

Optimització dels temps d'espera a les cues del Peatge dels Túnel·ls de Vallvidrera

Grup 12 - Lab 21

Gerard Castell, Marc Castells i Izan Cordobila

ÍNDIX

1. Definició del Sistema	2
2. Enfoc del sistema	4
3. Hipòtesis	5
3.1. Hipòtesis de Dades	5
3.2. Estructurals	5
3.3. Simplificadores	6
4. Model conceptual	7
5. Estudi de les dades	8
5.1. Recol·lecció dades	8
5.2. Dades i conversió de dades	8
5.3. Procés d'ajust de dades	9
6. Modelització	11
6.1. Descripció del Model	11
6.2. Estadístics	13
7. Verificació	14
8. Disseny d'Experiments	16
8.1. Descripció i optimització	16
8.2. Càlcul nombre de rèpliques per escenari	18
9. Anàlisi de Resultats	20
10. Annex	21

1. Definició del Sistema

El sistema objectiu del nostre estudi es troba a l'entrada de Barcelona. És el peatge dels Túnels de Vallvidrera i està situat a l'autopista de Montserrat. Aquesta carretera proporciona accés a milers de cotxes cada dia a la ciutat .



Imatge 1: Situació del peatge dels Túnels de Vallvidrera.

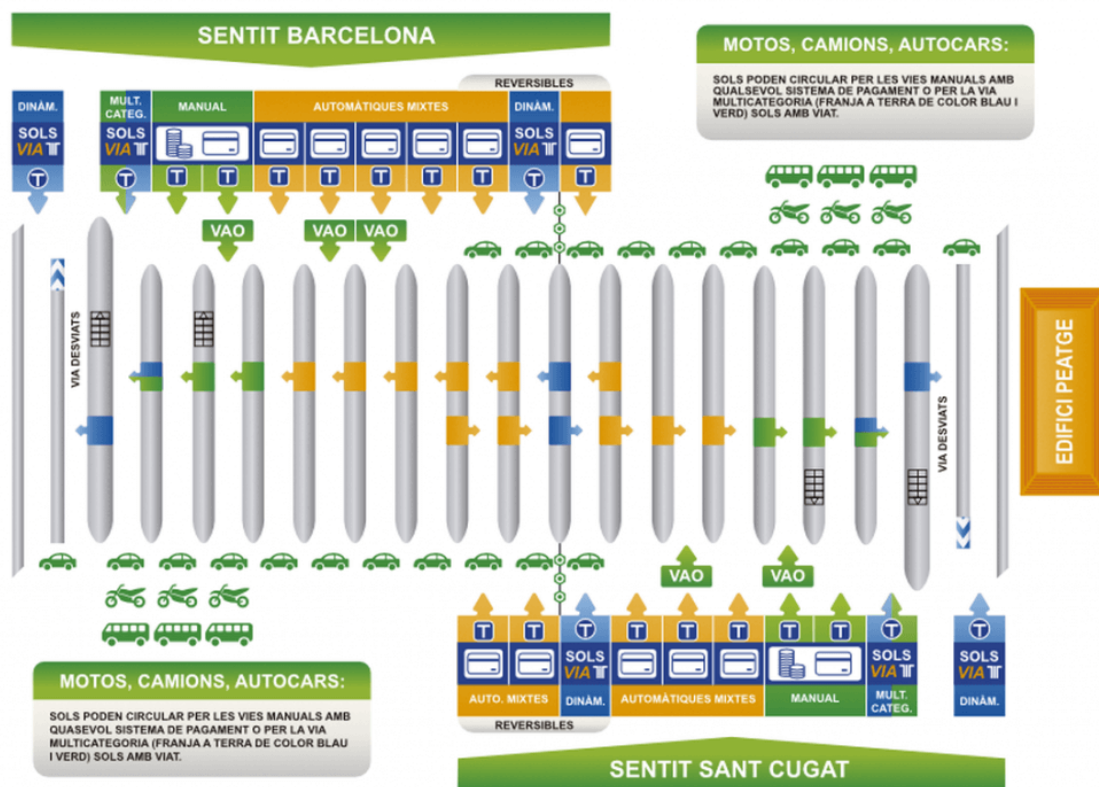
L'autopista de Montserrat disposa de dos sentits: direcció Barcelona i direcció Sant Cugat. Durant els dies laborals hi ha un gran volum de circulació de vehicles, sobretot a les hores punta, on acostumen a haver-hi grans retencions.



Imatge 2: Imatge proporcionada per tunels.cat amb informació respecte a l'afluència de trànsit.

Per tant, podem afirmar que aquesta carretera és una habitual font de retencions a causa de la gran quantitat de persones que ingressen a Barcelona en dies laborals per treballar (sent Barcelona una de les ciutats d'Espanya amb més treballadors en actiu). També, podem afirmar que els usuaris que utilitzen els túnels acostumen a ser treballadors dels afores de Barcelona que ingressen a la ciutat amb els seus vehicles privats.

Finalment, cal que observem la configuració actual dels carrils i les formes de pagament disponibles. Com podem veure a la següent imatge, el peatge (direcció Barcelona) consta de 9 carrils de pagament més 3 carrils reversibles que es poden fer servir en qualsevol dels dos sentits. Cada carril, des de l'entrada fins a la sortida, mesura 190 m de carretera. En el nostre estudi hem utilitzat la configuració que el nostre contacte dels túnels de Vallvidrera ens va comentar que era més habitual: 7 peatges de targeta, 2 de manual i 2 de Via T.



Imatge 3: Esquema de la distribució de cabines de pagament del peatge.

L'objectiu d'aquest estudi és determinar quina és la configuració òptima de carrils i cabines de pagament per poder minimitzar el temps d'espera de les cues que es formen habitualment al peatge, en sentit Barcelona.

2. Enfoc del sistema

Volem estudiar el temps d'espera del peatge en sentit Barcelona. Un cop han pagat i passat la barrera considerem que aquells vehicles estan fora de l'enfocament. Poden arribar al peatge qualsevol dels vehicles permesos en aquella via. A més, considerarem que cada tipus del vehicle pot utilitzar la targeta, el teletac o el carril manual.



Imatge 4: Àrea d'estudi del peatge.

3. Hipòtesis

Per a la realització d'aquest estudi s'han hagut de considerar un seguit d'hipòtesis que estableixen els processos i dades que usarem. També, incloem hipòtesis simplificadores, les quals no afectaran el resultat final obtingut, per poder fer un model més simple sense tants factors externs involucrats.

3.1. Hipòtesis de Dades

En aquest apartat tenim totes les hipòtesis que tindrem en consideració en el procés de modelització sobre les dades del nostre model.

- Els vehicles aniran a una velocitat màxima de 40 km/h.
- El temps de pagament dels vehicles que utilitzin Via T és quasi instantani.
- El temps de pagament dels vehicles que utilitzin el carril de pagament amb targeta pot ser d'entre 15 i 20 segons.
- El temps de pagament dels vehicles que utilitzin el carril de pagament manual pot ser d'entre 25 i 35 segons.
- Avaluarem el tràfic de tot un dia.
- Obtindrem el volum del tràfic a partir de les dades aportades per l'empresa que gestiona el túnel de Vallvidrera.

3.2. Estructurals

En aquesta categoria es recullen totes les consideracions que es tindran en compte en el procés de modelització u/o experimentació. Estan associades a la relació existent entre els diferents conceptes del nostre model conceptual i a la mateixa definició de concepte.

- Es disposen de 2 carrils manuals, 2 carrils de via T i 7 carrils amb targeta.
- El tram que s'estudiarà té 95 m.
- Les hores punta són de 7:30 h a 10:30 h i de 17:00 h a 21:00 h i les hores vall són de 21:00 h - 7:30 h i de 10:30 h - 17:00 h. [Font](#) de les dades obtingudes.

3.3. Simplificadores

En aquesta categoria es recullen totes les consideracions que es tindran en compte en el procés de modelització i que ens permeten simplificar el model i no perdre el rigor que requereix el nostre estudi.

- La velocitat dels vehicles un cop arribin al tram estudiat serà sempre constant a 40 km/h. Per tant, no es consideren acceleracions ni desacceleracions.
- Es considera que tots els vehicles seran del mateix tipus.
- Es considera que per al mateix tipus de mètode de pagament se seguirà una distribució uniforme entre dos valors temporals.
- Es considera que les entitats no puguin canviar de carril.
- Es considera que tots els carrils del peatge mesuren el mateix.
- Es considera que amb un únic pagament, només pot creuar el peatge un únic vehicle.
- No es considera el moviment de persones.
- No es consideren avaries de màquines.
- No es consideren avaries de cotxes.
- No es consideren accidents de tràfic.
- No es considera el comportament de les diferents entitats un cop travessat la barrera del peatge.

4. Model conceptual

En el següent diagrama es descriu el comportament dels vehicles que volen accedir al tram de peatge, on es pot veure com l'accés a aquest requereix estar el primer de la cua que tingui accedeixi al peatge amb pagament corresponent. Un cop s'accedeix a aquest no es podrà avançar fins que s'hagi dut a terme el pagament. Un cop pagat, el semàfor es posa en verd, s'aixeca la barrera i el vehicle creua el peatge i abandona el sistema.

Per la millor comprensió del model conceptual i del model de FlexSim (el qual es veurà posteriorment), hem establert aquesta distribució de colors: teletac, manual, targeta.



Imatge 5: Model conceptual de l'estudi.

5. Estudi de les dades

Per a realitzar aquesta simulació s'han utilitzat les dades adjuntes a l'annex. En aquest apartat s'explica el procés que s'ha dut a terme des de la recopilació al resultat final, on les dades han estat adaptades.

5.1. Recol·lecció dades

Per la recol·lecció de dades vam començar fent una recerca a les dades obertes de Catalunya així com a dades públiques a Google. Com vam veure que no hi havia gairebé dades interessants per nosaltres, vam decidir posar-nos amb contacte amb tunels.cat, l'empresa encarregada de gestionar els túnels de Vallvidrera i el Cadí.

Per posar-nos en contacte amb aquesta empresa vam trucar al telèfon de contacte. A la trucada vam aconseguir que ens posessin en contacte amb la Núria, l'encarregada d'administrar les dades dels túnels. Després de comentar-li el que necessitàvem, ella ens va proporcionar les diferents dades necessàries. Adjuntes a l'annex.

5.2. Dades i conversió de dades

Les dades que vam rebre per fer l'estudi eren en format .png. Així que vam haver de passar-les totes a un document de càlcul, manualment, ja que no vam trobar cap eina que fes la conversió correctament.

A les dades s'inclouen el volum de vehicles anual, mensual i diari, pels anys 2021 i 2022. També s'inclouen dades dels tipus de pagament, tipus de vehicles i descomptes aplicats durant els últims anys.

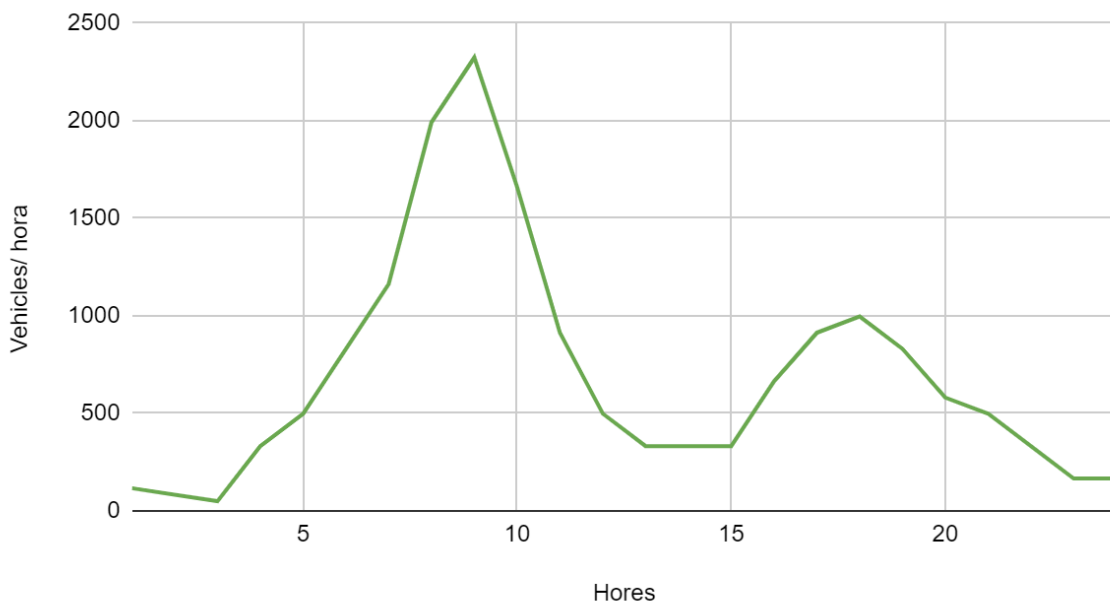
5.3. Procés d'ajust de dades

Per últim, vam realitzar un ajust de dades. Es va dur a terme perquè volíem fer la simulació durant un dia normal en només un dels sentits de la circulació del peatge. Per tant, tenint en compte el que ens va dir l'empresa dels túnels i la informació sobre hores vall i hores punt vam fer aquest ajust.

Primerament, vam agafar les dades d'usuaris d'un dia i la vam dividir entre dos, ja que vam considerar que en un sol sentit només passen la meitat de vehicles. Això s'ha considerat així, perquè aquest túnel es sol utilitzar com a entrada a Barcelona pel matí i sortida a la nit.

A més, vam distribuir el flux de cotxes de manera repartida per hores, tenint en compte el comentat en primer paràgraf. Aquesta distribució es pot veure al gràfic 1 i a la taula 1.

Distribució Vehicles / Hora



Gràfic 1: Distribució per percentatge_usuaris/hores d'un dia de 2022 en sentit Barcelona.

Hores	% Vehicles	Vehicles/ hora
1	0,70%	116
2	0,50%	83
3	0,30%	50
4	2,00%	332
5	3,00%	498
6	5,00%	830
7	7,00%	1162
8	12,00%	1992
9	14,00%	2325
10	10,00%	1660
11	5,50%	913
12	3,00%	498
13	2,00%	332
14	2,00%	332
15	2,00%	332
16	4,00%	664
17	5,50%	913
18	6,00%	996
19	5,00%	830
20	3,50%	581
21	3,00%	498
22	2,00%	332
23	1,00%	166
24	1,00%	166

Taula 1: Distribució per hores del flux de vehicles.

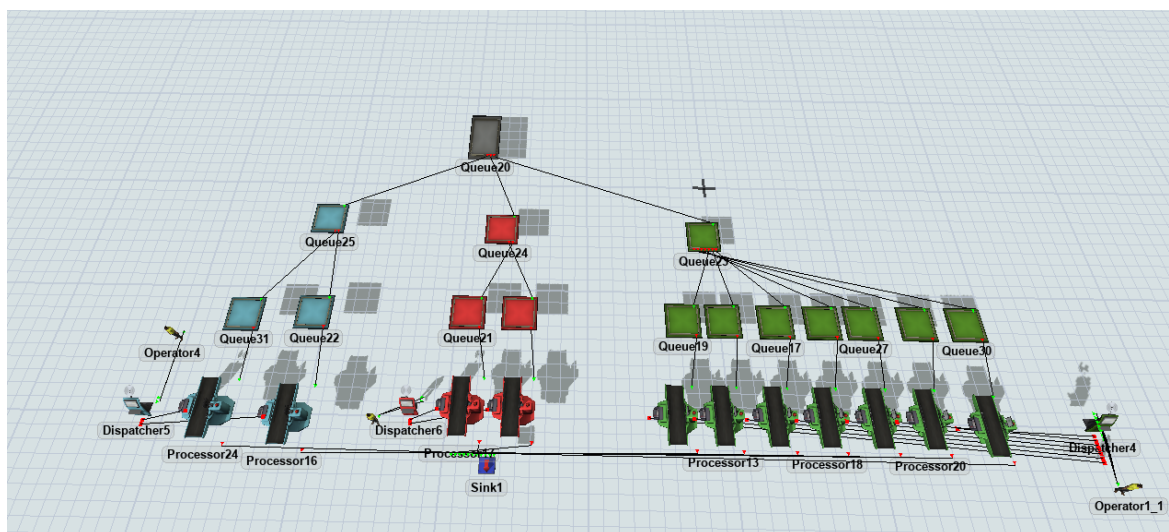
6. Modelització

A partir de l'anàlisi entre el model conceptual i les hipòtesis es conclou la següent relació entre conceptes i elements de simulació:

Concepte	Model de flexism
Arribades dels vehicles al sistema	Source (un general, desenvolupat amb el process flow)
Cues	Queue (una per carril del peatge)
Cabines	Processor
Sortida de vehicles	Sink (una general)

Taula 2: Distribució per hores del flux de vehicles.

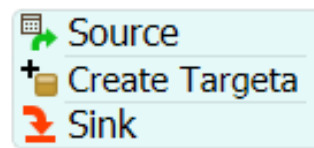
6.1. Descripció del Model



Imatge 6: Model de Flexism.

El model que hem desenvolupat té una estructura una mica peculiar. En primer lloc, tenim una cua principal on amb l'ajuda del process flow se'ns generen tots els vehicles a l'hora definida i el tipus de pagaments segons les dades proporcionades pels peatges (Taula 1).

Després, els col·loca a la cua i per tal de no ocupar tanta memòria borra les instàncies creades en el process flow.



Imatge 7: Process flow.

Un cop apareixen en aquesta cua es divideixen en 3 cues més, cada una corresponent a un tipus de pagament (Per poder fer la distinció d'aquest cada cua i cabina tenen un color assignat, teletac de color blau, manual de vermell i targeta de verd. Aquestes cues serveixen com a separador per després poder repartir els vehicles entre els carrils corresponents de forma més fàcil. Un cop el vehicle passa el "filtratge" escull la cua més curta que trobi. S'espera fins que li arriba el seu torn per passar per la cabina (Processor) i quan acaba se'n va del sistema.

Per poder ajudar a simular més fàcilment si tenim un carril obert o tancat hem utilitzat dispatchers amb diferents workers cadascun. Aquest dispatcher tenen uns paràmetres associats amb els quals podem indicar quants workers tenen a la seva disposició i, per tant, quants peatges oberts de cada tipus tenim.

Parameters			
Parameters	3		
Name	Value	Display Units	Description
Targeta	7	Display Units	Description
Manual	2		
Teletac	2		

Imatge 8: Paràmetres amb el seu valor màxim.

6.2. Estadístics

Per poder analitzar les diferents dades hem utilitzat un dashboard on hem introduït dos estadístics:

- Stay Time màxim per cua (es mostren les cues de targeta, ja que les de Via T i manual no presenten cues).
- Descriptiva completa dels diferents temps d'estada a les cues del model.

Per consultar els estadístics estudiats consultar el següent recurs d'informació, el qual disposa d'una extensa quantitat de informació i grafs útil pel estudi: [Estadístic.html](#)

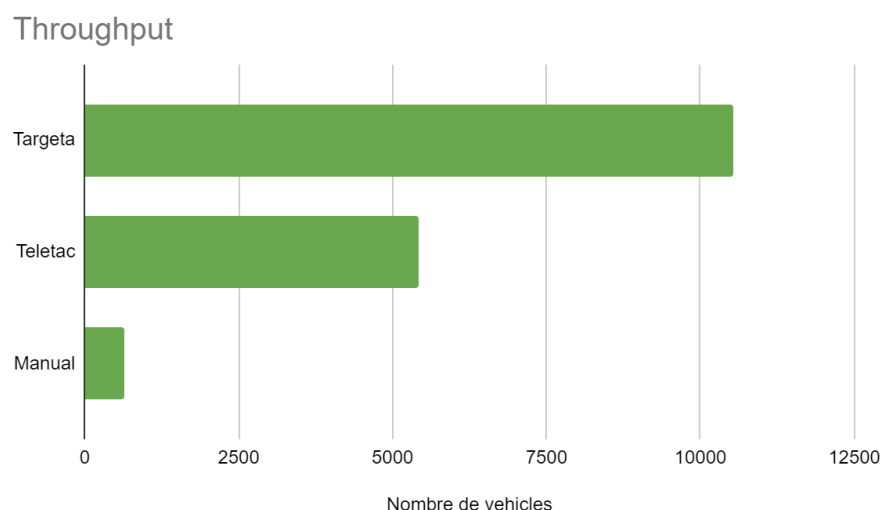
7. Verificació

Per a la verificació del model s'han realitzat diferents casuístiques per a observar els estadístics:

- Assumint arribades constants i temps constants hem pogut observar que es mantenia la proporció de la cua de cada carril en funció del temps assignat a cada peatge.
- També, hem observat pas a pas que els esdeveniments s'encadenen de forma correcta.
- A més, canviant el temps d'execució dels processadors hem observat com les cues creixen i decreixen proporcionalment al temps quan augmentem i decrementem aquest.

També, hem pogut verificar el model gràcies a la observació de diferents estadístics:

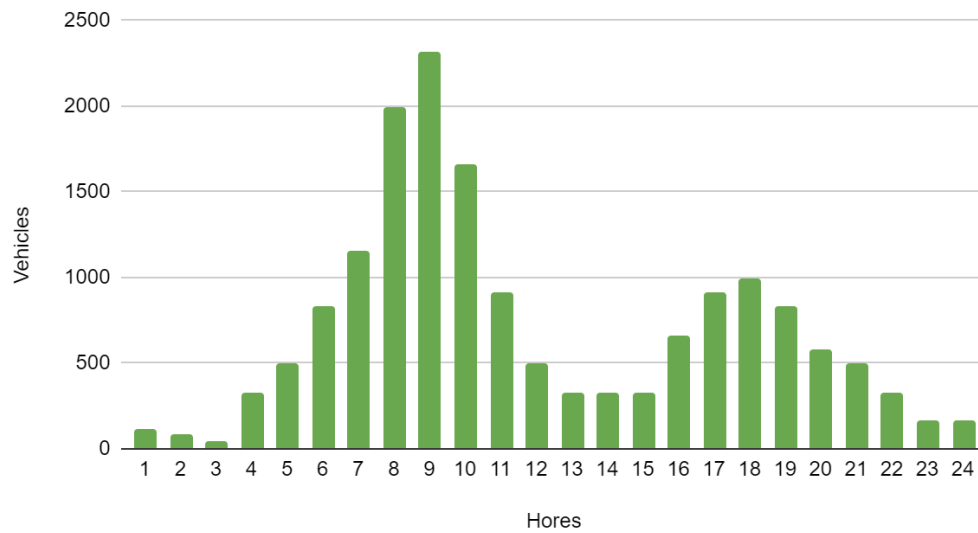
- **Estadístic de Throughput:** ens ha sigut útil per veure si la quantitat de vehicles que han passat per les diferents cues ha sigut el correcte o no. També, hem pogut observar si els percentatges de vehicles que paguen amb teletac, targeta o manual és el correcte.



Gràfic 4: Estadístic de Throughput.

- **Estadístic de Throughput per Hour:** hem observat que el comportament d'arribada de vehicles durant les diferents hores del dia és l'esperat perquè segueix la distribució de la taula 1 i el gràfic 1.

Throughput per Hour



Gràfic 5: Estadístic de Throughput per hour.

8. Disseny d'Experiments

8.1. Descripció i optimització

L'objectiu del nostre estudi és esbrinar quina és la combinació de peatges necessària per què els usuaris d'aquest no hagin mai de fer cues superiors a 10 minuts. És a dir, volem saber quin és el nombre mínim de peatges que han d'haver per tal de poder tenir sempre un servei amb menys de 10 minuts de cua.

Com podem afirmar que el model ha estat verificat i es pot considerar vàlid amb la hipòtesi de validació definida, podem utilitzar l'Optimizer per assolir el nostre objectiu.

Els paràmetres que hem considerat són el nombre de peatges de tipus targeta [1,7], els dels peatges de teletac i manual, ambdós amb [1,2].

La nostra variable resposta, la qual és l'estadístic que es vol observar per comparar diferents escenaris, serà els temps de cua màxima per cada una de les diferents estacions dels peatges.

En el nostre cas, en fer les proves amb l'Optimizer, els resultats que ens va proporcionar no eren vàlids pel nostre estudi, ja que eren resultats que suposaven cues d'hores.

Per tant, en ser un cas amb un nombre d'escenaris no molt elevat vam decidir fer l'optimització pel nostre compte. Amb l'Experimenter, vam crear els 28 escenaris possibles amb les combinacions de paràmetres, com es veu a les imatges 9 i 10. Vam realitzar l'experiment en el període de temps de 24 hores.

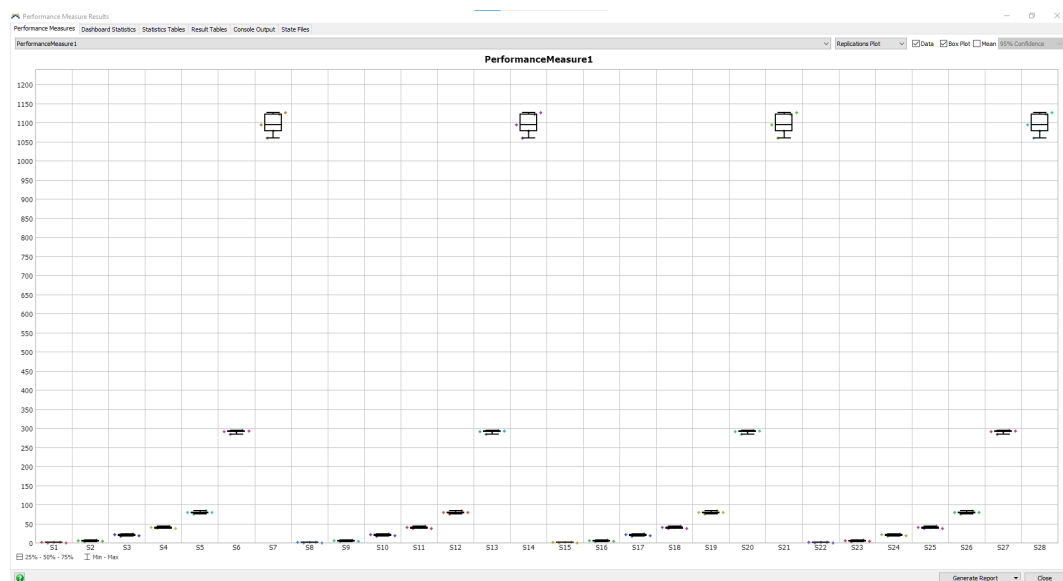
Amb les dades obtingudes a l'Experimenter, les quals es poden veure a la imatge 10, vam agafar els casos on les cues eren més properes als 10 minuts per poder tornar a dur a terme l'experiment de manera optimitzada i poder així analitzar els resultats de manera més precisa (aquests resultats es poden veure a l'anàlisi de resultats).

La següent taula mostra el procés que s'ha seguit alhora de fer la nostra pròpia optimització.

The screenshot shows the 'Experimenter' application window. On the left, there's a sidebar with 'Jobs' (Experiment1, Optimization1, Experiment2) and 'Parameters'. The main area displays configuration for 'Experiment1': Warmup Time (0.00), Stop Time (3600.00), and Replications per Scenario (5). A table of 28 scenarios is shown with columns for 'Targeta', 'Manual', and 'Teletac'.

Scenaris	Targeta	Manual	Teletac
Scenari 1	7	1	1
Scenari 2	6	1	1
Scenari 3	5	1	1
Scenari 4	4	1	1
Scenari 5	3	1	1
Scenari 6	2	1	1
Scenari 7	1	1	1
Scenari 8	7	2	1
Scenari 9	6	2	1
Scenari 10	5	2	1
Scenari 11	4	2	1
Scenari 12	3	2	1
Scenari 13	2	2	1
Scenari 14	1	2	1
Scenari 15	7	1	2
Scenari 16	6	1	2
Scenari 17	5	1	2
Scenari 18	4	1	2
Scenari 19	3	1	2
Scenari 20	2	1	2
Scenari 21	1	1	2
Scenari 22	7	2	2
Scenari 23	6	2	2
Scenari 24	5	2	2
Scenari 25	4	2	2
Scenari 26	3	2	2
Scenari 27	2	2	2
Scenari 28	1	2	2

Imatge 9: Diferents escenaris per a la prova amb l'Experimenter.



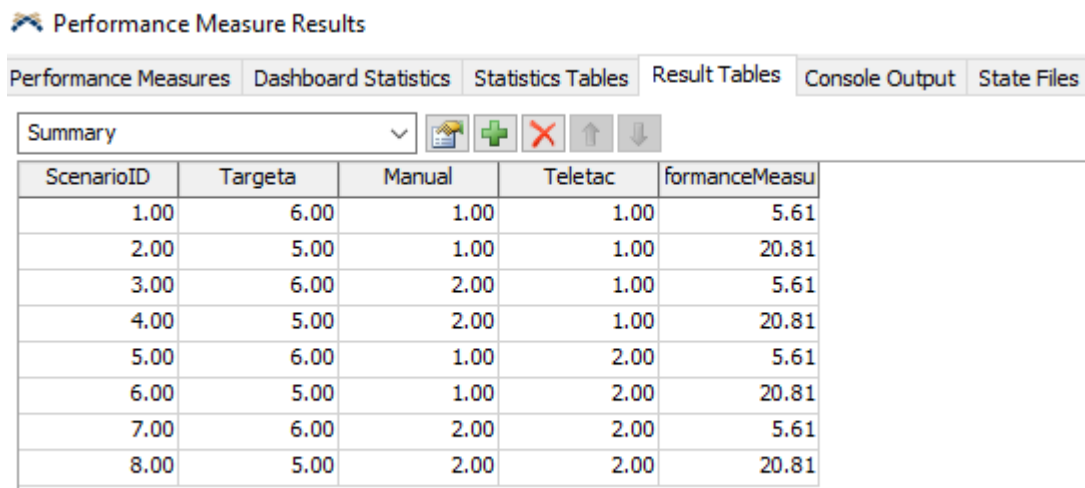
Imatge 10: Resultats obtinguts pel cas descrit.

8.2. Càlcul nombre de rèpliques per escenari

Per dur a terme l'experiment de manera correcta, a l'*Experimenter*, hem calculat quin és el nombre de rèpliques per escenari si volem mantenir un Interval de Confiança del 95%.

Per obtenir-ho, hem realitzat els següents passos:

- 1) Hem obtingut els següents resultats (la PerformanceMeasure és l'Average Stay Time)



The screenshot shows the 'Performance Measure Results' window. It has tabs for 'Performance Measures', 'Dashboard Statistics', 'Statistics Tables', 'Result Tables', 'Console Output', and 'State Files'. The 'Result Tables' tab is active, showing a 'Summary' table with the following data:

ScenarioID	Targeta	Manual	Teletac	formanceMeasu
1.00	6.00	1.00	1.00	5.61
2.00	5.00	1.00	1.00	20.81
3.00	6.00	2.00	1.00	5.61
4.00	5.00	2.00	1.00	20.81
5.00	6.00	1.00	2.00	5.61
6.00	5.00	1.00	2.00	20.81
7.00	6.00	2.00	2.00	5.61
8.00	5.00	2.00	2.00	20.81

Imatge 11: Resultats obtinguts pel cas descrit.

- 2) Seguidament, hem calculat la mitjana mostral i la desviació estàndard mostral:

a) $\bar{x} = 13.21$

b) $s = 8,325382874$

- 3) Aplicant la fórmula de l'interval de confiança, la qual es pot veure en aquesta imatge:

$$\bar{X} \pm t_{1-\alpha/2, n-1} \sqrt{\frac{S^2}{n}}$$

Imatge 12: Fórmula interval de confiança.

hem obtingut un límit inferior i superior, en aquest cas [7,25 i 19,17] corresponentment. Per tant, podem afirmar amb un 95% de seguretat que el valor mitjà es troba entre 7,25 i 19,17.

- 4) Una vegada hem obtingut l'interval de confiança, hem procedit a calcular la semi-amplada de l'interval de confiança per la prova pilot.

$$h = t_{1-\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Imatge 13: Fórmula semi-amplada interval de confiança prova pilot.

- 5) Després, hem calculat la semi-amplada de l'interval de confiança per a totes les rèpliques utilitzant la següent fórmula:

$$h^* = 0.05 * \bar{x} = 0.05 * 13.21 \Rightarrow h^* = 0.66$$

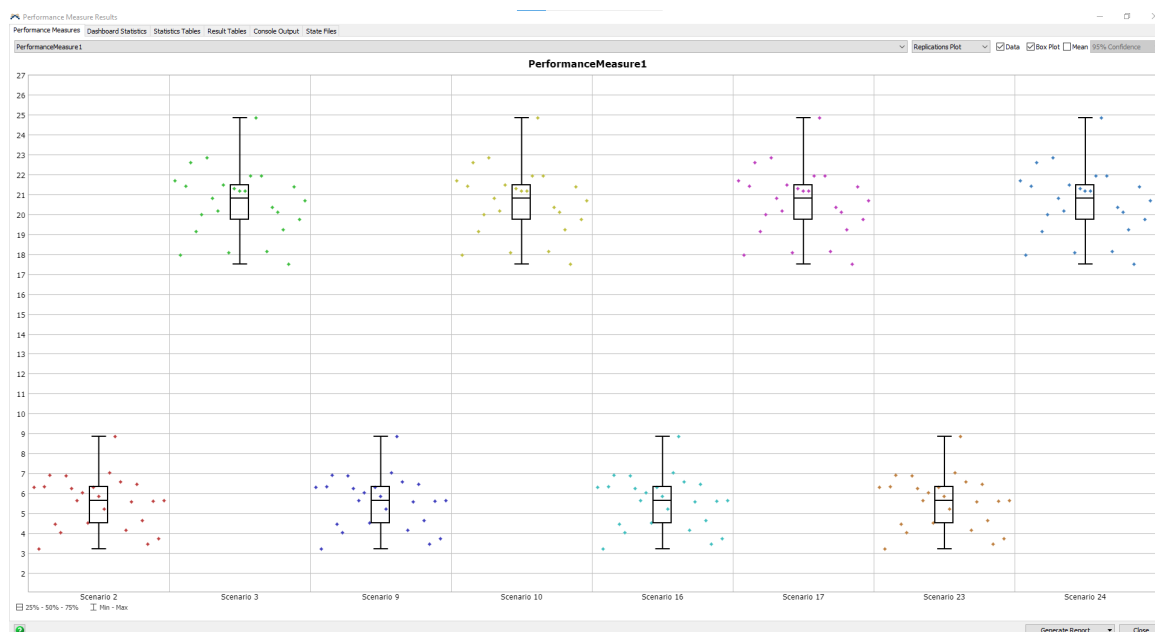
- 6) Finalment, calculem el nombre total de rèpliques necessàries n^* :

$$n^* = n (h/h^*)^2 = 10 * (5.96 / 0.66)^2 \Rightarrow n^* = 815.46$$

Fer 816 rèpliques és un procés molt costós, tenint en compte els recursos dels ordinadors utilitzats. Per aquest motiu, el nostre experiment ha estat realitzat amb 40 rèpliques per escenari, el nombre màxim que hem aconseguit en un temps raonable.

9. Anàlisi de Resultats

Un cop obtinguts els resultats, els quals es poden observar a la imatge 11, vam realitzar un experiment amb més casos, però només per aquells escenaris on el temps de cues era el més semblant a l'estudi actual.



Imatge 14: Resultats de l'Experimenter per les dades als 8 escenaris amb 25 rèpliques cadascun

Observant aquests resultats podem obtenir la configuració òptima perquè els cotxes mai hagin d'esperar més de 10 minuts i a més el nombre de peatges sigui el mínim. Aquesta configuració és la de l'escenari 2: 6 peatges de targeta, 1 manual i 1 de teletac. Té uns temps d'espera de 6.91 minuts de màxima en tot el dia.

Finalment, mirant els resultats també ens hem pogut fixar que realment el temps d'espera sempre ve condicionat pel nombre de peatges de targeta que hi ha oberts. Això té tot el sentit, ja que un 63% del volum diari efectua el pagament amb targeta.

10. Annex

A l'annex s'inclouen les dades proporcionades l'empresa dels túnels de Vallvidrera. Per veure de manera més gràfica les dades convertides es pot consultar el document de [Dades dels Túnels](#).

També es poden consultar més resultats de l'experiment a: [Resultats.html](#)