
This is the **published version** of the bachelor thesis:

López García, Júlia; Ibeas, Asier , dir. Optimització de rutes en autobusos urbans. Creació de trajectes exprés. 2024. 14 pag. (Grau en Gestió de Ciutats Intel·ligents i Sostenibles)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/308100>

under the terms of the  license

Optimització de rutes en autobusos urbans. Creació de trajectes exprés.

Júlia Lopez Garcia

Resum– En aquest treball es crearan línies d'autobusos de transport urbà a la ciutat de Sabadell, segons el model de Línia Exprés (LX), que representa un reforç al servei de les línies de transport més utilitzades (L1, L2, L3, L8). És un avenç significatiu en l'optimització de la mobilitat per als usuaris que requereixen desplaçar-se per trajectes extensos dins de l'àmbit urbà de manera eficient i ràpida. La proposta inclou l'anàlisi de les necessitats de transport, la definició d'una ruta òptima que connecti punts estratègics i l'ús d'autobusos moderns i sostenibles amb la implementació d'un nou format de validacions propi de la ciutat. Els trajectes estan creats a partir de les dades recollides de la base de dades SAE (Sistema d'Ajuda a l'Explotació) en temps real dels TUS (Transports Urbans de Sabadell), dels carrers i les parades. Es porta a terme un estudi (inclou dos enfocaments: heurístic i analític) amb l'ajuda dels arxius d'ús/ocupació i matrius d'origen/destí, aplicant l'algorisme GA de Matlab, per optimitzar al màxim els desplaçaments i reduir el temps de durada.

Paraules clau– Transport urbà, Optimització, Base de dades, línia exprés, algorisme GA

Abstract– In this work, urban transport bus lines will be created in the city of Sabadell, according to the Express Line (LX) model, which represents a reinforcement of the service of the most used transport lines (L1, L2, L3, L8). It is a significant advance in the optimization of mobility for users who need to travel long distances within the urban area efficiently and quickly. The proposal includes the analysis of transport needs, the definition of an optimal route that connects strategic points and the use of modern and sustainable buses with the implementation of a new validation format specific to the city. The routes are created from the data collected from the SAE database (Sistema d'Ajuda a l'Explotació) in real time of the TUS (Urban Transport of Sabadell), between streets and stops. A study is carried out (includes two approaches: heuristic and analytical) with the help of use/employment files and source/destination matrices, applying Matlab's GA algorithm, to optimize the displacements to the maximum and reduce the duration.

Keywords– Urban Transport, Optimization, Database, Express Line, GA algorithm

1 INTRODUCCIÓ - CONTEXT DEL TREBALL

EN l'últim segle el transport urbà s'ha convertit en un component essencial de la vida de les ciutats, tant en les àrees urbanes com rurals,[5]. La mobilitat de les persones depèn, en gran mesura, de sistemes de transport eficients, siguin tramvies, trens, metres o autobusos[2]. Aquest treball analitza aquests darrers des de la perspectiva de l'optimització de rutes, ja que és un problema rellevant que cal atendre. El fet que aquests diferents models de transport mostrin resultats diversos quant al nivell de servei percebut pels usuaris, així com del cost de funcionament del sistema, fa necessària l'aplicació de mesures que optimitzin

la gestió. L'aplicació d'aquestes pot contribuir a millorar els nivells de benestar dels usuaris. Per això, el desenvolupament de metodologies que permetin obtenir i adaptar dinàmicament el sistema de transport públic d'acord amb els canvis que experimenta una urbs, és un problema prioritari per als planificadors del transport. El creixement dels espais urbans, fa créixer la demanda de serveis de transport a la ciutat i als barris i els ajuntaments han de modificar o afegir noves rutes per donar-hi resposta; condicionats per factors de sostenibilitat, qualitat del servei i pressupost, la qual cosa no sempre és fàcil.

L'optimització de sistemes de transport urbans és una pràctica que es troba en auge. Així, en el sistema de busos urbans s'està emprant en la millora de les xarxes de ciutat i àrees metropolitanes. Existeixen diversos sistemes que poder facilitar la implementació d'aquesta optimització. Un clar exemple és el model BRT (Bus Rapid Transit) de Galindres i Soto[4]. Expliquen que a causa de la complexitat dels sistemes del transport públic, la configu-

• E-mail de contacte: 1638784@uab.cat
• Treball tutoritzat per: Asier Ibeas (Dept. de Telecomunicació i Enginyeria de Sistemes)
• Curs 2023/24

ració d'estratègies basades en models d'optimització per a la generació de freqüències de pas, taules horàries i models de control de flota en temps real ha estat una necessitat en diverses àrees urbanes. Exemples com Transmilenio (Bogotà, Colòmbia), Transantiago (Santiago, Xile) i Metre Rapid (Los Angeles, CA) (Leiva et al., 2010) [6] són prou representatius. En aquest estudi (Galindres Guancha i Soto Mejía, (2020), avaluen dos escenaris a l'hora d'utilitzar el transport urbà d'autobusos: la comoditat dins del bus i el temps d'espera dels usuaris. En el primer escenari, els passatgers han de poder recórrer la distància més curta per arribar al seu destí. En el segon escenari, a més de la restricció de distància, també es té en compte el factor de comoditat i el temps d'espera en l'estació. Si la capacitat disponible d'un autobús que arriba a l'estació és baixa, disminueix la comoditat per als usuaris, això augmenta la probabilitat que esperin al següent autobús. D'altra banda, el temps d'espera es torna rellevant si el passatger ja ha esperat molt de temps en l'estació, la qual cosa redueix la probabilitat que continuï esperant.

Un altre estudi (Peña, 2022) esmenta el problema de la planificació de línies, més conegut com *line planning problem* (LPP). El problema consisteix a dissenyar línies i les seves freqüències en una xarxa de carrers, de manera que un determinat volum de passatgers, representat per una matriu origen-destí, pugui viatjar amb seguretat per la xarxa[7].

Se solen considerar dos objectius, com a mínim, per a aquesta mena de problemes: representar el punt de vista de l'operador de serveis reduint els costos d'explotació i seguidament la representació del punt de vista dels usuaris, reflectint el desig dels passatgers de minimitzar els temps de viatge. Fins i tot, reduir el nombre de transbords a realitzar durant el trajecte, encara que alguns autors ignorin aquest últim. És per això que l'objectiu d'aquest estudi és reduir al màxim el temps de ruta i nombre de transbords en un viatge de llarga distància (Sabadell Nord a Sud i viceversa).

Al 2019, (Zhou, Yang, Wang, Yan(2019)), van definir un problema d'optimització de la planificació de línies urbanes amb dos objectius oposats. D'una banda, des del punt de vista de l'empresa, que busca disminuir els costos d'operació o maximitzar els beneficis. D'altra banda, des del punt de vista de l'usuari, que busca viatjar en el menor temps possible. Així, en primer lloc, es busca la configuració de línies més barata que cobreixi tots els punts de demanda de la xarxa de transport. Per a això, s'ha de escurçar la longitud de les línies, ja que és directament proporcional al cost. També s'ha de tenir en compte la freqüència dels busos a les línies, ja que, a major flota, major cost. Se suposa que els viatgers triaran la ruta més breu, des d'un criteri cronològic, és a dir, la que menor temps consumeixi tenint en compte el temps de trajecte, temps d'espera, de transbord i temps final necessari per a arribar a destí[10].

Entendre com la tecnologia pot col·laborar amb els gestors del transport públic i les empreses privades del sector per a elevar la qualitat del servei és decisiu en la transformació sostenible de les ciutats. Actualment, l'Ajuntament de Sabadell i Transports Urbans de Sabadell (TUS)[8] estan treballant per millorar el sistema d'autobusos urbans a la ciutat i la seva eficiència. Aquestes millores no sols beneficien als usuaris diaris, sinó que també contribueixen al benestar general de la comunitat i al medi ambient.

El març de 2004, l'empresa va prendre una decisió es-

tràtica alineada amb la seva política de millora contínua. Es va proposar implementar un Sistema Integrat de Gestió de Qualitat i Medi Ambient, cosa que, el desembre de 2004, es va aconseguir amb la certificació del Sistema de Gestió de Transport Urbà Sostenible segons les normes ISO 9001:2000 i ISO 14001:1996. Al llarg de les revisions subsegüents, el sistema es va adaptar a les versions més recents d'aquestes normes.

Aquestes actualitzacions van introduir conceptes clau, com la gestió del risc, l'enfocament del cicle de vida, el context organitzacional, l'acompliment ambiental i el lideratge. Aquests elements enriqueixen la gestió de qualitat i medi ambient de l'empresa TUS.

Com s'ha esmentat anteriorment, aquest projecte es planteja com a objectiu aconseguir l'optimització del temps que un usuari passa dintre del bus per arribar al seu destí, per aquesta raó es crea un reforç per les quatre línies més utilitzades pels usuaris, creant dos trajectes (anada i tornada) de llarga distància amb menys parades i més ràpids, recurrent les zones més importants i les parades més utilitzades de Sabadell. Aquestes noves rutes reben el nom de "Trajectes Exprés". Beneficiaran a la població que s'hagi de desplaçar d'una punta a l'altra de la ciutat amb més rapidesa, ja que actualment per a fer-ho el temps emprat és de 40 minuts, segons Google Maps. Tenint en compte tots els factors de sostenibilitat i pressupostos, el temps és un dels factors més importants. Altres elements rellevants són la puntualitat, la freqüència de pas, la velocitat i l'eficiència[1].

Una forma preferible de reduir el desaprofitament de recursos públics i augmentar la seva utilització és saltar-se les parades que registren, estadísticament, menys usos, en cada línia d'autobús. Un mètode d'aquest tipus reduiria el temps de viatge dels passatgers, el temps d'execució de cada ruta i un ús més eficient de les rutes, al mateix temps que satisfaria els passatgers simultàniament en augmentar lleugerament el temps mitjà d'espera dels passatgers. Un major desenvolupament d'aquest mètode consisteix a determinar dinàmicament la parada per a cada ruta, la qual cosa satisfà millor la demanda dels passatgers i redueix encara més el temps d'execució. Optimitzar rutes i trajectes al màxim, permetria augmentar el benefici del servei i augmentar la satisfacció dels usuaris del transport[11].

Aquests són els objectius en què focalitza el model de Línia Exprés. Un exemple de trajectes exprés es el Metro Ràpid de Los Angeles, CA. Metro Ràpid és un sistema de transport ràpid d'autobús que funciona al comtat de Los Angeles. Suisman Urban Design va ser contractat per l'MTA[3] per desenvolupar tota la identitat gràfica i arquitectònica del sistema, incloent el seu logotip, els autobusos i les estacions. Les parades de l'estació, situades a una milla de distància, disposen de marquesines distintives *umbrella*, il·luminació de la vorera, informació d'arribada d'autobús a temps real, mapes de trànsit i informació de barri. Es van llançar per primera vegada al voltant de l'any 2000. Les línies ràpides de bus de Los Angeles eren les més populars, tan populars que es va desenvolupar un famós sistema de marca: autobusos ràpids vermells i autobusos locals taronges. Els autobusos ràpids recorren llargues distàncies al llarg dels principals bulevards, detenint-se cada mitja milla (800m), mentre que els autobusos locals corren al costat d'ells i es detenen cada dues illes d'edificis(250m, aprox). Aquesta freqüència reduïda de parades permet als passat-

gers arribar més ràpidament als seus destins. Aquest sistema podria inspirar la creació de trajectes exprés a la ciutat de Sabadell.

Cada línia de la ciutat de Sabadell està pensada de manera estratègica, però s'observa un desequilibri en l'ús que fan els usuaris segons les zones. En aquest treball, s'estudien les línies centríques[9] que van de Nord a Sud i de Sud a Nord (verticalment) en un període concret, de dilluns a divendres, i són les línies L1, L2, L3 i L8. Les línies L1, L2 i L3, que transcorren pel centre de la ciutat, són les que més usuaris utilitzen en dies feiners, amb una freqüència de 18 minuts individualment. Comparteixen un recorregut similar, cosa que fa que cada 5 o 10 minuts un bus d'alguna d'aquestes 3 línies passi, garantint, així, un servei ràpid i fluid. La línia L8 és la més ràpida, però té una freqüència de pas inferior de 35 minuts [Taula 1] en comparació amb les altres línies analitzades, provocant majors temps d'espera per als usuaris.

El servei d'aquestes línies té pros i contres que a continuació es descriuen. Els aspectes positius de cadascuna són, per una banda, el nombre de parades: l'L1 compta amb 27 parades, l'L2 amb 33 parades, l'L3 amb 29 parades i l'L8 amb 22. Això permet que la mobilitat sigui eficient quant a la proximitat de les parades al destí dels passatgers. Quant als aspectes negatius, els usuaris que han de recórrer tot el trajecte triguen un temps excessiu en arribar a les parades de final de trajecte. El temps aproximat que tarda cada línia a començar i finalitzar els trajectes [Taula 1] és de: L1 40 min, L2 39 min, L3 41 minuts i L8 30 minuts, en temps teòric. La durada suposa un inconvenient per a aquells que necessiten desplaçaments més ràpids o que realitzen trajectes quotidians de llarga distància. Cal afegir que la distribució de la demanda al llarg de les línies no és uniforme. Està pensada per garantir el servei a les zones amb major concentració d'usuaris, com ara el centre de la ciutat o les zones properes a les estacions de tren.

TAULA 1: LÍNIES CENTRALS (MÉS POPULARS)

Característiques de cada línia			
Línies	Temps Trajecte	Parades	Freqüència
Línia 1	40 minuts	27 parades	18 minuts
Línia 2	39 minuts	33 parades	18 minuts
Línia 3	41 minuts	29 parades	18 minuts
Línia 8	30 minuts	22 parades	35 minuts

Un cop vistes les línies centrals i abans d'analitzar les parades més utilitzades, es crea una descripció detallada del sistema de transport urbà de Sabadell. Les línies de transport de la ciutat s'organitzen segons els dies de la setmana, és a dir feiners, dissabtes i festius. És obvi que les línies dels dies feiners [Fig.1] concentren la major part dels usuaris, ja que els desplaçaments estan condicionats per la feina, l'escola, visites a centres sanitaris, activitats comercials, etc. Durant aquests cinc dies, degut a causa de l'alta demanda, les línies de bus funcionen amb més freqüència [Fig. 1]. Tot i que la demanda és menor els dissabtes i festius, és essencial mantenir el servei de busos per als usuaris que necessiten desplaçar-se en aquests dies. És important assenyalar que la ciutat encara no disposa d'un servei de busos nocturns.



Fig. 1: Xarxes del transport urbà de Sabadell els dies feiners

Aquesta manca d'un horari nocturn pot limitar les opcions de desplaçament per als residents, especialment durant les hores tardanes de la nit o matinalades. L'última sortida dels autobusos a la nit generalment és al voltant de les 22:30 h o 23:00 h, depenent de la línia i del dia de la setmana. En referència a les parades, s'ha de destacar que cadascuna té un codi propi, que més tard es mencionarà.

Les línies poden tenir més de 2 trajectes d'anada i tornada, als quals anomenem reforços. Aquests reforços no són altra cosa que busos que es posen a disposició dels usuaris per donar resposta a l'alta demanda del servei i agilitzar la gestió dels passatgers, sigui en hores punta o per recórrer zones específiques. Normalment, es compta amb un o dos reforços en horaris diferents, però depenent de la demanda de la línia poden haver-hi més de 3 o 4. Alguns reforços fan una ruta diferent, variant una o dues parades del recorregut habitual o directament modifiquen una part del trajecte per donar resposta a les necessitats de transport en cada franja horària i dia de la setmana. En aquest treball es crea un reforç anomenat trajecte exprés per a cadascuna de les línies.

A més dels reforços en hores punta, també s'han implementat altres mesures per millorar l'eficiència dels serveis de transport. Aquests inclouen:

- La instal·lació de punts d'informació a les parades més concorregudes
- L'ús de tecnologia avançada per supervisar el trànsit i preveure possibles incidents
- La millora de les infraestructures per garantir una experiència de viatge segura i còmoda.

Per exemple, s'han construït noves marquesines que ofereixen protecció contra la pluja i les inclemències del temps, i també de la calor dels mesos d'estiu. A més, càmeres de seguretat s'han instal·lat per garantir la seguretat i tranquil·litat dels usuaris durant tot el seu trajecte.

Aquestes dades arriben al SAE (Sistema d'Ajuda a l'Exploatació), sistema de dades basat en el coneixement exacte

de les incidències i desenvolupament del servei en temps real, tant de recopilació i monitoratge de la informació com d'actuació sobre el servei que s'utilitza per la seva gestió. Es pot controlar amb seguretat el funcionament de busos, sobretot per mantenir informats als usuaris del servei de la regularitat de les línies i de les incidències que s'originin mitjançant els rètols d'informació i dispositius mòbils.

2 OBJECTIUS I METODOLOGIA

El punt de partida d'aquest treball i que es planteja com a objectiu és optimitzar línies de transport urbà de Sabadell mitjançant la implementació d'un model de Línia Exprés. Aquest model es planteja amb la finalitat de reduir el temps mig que una persona passa dins l'autobús, millorant així l'eficiència del servei i la satisfacció dels usuaris.

Per dur a terme els trajectes exprés, es planifiquen les següents fases:

1. Estudi de les línies centrals L1, L2, L3, L8, de dilluns a divendres (5 dies), per detectar les necessitats i les condicions que permetran implementar el model de Línia Express
2. Detecció de parades i zones amb major afluència de viatgers, i possibilitats de millora de la gestió i la comoditat dels usuaris. Recol·lecció de dades per a la generació de trajectes exprés. Selecció i creació dels trajectes de reforç de les línies i les parades on es pot aplicar el servei aplicant l'enfocament Heurístic
3. Graf de la Xarxa de Transport. Diagrames
4. Aplicació de l'enfocament Analític: Construcció de la matriu de flux de passatgers i definició del vector de parades
5. Formulació de la Funció Objectiu
6. Ús de MatLab amb l'implementació de l'algoritme GA
7. Anàlisi dels resultats un cop aplicat l'algoritme, verificació de la seva fiabilitat

En una primera fase, per a la seva planificació i execució, cal analitzar les línies de Sabadell amb més usuaris de bus urbà, identificar quina línia pot ser interessant prioritzar i seleccionar les parades òptimes per crear una línia Exprés que optimitzi temps i millori el servei per tots els usuaris. S'ha dut a terme la detecció de parades i zones amb major afluència de viatgers a les línies L1, L2, L3, i L8. Aquesta detecció es basa en la recopilació de dades quantitatives durant un període de cinc dies feiners, de dilluns a divendres. La recollida de dades inclou els arxius d'ocupació i matrius, origen/destí del SAE, que inclouen dades dels sensors de comptatge de passatgers a bord dels vehicles i anàlisi de les dades de validació de títols de transport en temps real. S'han pogut identificar punts crítics amb alta densitat de passatgers i moments del dia en què es produeixen congestions significatives. Quant a la comoditat dels usuaris, s'han valorat les possibilitats de millora en la gestió del flux de viatgers a les parades identificades, tenint en compte factors com la capacitat dels vehicles, el temps

d'espera i la distribució del flux de passatgers en les diferents parades. Aquesta anàlisi permet mostrar els aspectes en què cal focalitzar per prendre les decisions pertinents. L'apartat 3 també inclou la fase 2 amb l'afluència de viatgers i la generació dels trajectes on s'analitzen la demanda de parades per saber les zones més populars, obtenint una aproximació de l'ús del servei. Per generar els trajectes s'ha utilitzat un enfocament heurístic. Aquest enfocament ha implicat la selecció i creació de trajectes de reforç basats en les dades recopilades prèviament. Els trajectes exprés s'han dissenyat per minimitzar el nombre de parades, centrant-se en aquelles amb major demanda de passatgers, tot assegurant una connexió eficaç entre els punts de major afluència i les àrees de destinació principals. Aquest procés ha inclòs la simulació de diferents escenaris de trajectes per avaluar l'impacte potencial en els temps de desplaçament i la distribució de passatgers.

Partint de l'estudi inicial de les línies i de les dades reals de les parades més utilitzades i el temps de viatge entre aquestes, es pot crear una aproximació del servei que donaran les línies exprés a la ciutat. En la fase 3, s'ha creat un graf de la xarxa de transport [Fig.12 i Fig.13], on cada parada es representa com un node i cada ruta entre parades com una aresta, la distància entre cadascuna. Al graf es poden visualitzar totes les rutes possibles on s'aplicaran els nous trajectes exprés, que només serviran per tenir una visió gràfica dels possibles trajectes.

En la fase 4, es planteja una matriu de flux de passatgers que representa la quantitat de viatgers que es desplacen entre diferents parades de diferents línies, amb dades no reals, només en la pràctica serien necessàries dades reals que s'obtidrien. Es mostra un procediment de problema d'optimització des d'un altre punt de vista amb dades òbvies per demostrar que l'algoritme GA funciona. La matriu de flux creada ha estat desenvolupada a partir de les dades inventades sobre patrons de desplaçament dels passatgers. A continuació, a la fase 5, s'ha definit un vector de parades, que inclou les ubicacions de totes les suposades parades. Aquesta definició ha estat crucial per a la posterior formulació de la funció objectiu, implementada en MatLab posteriorment, fase 6. Al resultat s'han pogut identificar les parades amb major demanda i les rutes potencials per a la implementació dels trajectes exprés, demostrant que l'algoritme GA de MatLab funciona.

3 GENERACIÓ DE TRAJECTES EXPRÉS

Per abordar la creació de trajectes exprés, es plantegen dos enfocaments: heurístic i analític. En aquest apartat, es començarà amb la generació heurística de rutes exprés, que representa l'enfocament intuïtiu inicial. Per a cada línia de transport, el model de reforç es dividirà en trajecte nord i trajecte sud. A partir d'aquí, s'identificaran les parades amb major afluència de passatgers, tant en pujada com en baixada. A continuació, es proposarà un trajecte exprés per a cada recorregut de les línies esmentades, incloent-hi només les parades on el nombre de passatgers que pugen o baixen superi un cert llindar, creant així un suport per la línia. Això permetrà eliminar de les rutes exprés aquelles parades amb un nombre menor de passatgers.

Per determinar les zones amb major demanda de servei, s'ha utilitzat el Sistema d'Ajuda a l'Explotació (SAE), que

proporciona dades en temps real de l'ús dels Transports Urbans de Sabadell (TUS). Aquestes dades aproximades han permès identificar les àrees amb major concentració de viatgers i els moments del dia en què la demanda és més alta. Per optimitzar la planificació a llarg termini i identificar les parades amb major demanda, és preferible analitzar el total dels cinc dies laborables. Això ens proporciona una visió més completa i consistent de la demanda global, reduint l'impacte de les variacions diàries i anomalies. S'analitzen dades d'ocupació del servei de dilluns a divendres del 8/04/2024 al 12/04/2024. S'observen per línia les parades amb més demanda i això ha ajudat a crear nodes per trajectes exprés que han d'oferir rutes més eficients. Quant a la seva creació, s'han hagut de crear uns més curts i altres més llargs, ja que pot haver-hi algun trajecte que s'utilitzi per més d'una línia. Primer es presenten els trajectes individuals i un cop finalitzat això, es crearan trajectes exprés comuns entre les 4 línies.

Les dades utilitzades referents a nombre d'usuaris són dades aproximades, ja que els sensors d'entrada i sortida dels busos no detecten sempre tots els bitllets i les dades de les validacions mostren un marge d'error que cal considerar.

DATA	L1	L2	L3	L8	TOTAL
8/04/2024	8.731	7.284	6.593	1.980	24.587
09/04/2024	9.128	7.590	6.550	2.116	25.384
10/04/2024	8.519	7.431	6.551	2.132	24.633
11/04/2024	9.333	6.803	6.539	2.101	24.776
12/04/2024	9.054	6.933	6.862	2.024	24.872
MITJA	8943	7196	6617	2069	
TOTAL	44.765	36.040	33.095	10.352	124.252

Fig. 2: Taula de dades d'usuaris de la setmana en les línies els dies feiners

La distribució setmanal dels usuaris entre les quatre línies (L1, L2, L3, i L8) amb un total de 124.252 usuaris[fig.2], ens ofereix una perspectiva sobre el volum de trànsit que cada línia gestiona.

3.1 LÍNIA 1

La línia L1 del servei és un exemple clar d'una infraestructura vital per a la mobilitat urbana. Amb una mitjana d'ús de 8.900 usuaris diaris, amb 44.765 usuaris de dilluns a divendres en la setmana quantificada, destaca com la més utilitzada, reflectint la seva importància i popularitat entre els ciutadans. Analitzant les dades d'ocupació, podem obtenir una visió detallada del comportament dels usuaris, les quals ens permeten identificar les parades amb major afluència, que es converteixen en punts clau per a l'optimització del servei. Per exemple, (codi parades:13/49) Francesc Macià lidera la llista [Taula 2] amb 2.598 usuaris pujant i 2.320 baixant, seguida de la parada (codi: 11/51) Espanya on 2281 pugen i 2265 hi baixen. Aquestes xifres són indicatives de les necessitats de transport de la població; és per això que la primera ruta creada és un reforç de bus per aquesta línia. Les parades analitzades, on pugen i baixen més usuaris, seran les que formin aquesta ruta nova [fig.4]. Aquesta anàlisi ens permet descartar les parades amb dades menys rellevants. Per definir aquest trajecte exprés, el llistar d'ús s'ha establert a partir de la parada més utilitzada i quatre més per sota, les que es troben al top 5 de més populars [Taula 2], per identificar els punts estratègics.

TAULA 2: PARADES SETMANA L1

Parades més utilitzades de dilluns a divendres L1	
PUGEN	BAIXEN
1. Francesc Macià (2598)	1. Francesc Macia (2320)
2. Espanya (2281)	2. Espanya (2265)
3. Rambla(2244)	3. Sant Joan (2029)
4. Mestre Planas (2159)	4. Casal Pere Quart (1942)
5. Dr Robert (2092)	5. Massagué (1885)

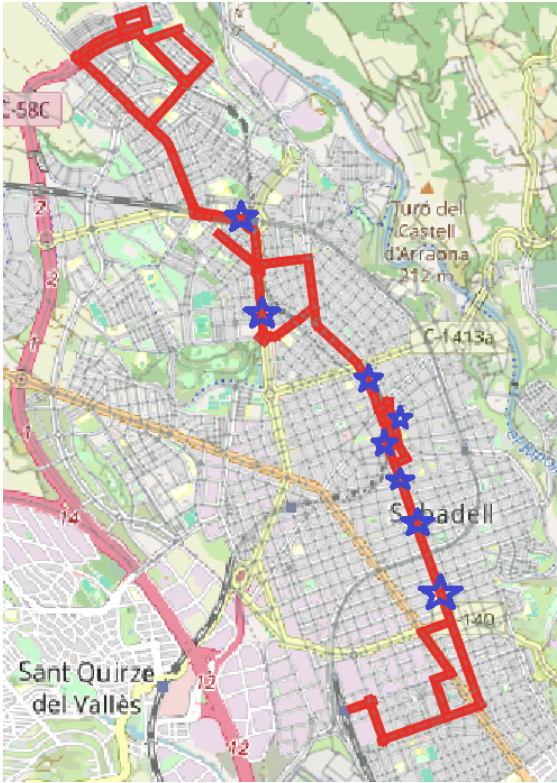


Fig. 3: Mapa de la Línia L1. Les estrelles indiquen les parades més populars

La Figura 4 representa el trajecte exprés creat a partir de les parades de la taula 2. Amb l'ajuda dels arxius de matrius origen/destí i d'ocupació del Sistema d'Ajudes a l'Exploatació (SAE), s'ha pogut determinar el nombre d'usuaris que viatgen entre cada parell de parades.

El codi de parada s'indica al davant del nom de cadascuna al llarg del desenvolupament del treball. El recorregut de baixada inclou les següents parades: 11 Espanya (1), 13 Francesc Macià (2), 16 Massagué (3), 18 Dr. Robert (4), 19 Casal Pere Quart (5), 20 Rambla (6), 22 Mestre Planas (7). Aquest recorregut exprés triga un total de **18 minuts** teòrics en cobrir les 7 parades, segons els càlculs del SAE.

La Figura 5 representa el trajecte exprés creat a partir de les parades de la taula 2 en direcció Sud a Nord. El recorregut de pujada inclou les següents parades: 40 Mestre Planas (1), 42 Rambla (2), 43 Casal Pere Quart (3), 178 Sant Joan (4), 46 Massagué (5), 49 Francesc Macià (6), 51 Espanya(7). Se substitueix la parada de Dr. Robert per Sant Joan per tal d'adaptar el recorregut a les necessitats específiques d'aquest sentit de la ruta. Aquest recorregut exprés tarda un total de **19 minuts** teòrics en cobrir les 7 parades.



Fig. 4: Reforç E1 trajecte exprés L1 de Nord a Sud

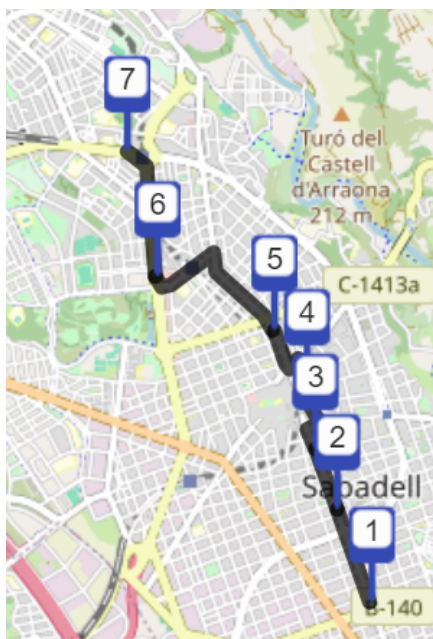


Fig. 5: Reforç E1 trajecte exprés L1 de Sud a Nord

3.2 LÍNIA 2

La línia L2 és utilitzat per 36040 usuaris a la setmana, de dilluns a divendres, amb una mitjana de 7196 usuaris diaris. Això fa que sigui la segona línia més utilitzada. Destaquen com a parades amb major afluència: Dr. Robert (2.019 pujades), Barcelona (1.766 pujades), La Creu de Barberà (1.695 pujades), La Rambla (1.643 pujades) i L'Eixample (1.550 pujades). Pel que fa a les baixades, Sant Joan lidera amb 2.043, seguida de Casal Pere Quart (1900), La Creu de Barberà (1694), Massagué (1486) i la Rambla (1468). L'alta freqüència de servei d'aquestes línies i la cobertura de parades estratègiques les converteixen en l'opció preferida pels usuaris diaris d'aquesta línia, contribuint significativament

TAULA 3: PARADES SETMANA L2

Parades més utilitzades de dilluns a divendres L2	
PUGEN	BAIXEN
1. Dr. Robert (2019)	1. Sant Joan (2043)
2. Barcelona (1766)	2. Casal Pere Quart (1900)
3. Creu de Barberà (1695)	3. Creu de Barberà (1694)
4. Rambla (1643)	4. Massagué (1486)
5. Eixample (1550)	5. Rambla (1468)

a la mobilitat sostenible a la ciutat. Les dades d'ús reflecteixen la seva importància.

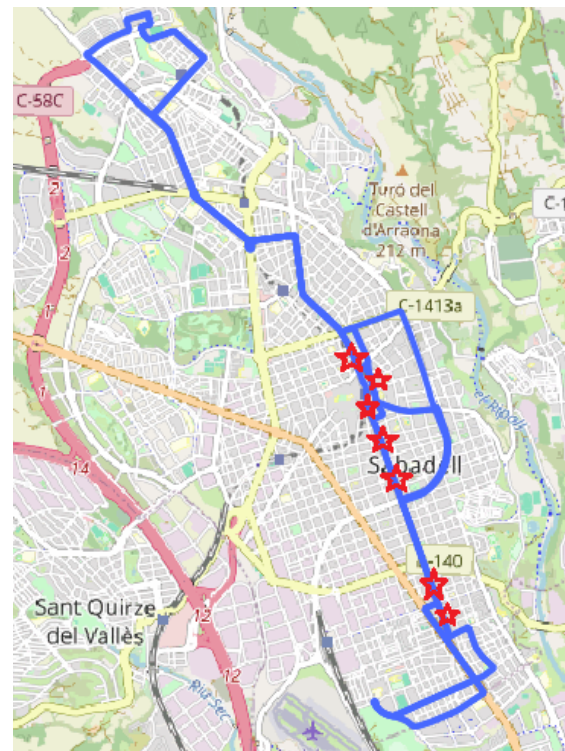


Fig. 6: Mapa de la Línia L2. Les estrelles indiquen les parades més populars

El trajecte de reforç exprés de la L2 és similar al de la L1. Comparteix part del trajecte i algunes parades com 18 Dr. Robert, 19 Casal Pere Quart, 20 Rambla i 178 Sant Joan, però aquest comença a 16 Massagué i acaba a 25 La Creu de Barberà. Les Figures 7 i 8 representen el trajecte exprés creat a partir de les parades de la taula 3. El recorregut de baixada[fig.7] inclou les següents parades: 16 Massagué (1), 18 Dr. Robert (2), 19 Casal Pere Quart (3), 20 Rambla (4), 21 Eixample (5), 24 Barcelona (6), 25 La Creu de Barberà (7). Aquest recorregut exprés tarda un total de **12 minuts** teòrics en cobrir les 7 parades.

La Figura 8 representa el trajecte exprés creat a partir de les parades de la taula 3 en direcció Sud a Nord. El recorregut de pujada inclou les següents parades: 82 La Creu de Barberà (1), 83 Barcelona (2), 41 Eixample (3), 42 Rambla (4), 43 Casal Pere Quart (5), 178 Sant Joan (6), 46 Massagué(7). Se substitueix la parada de Dr. Robert per Sant Joan per tal d'adaptar el recorregut a les necessitats específiques d'aquest sentit de la ruta.

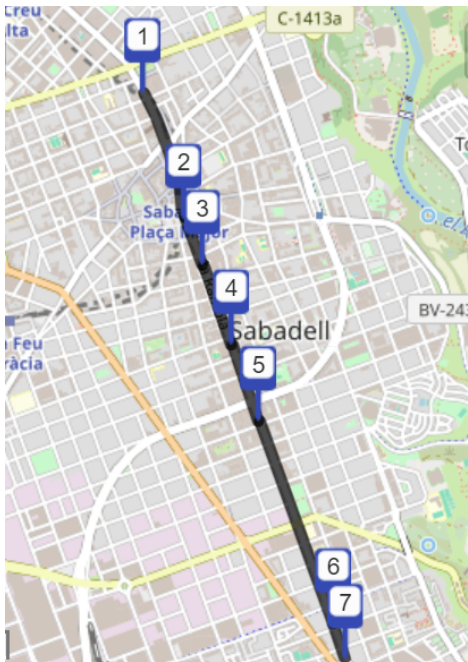


Fig. 7: Reforç E2 trajecte exprés L2 de Nord a Sud

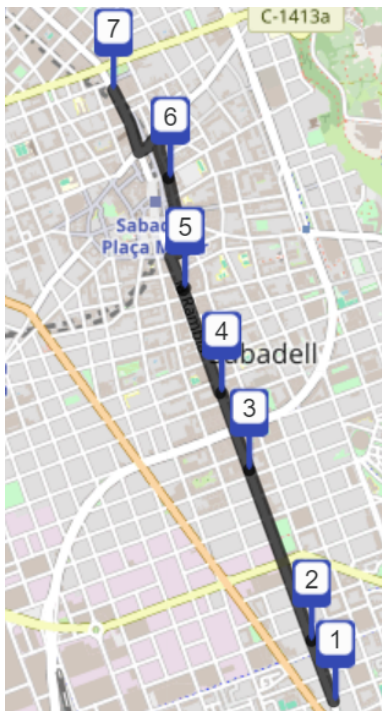


Fig. 8: Reforç E2 trajecte exprés L2 de Sud a Nord

Aquest recorregut exprés tarda un total de **13 minuts** teòrics en cobrir les 7 parades.

3.3 LÍNIA 3

La línia L3 també és una opció popular per als desplaçaments diaris, amb una mitjana d'ús de 6617 usuaris diaris i amb un total de 33095 d'usuaris de dilluns a divendres. Les parades més utilitzades són Barcelona (2092 pujades) i Sant Joan (1806 baixades). També destaquen La Creu de Barberà (1983 pujades), Casal Pere Quart (1778 baixades), Francesc Layret (1695 pujades) i Ca n'Oriac (1603 baixades).

TAULA 4: PARADES SETMANA L3

Parades més utilitzades de dilluns a divendres L3	
PUGEN	BAIXEN
1. Barcelona (2092)	1. Sant Joan(1806)
2. La Creu de Barberà(1983)	2. Casal Pere Quart(1778)
3. Francesc Layret(1695)	3. Ca n'Oriac(1603)
4. Rambla (1674)	4. Rambla (1524)
5. Mestre Planas(1467)	5. Francesc Layret (1489)

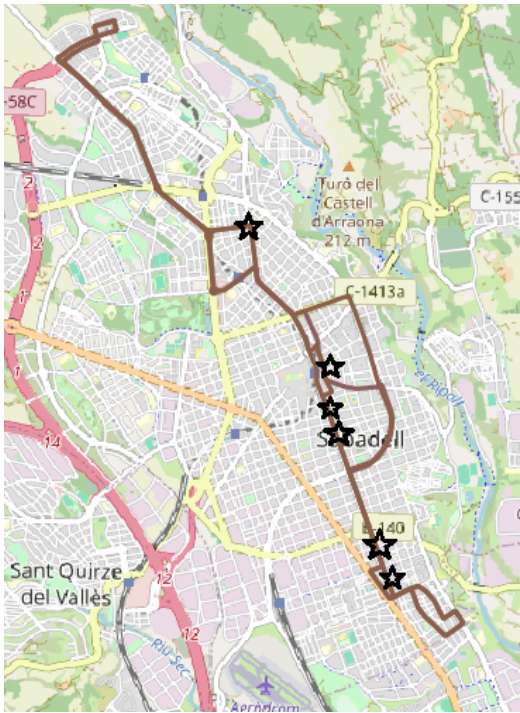


Fig. 9: Mapa de la Línia L3. Les estrelles indiquen les parades més populars.

Les Figures 10 i 11 representen el trajecte exprés creat a partir de les parades de la taula 4. El recorregut de baixada[fig.10] inclou les següents parades: 9 Ca n'Oriac (1), 69 Francesc Layret (2), 19 Casal Pere Quart (3), 20 Rambla (4), 22 Mestre Planas (5), 24 Barcelona (6), 25 La Creu de Barberà (7). Aquest recorregut exprés tarda un total de **25 minuts** teòrics en cobrir les 7 parades.

La Figura 11 representa el trajecte exprés creat a partir de les parades de la taula 4 en direcció Sud a Nord, en aquest trajecte hi ha una parada més que en l'altra direcció, 178 Sant Joan, ja que és una de les més utilitzades per tal d'adaptar el recorregut a les necessitats específiques d'aquest sentit de la ruta. El recorregut de pujada inclou les següents parades: 82 La Creu de Barberà (1), 83 Barcelona (2), 40 Mestre Planas (3), 42 Rambla (4), 43 Casal Pere Quart (5), 178 Sant Joan (6), 84 Francesc Layret(7), 53 Ca n'Oriac. Aquest recorregut exprés tarda un total de **24 minuts** teòrics en cobrir les 8 parades.

3.4 LÍNIA 8

La línia L8 és la menys utilitzada de les quatre línies de Sabadell, amb una mitjana de 2.069 usuaris diaris i un total



Fig. 10: Reforç E3 trajecte exprés L3 de Nord a Sud

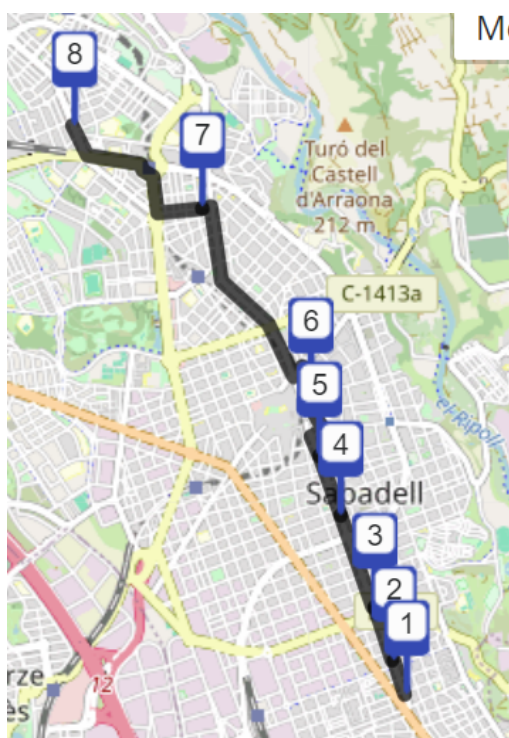


Fig. 11: Reforç E3 trajecte exprés L3 de Sud a Nord

TAULA 5: PARADES SETMANA L8

Parades més utilitzades de dilluns a divendres L8	
PUGEN	BAIXEN
1. Francesc Macià (1071)	1. Sant Fèlix (979)
2. Espanya (1048)	2. Espanya (960)
3. Sant Fèlix (810)	3. La Roureda (793)
4. Estació Sud (677)	4. Francesc Macià (703)
5. La Roureda (597)	5. Comte Jofre (690)

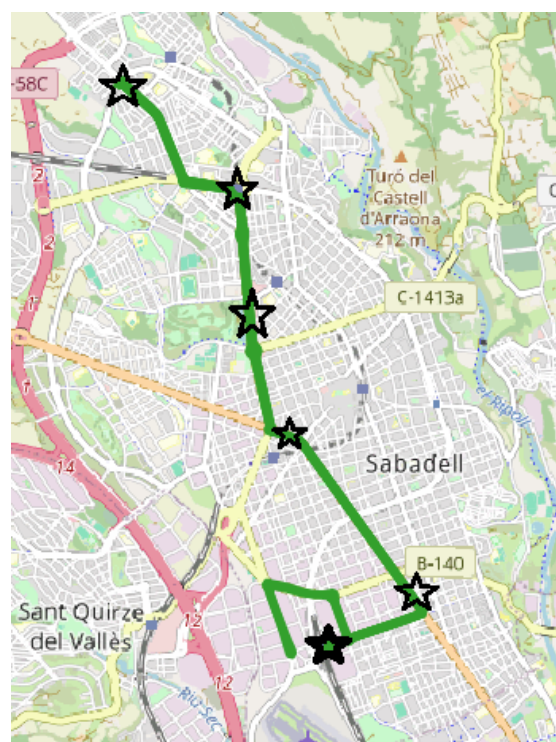


Fig. 12: Mapa de la Línia L8. Les estrelles indiquen les parades més populars.

da[fig.13] inclou les següents parades: 300 La Roureda (1), 11 Espanya (2), 13 Francesc Macià (3), 303 Comte Jofre (4), 308 Sant Fèlix (5), 30 Estació Sud (6). Aquest recorregut exprés tarda un total de **22 minuts** teòrics en cobrir les 6 parades. El recorregut de pujada[fig.14] inclou les següents parades: 30 Estació Sud (1), 39 Sant Fèlix (2), 332 Comte Jofre (3), 49 Francesc Macià (4), 51 Espanya (5), 300 La Roureda (6). Aquest recorregut exprés tarda un total de **22 minuts** teòrics en cobrir les 6 parades. Aquesta ruta exprés es planteja per a que pugui ser utilitzada com a línia comuna.

de 10.352 persones de dilluns a divendres. Aquest ús menor es deu al fet que l'L8 no passa directament pel centre de la ciutat, sinó que segueix una ruta paral·lela que cobreix les zones sud-oest, oest i només al nord s'uneix amb la resta de línies del centre. Aquesta ruta és la més curta de les quatre, tant en parades com en temps. És important per connectar les àrees perifèriques amb punts estratègics de la ciutat, facilitant la mobilitat dels residents en aquestes zones i descongestionant altres línies més transitades.

Les Figures 13 i 14 representen el trajecte exprés creat a partir de les parades de la taula 5. El recorregut de baixa-

L'anàlisi de les dades d'ocupació dels usuaris revela que les parades amb major afluència de pujades i baixades es concentren principalment a les línies L1 i L2, amb alguna presència significativa a l'L3. Francesc Macià (L1) destaca clarament com una de les parades més utilitzades tant per pujades com per baixades, la qual cosa reflecteix la seva importància com a nucli de transport. Dr. Robert (L2) i Barcelona (L3) també són parades clau per a les pujades, mentre que Sant Joan (L2 i L3) representa un punt crític per a les baixades. L'L8 presenta importants parades estratègiques que es tindran en compte posteriorment. Aquestes parades

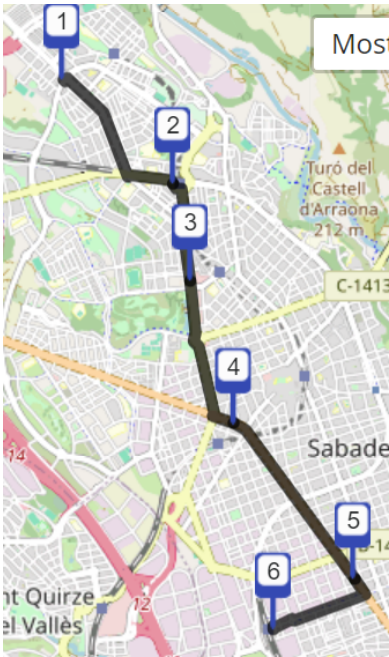


Fig. 13: Reforç E8 trajecte exprés L8 de Nord a Sud

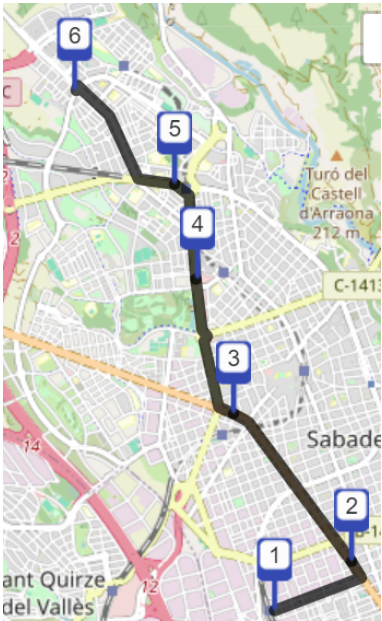


Fig. 14: Reforç E8 trajecte exprés L8 de Sud a Nord

TAULA 6: PARADES AMB MAJOR AFLUÈNCIA

Parades amb major aflluència L1,L2,L3,L8	
PUJADES	BAIXADES
1. Francesc Macià (L1)	1. Sant Joan (L2)
2. Dr. Robert (L2)	2. Francesc Macià (L1)
3. Barcelona (L3)	3. Espanya (L1)
4. Espanya (L1)	4. Casal Pere Quart (L2)
5. La Creu de Barberà (L3)	5. Sant Joan (L3)
6. Rambla (L1,L2,L3)	6. Massagué (L1,L2)
7. La Roureda (L8)	7. Sant Felix (L8)
8. Sant Felix (L8)	8. Comte Jofre (L8)

es converteixen en nodes estratègics per a l’optimització del servei, ja que concentren un alt volum d’usuaris.

3.5 Trajectes exprés comuns

A continuació s’observa la creació d’un altre trajecte exprés comú entre les 4 línies [fig.15 i fig.16]. Agafem la informació de les parades amb major aflluència de pujades en les que destaca 13 Francesc Macià (L1), la més concorreguda amb 2.598 pujades setmanals. La seva ubicació estratègica i l’alta demanda la converteixen en un node crític per la xarxa. 18 Dr. Robert (L2), amb 2.019 pujades setmanals, és una altra parada clau. La seva popularitat entre els usuaris reflecteix la seva importància en el sistema de transport. 24 Barcelona (L3) presenta 2.092 pujades setmanals, destacant-se com un dels nodes més utilitzats i un punt central per als desplaçaments diaris. 11 Espanya (L1), amb 2.281 pujades i 82 La Creu de Barberà (L3), amb 1.983 pujades setmanals. De les parades amb major aflluència de baixades destaca 178 Sant Joan (L2), amb un total de 2.043 baixades setmanals. La segueix 49 Francesc Macià (L1), amb 2.320, que no només és un punt de pujada important, sinó també un punt de descens crític. A continuació 51 Espanya (L1) presenta 2.265, 43 Casal Pere Quart (L2), amb 1.900, i 178 Sant Joan (L3), amb 1.806 baixades setmanals.

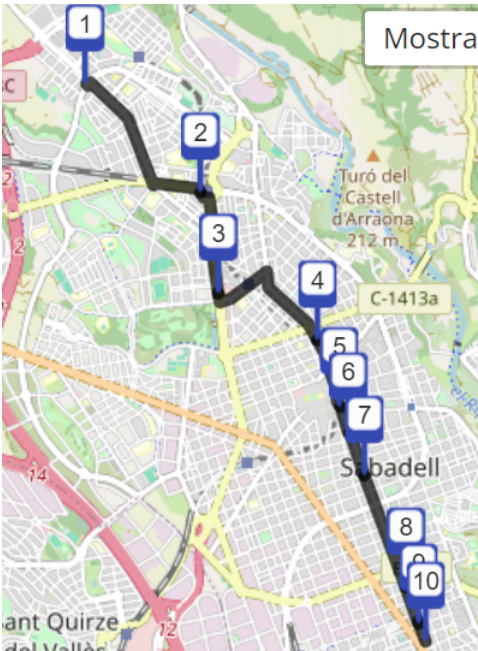


Fig. 15: Ruta exprés conjunta entre les 4 línies de Nord a Sud

Les Figures 15 i 16 representen el trajecte exprés comú creat a partir de les parades de la taula 6. El recorregut de baixada[fig.15] inclou les següents parades: 300 La Roureda (1), 11 Espanya (2), 13 Francesc Macià (3), 16 Massagué (4), 18 D. Robert (5), 19 Casal Pere Quart (6), 20 Rambla (7), 23 Sant Fèlix (8), 24 Barcelona (9), 25 La Creu de Barberà (10). Aquest recorregut exprés tarda un total de **27 minuts** teòrics en cobrir les 10 parades. La Figura 16 representa el trajecte comú en direcció Sud a Nord. El recorregut de pujada inclou les següents parades: 82 La Creu de Barberà (1), 83 Barcelona (2), 40 Mestre Planas(3), 42 Rambla (4), 43 Casal Pere Quart (5), 178 Sant Joan (6),46

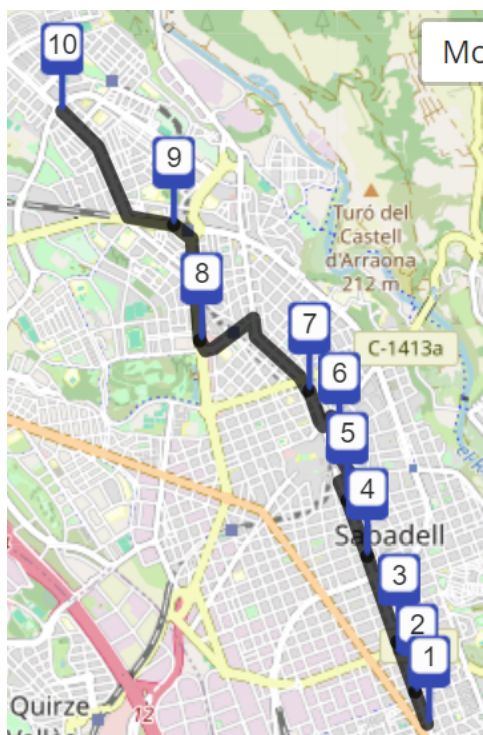


Fig. 16: Ruta express conjunta entre les 4 línies de Sud a Nord

Massagué(7), 49 Francesc Macià (8), 51 Espanya (9), 56 La Roureda (10) . Aquest recorregut express tarda un total de **30 minuts** teòrics en cobrir les 10 parades.

Finalment, es mostra l'últim trajecte express creat[fig.17 i fig.18] basat en l'anterior [fig.15 i fig.16], simplificant les parades. Les parades que el formen en ordre són : Espanya (primera i última parada), Francesc Macià, Dr.Robert o Sant Joan (depenent de la direcció), Casal Pere Quart , Rambla , Barcelona i La Creu de Barberà (primera i última). Aquest trajecte té un temps total de 20 minuts d'anada i 20 minuts de tornada.



Fig. 17: Ruta express optimitzada, entre les 4 línies. Nord a Sud



Fig. 18: Ruta express optimitzada, entre les 4 línies. Sud a Nord

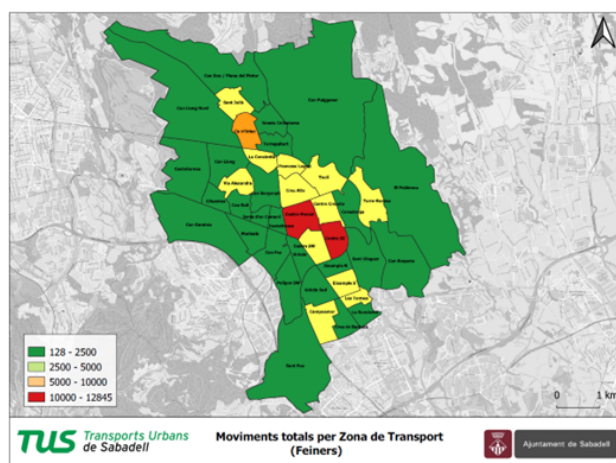


Fig. 19: Moviments totals per zona de transport

El mapa [fig.19] demostra que les línies express responen a les zones de màxima demanda.

3.6 Millora de la gestió i comoditat

A la creació de rutes express, que pretenen millorar el servei, se sumen les millores en la gestió i experiència d'usuari que ha posat en marxa l'empresa TUS. Aquests aspectes poden contribuir a potenciar la sostenibilitat del sistema i l'augment d'usuaris, aspectes clau per millorar la mobilitat a la ciutat de Sabadell. Per millorar la gestió i la comoditat dels usuaris ja s'han posat en marxa moltes millores i els beneficis ja estan sent experimentats. La freqüència de pas dels autobusos, per exemple, ja ha estat incrementada en moltes línies, reduint el temps d'espera i millorant la fiabilitat del servei. Això ha contribuït a una experiència de viatge més fluida, especialment durant les hores més concorregudes del dia. Les infraestructures millorades a les parades, com les marquesines amb seients còmodes i pantalles digitals d'informació en temps real, ja estan proporcionant una

experiència més còmoda i adequada, assegurant que els autobusos compleixin amb l'horari previst i segueixin les rutes de manera més eficient. A més, la integració de sistemes de pagament electrònic ja està simplificant l'embarcament dels passatgers i, en conseqüència, s'està eliminant la necessitat de manipular diners en efectiu i agilitzant els temps d'espera a les parades. La seguretat també s'ha millorat amb la instal·lació de càmeres, fet que ha ajudat a crear un entorn més segur i tranquil.

4 ALGORITME GA I LA SEVA APLICACIÓ EN MATLAB

En l'enfocament analític s'aplica l'algoritme GA, amb dades no reals i òbvies per demostrar que el supòsit presentat funciona. L'algoritme GA (Genetic Algorithm) és una tècnica d'optimització genètica. En el context de MATLAB, l'algoritme GA forma part de la Global Optimization Toolbox i s'utilitza per resoldre problemes d'optimització complexos que poden ser no lineals, multivariables i amb múltiples restriccions.

L'objectiu de l'enfocament analític és maximitzar la diferència entre el temps estalviat pels passatgers que utilitzen la ruta exprés i el temps addicional sofert pels passatgers que han d'esperar el següent autobús perquè la ruta exprés no s'atura a la seva parada. Per aconseguir-ho, s'utilitzen tècniques d'optimització no lineal mitjançant Matlab, utilitzant algoritmes genètics per trobar la configuració òptima de parades. L'algoritme GA és una funció que està programada per a minimitzar, en lloc de maximitzar, llavors la funció objectiu va negativa posteriorment al codi, però només a l'efecte de programació. Aquesta optimització es calcula a través de dos termes: el temps estalviat pels passatgers exprés i el temps en excés pels passatgers afectats.

4.1 Problema d'optimització

El punt de partida és la matriu P , que representa els fluxos de passatgers entre cada parell de nodes d'una ruta (per exemple, de nord a sud, fent que la matriu sigui triangular, com en l'exemple). L'element p_{ij} indica el nombre de passatgers que pugen a la parada i i baixen a la parada j .

```
% Programa per realitzar l'optimització no-lineal del sistema.

P = [0 2 45 3 0 0 0 6 3 2 45 1 47;
0 0 1 1 0 0 0 12 4 1 39 1 23;
0 0 0 0 0 0 0 1 4 2 3 2 1;
0 0 0 0 1 0 0 1 6 1 1 5 1;
0 0 0 0 0 1 2 3 1 1 1 1 8;
0 0 0 0 0 0 0 0 5 1 1 3;
0 0 0 0 0 0 0 1 2 1 6 2;
0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 2 1;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 2;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 1;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
% Matriu de flux de viatgers origen destí
```

Fig. 20: Matriu P

Definim el vector columna X com un vector de components binàries que indica si una parada forma part de la ruta exprés ($x_i = 1$) o no ($x_i = 0$). Si $P \in R^{n \times n}$, aleshores $X \in R^n$, és a dir, té la mateixa dimensió que la matriu P . Aquest vector és una columna amb components binàries.

L'objectiu del problema d'optimització és maximitzar la diferència entre el temps estalviat pels passatgers que utilitzen la ruta exprés i el temps addicional que han de suportar els passatgers que han d'esperar el pròxim autobús perquè la ruta exprés no s'atura a la seva parada (d'origen o de destí). La idea és que si moltes persones viatgen d'un origen a un destí, i poques ho fan entremig, el temps estalviat per totes aquestes persones exprés compensa el temps addicional patit per unes poques. Per tant, en el problema d'optimització, s'ha de considerar el temps estalviat i el temps afegit per a cada ruta de prova, segons els passatgers, i optimitzar aquest valor. A continuació, es calcula cada terme.

El temps estalviat per cada viatger: La matriu XX^T ens proporciona una matriu quadrada en què, per a cada candidat a ruta exprés X , es determinen quines parades estan incloses en aquesta ruta i quines no, per a cada parell d'estacions d'origen i destí. Si calculem la matriu $P \circ (XX^T)$, obtenim la que mostra els passatgers entre cada parell d'estacions connectades per la ruta exprés X . L'operació $A \circ B$ significa que les matrius A i B es multipliquen component a component, no amb el producte de matrius convencional. Així obtenim els passatgers entre cada parell d'estacions connectades per la ruta exprés proposada X . Ara necessitem calcular el temps estalviat per cada passatger.

Per calcular el temps estalviat per cada passatger, necessitem un vector que indiqui el temps estalviat en no aturar-se a cada estació. Així, el vector $T_{estalvi}$ indica el temps estalviat. Per calcular-lo per cada passatger, hem de saber per quantes estacions passa cadascun en què l'autobús no s'atura, i sumar el temps estalviat a cada una d'elles. Segons l'origen i destí de cada usuari, el temps estalviat és diferent. A partir del vector $T_{estalvi}$, es pot calcular el temps estalviat per cada candidat a ruta exprés X amb l'algoritme següent:

```
[n,m] = size(P);
RE = X*X';
for i = 1:n,
    for j = 1:n,
        if RE(i,j) == 1,
            TiempoArro(i,j) = sum(Tah1(i,1:j));
        else
            TiempoArro(i,j) = 0;
        end
    end
end
```

Fig. 21: Algoritme

L'algoritme essencialment calcula, per a cada usuari, quantes parades deixa de passar en el seu trajecte exprés i el temps que s'estalvia. Per a cada parell d'estacions d'origen i destí, la matriu $TiempoAhorro$ conté aquesta informació.

Ja podem formular finalment el temps estalviat en una línia exprés entre cada parell d'estacions com $P \circ (XX^T) \circ TiempoAhorro$, i l'estalvi agregat total serà la suma de totes les seves components: $\sum_{i,j} (P \circ (XX^T) \circ TiempoAhorro)$.

Ara hem de calcular el temps en excés afegit a aquelles persones que han d'esperar el següent torn d'autobús perquè la ruta exprés no s'atura a la seva parada. Per a això, necessitem definir el temps d'espera al següent bus, T_{espera_bus} , que és el temps que trigarà en arribar el següent torn de bus.

Els passatgers que han d'esperar el següent bus són aquells que no poden agafar l'autobús, perquè o bé l'autobús no fa parada on es troben o bé no para al seu destí. Aquests passatgers es poden calcular com $P \circ (1 - XX^T)$, on 1 indica la matriu que té uns en totes les entrades (no confondre-la amb la matriu identitat). Per tant, el temps afegit en cada trajecte és $P \circ (1 - XX^T) \circ T_{espera_bus}$, i el valor agregat és $\sum_{i,j} (P \circ (1 - XX^T) \circ T_{espera_bus})$, per sumar totes les components.

El problema és aleshores maximitzar la funció:

$$F = \sum_{i,j} (P \circ (XX^T) \circ T_{tiempoArro}) - \sum_{i,j} (P \circ (1 - XX^T) T_{esperabus})$$

Fig. 22: Funció a maximitzar

La solució és basa en les dades que hem aportat a la matriu, on el resultat conclou el trajecte més curt seleccionant les parades amb més usuaris demostrant amb un 1 les incloses i amb un 0 eliminant-les. En aquest cas, observant la figura 20, el resultat és: 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1. Confirmant així que les 2 primeres parades, l'antepenúltima i l'última són les més utilitzades, creant així una optimització del trajecte amb dades fictícies i una reducció del temps de viatge.

S'ha utilitzat un programari dissenyat específicament per realitzar càlcul científic, com Matlab, perquè la variable de decisió, X , apareix com XX^T , és un terme no lineal. També es podria fer servir l'Excel ja que disposa de no lineals que es podrien utilitzar (al Solver), però la dificultat amb Excel seria incloure l'algoritme de càlcul del temps estalviat.

5 CONCLUSIONS

En aquest treball es demostra que la implementació de Línies Exprés [6] pot millorar significativament l'eficiència del sistema de transport públic a Sabadell. La metodologia desenvolupada, basada en l'anàlisi de dades reals, la modelització matemàtica i l'ús d'algoritmes genètics, permet dissenyar diverses rutes òptimes que redueixen el temps de viatge per als usuaris. Aquest enfocament no només augmenta la satisfacció dels passatgers, sinó que també proporciona una solució sostenible als desafiaments de mobilitat urbana.

El treball desenvolupa dos enfocaments principals: heurístic i analític. Amb el primer, es proposen rutes exprés basades en l'anàlisi de dades de les línies de transport més utilitzades a Sabadell. Es realitza un estudi exhaustiu de les línies L1, L2, L3 i L8 durant cinc dies laborables per identificar les parades i zones amb major afluència de viatgers. Aquest enfocament permet detectar punts crítics amb alta densitat de passatgers i moments del dia amb congestions significatives. Mitjançant la selecció i creació de trajectes de reforç, es generen rutes exprés que minimitzen el nombre de parades, centrant-se en aquelles amb major demanda de passatgers i assegurant una connexió eficaç entre els punts de major afluència i les àrees de destinació principals.

L'enfocament heurístic demostra un estalvi de temps significatiu en les línies estudiades. Per exemple, en la línia L1, un passatger que viatja de cap a cap pot estalviar fins a 20 minuts, mentre que en la línia L2, l'estalvi és de 25 minuts, i en la línia L3, és de 15 minuts. Aquests resultats

són prometedors i mostren el potencial de les rutes exprés per millorar l'eficiència del transport públic a Sabadell.

L'enfocament analític, per altra banda, requereix l'ús d'eines d'optimització no lineal, com l'algoritme genètic (GA) implementat en MATLAB. Aquest enfocament permet desenvolupar una matriu de flux de passatgers i definir un vector de parades, formulant així una funció objectiu per maximitzar el temps estalviat pels passatgers que utilitzen la línia exprés. Tot i que aquest mètode és més complex i requereix eines avançades, demostra ser eficaç en la identificació de les parades amb major demanda i les rutes potencials per a la implementació dels trajectes exprés.

Al llarg de tot el procés d'anàlisi, disseny de línies exprés, la creació del problema i execució de l'algoritme s'han complert els objectius inicials d'aquest treball de fi de grau.

Els resultats obtinguts se sumen a totes aquelles estratègies tecnològiques que contribueixen a la sostenibilitat urbana aplicada a la mobilitat i que tenen com a objectiu prioritar la millora de les condicions de vida dels ciutadans.

AGRAÏMENTS

Aquesta recerca no hagués estat el mateix sense el suport, l'ajuda i l'acompanyament del meu tutor Asier Ibeas, que ha estat sempre disposat a revisar i aclarir tots els dubtes que han anat sorgint al llarg del procés. Ha estat una peça clau per donar forma al que pretenia investigar i crear.

En segon lloc, he de fer arribar el meu més sincer agraïment als companys de l'empresa TUS, que m'han proporcionat totes les dades necessàries per fer que el meu treball tingui un component real. Sense aquestes dades, el treball no s'hagués pogut desenvolupar.

En tercer lloc, vull agrair a totes les persones que han estat al meu costat per donar-me empena i l'energia suficient per tirar-lo endavant: amigues, companyes de pis i la meva família.

REFERÈNCIES

- [1] V. Aucejo. Problemas de rutas. *Dpt. Estadística i Investigació Operativa Universitat de Valencia*, 1983.
- [2] Observatorio del transporte y la logística en España. El transporte urbano y metropolitano en España de acuerdo con las estadísticas del ine. 2022.
- [3] Suisman Urban Design. Gráficos y arquitectura del sistema metro rápido. *Suisman Urban Design*, 2023.
- [4] J.A. Galindres Guancha, D.A.; Soto Mejía. Modelo de asignación de demanda de pasajeros en un sistema de buses de tránsito rápido considerando la congestión del sistema y la percepción de comodidad del pasajero. *Revista EIA*, Julio-Diciembre, 2020.
- [5] Muñoz J.C. Giesen R. Delgado F. Hernández, D. Analysis of real-time control strategies in a corridor with multiple bus services. *Transportation Research Part B: Methodological*, 78:83–105, 2015.
- [6] Muñoz J.C. Giesen R. Larrain H. Leiva, C. Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. *Transp. Res. Part B*, 2010.

- [7] Peña, M.T. 2022. Tutor: Ortiz.J.D.C. Desarrollo de una metodología para el diseño de líneas de transporte público. *Dpto. de Organización Industrial y gestión de empresas I*, 2022.
- [8] S. Coop. C. TUS. Calidad y medio ambiente. *TUS, S. Coop. C.*, 2015.
- [9] S. Coop. C. TUS. Información de las líneas. *TUS, S. Coop. C.*, 2023.
- [10] Yang H. Wang Y. Yan X. Zhou, Y. Integrated line configuration and frequency determination with passenger path assignment in urban rail transit networks. *MOT Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport.*, 2019.
- [11] Q. Zhu. Un modelo óptimo para la selección de paradas para rutas de autobús en zonas concurridas. *Destacados en Ciencia, Ingeniería y Tecnología. Universidad Xi'an Jiaotong Liverpool, Departamento de Matemáticas Aplicadas, Suzhou, Jiangsu, China.*, Volumen38(2023), 2022.

TAULES

- Taula 1: Línies centrals (més populars)
- Taula 2: Parades Setmana L1
- Taula 3: Parades Setmana L2
- Taula 4: Parades Setmana L3
- Taula 5: Parades Setmana L8
- Taula 6: Parades amb major afluència

IMATGES

- Fig. 1: Xarxes del transport urbà de Sabadell els dies feiners
- Fig. 2: Dades d'usuaris de la setmana en les línies els dies feiners
- Fig. 3: Mapa de la Línia L1. Les estrelles indiquen les parades més populars
- Fig. 4: Reforç E1 trajecte expres L1 de Nord a Sud
- Fig. 5: Reforç E1 trajecte expres L1 de Sud a Nord
- Fig. 6: Mapa de la Línia L2. Les estrelles indiquen les parades més populars
- Fig. 7: Reforç E2 trajecte expres L2 de Nord a Sud
- Fig. 8: Reforç E2 trajecte expres L2 de Sud a Nord
- Fig. 9: Mapa de la Línia L3. Les estrelles indiquen les parades més populars.
- Fig. 10: Reforç E3 trajecte expres L3 de Nord a Sud
- Fig. 11: Reforç E3 trajecte expres L3 de Sud a Nord
- Fig. 12: Mapa de la Línia L8. Les estrelles indiquen les parades més populars

- Fig. 13: Reforç E8 trajecte expres L8 de Nord a Sud
- Fig. 14: Reforç E8 trajecte expres L8 de Sud a Nord
- Fig. 15: : Ruta expres conjunta entre les 4 línies de Nord a Sud
- Fig. 16: Ruta expres conjunta entre les 4 línies de Sud a Nord
- Fig. 17: Ruta expres optimitzada entre les 4 línies de Nord a Sud
- Fig. 18: Ruta expres optimitzada entre les 4 línies de Sud a Nord
- Fig. 19: Moviments totals per zona de transport
- Fig. 20: Matriu P
- Fig. 21: Algoritme
- Fig. 22: Funció a maximitzar

APÈNDIX

En aquesta secció final es recullen els aspectes tècnics i metodològics addicionals que s'han utilitzat per desenvolupar el Treball de Final de Grau (TFG) sobre la creació de trajectes express en la xarxa de transport públic de Sabadell. Inclou els detalls de les dades utilitzades, les tècniques d'anàlisi, els algorismes implementats, i les eines emprades per a la resolució del problema d'optimització.

A.1 Secció d'Apèndix: Recopilació i Anàlisi de Dades

Les dades utilitzades en aquest TFG s'han obtingut a partir dels registres de passatgers de les línies d'autobús de Sabadell, proporcionades per l'empresa de transports urbans i la seva base de dades, SAE. Es van recollir dades setmanals de pujada i baixada de passatgers per a cadascuna de les parades més utilitzades de les línies L1, L2, L3 i L8. Les dades dels diagrames també han sigut recopilats dintre del SAE, als historials d'ocupació s'han pogut saber els passatgers i el temps, tant com a les matrius d'origen/destí. Es mostra una captura d'imatge de la base de dades utilitzada, arxius de matriu i mostra de taules i gràfics generats amb Excel:

Hora de inicio	Posición	Nombre Parada	Código Parada	Subidos	Bajados	Total	Hora teórica	Hora real	Column
2024-04-08 22:55:00	11	Pl. Concordia	12	1	1	8	2024-04-08 23:06:50	2024-04-08 23:09:52	
2024-04-08 22:55:00	12	Francesc Macià	13	0	0	8	2024-04-08 23:08:37	2024-04-08 23:10:38	
2024-04-08 22:55:00	13	La Creu Alta	14	0	0	8	2024-04-08 23:10:58	2024-04-08 23:13:14	
2024-04-08 22:55:00	14	Orze de Setembre	15	0	0	8	2024-04-08 23:12:09	2024-04-08 23:13:51	
2024-04-08 22:55:00	15	Massagüé	16	1	0	9	2024-04-08 23:13:34	2024-04-08 23:15:06	
2024-04-08 22:55:00	16	Manresa	17	0	0	9	2024-04-08 23:14:57	2024-04-08 23:17:15	
2024-04-08 22:55:00	17	Dr. Robert	18	0	0	9	2024-04-08 23:16:50	2024-04-08 23:18:46	
2024-04-08 22:55:00	18	Casal Pere Quart	19	0	0	17	2024-04-08 23:16:40	2024-04-08 23:19:51	
2024-04-08 22:55:00	19	Rambla	20	0	0	17	2024-04-08 23:18:05	2024-04-08 23:21:52	
2024-04-08 22:55:00	20	Exemple	21	0	4	13	2024-04-08 23:19:26	2024-04-08 23:24:16	
2024-04-08 22:55:00	21	Mestre Planas	22	0	1	12	2024-04-08 23:20:45	2024-04-08 23:25:00	
2024-04-08 22:55:00	22	Sant Felix	23	0	1	11	2024-04-08 23:21:50	2024-04-08 23:25:40	
2024-04-08 22:55:00	23	Barcelona	24	0	1	10	2024-04-08 23:23:02	2024-04-08 23:26:44	
2024-04-08 22:55:00	24	La Creu de Barberà	25	0	2	8	2024-04-08 23:23:41	2024-04-08 23:27:31	
2024-04-08 22:55:00	25	Pizarro	26	0	3	5	2024-04-08 23:24:27	2024-04-08 23:28:07	
2024-04-08 22:55:00	26	Espronceda	27	0	1	4	2024-04-08 23:25:45	2024-04-08 23:29:36	
2024-04-08 22:55:00	27	Pisanes	28	0	3	1	2024-04-08 23:26:49	2024-04-08 23:30:54	
2024-04-08 22:55:00	28	Goya	29	0	3	0	2024-04-08 23:27:52	2024-04-08 23:31:51	
2024-04-08 12:52:00	5	Sant Felix	39	0	0	0	2024-04-08 12:59:23	2024-04-08 13:03:47	
2024-04-08 12:52:00	6	Mestre Planas	40	2	1	1	2024-04-08 13:01:38	2024-04-08 13:05:42	
2024-04-08 12:52:00	7	Exemple	41	0	0	1	2024-04-08 13:03:07	2024-04-08 13:06:56	
2024-04-08 12:52:00	8	Rambla	42	5	2	4	2024-04-08 13:04:35	2024-04-08 13:08:45	
2024-04-08 12:52:00	9	Casal Pere Quart	43	1	1	4	2024-04-08 13:06:30	2024-04-08 13:10:36	
2024-04-08 12:52:00	10	Renúncia	401	2	1	5	2024-04-08 13:07:26	2024-04-08 13:10:51	

Fig. 23: Arxius d'ocupació

OrigenDestino	657	77	78	79	80	81	82	83	40	41	42	43	401	178	46	47	48	631	84	85	86	654	53	54	55	67	684	88	89	90	1		
657	-	0	2	5	20	17	21	14	7	7	15	16	13	12	6	2	2	2	3	1	3	3	4	5	0	0	1	1	0	0	0	0	
77	-	-	0	1	5	4	15	13	5	8	7	10	6	13	4	1	1	2	3	1	2	2	2	3	2	0	0	1	0	3	0	0	
78	-	-	-	0	9	4	23	7	11	6	13	18	9	29	3	4	3	0	3	3	2	2	1	2	2	1	0	0	0	1	2	0	
79	-	-	-	-	6	6	23	34	14	12	25	20	24	28	15	6	4	3	1	3	1	1	3	3	0	0	0	0	1	3	0	0	
80	-	-	-	-	-	1	26	19	22	11	16	35	19	44	12	4	2	0	4	1	4	3	2	5	2	1	0	1	0	0	0	0	
81	-	-	-	-	-	-	33	41	17	18	27	42	29	33	9	3	2	2	7	0	4	3	2	1	2	1	0	1	2	1	2	0	
82	-	-	-	-	-	-	-	12	31	31	41	60	30	31	12	14	6	2	8	4	4	3	4	2	1	0	1	0	1	2	0	0	
83	-	-	-	-	-	-	-	-	16	133	112	80	32	21	14	8	2	10	9	11	4	5	8	7	3	1	1	1	0	4	0	0	
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	63	70	71	67	18	11	7	7	7	6	9	4	5	9	4	1	3	0	1	0	2	0	
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	124	105	81	10	11	9	4	9	6	5	5	7	4	3	0	2	0	1	2	0	0	
42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	150	90	72	25	14	7	14	11	15	7	5	4	6	5	1	0	1	0	2	3	0	
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35	45	27	14	13	13	15	12	12	13	7	12	6	2	1	0	2	0	3	0	
401	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59	30	33	18	21	17	24	23	8	22	12	5	4	4	0	1	0	5	0	
178	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93	65	72	46	64	43	39	24	43	26	26	6	6	4	5	3	7	0	
46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	52	34	41	28	20	17	19	13	10	6	0	2	0	4	6	0	
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	7	12	10	10	3	7	4	3	1	0	0	2	0
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	7	5	6	5	2	3	1	0	2	3	0	
631	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	2	2	6	1	3	0	3	0	1	0	0	
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	12	12	17	7	13	4	3	1	4	1	5	
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	12	8	14	6	3	1	1	0	2	3	
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	32	29	24	10	6	3	2	6	7	0	
654	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	9	7	3	1	5	0	4	3	0	
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	18	9	19	9	4	6	19	9	0	
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	4	14	9	6	2	16	6	2	
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	8	20	13	10	30	30	30	
87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	4	3	0	2	2	0	
684	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0	3	25	25	0	
88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2	26	26	0	
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n	o	

Fig. 24: Arxius de matriu origen/destí

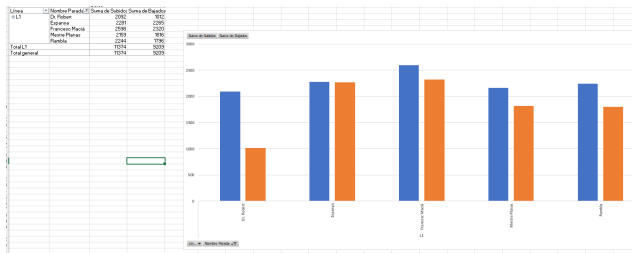


Fig. 25: Mostra de taula i gràfic generat amb Excel

A.2 Secció d'Apèndix: Problema d'optimització

- **OptimitzadorRutas.m** : Programa per realitzar l'optimització no-lineal del sistema.

```
P=[0 2 45 3 0 0 0 6 3 2 45 1 47;
0 0 1 1 0 0 0 12 4 1 39 1 23;
0 0 0 0 0 0 0 1 4 2 3 2 1;
0 0 0 0 1 0 0 1 6 1 1 5 1;
0 0 0 0 0 1 2 3 1 1 1 1 8;
0 0 0 0 0 0 0 0 5 1 1 3;
0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 1 6 2;
0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 2 2 1;
0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 2 2;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 1 2;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; Matriu de flux de viatgers
origen destí
```

```
[parf,parc] = size(P);
nvars = parf; Número de variables
A = [];
b = [];
Aeq = [];
beq = [];
lb = zeros(1,parf); límit inferior per la solució
ub = ones(1,parf); límit superior per la solució (binari)
IntCon = 1:nvars; Totes las variables son binaries
options = optimoptions('ga', 'ConstraintTolerance', 1e-
6, 'MaxGenerations', 1000, 'PopulationSize', 1000);
[x, fval] = ga(@FuncionObjetivo, nvars, A, b, Aeq, beq,
lb, ub, @restricciones, IntCon, options);
disp('Solución:');
disp(x)
```

- **FuncionObjetivo.m**

```
function sal = FuncionObjetivo(X)
```

```
P=[0 2 45 3 0 0 0 6 3 2 45 1 47;
```

```
0 0 1 1 0 0 0 12 4 1 39 1 23;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 1 4 2 3 2 1;
```

```
0 0 0 0 1 0 0 1 6 1 1 5 1;
```

```
0 0 0 0 0 1 2 3 1 1 1 1 8;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 5 1 1 3;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 1 6 2;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 2 2 1;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 2 2;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 1 2;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
```

```
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
```

el vector columna a optimizar es X

Si una component es 1, la parada está a la ruta exprés, si no no

```
X = [1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0];
```

P.*(X*X) Matriu conté els passatgers entre cada parell d'estacions que configuren la ruta exprés

Temps estalviat por cada pasatger

ones(length(X),length(X))-X*X' matriu amb les estacions que s'estalvien a cada trajecte

```
Tahorrop = [2 3 2 3 4 5 6 1 3 5 4 1 3];
```

aquest vector conté el temps estalviat si s'evita cada parada en min.

```
Tah1 = (ones(length(X),length(X))-X*X').*Tahorrop;
```

Aquesta matriu representa el temps que s'estalvia en cada parada que no està en el recorregut exprés

Per a calcular el temps d'estalvi entre cada parell de parades quan algunes no estan en la ruta express

Algoritme FIG 21

TiempoArro

La matriu del tiempos estalviat total es:

```
P.*(X*X').*TiempoArro
```

```
Positivo = sum(sum(P.*(X*X').*TiempoArro));
```

és la suma del temps total estalviat pels passatgers que agafen les rutes exprés

Ara calculem el temps d'altres esperant per tots aquells passatgers que han d'esperar al següent bus perquè no per a en la seva parada

P.*(ones(length(X),length(X))-X*X') Matriu conté els passatgers entre cada parell d'estacions que no configuren la ruta exprés

Tesperabus = 2; minuts d'espera al siguiente

com calculem els passatgers afectats

```
Negativo = sum(sum(P-P.*(X*X'))*Tesperabus;
```

Total de passatgers afectats pel temps d'espera al següent bus

```
sal = -Positivo+Negativo;
```