3.3 Segona fase – Detall dels dos millors escenaris

Per cadascuna de les opcions seleccionades, després del primer filtre com a resultat de la primera fase, es fixa una configuració semafòrica. Aquesta es determina en funció dels resultats obtinguts, de forma que, tant la velocitat mitjana del tramvia en els dos sentits de circulació com els nivells de servei de les cruïlles tinguin uns nivells acceptables i que siguin estables.

Amb les configuracions semafòriques fixades, es continua el procediment:

- Bateria de simulacions amb **la configuració de semàfors escollida (no variable)**.
- Temps a les parades i flux de vehicles aleatori.
- Freqüència de sortida de tramvies en funció de l'escenari
- Obtenció d'indicadors del comportament durant l'hora punta de 8h-9h del matí.

S'afegeix un altre nivell més de proves amb la incorporació del tramvia de 64 metres:

- Primer es fa una valoració de com afecta la incorporació de combois de 64 metres sobre la infraestructura prevista.
- Bateria de simulacions per determinar la configuració semafòrica, sense modificar la infraestructura prevista.
- Bateria de simulacions amb els semàfors fixats, temps a les parades i flux aleatori.
- Obtenció d'indicadors, que s'afegiran als indicadors resultants de les proves anteriors.

Igual que a la fase anterior, es fa una comparativa a partir dels indicadors obtinguts, per tal de determinar quin serà l'escenari amb el que es continuarà l'estudi.

3.4 Tercera fase – Ajustant l'escenari escollit

Aquesta fase té per objectiu validar el comportament dels diferents elements viaris en l'escenari definit. Per això, en primer lloc cal fer els ajustos necessaris a la

configuració de semàfors que ajudin a calibrar la simulació. Es treballa en tres àmbits diferents: les detencions del tramvia fora de les parades, que fan augmentar el temps de recorregut del tramvia; la freqüència de pas del tramvia per les diferents parades, que si és molt variable li resta fiabilitat; i per últim, la circulació als carrers transversals, per tal de millorar la mobilitat per autobusos i vehicles privats.

Així, es porten a terme els següents ajustos:

Procediment Fase 3:
ajustos fets

- 1) **Detectar cruïlles amb aturades amb certa reincidència** a partir de:
 - la visualització de les pròpies simulacions,
 - revisió del diagrama espai/temps d'algunes simulacions,
 - anàlisi estadístic dels temps de recorregut del tramvia entre les diferents parades, i comparant el comportament en els dos sentits de la marxa,
 - anàlisi estadístic dels intervals de pas dels tramvies a les parades i la seva evolució al llarg del recorregut.

- 2) **Accions realitzades sobre les cruïlles susceptibles de ser millorades pel pas del tramvia:**
 - ampliar el temps de verd del tramvia, si és factible fer-ho sense empitjorar significativament el comportament dels vehicles als carrers transversals, i
 - ajustar el temps d'offset, tenint en compte de no afectar a cap dels dos sentits de circulació del tramvia.

- 3) **Respecte de la circulació de vehicles als carrers transversals:**
 - es revisen aquelles cruïlles amb un nivell de servei alt, i que a les simulacions es pot comprovar que tenen un grau de congestió important, i
 - es revisa el pla semaforic assignat: es fan petits ajustos quant a repartiment entre els carrers transversals, sense modificar els temps del tramvia, i respecte als temps de neteja de cruïlla.

Amb els ajustos realitzats, es tornen a fer simulacions per tal de validar i comprovar que el comportament de tots els elements ha millorat, obtenint els indicadors de les simulacions realitzades.

4 Resultats obtinguts

Els diferents indicadors obtinguts mitjançant les rèpliques fetes són les eines que ajuden a fer un anàlisi de la mobilitat en els escenaris analitzats: permeten veure el comportament dels elements que formen part de l'estudi.

4.1 Hipòtesi

Consideracions
prèvies

Els **fluxos de vehicles considerats** contempnen la reducció de 12.500 vehicles/dia previstos en els estudis de demanda previs, segons la darrera assignació de trànsit per l'escenari simulat proporcionada per l'Ajuntament de Barcelona.

S'està simulant **l'hora punta, de 8h a 9h** (aplicant un factor del 7% sobre la IMD – intensitat mitjana diària), segons les dades recollides a la gràfica de la Figura 14.

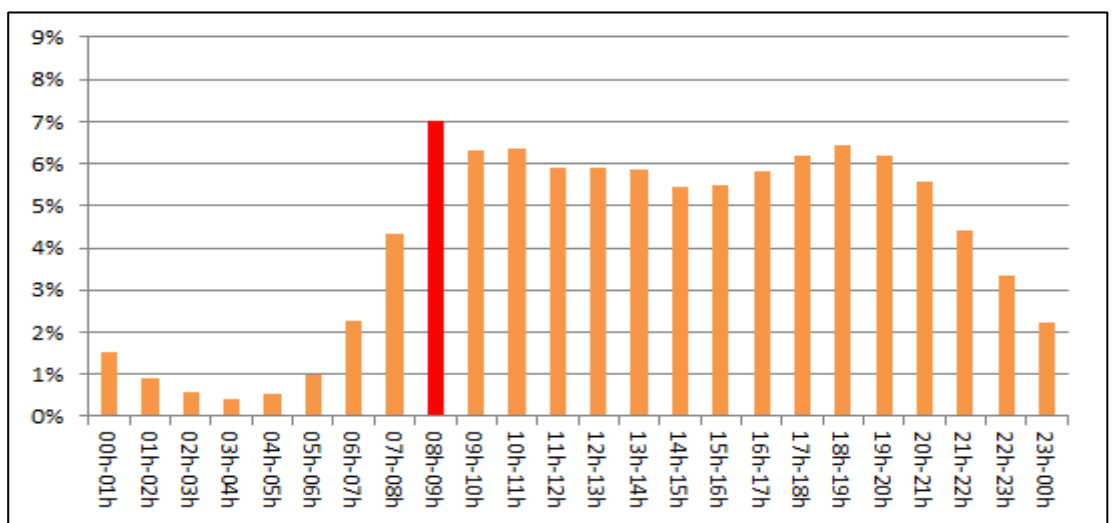


Figura 14 - Intensitat mitjana de flux de vehicles

S'ha fet servir una matriu origen-destí a nivell local en el cas específic de **Francesc Macià**, per tal de simular el comportament esperat dels vehicles, tal i com es detalla a la Taula 2.

| Origen | Destinació | Percentatge |
|--|-------------------------------------|-------------|
| Carrer del Comte d'Urgell | Avinguda Diagonal Central (sortida) | 70,3% |
| | Avinguda Diagonal Lateral (sortida) | 21,1% |
| | Avinguda de Pau Casals | 8,7% |
| Entrada a BCN per central Av. Diagonal | Lateral Av. Diagonal → Villarroel | 66,8% |
| | Lateral Av. Diagonal → continuen... | 33,2% |
| Entrada a BCN per lateral Av. Diagonal | Lateral Av. Diagonal → Villarroel | 12,7% |
| | Lateral Av. Diagonal → continuen... | 84,0% |
| | Avinguda de Pau Casals | 3,3% |
| Avinguda de Josep Tarradellas | Lateral Av. Diagonal → Villarroel | 0,5% |
| | Lateral Av. Diagonal → continuen... | 11,6% |
| | Avinguda de Pau Casals | 63,9% |
| | Avinguda Diagonal Lateral (sortida) | 14,9% |
| | Avinguda Diagonal Central (sortida) | 9,2% |
| Avinguda de Pau Casals | Avinguda Diagonal Lateral (sortida) | 0,0% |
| | Avinguda Diagonal Central (sortida) | 2,8% |
| | Avinguda de Josep Tarradellas | 58,9% |
| | Lateral Av. Diagonal → Villarroel | 22,8% |
| | Lateral Av. Diagonal → continuen... | 15,4% |

Taula 2 - Repartiment de flux a Francesc Macià

Temps de neteja de la cruïlla, pels diferents grups semafòrics: s'han obtingut de les dades actuals, i quan no ha sigut possible, s'han calculat les distàncies de recorregut aproximades, i a partir de les velocitats mitjanes de circulació (tramvia – 20 km/h; vehicle privat – 35 km/h; autobús – 12/20 km/h - depèn de la zona de circulació) s'ha calculat el temps corresponent.

Disseny de l'avinguda Diagonal: s'ha treballat amb les següents hipòtesi de disseny, facilitades per l'Ajuntament de Barcelona:

- **Ubicació de les parades**: són 6 les parades definides, amb extrems a la plaça Francesc Macià i Avinguda Diagonal/Castillejos, segons el que es pot veure a la Figura 15:



Figura 15 - Parades del tramvia a la secció entre Francesc Macià i Castillejos

- **Distribució de carrils:** per tal d'ubicar les vies del tramvia al llarg de l'Avinguda Diagonal s'ha treballat amb una distribució de 2 carrils centrals destinats al pas del tramvia amb l'espai corresponent per les andanes, dos carrils centrals reservats per les bicicletes i quatre carrils laterals destinats a la circulació del vehicle privat. En total, es calcula una distància total d'uns 30 metres de vorera de façana a vorera de façana, per al pas dels vianants.

Temps de durada de les fases del semàfor fixes: no s'han tingut en compte els possibles efectes que poden tenir les extensions de fase, s'ha optat per treballar de forma conservadora, deixant les extensions com possibles millores a aplicar a partir dels resultats obtinguts.

Temps de parada variable al TRAM: 20,6 segons amb desviació de 7,6" (Font: estudi de camp propi obtingut al segment Francesc Macià-Zona Universitària, ambdós sentits).

Freqüències de pas de les línies de bus: 11 minuts per la línia 22, 14 minuts per la línia 55, 8 minuts per la línia V11 i 6 minuts per les línies V15 i V17.

Fórmules utilitzades:

- S'ha fet servir la constant de Webster (525) per calcular la **intensitat mitjana de saturació**, així com una **amplada de 2'5m per carril**.
- Les **comparacions amb les dades actuals** fan servir una extrapolació dels temps semafòrics de 96" de cicle a 120" de cicle.
- El càlcul del temps mig o demora mitja d'espera es fa d'una forma determinista, a partir de valors mitjans: és la forma més senzilla, però que permet fer comparacions amb dades actuals. Es fa amb la següent fórmula, on r és el temps de vermell del semàfor, μ és la intensitat mitjana de saturació, λ és la taxa d'arribada de vehicles al semàfor i C el temps de cicle.

$$W_i = \frac{1}{2} \frac{\mu r^2}{(\mu - \lambda)C}$$

- El càlcul de la longitud de la cua en vehicles es fa a partir de la fórmula que es detalla a continuació, on λ és la taxa d'arribada de vehicles al semàfor i W_i és el temps d'espera ; per traduir-la a metres, s'ha fet una estimació de 4,5 metres per vehicle i s'ha dividit pel nombre de carrils del carrer:

$$Q = \lambda \cdot W_i$$

- El nivell de servei a les cruïlles és el que proporciona l'Aimsun com a resultat de la simulació. Està relacionat amb el temps mig d'espera dels vehicles als carrers que conflueixen a la cruïlla. La Taula 3 mostra l'escala de valors i la descripció.

| Símbol | Interval | Descripció |
|--------|----------|---|
| A | 0-10 | Circulació lliure: intensitat de tràfic baixa i velocitat alta |
| B | 10-20 | Circulació estable: la velocitat comença a estar condicionada pels altres vehicles |
| C | 20-35 | Circulació estable: certa dificultat en fer avançaments i canvis de carril |
| D | 35-55 | Densitat alta: velocitat i llibertat de maniobra restringits |
| E | 55-80 | Condicions properes al màxim de capacitat de la via: velocitat baixa i possibilitat de maniobra escassa |
| F | >80 | Saturació de la via i circulació inestable. |

Taula 3 - Nivell de servei a les cruïlles - Escala de valors

4.2 Primera fase – Comparació diferents escenaris

En primer lloc, es detallen els resultats de les proves fetes per validar els diferents escenaris proposats. Tal i com s'explica al capítol 3, els escenaris analitzats són:

- **Escenari 120''/4'**: temps de cicle 120'' i freqüència de pas de tramvies 4'.
- **Escenari 120''/3'**: temps de cicle 120'' i freqüència de pas de tramvies 3'.
- **Escenari 96''/3'12''**: temps de cicle 96'' i freqüència de pas de tramvies 3'12''.
- **Escenari 105''/3'30''**: temps de cicle 105'' i freqüència de pas de tramvies 3'30''.

Característiques
particulars dels
escenaris

Per cada escenari cal definir uns paràmetres propis; tots comparteixen algunes dades, com per exemple el temps de neteja de cruïlla per cada grup semafòric (sols depèn del tipus de vehicle i la seva velocitat mitjana de circulació), el temps perdut, el temps d'ambre. Però d'altres depenen del temps de cicle, com per exemple el temps mínim/màxim de vermell (quan més petit és el temps de cicle, més ajustats són els temps semafòrics), l'instant de sortida dels tramvies a la simulació.

Com ja s'ha explicat a la metodologia, a aquesta fase del procediment cada rèplica s'executa amb un grau d'aleatorietat que ve donat per el flux dels vehicles, el temps del tramvia a les parades i a més a més, cada rèplica té una configuració semafòrica diferent, calculada en el procés d'optimització a partir dels resultats de la simulació. Analitzant els resultats a partir dels indicadors obtinguts, el que es vol es trobar, per cada escenari, una configuració semafòrica que es la que mostra tenir millor comportament, tant a nivell de temps de recorregut del tramvia com a nivell de temps d'espera a les cruïlles (temps d'espera que afecta a autobusos i vehicle privat).

4.2.1 Resum de resultats

Revisant velocitats
mitjanes del tramvia

A la Figura 16 es poden veure els valors de la velocitat mitjana del tramvia, per cadascun dels sentits i cadascun dels escenaris analitzats. Cada línia de diferent color correspon a un dels escenaris; i els punts indiquen el valor que té a la rèplica corresponent. Es pot veure que tant l'escenari **120''/4'** com els escenaris **120''/3'** i **105''/3'30''**, tenen un comportament força similar, mentre que a l'escenari **96''/3'12''**,

la velocitat mitjana del tramvia és lleugerament inferior a totes les rèpliques.

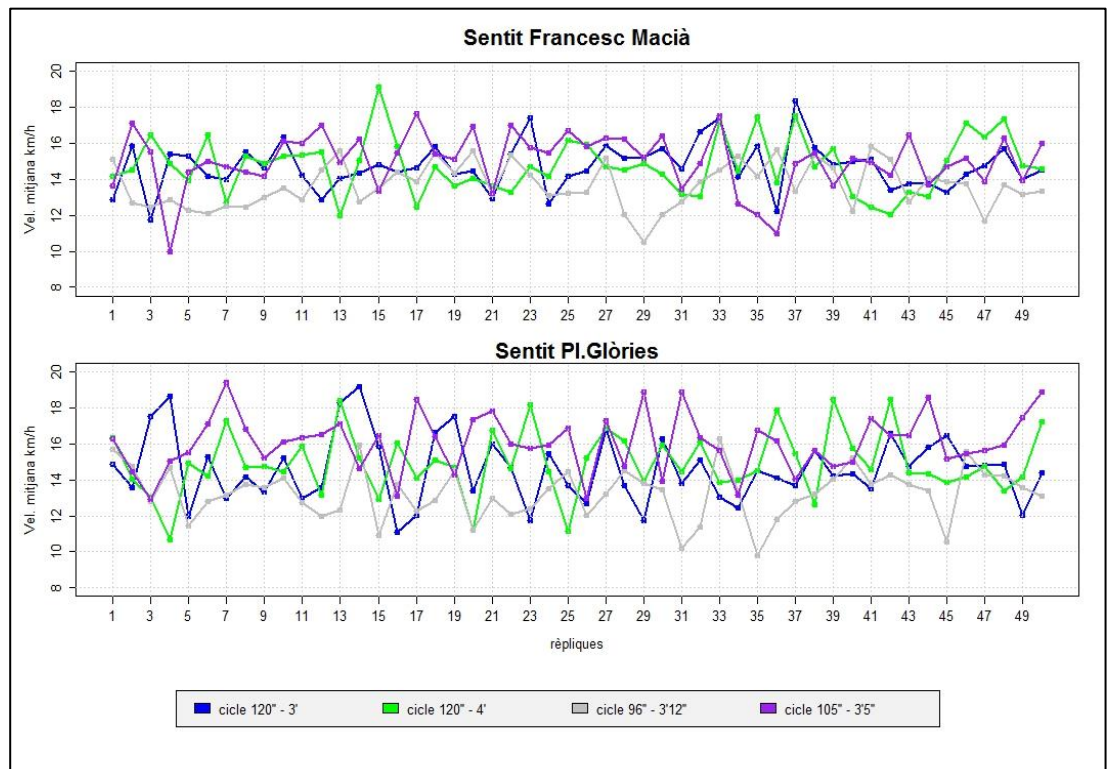


Figura 16 - Evolució Velocitat mitjana del tramvia

Afegim la congestió als carrers

A la Figura 17, juntament amb la velocitat mitjana es representa el nivell de servei a les cruïlles, amb una gràfica per cadascun dels escenaris. L'eix vertical de la dreta recull la velocitat mitjana del tramvia, i es pot veure els valors que agafa per cada sentit (blau fort i morat), i en blau cel la mitjana dels dos valors. L'eix vertical de l'esquerra correspon al nombre de cruïlles, i les barres (una per cada rèplica), mostren el nombre de cruïlles que tenen com a nivell de servei mitjà un valor D (35-55) o superior. En groc les cruïlles amb nivell D, taronja les cruïlles amb nivell E, vermell les cruïlles amb nivell F, i s'ha afegit un nivell F+ (no és estàndard), en color fosc, per indicar aquelles amb un nivell de servei superior a 100. Es treballa amb els nivells de servei a partir del nivell D ja que és a partir del que es considera que es pot començar a parlar de congestió (tal i com es descriu a la Taula 3).

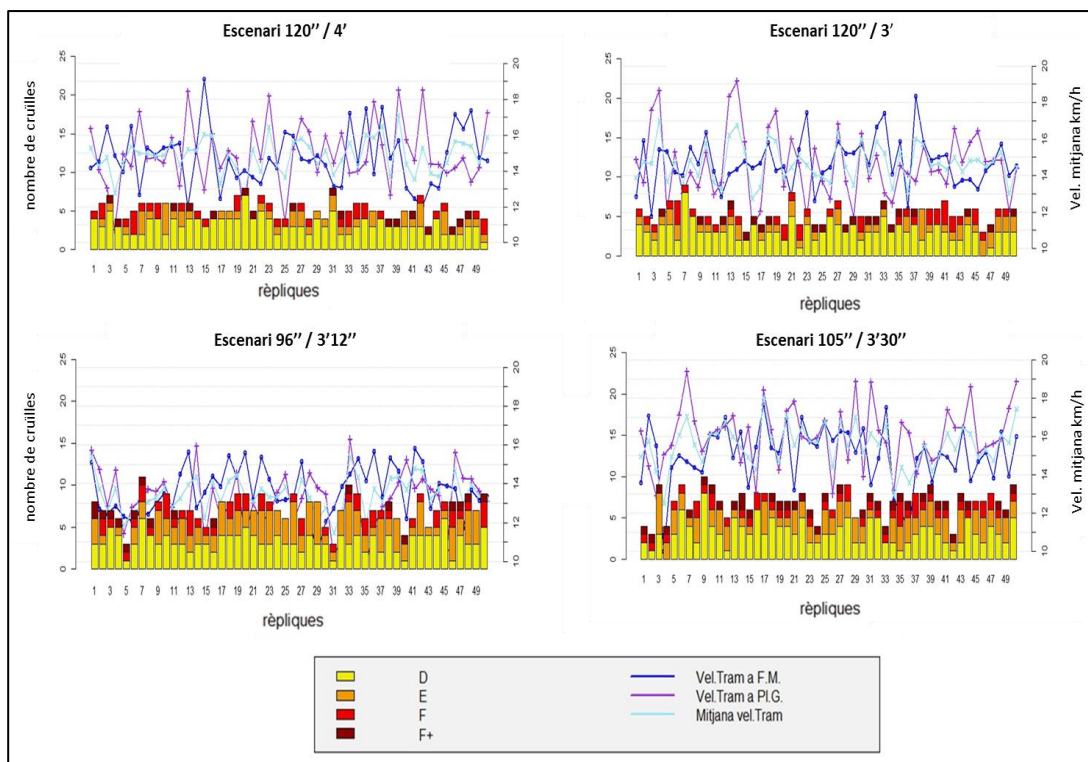


Figura 17 - Vel. mitjana i nivell de servei – Diferents escenaris

Revisant tots els indicadors de forma conjunta

Per cada escenari, s'ha seleccionat la rèplica amb un millor comportament, tal i com s'explica al capítol 3 . A la Taula 4 es pot veure el resum del nivell de servei mitjà a les cruïlles, per la rèplica seleccionada. També s'inclou la velocitat mitjana del tramvia en cadascun dels sentits i el nivell de *tram-bunching* que s'ha observat al llarg de les rèpliques. Aquest últim indicador ajuda a posar valor a la fiabilitat i regularitat del servei. S'ha calculat a partir dels temps d'arribada de dos vehicles consecutius a les parades, i s'ha considerat que hi havia *tram-bunching* si dos vehicles consecutius arriben a alguna de les parades amb una separació en el temps inferior a un 25% de l'interval de pas teòric. A la taula es mostren el total de rèpliques en les que han aparegut casos de *tram-bunching*, mentre que el promig es calcula dividint el total de casos que s'han donat pel total de rèpliques que s'han executat.

| CRUÏLLA | Tc 120" - 3' | | Tc 120" - 4' | | Tc 96" - 3'12" | | Tc 105" - 3.5' | |
|------------------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | Classificació | Velocitat (km/h) | Classificació | Velocitat (km/h) | Classificació | Velocitat (km/h) | Classificació | Velocitat (km/h) |
| 101-FRANCESC MACIÀ | D | 42 | D | 41 | D | 45 | D | 40 |
| 102-CALVET - VILLARROEL | C | 22 | B | 18 | C | 27 | C | 31 |
| 116-CASANOVA - BUENOS AIRES | B | 13 | C | 21 | B | 18 | C | 24 |
| 121-MUNTANER | B | 20 | D | 41 | C | 29 | B | 18 |
| 127-ARIBAU | B | 15 | F | 96 | C | 22 | B | 11 |
| 132-ENRIQUE GRANADOS - Tuset | A | 3 | A | 5 | B | 19 | A | 3 |
| 301-BALMES - PARIS | E | 61 | B | 20 | E | 66 | D | 49 |
| 302-VIA AUGUSTA | C | 29 | C | 33 | E | 69 | B | 19 |
| 308-RAMBLA CATALUNYA | A | 3 | A | 3 | A | 8 | A | 5 |
| 314-P GRACIA - CÔRSEGA | A | 8 | A | 9 | B | 14 | B | 13 |
| 318-PAU CLARIS - ROSSELLÓ | B | 12 | B | 13 | B | 16 | B | 13 |
| 322-ROSSELLO-ROGER DE LLURIA | E | 78 | D | 50 | D | 43 | C | 29 |
| 326-BRUC - PROVENÇA | D | 37 | A | 9 | C | 32 | B | 15 |
| 329-GIRONA - PROVENÇA | E | 79 | B | 13 | C | 27 | B | 16 |
| 503-BAILLEN - MALLORCA | B | 10 | B | 11 | B | 15 | B | 12 |
| 504-P SANT JOAN - MALLORCA | E | 79 | C | 34 | E | 75 | E | 72 |
| 508-ROGER DE FLOR - VALÈNCIA | A | 9 | A | 7 | A | 9 | A | 7 |
| 509-VALENCIA-NÀPOLS | C | 31 | C | 28 | E | 71 | F+ | 180 |
| 521-SICILIA | B | 14 | B | 14 | B | 11 | B | 13 |
| 522-ARAGÓ - SARDENYA | C | 23 | D | 35 | B | 17 | C | 23 |
| 531-MARINA - CONSELL DE CENT | A | 8 | A | 8 | B | 12 | B | 10 |
| 625-CONSELL DE CENT-LEPANT | B | 19 | B | 19 | C | 24 | B | 20 |
| 2807-PADILLA - DIPUTACIÓ | A | 5 | A | 5 | A | 5 | A | 6 |
| 2805-CASTILLEJOS | A | 8 | A | 7 | A | 5 | A | 9 |
| | Sentit FM | Sentit GL | Sentit FM | Sentit GL | Sentit FM | Sentit GL | Sentit FM | Sentit GL |
| VEL. MITJA TRAMVIA (KM/H) | 15,8 | 15,6 | 17,6 | 15,4 | 14,6 | 14,1 | 15,5 | 16,0 |
| | Total Rèpl. | Promig | Total Rèpl. | Promig | Total Rèpl. | Promig | Total Rèpl. | Promig |
| CASOS POSSIBLE TRAM-BUNCHING | 31 | 1,74 | 7 | 0,2 | 9 | 0,2 | 9 | 0,28 |

Taula 4 - Nivell de servei a les cruïlles - Diferents escenaris

4.2.2 Conclusions Fase 1

Descartem dos escenaris

Amb les dades reportades, la primera conclusió és que, pel que fa a durada del trajecte del tramvia, l'escenari **96"/3'12"** és el que presenta pitjors prestacions, amb unes velocitats mitjanes que es mouen al voltant dels 14 km/h, mentre que a la resta d'escenaris, les velocitats mitjanes estan entre 15'4 km/h i 16'0 km/h en sentit Pl. Glòries, i els 15'5 km/h i 17'6 km/h en sentit Francesc Macià.

Pel que fa al *tram-bunching*, en aquest cas és l'escenari **120"/3'** el que mostra un comportament més inestable, ja que trobem casos de possible *tram-bunching* a 31 de les 50 rèpliques, i més d'un cas a les rèpliques on s'ha produït, amb un promig d'1'74, mentre que la resta donen un promig entre 0'2-0'3. Aquest indicador està directament associat a l'interval de pas i la seva relació amb el temps de cicle, i en el cas de l'escenari **120"/3'** l'interval de pas no és proporcional al cicle; això fa que, en cas de pèrdua (o guany) d'un cicle d'un dels vehicles, sigui més probable que acabi solapant-se amb el següent (anterior).

Per últim, s'observa el comportament dels vehicles mitjançant el nivell de servei. Mirant les gràfiques de la Figura 17, es pot apreciar una lleugera diferència entre els escenaris 120"/4' i 120"/3' i els altres dos escenaris. Ja que, mentre que als dos primers, el nombre de cruïlles amb un nivell de servei alt està al voltant de 5 a la majoria de les rèpliques (amb 1 o 2 com a màxim en els nivells més alts), en el tercer i quart escenari aquest número és superior a 5 en la majoria de les rèpliques, arribant a 10 en alguns casos. En el cas dels dos escenaris amb temps de cicle 120", és

correcte que tots dos tinguin un comportament similar pel que fa a la mobilitat de vehicles no tramvies, ja que la única diferència ve donada per l'interval de pas dels tramvies, i això no condiciona la configuració semafòrica. I que els altres dos tinguin una pitjor resposta, a la majoria de les rèpliques, es pot explicar per que els temps de cicle són més petits, i per tant, hi ha menys temps per repartir entre els diferents carrers que intervenen a les cruïlles, en particular aquelles on hi ha 3 fases semafòriques.

Tot això, finalment, porta a decidir descartar dos dels escenaris, i continuar treballant amb els altres dos. I els **dos escenaris descartats són** l'escenari **96"/3'12"**, en ser el de menor velocitat mitjana comercial del tramvia, i l'escenari **120"/3'**, per la probabilitat de *tram-bunching*.

4.3 Segona Fase – Detall dels dos millors escenaris

Entrem doncs a la segona fase de la metodologia. Tal i com s'explica al capítol 3 ara es treballa amb una configuració semafòrica fixada (la millor de la fase anterior), i es fan simulacions per tal de validar el comportament de la solució seleccionada. L'objectiu es determinar amb quin dels dos escenaris continuar l'estudi detallat.

4.3.1 Resum de resultats

Revisant velocitats mitjanes del tramvia

Pel que fa a les velocitats mitjanes del tramvia, la Figura 18 mostra els resultats per l'escenari **120"/4'**, mentre que la Figura 19 mostra els resultats per l'escenari **105"/3'30"**. Aquí els temps dels semàfors són fixes, però el flux de vehicles i el temps a les parades continua essent variable. En totes dues gràfiques, la línia blau fort correspon a la velocitat mitjana en sentit Francesc Macià, mentre que la morada representa la velocitat mitjana en sentit Pl. Glòries. Les línies grises marquen el primer i tercer quartil en que es mou la velocitat mitjana del tramvia. Quan més properes estan les línies grises, menys variabilitat a la velocitat mitjana trobem, el que vol dir un comportament del tramvia més robust. A tots dos escenaris el trajecte en sentit Francesc Macià mostra una velocitat mitjana força estable, mentre que en sentit Pl. Glòries apareix més variabilitat. A més a més, en el cas de l'escenari **120"/4'**, es veu un canvi brusc de la tendència en el tramvia sentit Pl. Glòries, que pot ser causa de la variabilitat de les dades aleatòries.

Afegim la congestió als carrers

La Figura 20 i la Figura 21 mostren el nivell de servei a les cruïlles per cadascun dels escenaris. Les barres representen el numero de cruïlles amb un nivell de servei mitjà tipus "D" o superior per cada rèplica. Com ja s'ha comentat abans, sols es mostren els nivells de servei D o superior, en ser els que es poden traduir en congestió, tal i com es defineix a la Taula 3. El nombre de cruïlles amb més congestió està al voltant de 4 en el cas de l'escenari **105"/3'30"**, i de 5 en l'escenari **120"/4'**, tot i que, en el primer apareixen sempre 1 o 2 cruïlles amb els nivells més alts (F o F+), mentre que en el segon, a 15 de les rèpliques el nivell màxim que s'assoleix és de tipus "E". Això fa pensar que a l'escenari **120"/4'**, amb un petit ajust, és possible millorar les cruïlles amb pitjor servei, ja que no sempre tenen aquest comportament, mentre que en el de

105"/3'30" serà més difícil rebaixar els nivells de servei de les que tenen pitjor temps d'espera.

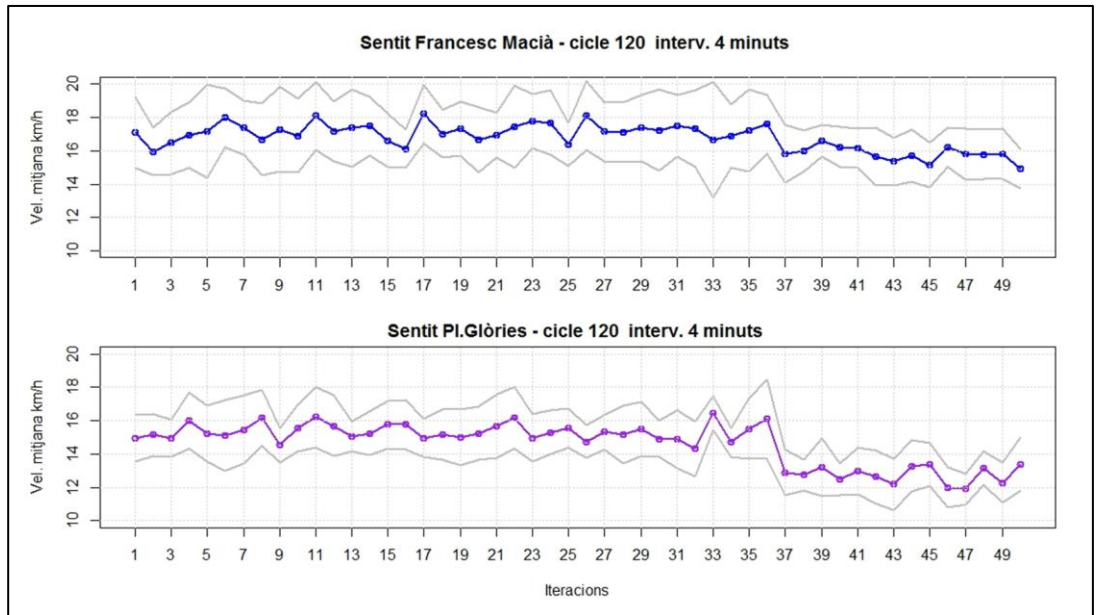


Figura 18 - Velocitat mitjana tramvia - Escenari 120"/4'

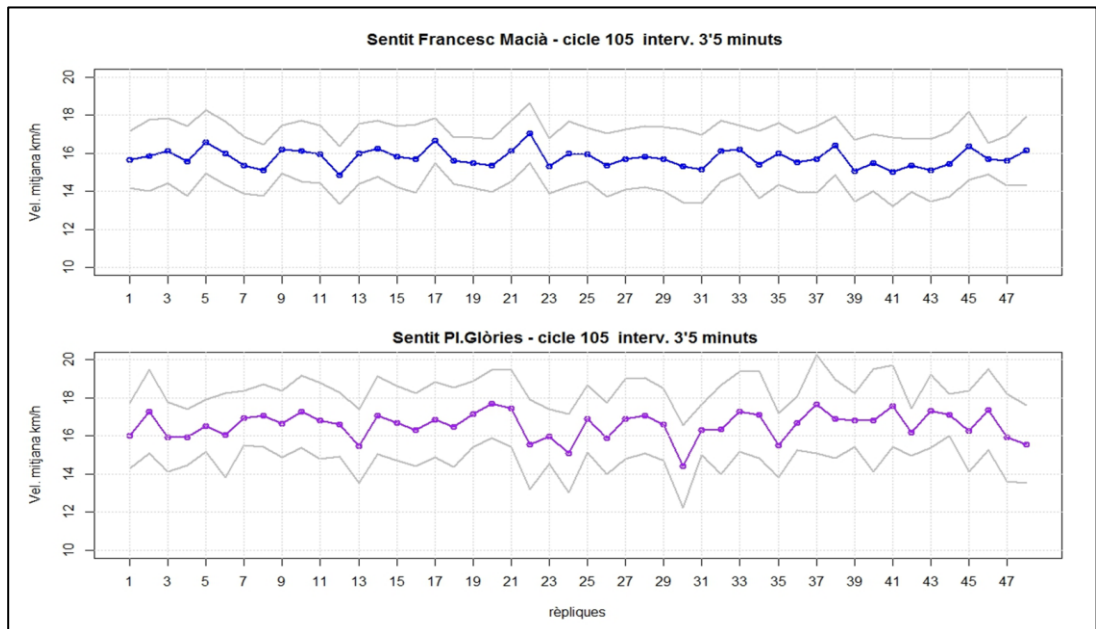


Figura 19 - Velocitat mitjana tramvia - Escenari 105"/3'30"

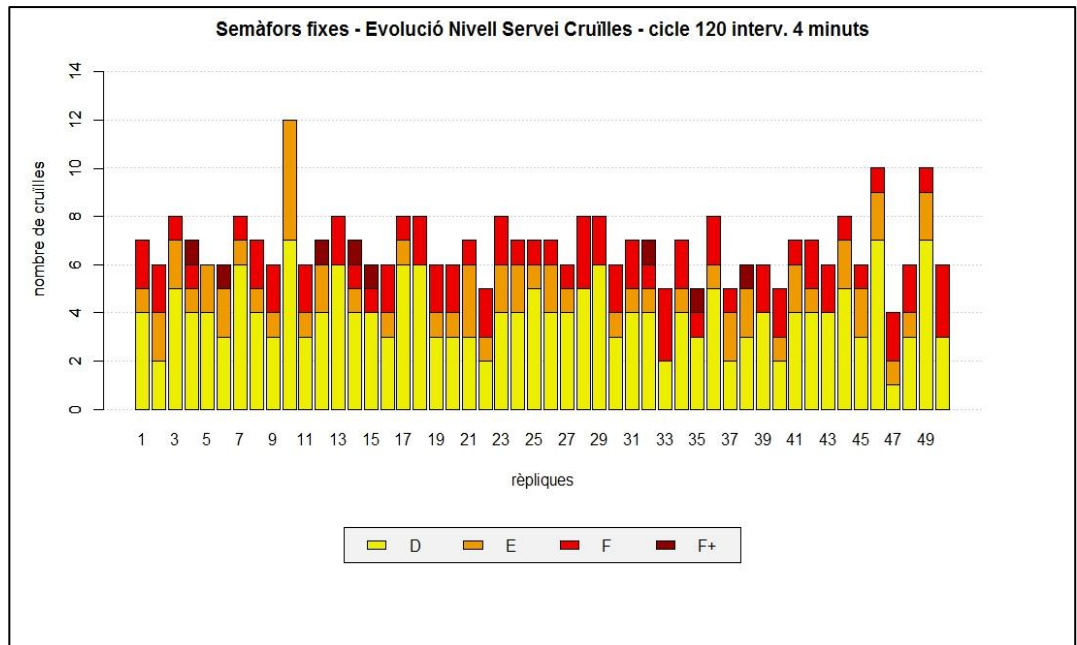


Figura 20 - Nivell de servei a les cruïlles - Escenari 120"/4'

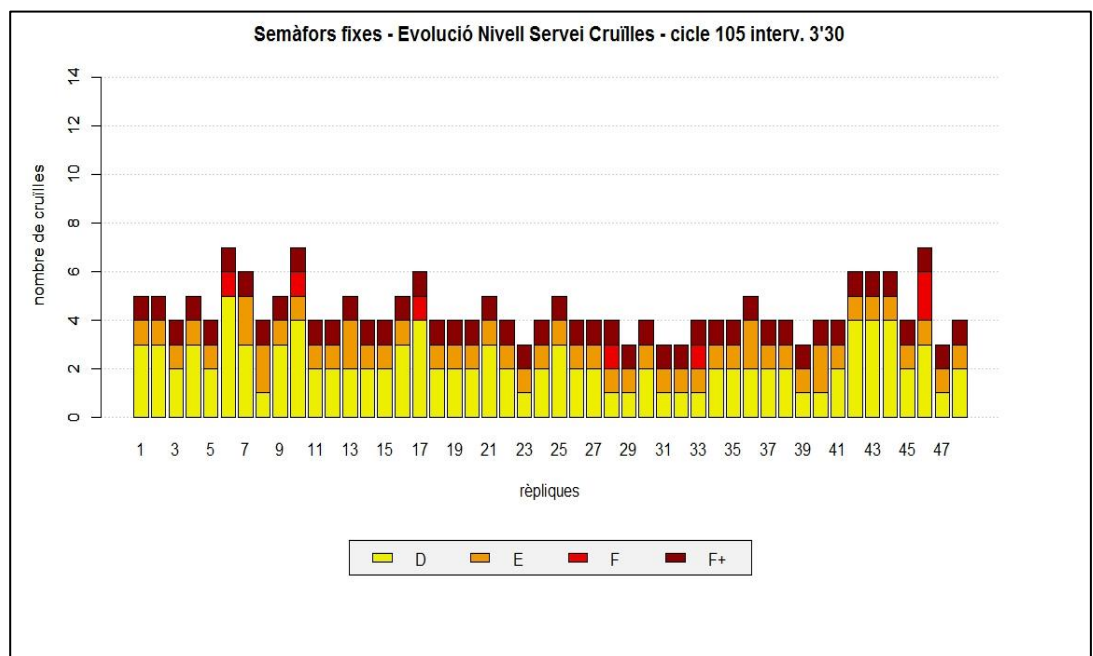


Figura 21 - Nivell de servei a les cruïlles - Escenari 105"/3'30"

4.3.2 Analitzant el comboi de 64 metres

Tal i com s'explica al capítol 3 , en primer lloc es fan les simulacions per cadascun dels dos escenaris on es fa circular un tramvia de doble composició (64 m.) per determinar la configuració semafòrica. A continuació es selecciona una de les solucions que ofereix millors prestacions, tant a nivell de velocitat mitjana de circulació del tramvia com a nivell de congestió a les cruïlles. Amb aquestes

configuracions fixades, es tornen a fer les simulacions, sense fer cap ajustament addicional i s'obtenen els indicadors que permeten analitzar el comportament en els dos escenaris quan el tramvia que circula és un comboi de 64 metres.

Particularitats del tramvia de doble composició

Cal fer uns ajustos als paràmetres per tal de poder treballar amb el tramvia de 64 metres:

- S'adapten els temps de neteja de cruïlla: s'incrementen en 5".
- Pel cas de l'escenari **105"/3'30"**, es relaxen les condicions que s'imposen per garantir un temps de verd suficient a les cruïlles amb més trànsit per tal de poder resoldre el problema d'optimització.
- Es comprova que les parades tenen la llargada necessària.
- Es revisen les distàncies entre carrers perpendiculars / transversals a la Diagonal, per determinar si hi ha espai per encabir el tramvia de 64 m.

Es comprova que hi ha tres punts on calen modificacions en les ubicacions de passos de vianants actuals per encabir un tramvia de 64 metres. En concret, els tres punts són les cruïlles Balmes/Via Augusta, Aragó/Sicília i Marina/Consell de Cent.

Analitzant velocitat mitjana amb el tramvia de doble composició

La Figura 22 i la Figura 23 mostren les gràfiques de la velocitat mitjana de circulació del tramvia, per cada sentit i cada escenari. Es pot comprovar que hi ha un descens del valor de la velocitat mitjana a tots dos escenaris respecte de l'equivalent amb comboi de 32 metres, recollit a la Figura 18 i a la Figura 19, respectivament. Mentre que en els segons la velocitat mitjana es mou al voltant dels 16 km/h, variant entre els 14 i 18 km/h (arribant als 20 km/h en el cas de l'escenari **120"/4'**, en sentit Francesc Macià), pel que fa als cas amb comboi de 64 m, aquests valors es situen entre els 14 km/h i els 16 km/h.

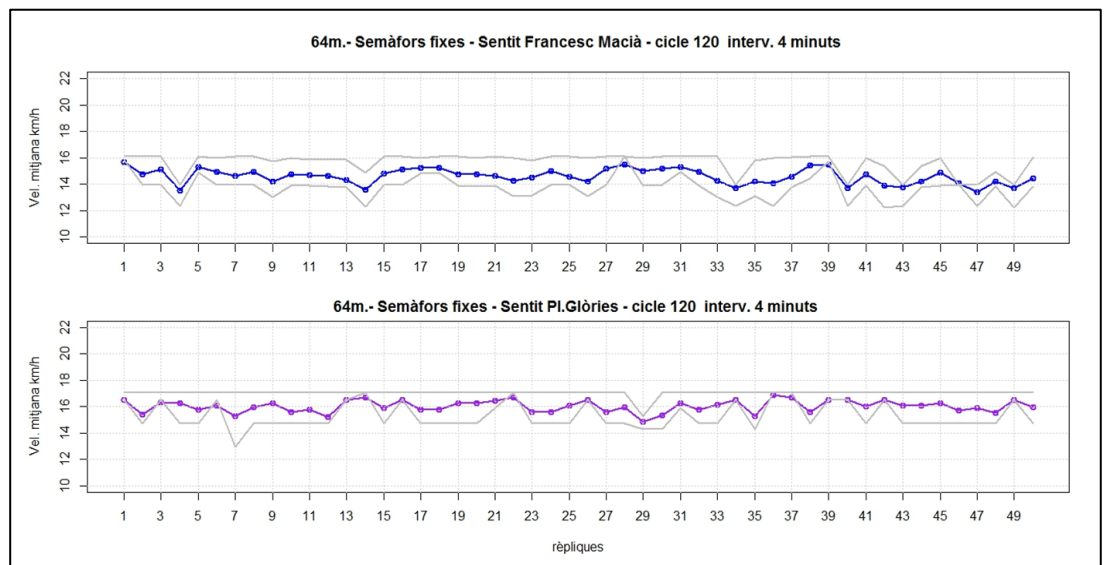


Figura 22 - Velocitat mitjana tramvia - Escenari 120"/3' amb comboi de 64m.

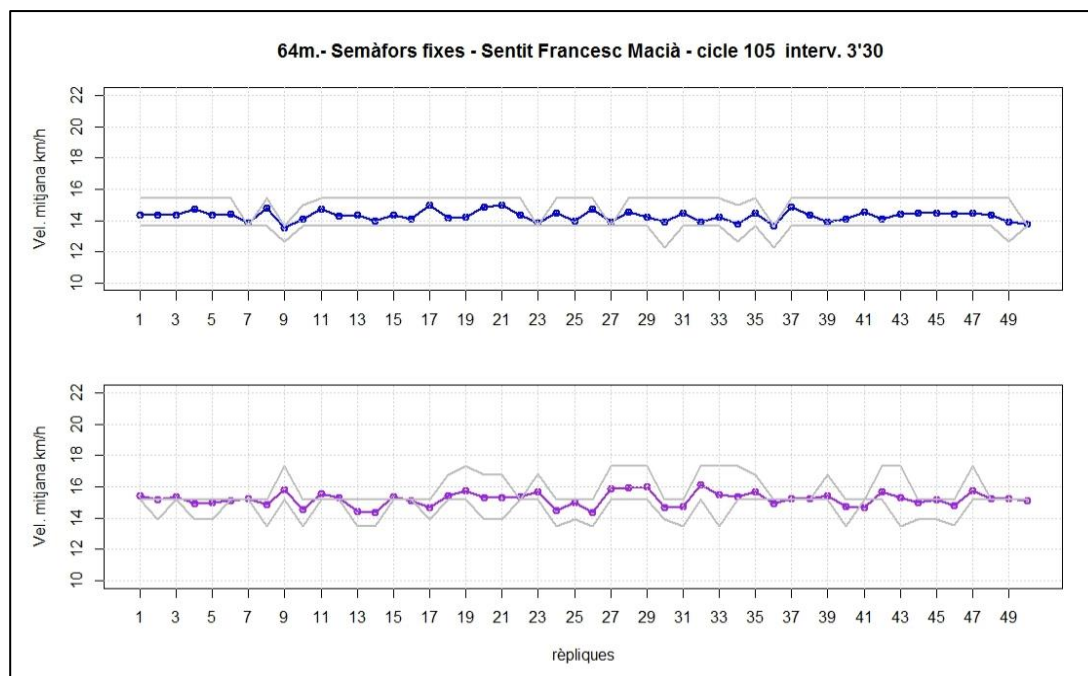


Figura 23 - Velocitat mitjana tramvia – Escenari 105"/3'30" amb comboi de 64m.

Revisant el nivell de congestió amb el tramvia de doble composició

Pel que fa als nivells de congestió, a les simulacions realitzades s'observa un augment en els temps d'espera dels vehicles a les cruïlles, en particular a les cruïlles on hi ha més de 2 fases semafòriques. Aquest increment es dona, principalment, per dos motius:

- La circulació de combois de 64 metres implica que el temps de neteja de la cruïlla pel pas del tramvia sigui superior respecte al que s'ha fet servir quan es treballa amb combois de 32 metres (s'ha calculat que són uns 5" més). I aquest diferència té més impacte quan el temps de cycle que deixa lliure el pas del tramvia s'ha de repartir entre dos fases semafòriques. I en particular, quan els carrers afectats tenen tràfic dens, ja que els temps estan molt ajustats.
- Per altre banda, s'ha fet la simulació amb les dades d'intensitat de flux de vehicles que hi haurà en el moment de la posta en marxa del servei; és de preveure que quan passin uns anys hi haurà una reducció d'aquesta intensitat, però encara no es pot estimar quanta.

Es a dir, a tots dos escenaris els indicadors tenen comportament menys positiu, tot i que en el cas de l'escenari 120"/4', hi ha més marge per poder fer ajustos. Però per poder fer els ajustos i analitzar el comportament, caldria abans definir com es resoldran els punts on actualment no es pot aturar el tramvia, en cas de tractar-se d'un comboi de 64 metres. Això queda fora de l'abast de l'estudi.

4.3.3 Conclusions Fase 2

Un cop analitzats, es fa un resum dels avantatges i inconvenients de cadascun dels

escenaris.

Pros i contres dels dos escenaris

1) Operació de la línia:

Segons la recomanacions de l'estudi d'INGEROP, en el cas de l'escenari **120''/4'** s'hauria d'operar el servei com a màxim amb 3 línies, mentre que en el cas de l'escenari **105''/3'30''** aquest es podria ampliar fins a 4 línies.

2) Introducció del comboi de 64 metres.

L'increment de temps de neteja de la cruïlla que implica treballar amb combois de 64 metres té menys repercussió sobre el rendiment total de la cruïlla en el cas de l'escenari **120''/4'**, en tenir un temps de cycle més llarg.

3) Ajustos semafòrics a les cruïlles.

En el cas de l'escenari **105''/3'30''**, els temps dels diferents grups semafòrics que formen part de la cruïlla estan més ajustats, el que suposa disposar de menys marge en cas de necessitar fer canvis per variacions en la mobilitat.

4) Temps de durada de cycle.

Un cycle més llarg implica esperes més llargues en cas de pèrdua de cycle, mentre que un cycle més curt afavoreix lleugerament el pas de vianants.

5) Compatibilitat amb la resta de la ciutat.

Els cycles actuals de la ciutat de Barcelona són el de 96'' a la majoria de carrers, i 120'' a la part alta de l'avinguda Diagonal. Incorporar un nou cycle de 105'' afegeix complexitat en la coordinació entre les diferents zones semafòriques.

A partir dels resultats presentats, i dels pros i contres dels dos escenaris, des del grup de treball es pren la decisió de **continuar amb l'anàlisi detallat** de l'escenari **120''/4'**.

4.4 Tercera Fase – Ajustant l'escenari escollit

Aquesta tercera i última fase s'inicia ajustant de forma manual els diferents grups semafòrics, per tal de millorar les prestacions, tant pel que fa a la velocitat mitjana del tramvia, com al nivell de servei a les cruïlles, així com afavorir el pas de vianants. El detall de com s'han portat a terme està explicat al capítol 3. Un cop fets els ajustos, es tornen a fer simulacions per validar el comportament de tots els elements afectats i comprovar el grau de millora obtingut. En aquest cas, es fa una bateria de 100 simulacions, les quals tenen la configuració dels semàfors fixa, i els temps de parada i els fluxos dels vehicles continuen essent variables.

Es presenta a continuació l'anàlisi estadístic dels resultats obtinguts en els diferents modes de desplaçament.

4.4.1 Tramvia

La informació més rellevant en quan al comportament del tramvia ve donada per el temps de verd de que disposa al seu pas per les diferents cruïlles, la freqüència de pas per les parades, i la seva trajectòria i velocitat mitjana de circulació.

Durada del temps de verd del tramvia a totes les cruïlles analitzades

En primer lloc, a la Figura 24 es pot veure el temps de verd assignat al tramvia, amb el temps d'ambre i el temps de neteja de la cruïlla que li correspon. Es pot apreciar com, a partir de Passeig de Sant Joan el temps de verd assignat al tramvia es veu reduït. Això és deu bàsicament al traçat de l'avinguda Diagonal, que suposa tenir moltes cruïlles on l'encreuament és de tres o més carrers, i alguns dels carrers suporten un nivell de tràfic molt alt (com poden ser Mallorca, València, Aragó o Consell de Cent). És en aquests casos on es veu més clara la necessitat de tenir un temps de cicle alt, que facilita un millor repartiment del temps de verd, donant més marge per poder garantir una bona circulació en tots els modes.

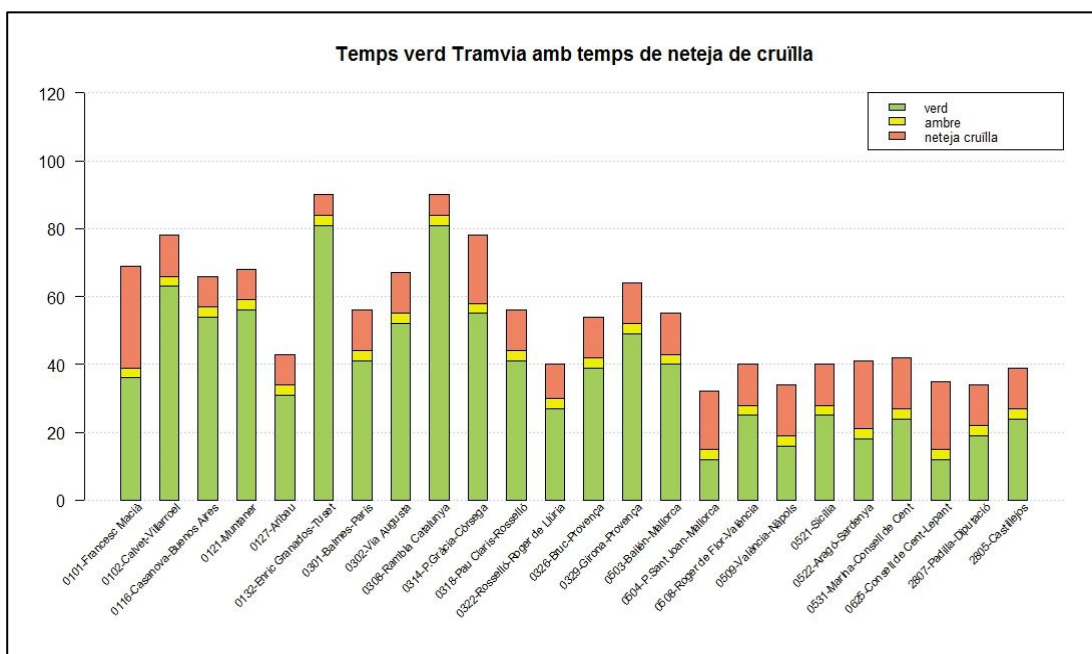


Figura 24 - Durada tems de verd + neteja cruïlla - Semàfors tramvia

Trajectòria del tramvia

La Figura 25 i la Figura 26 mostren els diagrames d'espai/temps del tramvia en tots dos sentits de circulació corresponents a una de les rèpliques en concret. Es veu l'evolució temporal dels combois al llarg de la seva trajectòria, i es poden apreciar els punts de detenció que no corresponen a parades comercials. Aquests diagrames ajuden a comprovar la regularitat dels desplaçaments (com més paral·lels, més regular és la trajectòria) i determinar punts on, amb un sistema d'extensions de fase, es podria millorar el temps de pas del tramvia. En el cas del diagrama en sentit Pl. Glories hi ha més detencions que en el cas del diagrama en sentit Francesc Macià, però en canvi el primer mostra més regularitat que el segon.

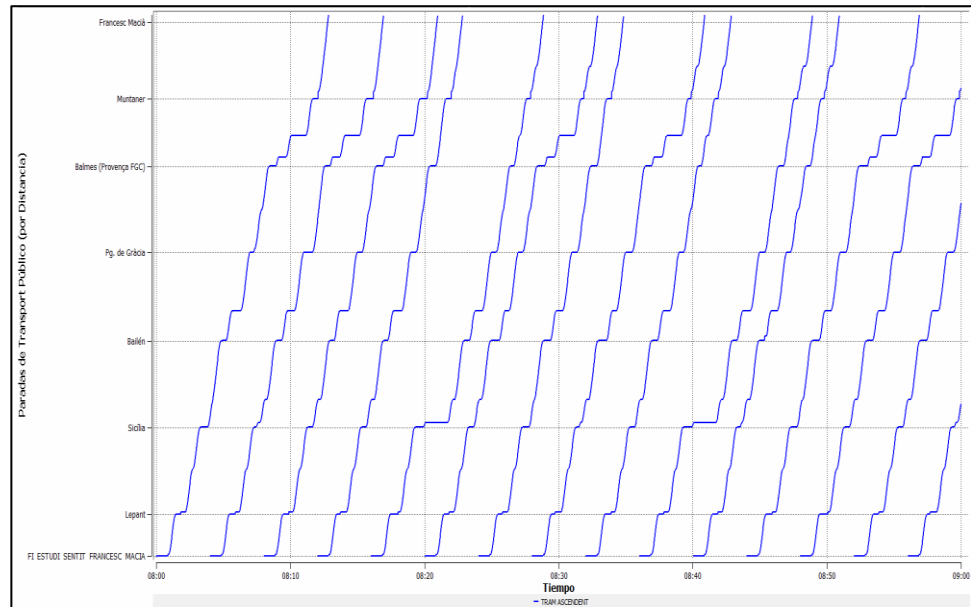


Figura 25 - Diagrama espai/temps - Sentit Francesc Macià

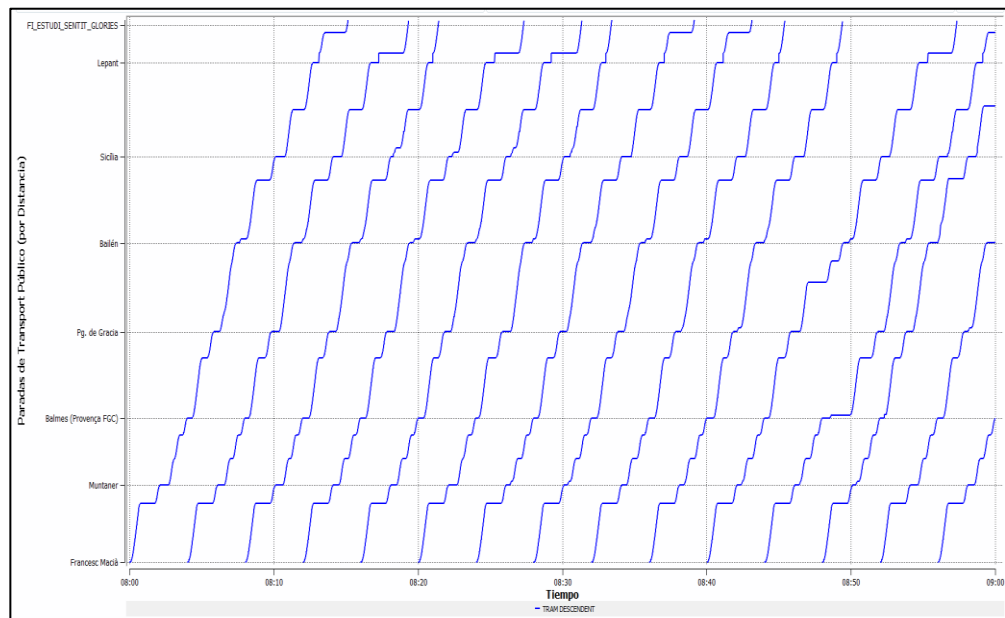


Figura 26 - Diagrama espai/temps - Sentit Pl. Glòries

Interval de pas a les parades

Veiem ara les dades de l'interval de pas a les parades, en segons, recollides a la Taula 5. Tenint en compte que l'interval teòric és de $4' = 240''$, les estadístiques de les simulacions realitzades mostren que aquest interval en mitjana es va mantenint, i que és a la parada Muntaner en sentit Francesc Macià (la penúltima del trajecte), on hi ha més variabilitat. Es aquesta última trobem un 38% de coeficient de variació, mentre que a la resta el coeficient de variació es mou entre el 0% de les primeres parades i un 15% en el sentit Francesc Macià, i un 29% en el sentit pl. de les Glòries. Es a dir, que en general la regularitat es va mantenint, tot i que hi ha alguns casos en

que es perd aquesta regularitat. Aquí es pot fer servir l'extensió de fase per tractar de reduir aquesta variabilitat.

| Interval de pas dels tramvies a les parades (en segons) | | |
|---|---------|---------------|
| Parada | Mitjana | Coef.Variació |
| Sentit Francesc Macià | | |
| Lepant | 240,0 | 0% |
| Sicília | 240,0 | 0% |
| Bailén | 240,4 | 15% |
| Passeig de Gràcia | 239,7 | 14% |
| Balmes | 240,3 | 14% |
| Muntaner | 239,0 | 38% |
| Sentit Pl. de les Glòries | | |
| Muntaner | 240,0 | 0% |
| Balmes | 240,0 | 0% |
| Passeig de Gràcia | 240,8 | 26% |
| Bailén | 240,7 | 29% |
| Sicília | 239,0 | 29% |
| Lepant | 244,7 | 29% |

Taula 5 - Interval de pas del tramvia a les parades

Velocitat mitjana del tramvia

Finalment, a la Taula 6 es mostra la velocitat de circulació mitjana obtinguda de totes les simulacions. La gràfica que mostra la Figura 27 permet comprovar que es manté una velocitat mitjana comercial força regular.

| Sentit | Velocitat mitjana | Velocitat mitjana global |
|----------------------|-------------------|--------------------------|
| Francesc Macià | 19,75 km/h | 17,6 km/h |
| Plaça de les Glòries | 15,30 km/h | |

Taula 6 - Velocitat mitjana del tramvia

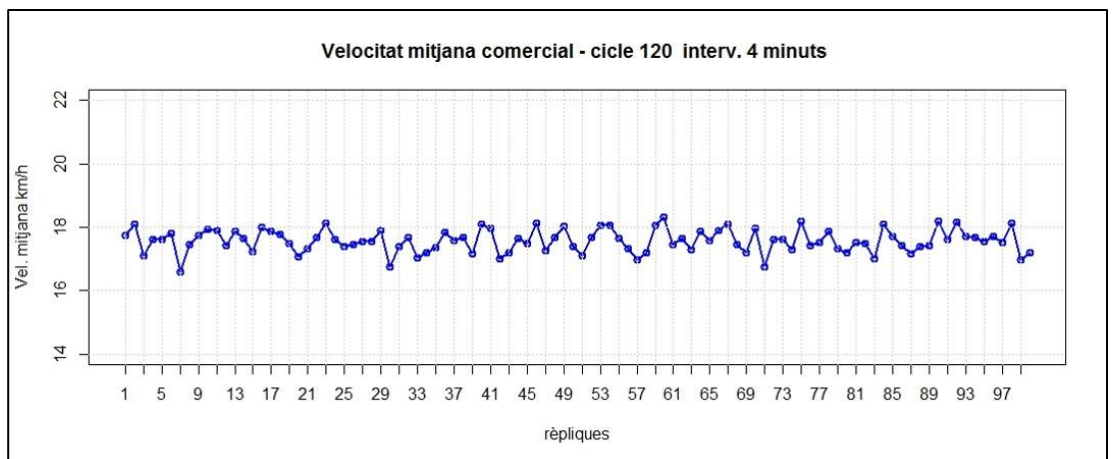


Figura 27 - Velocitat mitjana comercial tramvia amb la configuració semafòrica seleccionada

La Figura 28 recull l'evolució de la velocitat mitjana comercial per cadascun dels dos sentits, al llarg de les diferents simulacions fetes. En color blau fosc i color porpra es representen les velocitats mitjanes comercials en sentit Francesc Macià i sentit

Pl.Glòries, respectivament, mentre que en color gris es marquen els límits del primer i tercer quartil. Es pot comprovar que es manté l'estabilitat, amb una diferència en quant a la mitjana entre tots dos sentits. Això es deu principalment, en primer lloc a que, quan un mateix temps semafòric regula dos sentits oposats, sempre hi ha un dels dos que es veu afavorit, i en aquest cas és el sentit Francesc Macià. I per altre banda, a la geometria que marca la Diagonal. En efecte, tal i com ja s'ha comentat abans, el segment entre Francesc Macià i Passeig de Sant Joan està format per cruïlles la majoria de les quals té dues fases semafòriques, mentre que el segment entre Passeig de Sant Joan i Castillejos, la majoria de cruïlles tenen 3 fases semafòriques, i un temps de verd pel tramvia molt més ajustat. Això comporta que, si el pas per les cruïlles amb menys temps de verd es fa al principi, (com es el cas de la circulació en el sentit Francesc Macià), quan la probabilitat de respectar els temps teòric és molt alta (tal i com es veu a la Taula 5), pràcticament no hi ha pèrdua de cicle i la coordinació afavoreix el pas del tramvia. En canvi, quan és en sentit contrari, s'arriba a les cruïlles amb menys temps de verd quan la probabilitat de mantenir els temps teòrics és veu reduïda i hi ha per tant, més possibilitat de que es perdi la coordinació dels semàfors. Tal i com ja s'ha comentat abans, les extensions de cicle, que a l'estudi no s'han tingut en compte, poden ajudar a millorar aquesta velocitat mitjana comercial.

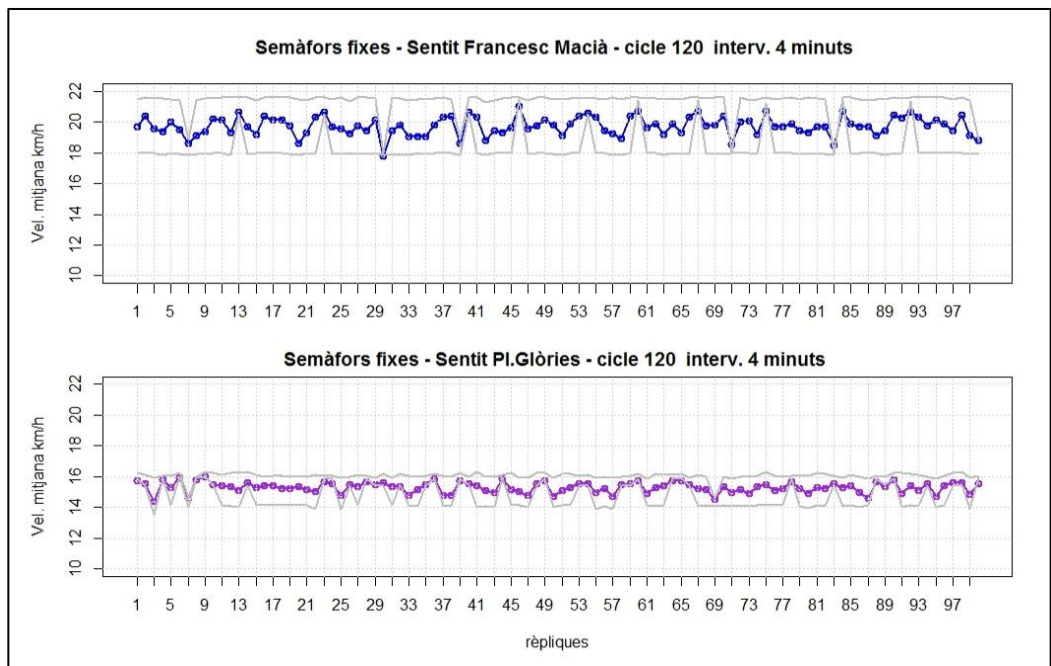


Figura 28 - Evolució velocitat mitjana per sentit de circulació amb la configuració semafòrica seleccionada

4.4.2 Xarxa d'autobusos

En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts que permeten analitzar el comportament dels autobusos quan interactuen amb el tramvia per l'avinguda Diagonal.

Compartint espai
tramvia - autobús

En primer lloc, a la Figura 29 es pot veure la solució adoptada per afavorir el trànsit dels autobusos al segment de la Diagonal on comparteixen circulació autobusos i tramvia. El sector entre Via Augusta i Passeig de Gràcia és l'únic de la Diagonal entre Francesc Macià i Pl. Glòries per on circularan autobusos, seguint la trajectòria del tramvia. La solució passa per que comparteixin l'espai, i això suposa establir una coordinació entre els semàfors dels diferents carrers implicats per tal d'evitar que la mobilitat del tramvia pugui afectar la dels autobusos i a l'inrevés.

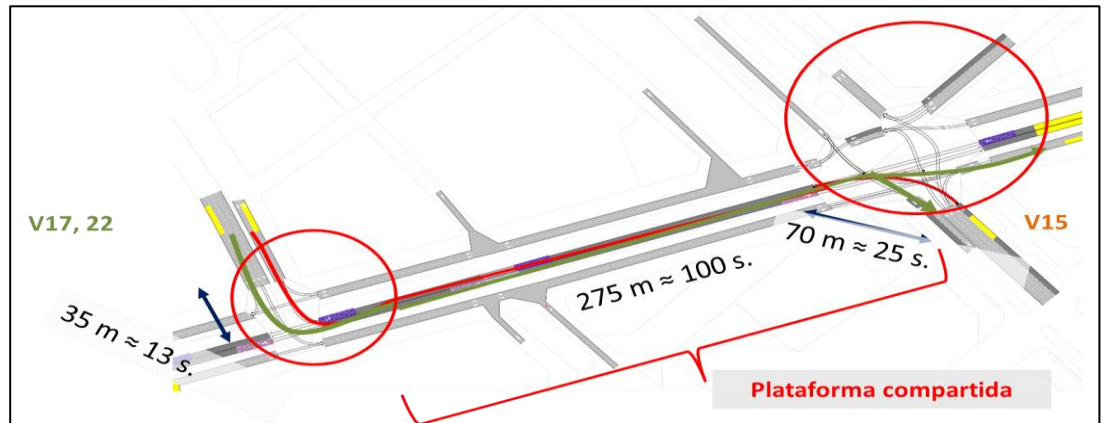


Figura 29 - Passeig de Gràcia - Via Augusta - Compartint espai

Per això s'ha optat per dotar a les cruïlles de semàfors d'ús exclusiu pels autobusos, i coordinats per agilitzar el pas en el dos sentits. A la Figura 30 es representa de forma esquemàtica com s'ha establert la coordinació dels semàfors per tramvia i autobusos i com es fan els moviments seguint aquesta configuració. Les dades de mobilitat són teòriques, obtingudes dels resultats de la simulació, a partir dels moviments detectats a les diferents rèpliques.

Les 3 barres verticals representen el cicle dels semàfors pel tramvia als carrers analitzats: verd pel temps de verd, groc per l'ambre, vermell amb trama pel temps de neteja de cruïlla i vermell pel temps de vermell. Es dibuixen a partir del moment en que comença el temps de verd pel tramvia a Passeig de Gràcia, i en funció de l'offset respecte aquest que té cada cruïlla representada. Les línies representen les trajectòries dels vehicles analitzats: blau fort i gris fort pel tramvia, un per cada sentit de marxa, i blau cel i gris fluix per l'autobús, un per cada sentit de la marxa. Els cercles 1 i 2 marquen el punt d'inici de l'autobús, que té verd quan el tramvia té vermell, amb semàfor exclusiu, i els cercles 3 i 4 senyalen el punt d'inici del temps de verd de l'autobús a la Diagonal en el moment d'incorporar-se al carrer transversal (o al lateral de la Diagonal, en el cas de la línia V17). Les pendents de les línies indiquen la velocitat de circulació que poden tenir en el pas d'aquell tram de carrer: s'ha fet una estimació a partir de les simulacions. A menys pendent, més velocitat.

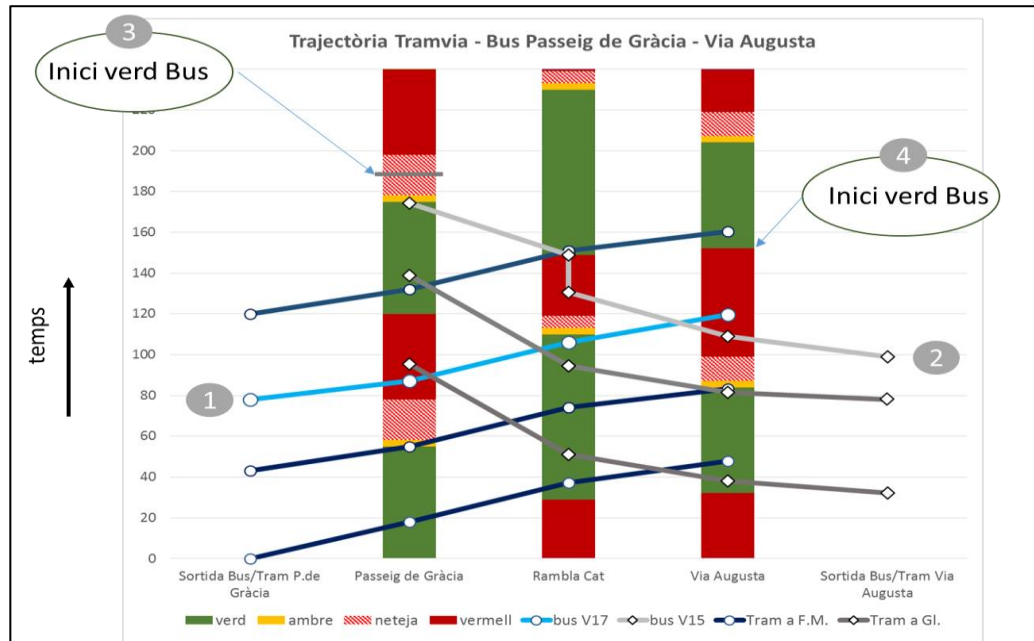


Figura 30 - Esquema semàfors tramvia - bus entre Via Augusta i Passeig de Gràcia

Mobilitat línies 22 – V15 – V17

Entrem en detall de la mobilitat de cadascuna de les línies. A la Figura 31 cada dibuix representa la trajectòria d'un dels autobusos en aquest segment de la Diagonal: el primer correspon a la línia V15, en sentit ascendent, des de Passeig de Gràcia cap a la Via Augusta, el segon a la línia 22, en sentit descendent, des de Via Augusta fins a Passeig de Gràcia, per on continua el seu recorregut, i el tercer és la línia V17 també en sentit descendent, des de Via Augusta cap a Pau Claris. Aquest últim, quan es troba amb Passeig de Gràcia, s'incorpora al lateral de la Diagonal compartint l'espai amb els vehicles, on tindrà la parada, per a continuació seguir per Pau Claris, tal i com fa actualment.

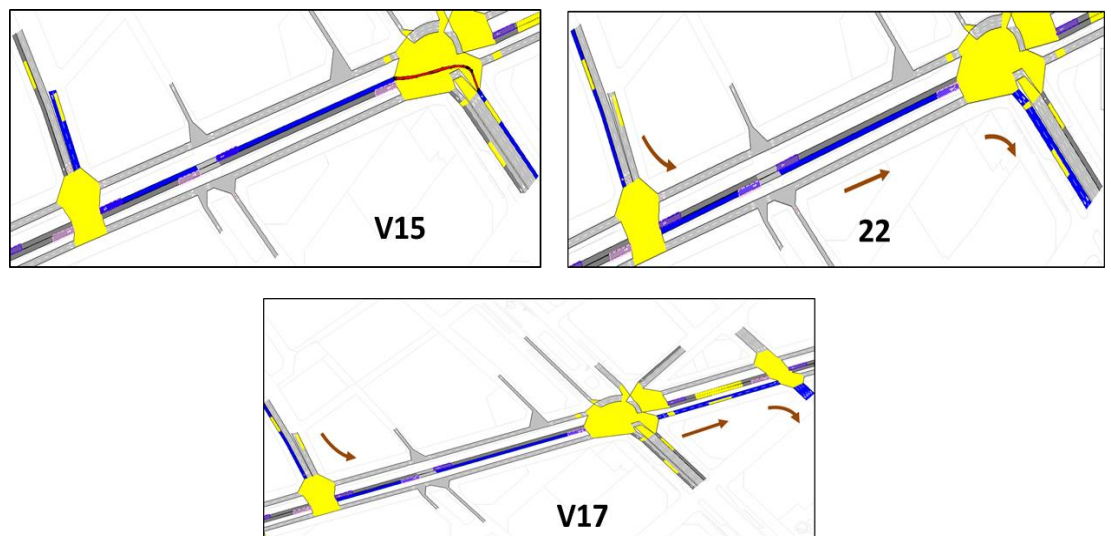


Figura 31 - Esquema mobilitat autobusos entre Via Augusta i Passeig de Gràcia

Mobilitat als carrers transversals:
exemple de les línies
V11 / 55 (V19)

S'han analitzat també dues línies que travessen la Diagonal, una amb carril exclusiu però que necessita incorporar-se al lateral de la Diagonal en un segment curt, que és la línia V11; i l'altre simplement travessa la Diagonal, però que en el sector previ al semàfor no té carril exclusiu, com és la línia 55 actualment, i que en el futur aquest trajecte quedarà cobert per la línia V19. A la Figura 32 es pot veure l'esquema de mobilitat de ambdues línies: a l'esquerra la línia V11, que baixa pel carrer Calvet, s'incorpora al lateral de la Diagonal per després continuar pel carrer Villarroel; i a la dreta la línia 55 (V19 en el futur), que puja per Passeig de Sant Joan i travessa la Diagonal a una de les cruïlles complicades, com és la de la Plaça Verdaguer, on s'ajunten Passeig de Sant Joan, Diagonal i Mallorca.

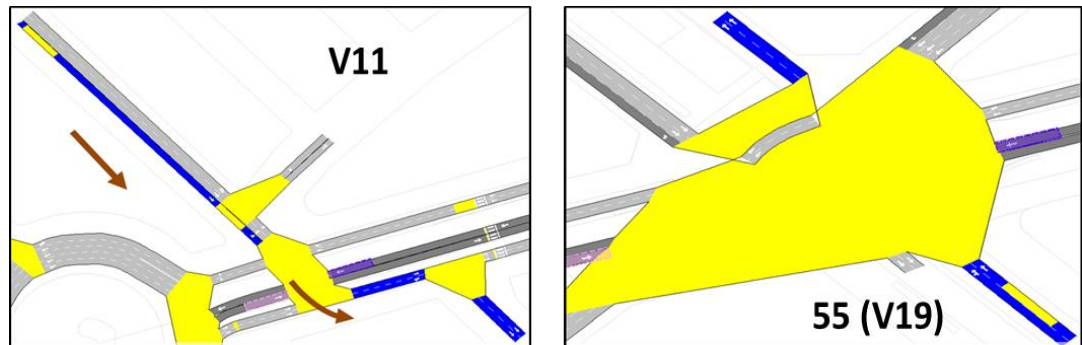


Figura 32 - Esquema mobilitat autobusos línies V11 i 55 (V19)

Dades de mobilitat
de les línies
analitzades

La Taula 7 recull un resum estadístic del comportament de les línies d'autobús estudiades: per cada línia es detalla la distància recorreguda; el temps total (en segons), de mitjana, que necessita l'autobús per fer el recorregut, incloent el temps de les parades; el temps (en segons) estimat que necessita l'autobús a la parada (variable). I per les línies que fan el trajecte Via Augusta - Passeig de Gràcia (i a l'inrevés), s'ha fet un estudi de camp per determinar quin és el temps requerit actualment per fer el mateix trajecte, en hora punta de 8 a 9 del matí. Es detalla per les línies 22, V15 i V17 el temps mig actual (en segons) que necessita l'autobús per fer el trajecte, el temps mínim i el màxim. Aquestes dues dades són importants en aquest cas, ja que la variabilitat que ara tenen aquests autobusos en aquestes trajectes, que depèn molt del trànsit del moment, és un dels aspectes que millorarà amb el nou traçat, ja que, en tenir carril exclusiu per l'autobús, els temps de recorregut seran molt estables.

A la taula es pot comprovar que mentre que la línia V15 millora el temps de recorregut mitjà actual en 30", les línies V17 i 22 reflecteixen uns temps mig de recorregut uns 30" superior al que hi ha actualment. Però, tal i com s'ha dit abans, evitant la variabilitat, que en aquests casos és força significativa, tal i com es veu amb els valors màxims i mínims. Un dels factors que afecten al temps de recorregut a la simulació de les línies V17 i 22 és la detenció al semàfor a l'alçada de Rambla de Catalunya per cedir el pas als vianants, necessària per una bona coordinació amb el semàfor que els hi dona pas al Passeig de Gràcia per continuar el seu trajecte.

| Línia | Distància | Temps total | Temps parada | Temps mig actual | Temps mínim actual | Temps màxim actual |
|-------|-----------|-------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------|
| V15 | 527 m. | 3'24" | 20" (±5") | 3'54" | 3'07" | 5'16" |
| V17 | 674 m. | 5'12" | 20" (±5") | 4'40" | 3'56" | 6'18" |
| 22 | 567 m. | 4'10" | 20" (±5") | 3'43" | 2'50" | 4'46" |
| V11 | 287 m. | 2'30" | 20" (±5") | | Sense dades | |
| 55 | 170 m. | 1'30" | 20" (±5") | | Sense dades | |

Taula 7 - Dades estadístiques de les línies V11, V15, V17, 22 i 55 (V19)

Mobilitat als carrers transversals: carrers per on circulen autobusos

Finalment, la Figura 33 representa com el tràfic als carrers transversals pot afectar a la circulació dels autobusos, en concret aquells on l'autobús no disposa d'un carril exclusiu. Al gràfic, les barres representen l'estimació de temps d'espera dels vehicles en general, als carrers transversals per on circulen línies d'autobús. En marró fosc es mostra el temps estimat actual (extrapolant de 96" a 120"), mentre que en marró clar es mostra el temps estimat amb el nou escenari del tramvia circulant. Les etiquetes en color vermell corresponen a carrers on actualment no hi ha carril exclusiu per l'autobús. A dalt, per cada carrer es detallen les línies que està previst que circulin (informació obtinguda a partir del mapa de la xarxa definitiva d'autobús). En un 65% dels carrers per on els autobusos creuen la Diagonal es redueix el temps d'espera en els semàfors. Pel que fa a les 16 línies que hi ha previstes que circulin per aquests carrers, un 81% milloren o mantenen els temps actuals d'espera (tenint en compte que als carrers on hi ha carril exclusiu, els temps de pas dels autobusos es mantindran com ara).

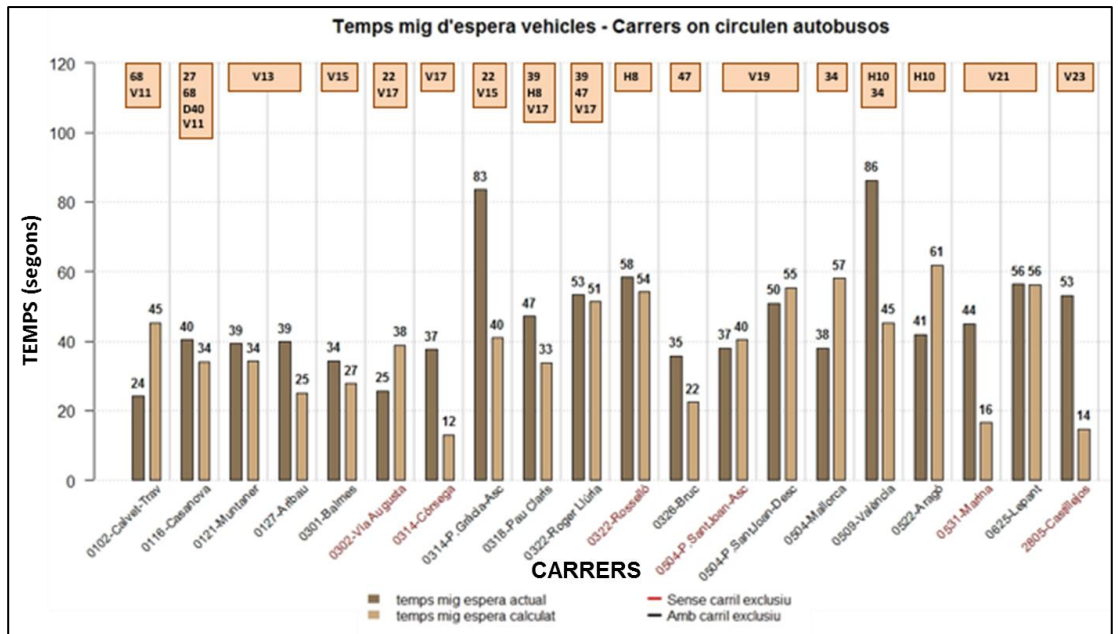


Figura 33 - Temps mig espera carrers on circulen autobusos

4.4.3 Vehicle privat

Es mostren ara els resultats relacionats amb la mobilitat del vehicle privat. En primer lloc, ens fixem en les cruïlles més conflictives, ja sigui pel seu traçat o bé pel tràfic que suporta, i en la seva configuració semafòrica, tal i com s'ha deixat a l'escenari final. En concret, es mostren Francesc Macià, la cruïlla amb Calvet-Travessera i Passeig de Sant Joan – Mallorca. La primera, per la seva complexitat com a centre distribuïdor, la segona per la necessitat d'incorporar l'autobús a la seva configuració i la tercera, per la mobilitat a la rotonda, que ha de contemplar la convivència dels vehicles amb l'autobús i les bicicletes, i el volum de tràfic que té el carrer Mallorca.

Pel que fa a la plaça Francesc Macià, la configuració dels semàfors, que ha suposat afegir condicions específiques al model matemàtic, s'ha construït a partir de definir dues fases principals de distribució del tràfic, i cadascuna d'elles amb subfases per acabar de fer els ajustos. A la Figura 34 es pot veure un esquema del repartiment que s'ha fet: en color blau una de les fases, associada a la trajectòria del tramvia, i en color marró l'altre fase, associada a la sortida des del carrer Urgell. Totes dues oposades, però entre mig hi ha semàfors que poden conviure amb les dues fases. Per donar agilitat, i reduir el possible efecte "aigües amunt" que es pot generar, s'ha permès l'entrada per la Diagonal (G22) amb certa simultaneïtat amb circulació des d'Urgell (G7), marcant línies contínues als carrils. Així se li pot donar més temps de verd al semàfor d'accés a la plaça des de la Diagonal (G22). També s'ha optat per reduir lleugerament el temps de verd del tramvia i així facilitar la neteja de la secció entre Urgell i la Diagonal.

Punts singulars:
analitzant Francesc
Macià

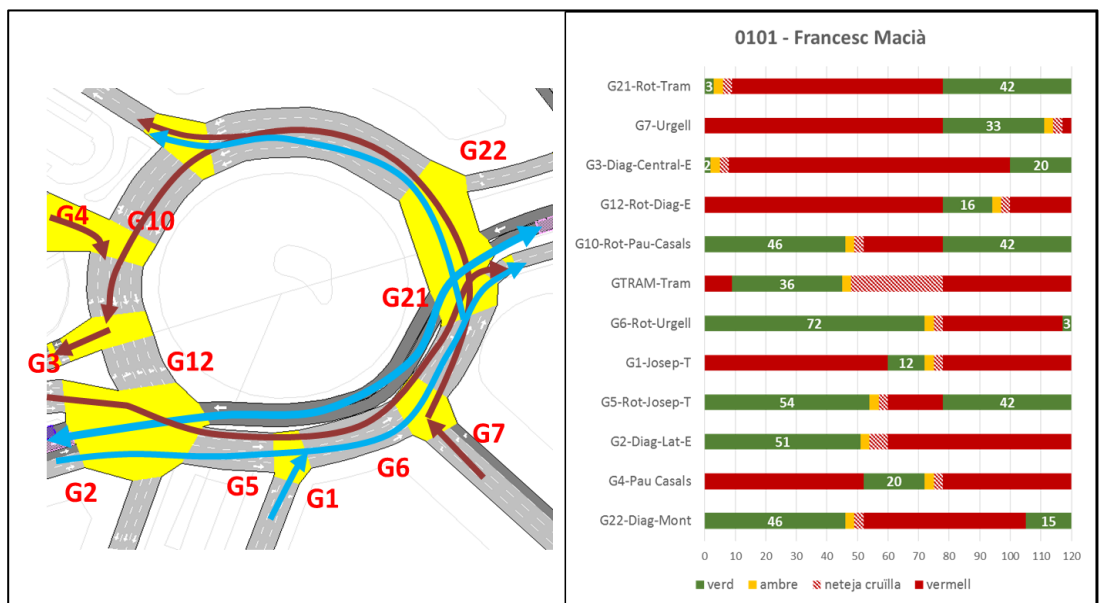


Figura 34 - Francesc Macià - Configuració dels grups semafòrics i rutes dels vehicles

Punts singulars:
analitzant Calvet /
Travessera

La Figura 35 mostra l'esquema dels grups semafòrics de la cruïlla de la Diagonal amb el carrer Calvet: aquí només cal definir dues fases, una pel tramvia i els grups que poden conviure amb el seu grup, i l'altre, oposada, pels grups del carrer Calvet i Travessera. Aquí, el que s'ha tingut en compte és afegir un semàfor exclusiu per les

línies d'autobús que travessaran la Diagonal (V11 i 68), tal i com es fa ara. I de cara als vianants, facilitar el pas de l'autobús abans que els vianants tinguin el seu semàfor en verd, garantint que tinguin el temps necessari per poder passar.

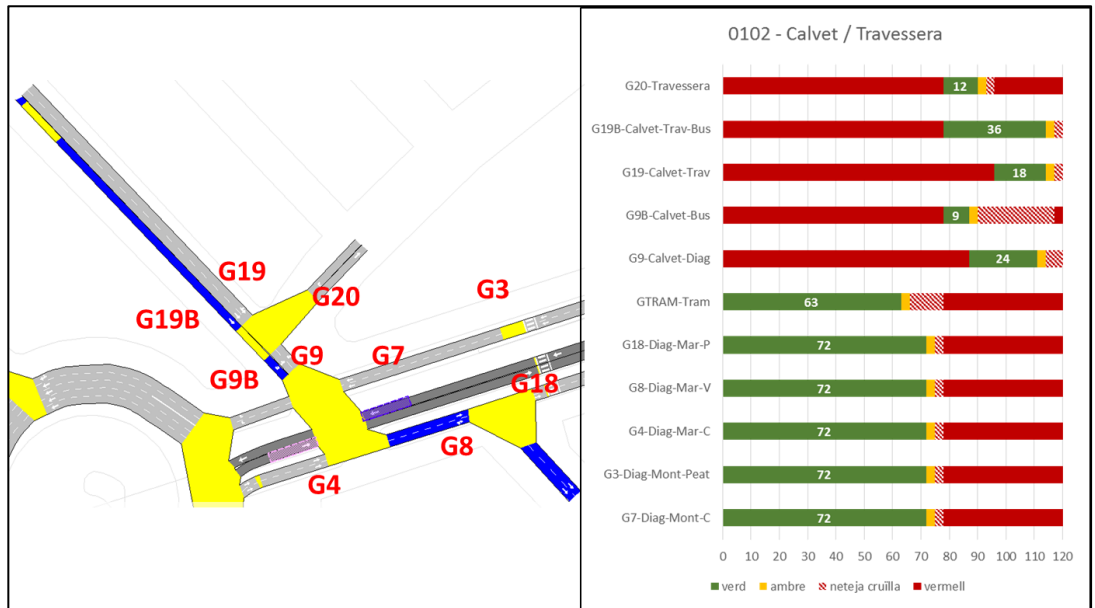


Figura 35 - Calvet / Travessera – Configuració dels grups semafòrics

Punts singulars:
analitzant Passeig de
Sant Joan / Mallorca

L'últim dels exemples, la Figura 36, representa esquemàticament la configuració dels semàfors a la cruïlla de la plaça Verdaguer, on conflueixen Diagonal/Passeig de Sant Joan/Mallorca. Aquí, els ajustos que ha calgut fer són, per una banda, garantir fluïdesa en la circulació de Passeig de Sant Joan de pujada (grup G2), amb un carril per vehicles i un altre per l'autobús, que abans del semàfor és compartit pels tots; per altre banda, facilitar la neteja de la rotonda dels vehicles que giren des de Passeig de Sant Joan de pujada (des del G2), i que han d'esperar aturats pel semàfor corresponent (G10), abans de que comencin a arribar els vehicles del carrer Mallorca (G7).

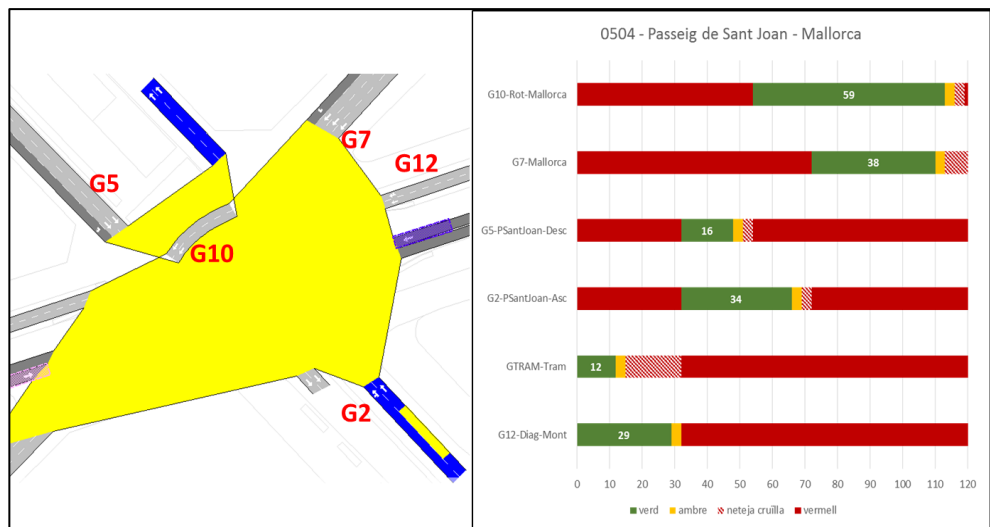


Figura 36 - Passeig de Sant Joan - Mallorca - Configuració dels grups semafòrics

El nivell de congestió a les cruïlles

Passem ara a estudiar els resultats relacionats amb el temps d'espera dels vehicles. En primer lloc revisem el nivell de servei a les cruïlles, per després analitzar el temps d'espera i les cues dels vehicles. En quan al nivell de servei, no es presenta comparativa amb les dades actuals ja que no es disposa d'informació suficient del comportament actual dels vehicles per poder obtenir l'indicador corresponent. S'ha optat doncs, per poder fer una comparació del comportament previst amb l'actual, per calcular els indicadors de temps d'espera i cua de vehicles, de forma determinista a partir de valors mitjans (tal i com s'explica a l'apartat 4.1 Hipòtesi), ja que el nivell de congestió està relacionat amb el temps d'espera.

A la Figura 37 es mostra el diagrama de barres del número de cruïlles amb un nivell de servei mitjà superior a "D" a les diferents rèpliques. Com es pot observar, en general el nivell més alt és "D", amb alguna cruïlla amb nivell mitjà "E", i puntualment (dos de les 100 rèpliques), s'ha donat el cas d'una cruïlla amb nivell "F". Recordem que és a partir del nivell D quan es comença a parlar de congestió (Taula 3)

A la Taula 8 es mostren les dades descriptives del nivell de servei al llarg de les rèpliques. Es detalla, per cada cruïlla, el valor mitjà del nivell de servei, en valor numèric i simbòlic, el valors mínim i màxim i la desviació estàndard. A més a més, s'afegeix el nombre de vegades en que la cruïlla ha tingut un nivell de servei mitjà de tipus "D" o superior, al llarg de totes les rèpliques. Les cruïlles marcades en groc són les que mostren tenir nivells de congestió mes alts, i llavors, s'ha volgut comprovar si els resultats que es mostren a la taula són molt o poc variables, a banda del que pugui indicar la desviació estàndard (que en la majoria de casos és petita).

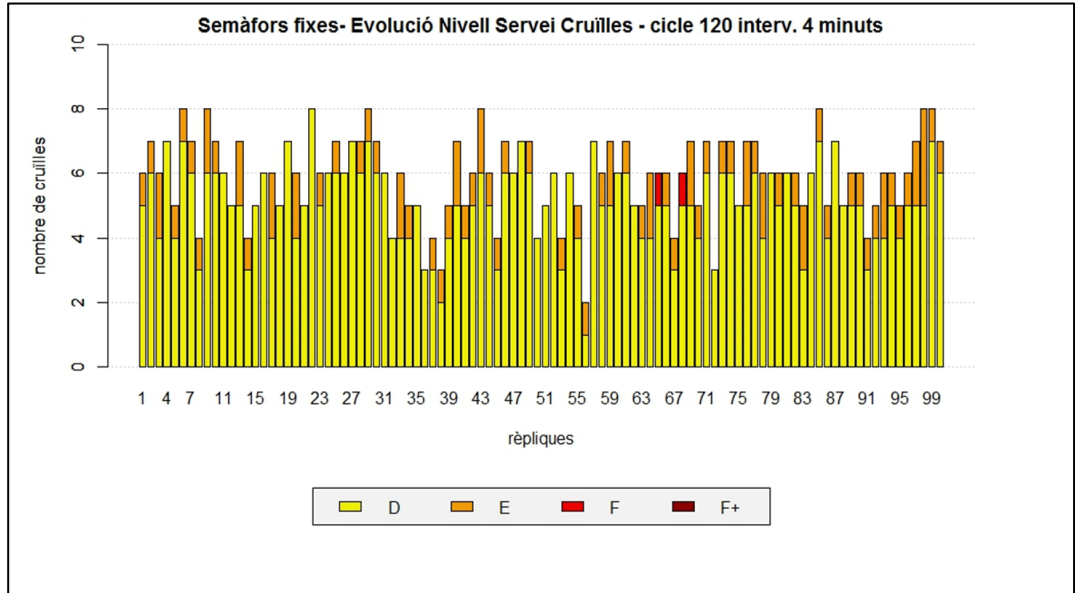


Figura 37 - Evolució del nivell de servei a les cruïlles

| CRUÏLLA | Mitjana | Mínim | Màxim | Desv. Estàndard | Núm. Rèp. > C | | | |
|------------------------------|---------|-------|-------|-----------------|---------------|----|----|---|
| | | | | | D | E | F | |
| 101-FRANCESC MACIÀ | 42 | D | 33 | 49 | 3,36 | 97 | - | - |
| 102-CALVET - VILLARROEL | 30 | C | 23 | 36 | 3,06 | 4 | - | - |
| 116-CASANOVA - BUENOS AIRES | 40 | D | 26 | 53 | 5,59 | 82 | - | - |
| 121-MUNTANER | 19 | B | 15 | 23 | 1,35 | - | - | - |
| 127-ARIBAU | 39 | D | 19 | 67 | 10,08 | 62 | - | - |
| 132-ENRIQUE GRANADOS - TUSET | 4 | A | 4 | 4 | 0,10 | - | - | - |
| 301-BALMES - PARIS | 56 | E | 29 | 83 | 9,53 | 43 | 54 | 1 |
| 302-VIA AUGUSTA | 25 | C | 15 | 43 | 6,41 | 9 | - | - |
| 308-RAMBLA CATALUNYA | 3 | A | 3 | 3 | 0,10 | - | - | - |
| 314-P GRACIA - CÒRSEGA | 11 | B | 8 | 12 | 0,82 | - | - | - |
| 318-PAU CLARIS - ROSSELLÓ | 45 | D | 23 | 71 | 10,54 | 64 | 17 | - |
| 322-ROSSELLO-ROGER DE LLURIA | 38 | D | 24 | 57 | 6,57 | 68 | 1 | - |
| 326-BRUC - PROVENÇA | 32 | C | 23 | 36 | 2,43 | 7 | - | - |
| 329-GIRONA - PROVENÇA | 40 | D | 17 | 80 | 11,52 | 58 | 7 | 1 |
| 503-BAILEN - MALLORCA | 10 | A | 9 | 11 | 0,31 | - | - | - |
| 504-P SANT JOAN - MALLORCA | 22 | C | 19 | 27 | 1,77 | - | - | - |
| 508-ROGER DE FLOR - VALÈNCIA | 9 | A | 8 | 10 | 0,46 | - | - | - |
| 509-VALENCIA-NÀPOLS | 25 | C | 22 | 34 | 2,28 | - | - | - |
| 521-SICILIA | 15 | B | 14 | 16 | 0,47 | - | - | - |
| 522-ARAGÓ - SARDENYA | 26 | C | 19 | 51 | 6,30 | 11 | - | - |
| 531-MARINA - CONSELL DE CENT | 8 | A | 7 | 8 | 0,25 | - | - | - |
| 625-CONSELL DE CENT-LEPANT | 19 | B | 18 | 20 | 0,34 | - | - | - |
| 2807-PADILLA - DIPUTACIÓ | 5 | A | 5 | 6 | 0,25 | - | - | - |
| 2805-CASTILLEJOS | 7 | A | 7 | 8 | 0,37 | - | - | - |

Taula 8 - Estadístiques nivell de servei

La Figura 38 mostra el boxplot de les cruïlles remarcades en groc a la taula anterior; com es pot veure, en general els valors són força estables, mantenint-se en la majoria de casos al nivell "D", exceptuant la cruïlla del carrer Balmes, on el nivell de servei es mou entre "D" i "E".

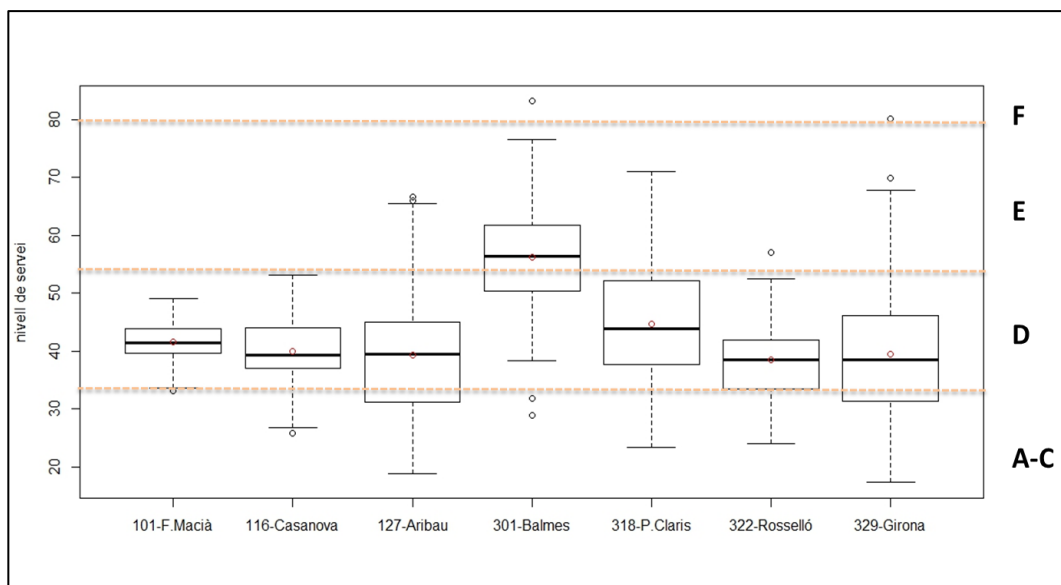


Figura 38 - Boxplot nivell de servei a les cruïlles amb nivell de congestió alt

Temps d'espera i cues dels vehicles als carrers transversals: comparant amb les dades actuals

Finalment, una revisió als temps mitjos d'espera per a vehicles als carrers transversals, comparant-los amb el mateix càlcul sobre les dades actuals (extrapolant el cicle de 96" a 120"). S'ha exclòs Francesc Macià d'aquesta comparativa donat que els canvis de circulació previstos (canvi de sentit del carrer Urgell i de l'Avinguda Sarrià, principalment) fan que calgui treballar amb altres tipus de dades actuals i simulades de les quals no es disposa en aquest estudi. A la Figura 39 es mostra en format gràfic de barres la comparativa entre els temps mitjos d'espera actuals i els calculats; les barres de color marró fosc corresponen als temps actuals i les de color marró clar, als previstos. El que es pot veure es que 20 dels 30 carrers transversals considerats experimenten una reducció del temps mig d'espera, mentre que 3 mantenen valors semblants.

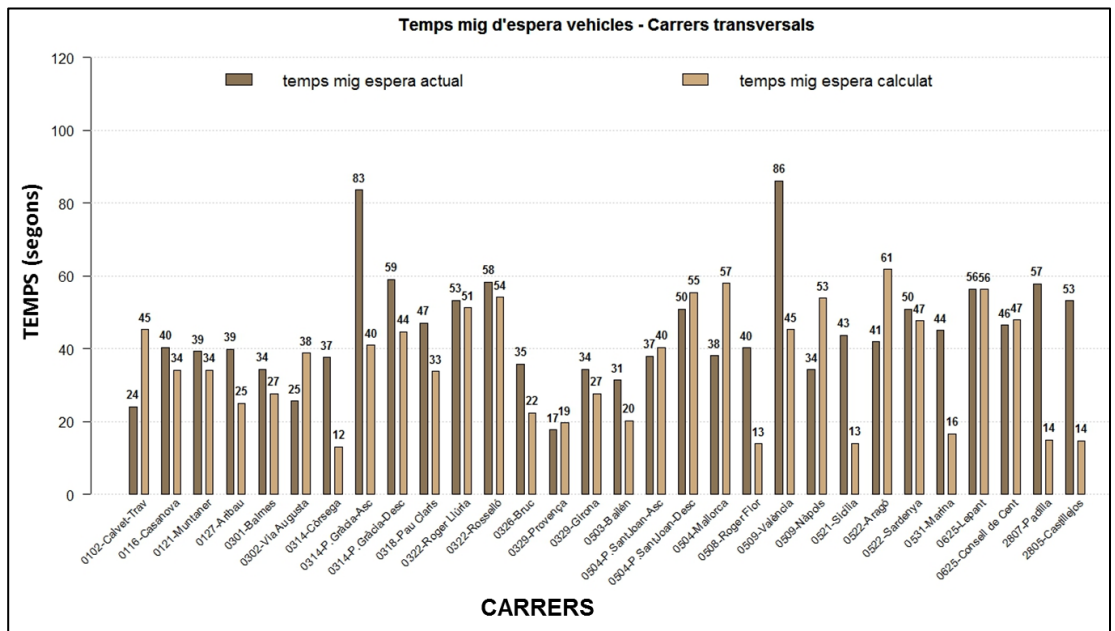


Figura 39 - Temps mig d'espera carrers transversals-comparativa simulació amb dades actuals

Com a complement als temps d'espera, s'afegeix la gràfica amb l'ocupació dels carrers en mitjana (expressat en metres, a partir d'un valor mig de 4`5 metres per vehicle), tal i com es pot veure a la Figura 40. Es pot veure que 20 dels 30 carrers transversals considerats experimenten una reducció a les cues dels vehicles, mentre que en les 10 que empitjoren, les cues no arriben a bloquejar les cruïlles precedents.

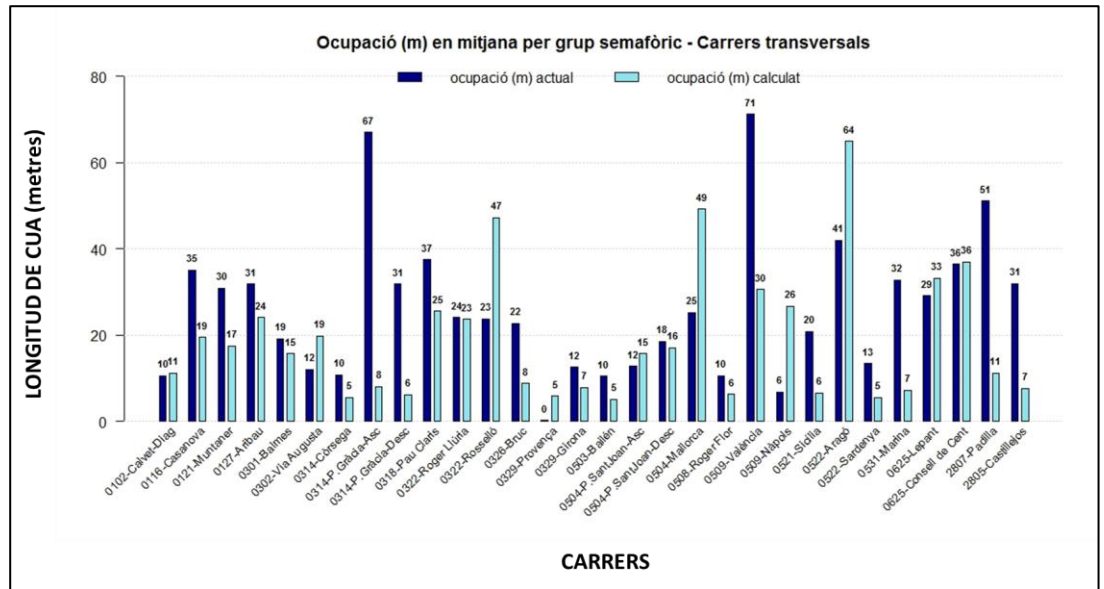


Figura 40 - Ocupació dels carrers en mitjana (metres)-comparativa simulació amb dades actuals

4.4.4 Vianants

Tot i que no s'han configurat grups semafòrics específics per als vianants, aquests han estat presents a tots els càlculs a través dels temps de semàfor dels carrers amb que comparteixen fase (en general, una de les fases oposades al pas del tramvia), i amb els temps mínims de verd que s'han definit com a paràmetres d'entrada del model d'optimització.

La velocitat mitjana mínima per creuar l'avinguda Diagonal

La Figura 41 mostra les velocitats mitjanes mínimes per poder travessar la Diagonal a les diferents cruïlles (en m/s). Aquesta s'ha calculat a partir de la distància que cal travessar dividida pel temps de verd per a vianants. En tot el procés, s'ha garantit que es mantinguin per als passos de vianants les mateixes condicions que es donen a la resta de la ciutat: una velocitat màxima de pas d'1 m/s. i, seguint els nous estàndards de l'Ajuntament, tractar de millorar aquesta velocitat baixant-la a un màxim de 0'8 m/s. Tal i com es pot veure, els valors dels cicles resultants permeten als vianants creuar adequadament totes les cruïlles, de vorera de façana a vorera de façana: 19 de les 24 cruïlles s'adeqüen a la velocitat màxima de 0'8 m/s, i les 5 restants es mantenen amb una velocitat mitjana màxima inferior o igual a 1'0 m/s.

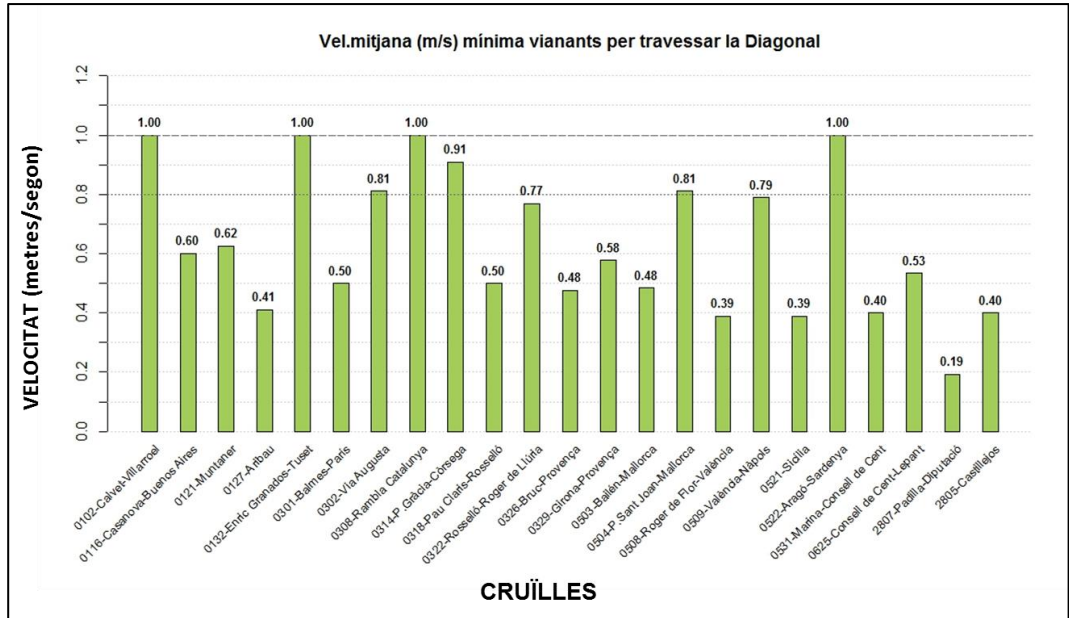


Figura 41 - Velocitat mitjana mínima de pas per als vianants (en m/s)

4.4.5 Bicicletes

Finalment, pel que fa a les bicicletes, en el nou traçat contaràn amb carril exclusiu separat de vianants i vehicles. Aquest és un punt de millora molt significatiu, ja que actualment el carril bici, el segment entre Passeig de Gràcia i Passeig de Sant Joan discorre entre els vianants, i entre Passeig de Sant Joan i Marina i a les rotondes, té un traçat complicat. Per altre banda, aquest carril és paral·lel al tramvia: això vol dir que el seu temps de semàfor verd anirà simultani al del tramvia, ajustat als temps de neteja de la cruïlla propis de les bicicletes. Tot i així, s'ha volgut fer una simulació amb les trajectòries de les bicicletes, suposant que circulen amb els temps del semàfor del tramvia.

El resultat obtingut es pot veure a la Figura 42 i a la Figura 43, això és, els diagrames espai-temps que s'han obtingut de la simulació. Considerant una velocitat mitjana de circulació de les bicicletes de 15km/h en sentit Francesc Macià i de 20km/h en sentit Glòries, es pot fer el recorregut dins de l'àmbit d'estudi en un temps mig aproximat de 27 minuts i 22 minuts respectivament.

Les bicicletes circulen paral·leles al tramvia amb carril exclusiu

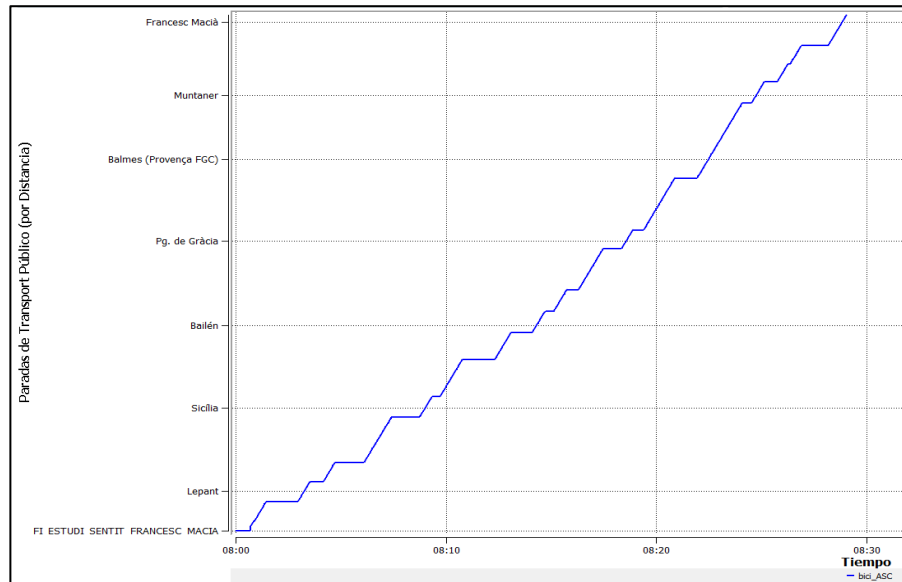


Figura 42 - Diagrama espai-temps bicicletes - Sentit Francesc Macià

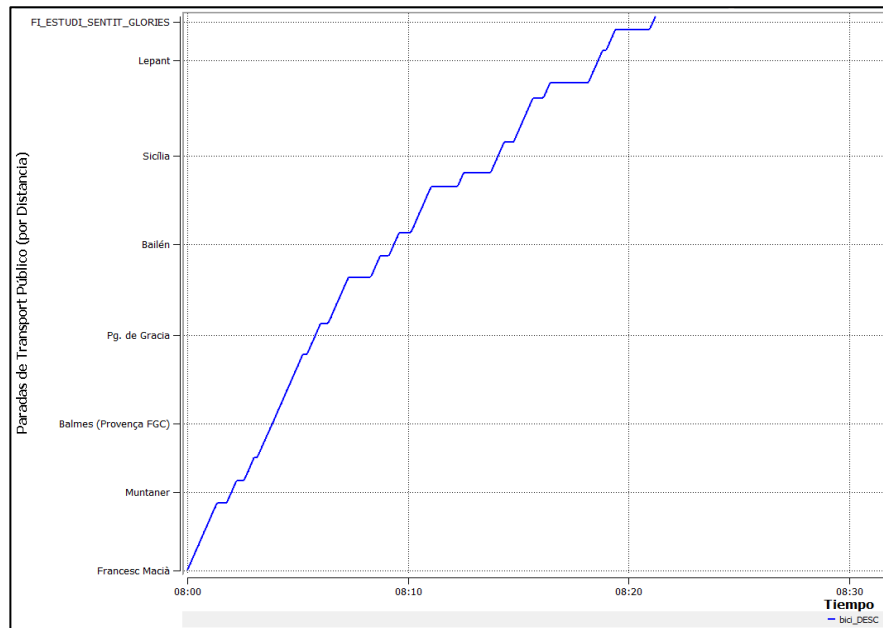


Figura 43 - Diagrama espai-temps bicicletes - Sentit Pl. Glòries

5 Resum

L'objectiu del present document és presentar les tasques fetes per definir una **coordinació semafòrica a la secció de la Avinguda Diagonal compresa entre la plaça Francesc Macià i el carrer Castillejos**, eix d'unió dels dos tramvies que actualment coexisteixen a la ciutat de Barcelona. Una coordinació semafòrica que busca afavorir la circulació del **tramvia** sense que la mobilitat dels carrers transversals, per on es desplacen **vehicles i autobusos**, es vegi perjudicada, com tampoc els altres dos modes de desplaçament: **vianants i bicicletes**.

Una solució recolzada en **dos productes** àmpliament reconeguts al seu entorn (**Aimsun i CPLEX**) i en **un model matemàtic** creat expressament seguint la literatura científica especialitzada, que és el pilar d'una **metodologia dissenyada ex professo** per aquest estudi, donades les seves particulars característiques.

Els punts forts de tot el procediment són:

- 1) **Calibració del model:**
 - ajustaments a les cruïlles més complexes,
 - temps de verd mínim als carrers transversals per garantir el pas dels vianants,
 - regulació semafòrica específica per facilitar el pas dels autobusos a la secció entre Via Augusta i Passeig de Gràcia.
- 2) **Execucions en lots de rèpliques del procés iteratiu Simulació + Càlcul semàfors:**
 - amb l'objectiu de determinar les millors configuracions de semàfors,
 - cada rèplica aporta variabilitat a certs paràmetres que permeten abastar un rang més ampli de situacions possibles al món real.
- 3) **Aplicació de criteris estadístics** per classificar les solucions obtingudes.
- 4) **Validació de les millors solucions** fent noves execucions que permeten revisar el comportament dels diferents modes de transport a la secció.

S'han analitzat **diferents escenaris**, segons el temps de cicle dels semàfors i la freqüència de pas del tramvia, per buscar aquell que pugui garantir unes **bones prestacions** als diferents elements involucrats tant a **curt com a mig termini**. Per això s'han incorporat criteris de possible evolució dels serveis, com pot ser la utilització de combois de 64 metres o possibles canvis en la mobilitat que poden afectar a les configuracions dels semàfors.

Dels diferents escenaris estudiats, un d'ells, el que ve donat per **un temps de cicle de 120'' i una freqüència de pas del tramvia de 4'**, s'ha seleccionat per ser analitzat amb més detall, atès que era el que presentava el millor comportament. S'han ajustat amb precisió els temps de durada dels semàfors de les cruïlles per millorar la mobilitat de la zona, obtenint així una solució semafòrica que, després d'un conjunt significatiu de simulacions, ha permès comprovar, mitjançant els indicadors recollits, que aconsegueix els requeriments plantejats a l'inici de l'estudi, i alhora, s'han pogut detectar qüestions a tenir en compte en el disseny final del projecte de connexió.

Així mateix, de la solució analitzada, i a partir del resultat de les simulacions, cal destacar que:

- 1) S'obté una **velocitat mitjana comercial del tramvia competitiva**, dintre dels valors en que es mouen actualment el Trambaix i el Trambesòs.
- 2) Hi ha **bona convivència entre autobusos i tramvia** a la plataforma compartida entre Passeig de Gràcia i Via Augusta.
- 3) La **circulació dels autobusos pels carrers transversals no es veurà afectada negativament** per la incorporació del nou mitjà de transport.
- 4) Es fa una **regulació semafòrica adaptada** a les característiques de **cada punt singular** per **afavorir** els moviments de **circulació**.
- 5) Els valors dels cicles resultants **permeten, sota els estàndards aplicats actualment als passos de vianants, creuar adequadament totes les cruïlles**, de vorera de façana a vorera de façana.
- 6) El nou traçat contempla una **via per les bicicletes exclusiva, i separada de vianants i vehicles**, amb un **temps de verd coordinat amb el temps de verd del tramvia**.

Equip de treball

Centre d'Innovació del Transport (CENIT)

Francisca Rosell

Llicenciada en Matemàtiques per la Universitat de Barcelona, màster en Estadística i Investigació Operativa per la UPC. Cap de Projectes Logística i Transport Urbà del CENIT.

Francisco Rodero

Enginyer Informàtic per la UPC i postgraduat en Smart Mobility: ITS per la UPC School of Professional & Executive Development. Responsable Sistemes Intel·ligents de Transport del CENIT.

Dr. Sergi Saurí

Doctor Enginyer de Camins, Canals i Ports per la UPC i Llicenciat en Economia per la Universitat de Barcelona. Director del CENIT

Referències

- Gartner, N. H., Little, J. D. C., & Gabbay, H. (1975). Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed-Integer Linear Programming: Part I: The Network Coordination Problem. *Transportation Science*, 9(4), 321–343.
- Möhring, R. H., Nökel, K., & Wunsch, G. (2006). A model and fast optimization method for signal coordination in a network. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 11, pp. 73–78).
- Highway Capacity Manual 2010 (2010). Washington, D.C. Transportations Research Board, 2010.
- Estudis per a la connexió de les xarxes Trambesòs i Trambaix [en línia]. Ajuntament de Barcelona. Disponible a <http://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/ca/estudis-tecnics-tramvia>
- Mapa de la xarxa definitiva BUS. [en línia]. Ajuntament de Barcelona. [consultada el 15/03/2017]. Disponible a <http://sitroom.bcn.cat/widget/mapa-mobilitat/visor.html>.
- INGEROP. Red Unificada de Tranvía. Análisis de Alternativas. Març 2017. Estudi realitzat per encàrrec de l'Ajuntament de Barcelona. No publicat.
- IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio v12.6.3
- TSS-Transport Simulation Systems, AIMSUN. Versió 7.0.4 (R25783 x32).

