Universitat de Girona
Escola Politècnica Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Tecnologies Industrials

Títol: Modelització i simulació d'una cruïlla semafòrica a la ciutat de Girona

Document: Memòria

Alumne: Òscar Caballero Recolons

Tutor: Dr. Pepus Daunis i Estadella/ Dr. Josep A. Martín Fernández

Departament: Informàtica, Matemàtica Aplicada i Estadística

Àrea: Estadística i Investigació Operativa

Convocatòria (mes/any): Setembre/2016

Índex de continguts

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Actualment vivim en una societat on pràcticament qualsevol família disposa d’un vehicle per a poder-se desplaçar i, a més a més, s’agafa aquest vehicle per a qualsevol situació: per anar a comprar, per portar els nens a l’escola, per anar a treballar, etc. El fet que actualment s’utilitzi tantes vegades els vehicles durant el dia ens ha aportat a tenir una relació directe entre la intensitat del trànsit i l’activitat humana. Durant les hores de matinada la quantitat de vehicles que es troben circulant és molt baixa ja que la gran part de la gent es troba dormint. En canvi, entre les 7:00 - 9:30 i les 16:30 - 20:00 trobem la intensitat màxima de vehicles, que correspon al període temporal on la gent porta i recull els nens a l’escola i on la gent se’n va o torna de treballar. Per tant, podem dir que l’activitat del dia de les persones influeix significativament en el flux de trànsit que trobem a les vies de circulació.

Aquest augment de vehicles als darrers anys en les vies de trànsit ha provocat més pèrdues de temps. Actualment hi ha més restriccions, més cues en els semàfors, més temps d’espera en les interseccions, etc. Aquestes pèrdues de temps per a moltes persones poden arribar a ser situacions d’ansietat i d’estrès. La causa principal d’aquest fet és que vivim en una societat on donem molta importància al nostre temps i el fet d’estar en una situació de trànsit perdent el temps provoca situacions de molèstia i d’irritació al conductor.

Per aquest motiu, en els darrers anys s’han realitzat més estudis de cares a intentar reduir els temps perduts en les cues semafòriques i reduir les retencions que es formen en les interseccions amb la finalitat d’oferir als conductors el millor servei de trànsit possible. A mesura que ha anat passant el temps, i amb l’evolució de la tecnologia respecte fa uns anys, s’ha pogut realitzar estudis més específics i més complexos que han permès obtenir millors sistemes de modelització.

Avui en dia, pràcticament tot el trànsit de les grans ciutats està modelat i simulat per programes. La xarxa de busos, la de trens, les cruïlles semafòriques, les rotondes, etc. Tota aquesta modelització ens permet realitzar estudis molt més concrets utilitzant dades reals. Gràcies aquest fet podem arribar a obtenir una solució molt més precisa i fiable que fa uns anys. Un exemple són les arribades de cotxes, actualment amb els sensors que es troben en algunes interseccions podem saber exactament la quantitat de vehicles que arriben en una intersecció, i llavors a partir d’aquestes dades, es pot trobar un model que s’hi ajusti correctament. És molt diferent realitzar l'estudi amb dades reals durant un període llarg de temps, que no analitzar un període de temps curt i llavors extrapolar les dades per a poder tenir una base gran de dades amb les quals poder treballar.

1.2 **Objecte**

L'objectiu principal d'aquest estudi era realitzar un estudi sobre la regulació del trànsit en algunes interseccions viàries en la ciutat de Girona i avaluar si eren adequades d'acord amb la modelització realitzada; o si per contra, es podia introduir alguna millora (tant en l'àmbit semafòric com en l'àmbit de la distribució dels carrils), amb la finalitat d'aconseguir una reducció de les cues d'espera dels vehicles -en cas que fos possible-, millorant així la fluïdesa del trànsit.

Hi ha hagut un problema amb la fiabilitat de les dades que hem rebut de l'Ajuntament de Girona. Degut aquest problema, les hem hagut de filtrar vàries vegades per a poder obtenir unes dades adequades a l'hora de realitzar la simulació de la cruïlla. Per aquest motiu, al final només s'ha pogut modelar una cruïlla semafòrica de la ciutat de Girona. Aquesta cruïlla és la formada per la intersecció entre la carretera Barcelona i el carrer Emili Grahit.

Sobre aquesta cruïlla realitzarem un estudi segons la intersecció semafòrica. Ens centrarem en la intersecció semafòrica per tal d'intentar reduir el temps de cua que es forma en el sistema. Intentarem buscar un nou cicle d'utilització dels semàfors i farem les corresponents simulacions per saber si realment hem aconseguit reduir el temps d'espera dels vehicles en la intersecció o si, per contra, el que hi ha en l'actualitat és millor.

Un altre dels objectius d'aquest projecte serà la creació d'un programa per tal de poder realitzar les simulacions corresponents. El programari que utilitzarem per a la resolució d'aquestes simulacions serà el software Arena. L'Arena és un programari de simulació, que permet fer models mitjançant uns blocs i llavors ens permetrà realitzar les simulacions del model. A més a més, el programari Arena incorpora un subprograma anomenat Output Analyzer, el qual ens permetrà realitzar anàlisis estadístics de totes els variables que s'utilitzin en les simulacions. Tanmateix, al no tenir una llicència del programa Arena, utilitzarem la versió d'estudiant.

Aquest projecte, a més a més, també té una millora en l'impacte ambiental i en la salut de les persones de Girona. El fet de reduir el temps d'espera en les cues de les cruïlles, implica una reducció de contaminants que emeten els vehicles en l'atmosfera, i d'aquesta manera es minimitzarem els afectes que poden causar aquests contaminants pels vianants de Girona.

Per poder realitzar aquests objectius principals també hem hagut de tenir en consideració alguns objectius secundaris com són els següents:

A través de les dades passades per l'Ajuntament de Girona hem pogut conèixer quin és el flux de vehicles que intervé en la realitat per la cruïlla. També hem vist quina és la intensitat màxima de vehicles que circulen i en quina franja horària es troben. Això ens ha permès entendre amb més facilitat que el trànsit té una relació directe amb l'activitat humana.

Un altre objectiu secundari del projecte ha estat veure que hi ha molts models diferents a l'hora de controlar el trànsit que circula per les vies. Alguns són molt senzills com el model lineal o el model parabòlic i d'altres molt més complexos com els models del factor humà o els models macroscòpics.

També hem considerat la part econòmica resultat de dur a terme un projecte com aquest. En el cas que ens hem trobat, evidentment gran part de pressupost s'aniria al temps dedicat a la filtració de les dades, ja que és l'àmbit del projecte a on li hem dedicat més temps. Un objectiu futur seria la millora de la fiabilitat de les dades captades.

1.3 **Especificacions i Abast**

Aquest projecte abastarà una intersecció viària concreta de la ciutat de Girona, ja que ens ha quedat fora de l'abast el fet de tractar altres cruïlles de la ciutat.

A més a més, l'estudi només inclourà un flux microscòpic, és a dir, només estudiarem el flux de vehicles relacionats directament amb la nostra cruïlla. En un estudi posteriori es podria analitzar unes quantes cruïlles semafòriques de la carretera Barcelona i utilitzar un flux macroscòpic en lloc d'un microscòpic, així es podria realitzar un estudi més complex per tal d'aconseguir uns millors resultats en les simulacions.

La cruïlla que hem escollit és una de les més transitades de la ciutat de Girona, es tracta de l'encreuament entre la carretera Barcelona i el carrer Emili Grahit juntament amb el passeig d'Olot. La cruïlla consta de 9 carrils.

S'ha treballat inicialment amb les dades de tot l'any 2015, però un cop analitzades hem vist que hi havia una gran quantitat d'elles que no eren fiables, per tant les hem hagut de filtrar. La quantitat de temps que hem hagut de dedicar a la filtració d'aquestes dades ha estat elevat, i per tant només hem pogut filtrar un sol dia: els dilluns. Aquest dia com ja veurem més endavant, té la mateixa modelització semafòrica que els dimarts, els dimecres i els dijous; per tant es podria arribar a considerar que el trànsit d'aquests 4 dies és similar. La franja horària a estudiar serà el dia sencer, per tant tindrem les 24 hores de tots els dilluns de tot l'any 2015, els quals no hagin estat eliminats per tenir dades incoherents.

Existeixen programes específics per a la resolució d'interseccions viàries, tals com: Aimsun, Cobe, etc. El problema d'aquest programes és la necessitat de tenir una llicència pel seu ús. En el nostre cas, en no tenir cap tipus de llicència a l'hora de realitzar les simulacions, hem utilitzat la versió d'estudiant del programa Arena. Aquesta versió d'estudiant té alguns inconvenients i un d'ells és la falta de capacitat a l'hora d'utilitzar els blocs. Per aquesta causa, un cop modelitzada la cruïlla sencera, vam veure que ocupava massa espai i vam haver de dividir la simulació en dos programes, un per la carretera Barcelona i l'altre per Emili Grahit i passeig d'Olot.

A part de la versió d'estudiant del software Arena, per poder realitzar aquest projecte s'han utilitzat diferents programes informàtics, entre ells destacar l'Excel pel tractament de dades.

2 MODELS TEÒRICS DEL FLUX VEHICULAR

2.1 Introducció

El model del flux vehicular consisteix en realitzar una anàlisi utilitzant les lleis físiques i matemàtiques per tal de conèixer les característiques del trànsit en qualsevol via: una carretera, un carrer, una autovia, etc.

A través d'aquest model podem conèixer els diferents paràmetres que intervenen en el trànsit (volum, velocitats dels automòbils, densitat de les vies, etc.) i d'aquesta manera podem arribar a obtenir la màxima eficiència possible del sistema.

Existeixen dos tipus de flux vehiculars, el continu i el discontinu/discret. El flux continu és aquell que podem trobar en les autopistes, autovies, i altres tipus de vies les quals no tinguin cap interrupció externa sobre el flux de vehicles. Que una via tingui restriccions no implica que el flux sigui discontinu, ja que les pròpies restriccions poden venir produïdes pel mateix flux de vehicles, per tant no es consideren com una interrupció externa. En canvi, en una intersecció semafòrica si que es considera un flux discontinu ja que la interrupció del trànsit en la via bé produïda per un factor extern al propi flux.

La principal diferència entre els models dels dos tipus de flux és la dificultat de cada un d'ells. En el flux discontinu, el fet d'introduir un element extern capaç d'interrompre el flux de la via, augmenta la dificultat del model ja que llavors els models comencen a resoldre's mitjançant equacions diferencials i derivades parcials respecte el temps i dificulta notablement la resolució del model. A més a més, el fet que el temps influeixi d'una manera tant significativa complica el seu estudi amb precisió o en cas que es requereixi una bona precisió el seu cost econòmic seria molt elevat.

2.2 Equació fonamental del flux vehicular

El flux vehicular de trànsit està basat principalment en tres característiques: la velocitat de circulació, el volum o la intensitat de vehicles que circulen i la densitat de les vies. Mitjançant aquestes tres variables es pot arribar a conèixer el comportament del trànsit, i d'aquesta manera, es pot analitzar per intentar trobar un model més eficient. A més a més, aquestes tres variables són les que s'utilitzen per indicar el nivell de servei que ofereix la via.

Definirem la taxa de flux o el flux com la quantitat de vehicles que passen per un punt o per una secció transversal a la via en un temps determinat inferior a una hora. Cal tenir en compte que la taxa de flux no és una variable de volum, per tant li hem de donar la interpretació correcte. El flux no és la quantitat de vehicles que passen realment en una hora completa. Per exemple si tenim 100 vehicles que han passat durant un període de temps de 15 minuts, tenim un flux de 100 vehicles, però tenim una intensitat o un volum de 400 vehicles/h.

Per una altra banda tenim la variable de la velocitat. Definirem aquesta variable com la raó de moviment entre la distància per unitat de temps. Normalment s’expressen en [km/h] Tenim dos tipus diferents de velocitats: la velocitat mitjana de viatge i la velocitat de flux lliure. La velocitat mitjana de viatge és quan fem referència a la velocitat en mitjana que ha tardat un vehicle en fer tot el recorregut, incloent-hi les parades i els temps perduts, en cas que no hagués variat en cap moment del recorregut la seva velocitat. Per altra banda, la velocitat a flux lliure és la mitjana de la velocitat calculada quan a la via hi ha una intensitat baixa de vehicles, és a dir, que el volum de trànsit de la via és pràcticament zero. Aquesta velocitat sol ser més elevada que l’anterior, ja que els vehicles no tenen cap obstacle ni cap pèrdua de temps per altres vehicles de la via. La velocitat de flux lliure sol ser bastant propera a la velocitat límit permesa per la via.

Per acabar explicarem breument la tercera variable fonamental que és la densitat. La densitat del trànsit o la concentració és defineix com la quantitat de vehicles que es troben simultàniament en una longitud específica de la via. Normalment s’expressa en [vehicle/km].

Aquestes tres variables fonamentals es relacionen entre elles per a dur a terme l’equació fonamental del flux vehicular. Aquesta equació s’utilitza per descriure la situació del trànsit a les vies.

Font: Tapia, J. G., Veizaga, R. D. (2006). ***Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la assignatura de Ingeniería de tráfico.***

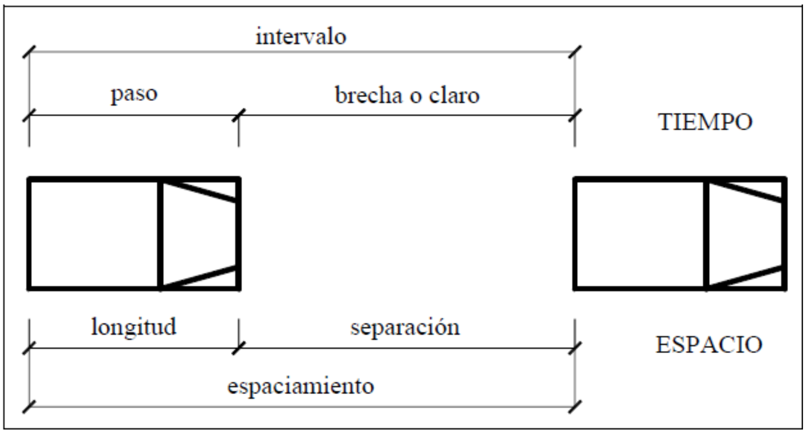

Figura 1: Relació entre el temps i l'espai de dos vehicles.

En la figura 1, es pot veure la relació que tenim entre dos cotxes en una via un cop els hi hem aplicat tots els atributs referents a la velocitat, intensitat i la densitat. Per una banda tenim el pas, que equival el temps que tarda un vehicle a recórrer la seva longitud. Llavors tenim el clar o la bretxa, que és l'interval de temps que separa els dos automòbils. Aquest interval de temps equival a la distancia que hi ha des de la part posterior del primer vehicle fins a la part davantera del segon automòbil dividida per la velocitat d'aquest segon.

D'aquesta relació entre les tres característiques es treu la funció fonamental del flux vehicular que equival a $q = vk$, on la q equival al flux, el caràcter v és la velocitat i la lletra k simbolitza la densitat.

2.3 **Models bàsics lineals del flux vehicular**

L'equació fonamental mencionada anteriorment $q = vk$ ens permet relacionant dues de les variables obtenir la tercera utilitzant la combinació entre elles. És a dir, amb la combinació de la velocitat-flux (vq) podem obtenir la densitat de la via; amb velocitat-densitat (vk) podem obtenir el flux i amb el flux-densitat (qk) podem obtenir la velocitat. La representació gràfica de les tres variables la podem veure en la figura 2.

Font: Mozo, J. (2011). ***Análisis de Nivel de Servicio y Capacidad de Segmentos Básicos de Autopistas, Segmentos Trenzados y Rampas de acuerdo al Manual de Capacidad de Carreteras HCM2000 aplicando MathCad.***

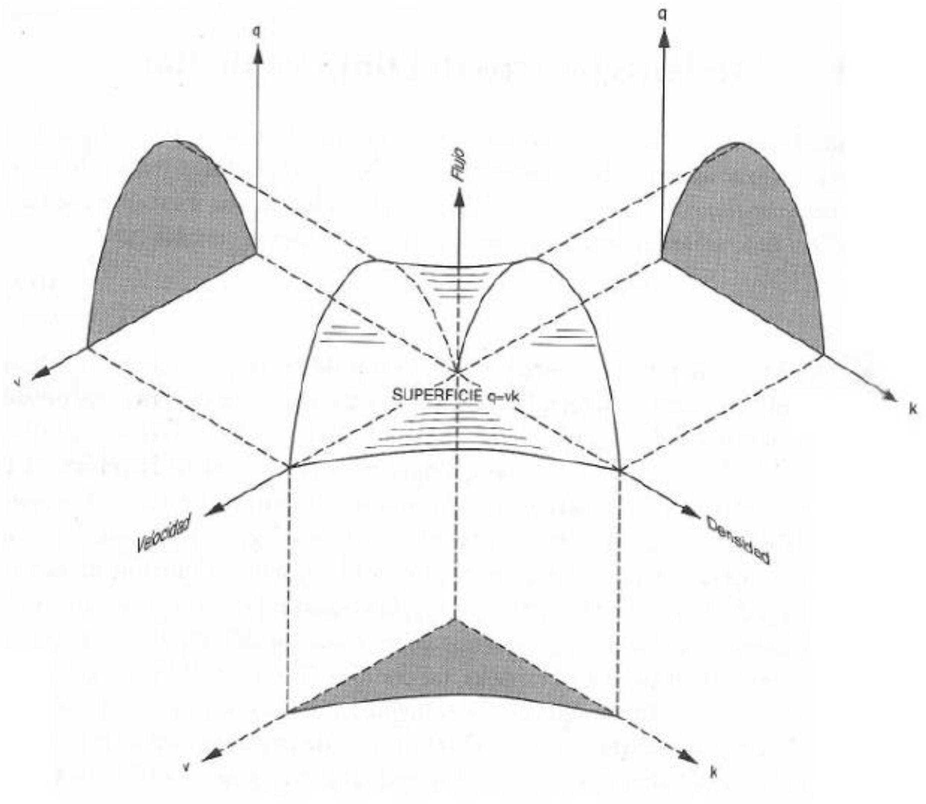

Figura 2: Representació de l'equació fonamental del flux vehicular i les seves combinacions

Cada combinació té els seus propis usos. La combinació entre velocitat-densitat és la més utilitzada de les tres, ja que per cada valor de la densitat només existeix un valor de la velocitat, fet que no passa amb les altres dues combinacions (això es veurà més endavant un cop s'expliquin els models). La relació entre flux-densitat s'utilitza pel control del trànsit en autopistes ja que la densitat o el flux es poden expressar en percentatges d'ocupació (fet que no es pot fer amb la velocitat) i d'aquesta manera es pot dimensionar la via per trams i saber exactament com funciona cada tram durant un temps determinat. La combinació entre velocitat-flux s'utilitza principalment per estudiar les velocitats i els fluxos de vehicles per intentar millorar el trànsit en les vies.

2.3.1 Model lineal de la velocitat i la densitat

B.D. Greenshields va ser el primer investigador que va realitzar investigacions sobre el comportament del flux vehicular (Greenshields, 1935). Aquestes investigacions el van portar a descobrir una relació lineal entre la velocitat, el flux i la densitat del trànsit. Aquesta relació s'ajustava mitjançant el mètode de mínims quadràtics. L'equació que va obtenir del model és la següent:

$$\overline{v_e} = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right) k \qquad \text{(Eq.1)}$$

On:

$\overline{v_e}$ = Velocitat mitjana espacial (km/h),
k = Densitat(vehicles/km/carril),
v_l = Velocitat mitjana especial a lux lliure (km/h), i
k_c = Densitat de congestió (vehicles/km/carril).

Com podem veure a l'equació 1 trobem que la velocitat disminueix a mesura que hi ha més congestió. La velocitat té el seu valor màxim quan $\overline{v_e} = v_l$, i el seu valor mínim quan $\overline{v_e} = 0$. El valor màxim de la velocitat mitjana espacial la trobem quan el valor de la densitat de la via és zero (realment mai serà zero perquè si tenim un cotxe que va a la velocitat v_l, la densitat ja no pot ser zero si hi tenim un cotxe circulant). En aquest cas la velocitat mitjana espacial pren el valor màxim quan la densitat pren valors molt petits propers a zero i per tant podem considerar que els pocs vehicles que estan circulant per la via poden fer-ho a una velocitat de flux lliure. Per l'altra banda, el valor mínim de la velocitat mitjana espacial el trobem quan la densitat de vehicles arriba al seu valor màxim, que és la densitat de congestió. En aquest cas és quan apareixen les restriccions i les cues, i per tant els vehicles estan aturats.

A continuació en la figura 3 podem veure aquest model lineal expressat gràficament.

Font: Tapia, J. G., Veizaga, R. D. (2006). ***Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la assignatura de Ingeniería de tráfico.***

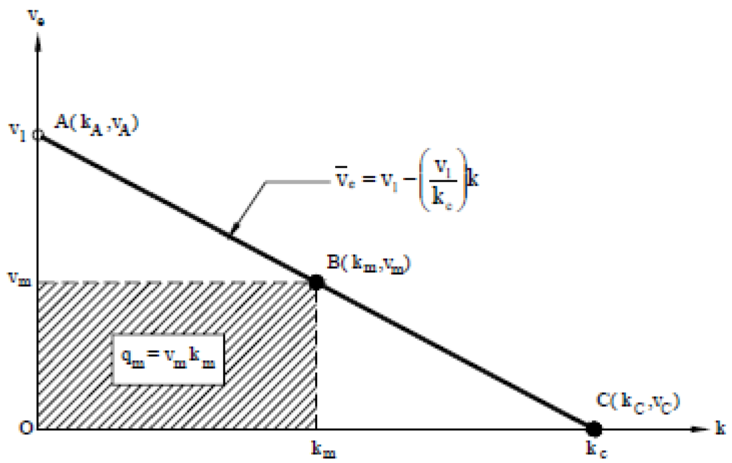

Figura 3: Representació gràfica entre la relació de la velocitat i la densitat

El flux (q) es pot calcular utilitzant les variables de la velocitat i densitat mitjançant l'equació fonamental del flux vehicular $q = vk$. En qualsevol punt de la recta de coordenades (v, k), el producte vk equival a una àrea d'un rectangle, que té el valor del flux.

Com podem veure en la figura 3, trobem l'àrea màxima del flux en el centre de la recte. Per tant, per poder obtenir un flux màxim hauríem de tenir que $v_m = \frac{v_l}{2}$ i $k_m = \frac{k_c}{2}$, per tant el flux màxim en un model lineal equival a $q_m = \frac{vk}{4}$.

2.3.2 Model parabòlic del flux i la densitat

Com hem dit anteriorment, l'equació fonamental del flux vehicular ens relaciona tres variables: la velocitat, el flux i la densitat. Coneixent dues de les variables es pot trobar la tercera mitjançant l'equació $q = vk$. A l'apartat anterior hem analitzar la relació entre la velocitat i la densitat, i ara estudiarem la relació entre el flux i la densitat.

Per arribar a l'equació necessària combinarem les següents equacions: $\overline{v_e} = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right) k$ i $q = vk$, on $\overline{v_e} = v$. Per tant, el que obtindrem serà la relació entre el flux i la densitat. L'equació resultant de la combinació de les equacions anteriors és:

$$q = v_l k - \left(\frac{v_l}{k_c}\right) k^2 \qquad \text{(Eq.2)}$$

Com podem veure en la figura 4 obtenim una equació parabòlica.

Font: Tapia, J. G., Veizaga, R. D. (2006). ***Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la assignatura de Ingeniería de tráfico.***

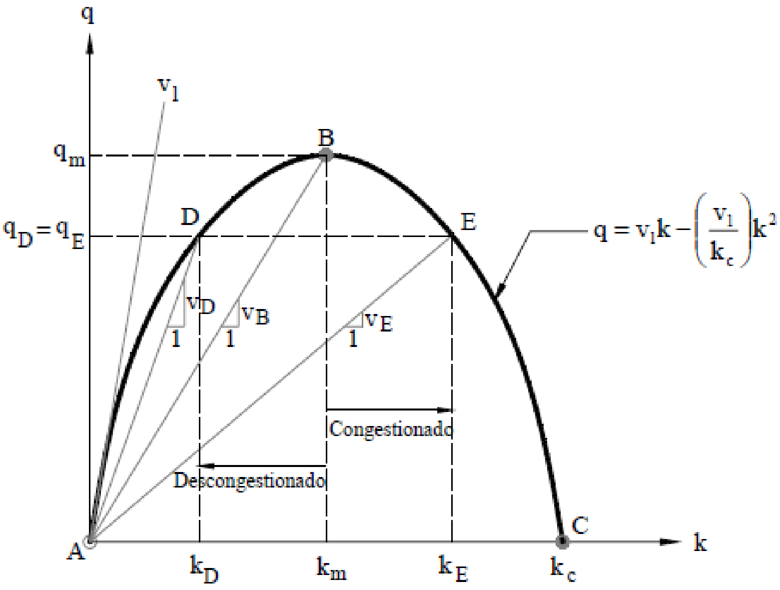

Figura 4: Relació parabòlica entre el flux i la densitat.

Aquesta funció parabòlica ens està dient que podem trobar dos casos a on el flux és zero. El primer cas (punt A) seria quan la densitat és zero. Evidentment, si la densitat és zero significa que no hi ha cap vehicle circulant, i per tant el flux de vehicles també és zero. L'altre cas (punt C) que hi trobem és quan la densitat arribar a la densitat de congestió ($k = k_c$), això significa que els vehicles estan aturats, i per tant, el flux torna a ser zero, ja que els vehicles no poden avançar.

Com podem observar en la figura 4, el punt òptim equival al vèrtex de la paràbola. A partir d'aquest punt, si ens movem cap a la dreta, perdem velocitat al haver-hi més congestió de vehicles, i per tant el flux també disminueix. Per l'altra banda, si ens movem cap a l'esquerra ens trobem en el mateix cas, perdem densitat i per tant perdem flux. El punt òptim de la funció segueix sent el punt mig, igual que ens passava amb el model lineal. En aquets punt obtenim que la tangent entre el flux i la densitat és constant, per tant estem parlant que la velocitat pren el seu màxim valor, que equival a ($v = v_l$). Aquesta velocitat màxima l'està prenent amb el màxim de vehicles possibles que poder circular simultàniament a la via. A la que augmentéssim el nombre de vehicles circulant la velocitat ja disminuiria i per tant el flux també.

2.3.3 Model parabòlic entre la velocitat i el flux

Prèviament ja hem analitzat la relació entre la velocitat - densitat i entre el flux - densitat, per tant, ara només ens queda analitzar la combinació entre la velocitat i el flux.

Per arribar a l'equació necessària combinarem les següents equacions : $k = k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right)\overline{v_e}$ i $q = vk$, on $\overline{v_e} = v$; però en aquest cas el que obtindrem serà la relació entre la velocitat i el flux. L'equació resultant de la combinació de les equacions anteriors és:

$$k = \overline{v_e}k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right)\overline{v_e}^2 \qquad \text{(Eq.3)}$$

Com podem veure en la figura 5 obtenim també una equació parabòlica.

Font: Tapia, J. G., Veizaga, R. D. (2006). ***Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la assignatura de Ingeniería de tráfico.***

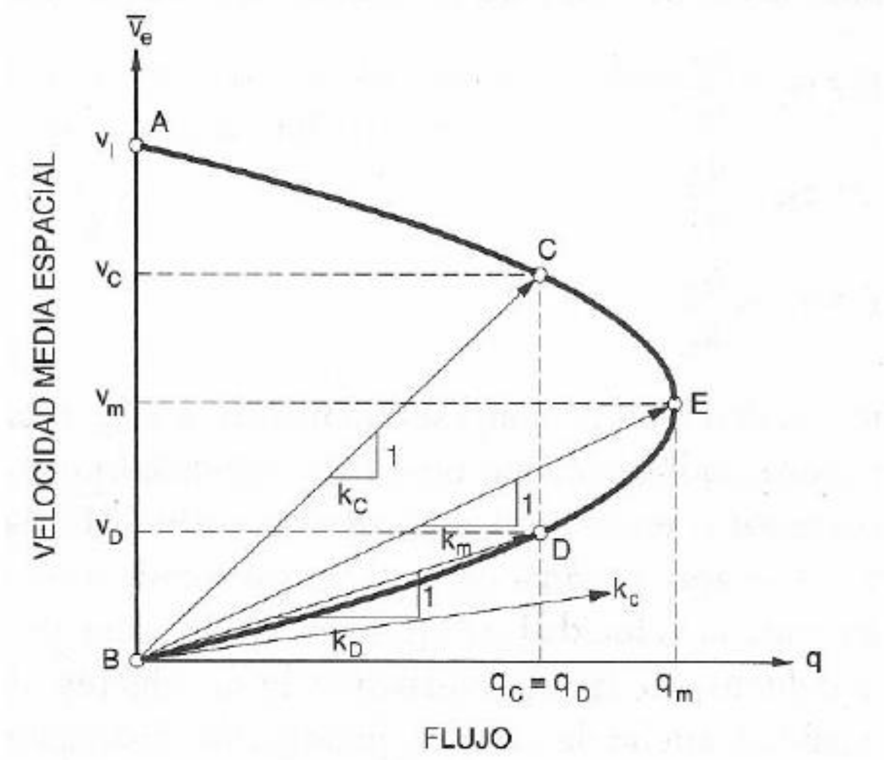

Figura 5: Representació gràfica de la relació parabòlica entre la velocitat i el flux.

Tal i com es pot observar a la figura 5 trobem dos punts a on el flux pren el valor zero. El primer punt (punt A), trobem que el vector BA és una recta vertical per tant té una pendent de valor infinit. Aquest fet ens està indicant que la densitat (al ser la inversa de la pendent) és zero, però com passava en el model anterior no serà mai zero si tenim algun cotxe circulant, per tant aquesta pendent ens està dient que la densitat pren valors molts petits i els pocs vehicles que hi circulen ho poden fer a la velocitat mitjana espacial, és a dir, que els vehicles circulen amb un flux lliure.

El segon punt (punt B) tenim que la pendent és zero indicant així que els vehicles es troben totalment parats a les vies. Al tenir un pendent amb valor zero, això ens indica que la densitat pren el seu valor màxim que seria la de congestió, i per tant vol dir que es troben en retencions i que els vehicles es troben aturats.

Hem d'aclarir uns fets, i és que aquests models lineals presenten alguns problemes. Al primer és que només s'ajusten bé amb condicions de trànsit homogeni, és a dir, amb un flux ideal. Això significa que aquests models lineals per funcionar correctament necessiten d'un trànsit regular i invariable amb el temps i que no tingui cap factor d'aleatorietat en la circulació. A la realitat no és així, per això es prenen aquests models com uns models bàsics d'aproximacions. L'altre inconvenient d'aquests models és que es van estudiar amb dades de trànsit corresponent a la època de vacances i aquest fet altera als resultats ja que el trànsit a l'estiu no és el mateix que durant l'any. Actualment els estudis es fan en èpoques de flux regular per tal de trobar un model més adequat per la regulació dels vehicles. Degut aquests factors, van aparèixer els models no lineals, que són més eficaços i més fiables que els lineals.

2.4 **Models bàsics no lineals del flux vehicular**

2.4.1 Model logarítmic

El model logarítmic del flux vehicular també va ser proposat per H.Greenberg (Greenberg, 1959) i es basa en combinar el model de flux vehicular amb el model dels fluids compressibles. H.Greenberg va agafar les equacions dels moviments dels fluids compressibles i l'equació de la continuïtat i les va introduir en el model de flux vehicular, obtenint així, unes equacions logarítmiques que van definir aquest model que va acabar agafant una gran importància en l'enginyeria del trànsit.

Aquest model, en combinar les equacions del flux vehicular i dels fluids compressibles, té una gran eficàcia quan la congestió del trànsit és elevada, i per contra és poc eficaç quan les condicions del trànsit són de flux lliure.

Les equacions que formen part del model logarítmic són les següents:

$$\boldsymbol{\overline{v_e} = v_m \cdot ln\left(\frac{k_c}{k}\right) \qquad q = v_m \cdot k \cdot ln\left(\frac{k_c}{k}\right)} \qquad \text{(Eq.4)}$$

Suposant que el flux és el màxim possible, obtenim que $k = k_m \rightarrow \boldsymbol{\overline{v_e} = v_m}$. Combinant aquestes dues equacions amb l'anterior, sabem que $k_m = \frac{k_c}{e}$. Substituint el valor de k_m en l'equació fonamental del flux vehicular obtenim que el flux màxim pel model logarítmic val $q_m = \frac{v_m \cdot k_c}{e}$.

Com podem veure en l'equació del flux màxim, aquesta ve determinada per la velocitat màxima espacial dels vehicles a la via i per la congestió màxima de la via.

2.4.2 Model exponencial

El model logarítmic, com hem explicat anteriorment, té una gran eficàcia per a situacions amb congestió elevada i és poc eficaç en situacions de flux lliure. Per aquest motiu és va introduir el model exponencial que funciona d'una manera molt efectiva quan la congestió de la via és baixa i poc efectiva en els casos on la congestió sigui elevada.

Aquest model és molt utilitzat per autopistes i per vies urbanes que són les vies a on la congestió sol tenir els nivells més baixos. Les seves equacions són les següents:

$$\overline{v_e} = v_l \cdot e^{-\left(\frac{k}{k_m}\right)} \qquad \bar{q} = v_l \cdot k \cdot e^{-\left(\frac{k}{k_m}\right)} \qquad \text{(Eq.5)}$$

Si tornem a introduir les condicions de flux màxim en el model $k = k_m \rightarrow \boldsymbol{\overline{v_e}} = v_m$, obtenim que $v_m = \frac{v_l}{e}$. Substituint aquest valor de la velocitat màxima en l'equació fonamental del flux vehicular en condicions màximes obtenim que $q_m = \frac{v_l \cdot k_m}{e}$.

Com podem veure en aquest model exponencial, la velocitat que s'utilitza per al model és la velocitat del flux lliure, per tant podem deduir que el model tindrà uns bons resultats quan hi hagi un nivell baix de congestió a la via.

2.4.3 Model probabilístic del flux vehicular

2.4.3.1 Introducció

Tots els models explicats fins ara tenen una cosa en comú, tots són deterministes, tots tenen una única solució al tenir unes condicions concretes, però a la realitat també ens trobem això?

La resposta és: no. Quantes vegades hem passat per una carretera amb dos carrils? Passem sempre pel mateix carril? Què ens fa escollir per quin carril passem? Sempre deixem la mateixa distància de seguretat amb els altres vehicles quan conduïm? Tots aquestes preguntes ens demostren que no sempre conduïm de la mateixa manera, la nostre conducció varia diàriament. D'aquesta manera si la nostre pròpia conducció ja és diferent d'un dia per l'altre, si pensem amb una ciutat com Girona i amb altres conductors, el més lògic seria pensar que cada conductor condueix a la seva manera i desigual als altres.

Tots aquests aspectes que tenim en consideració quan anem a analitzar el flux vehicular a la realitat permet adonar-se que té una característica d'heterogeneïtat, i per tant suposarem que segueix un procés aleatori. Aquest fet ens indica que hem de buscar una distribució de probabilitat que s'adeqüi al màxim a les característiques del flux. Aquestes característiques les hem separat en tres condicions.

1- El conductor es col·loca en el carril que ell vol, independentment dels automòbils que l'estiguin envoltant, amb excepció que el seu espai a la via sigui molt petit (congestió, cues, etc.).
2- Per qualsevol flux, el nombre de vehicles que passa per un punt en concret en un interval de temps definit és independent el nombre de vehicles que passa per un altre punt en el mateix interval de temps.
3- El nombre de vehicles que passa per un punt en un interval de temps definit és independent el nombre de vehicles que passa pel mateix punt en un altre interval de temps.

La distribució que més s'adequa per aquest model és la distribució de Poisson.

2.4.3.2 Distribució de Poisson

Actualment, les distribucions de probabilitat tenen dues funcions en el món de l'enginyeria. Una és l'anàlisi de dades en comportaments observats i l'altra és la predicció del futur. L'anàlisi de dades és basa en ajustar una distribució de probabilitat a unes dades obtingudes, i llavors, un cop demostrat que el comportament d'una realitat física bé definida per una distribució de probabilitat concreta, mitjançant aquesta distribució podem intentar predir el comportament futur que tindrà el sistema.

Com totes les distribucions de probabilitat, la distribució de Poisson és més eficaç en unes condicions especifiques i és menys vàlida en unes altres condicions. La distribució de Poisson és eficaç quan el flux de la via és baix, per això és la distribució més utilitzada en autopistes de més de 2 carrils, autovies, etc. Quan la concentració de vehicles és baixa, la distribució de Poisson defineix amb bastant precisió la realitat i es pot considerar un model molt fiable, mentre que si el flux és molt elevat i intens, llavors la distribució s'escapa una mica dels valors reals i normalment és decideix buscar alguna altre distribució que s’ajusti més a la realitat.

Per a determinar les probabilitats de Poisson s’utilitza l’equació 6:

$$p(x) = P(X = x) = \frac{m^x \cdot e^{-m}}{x!} \qquad \text{(Eq.6)}$$

On:

m: nombre en mitjana de vehicles que s’esperen que arribin en un interval de temps concret.
X: variable aleatòria que representa el número d’arribades en un punt.
p(x): probabilitat de que arribin x vehicles en l’interval de temps concret.

2.4.4 Altres models del flux vehicular

Tots els models explicats anteriorment es van utilitzar molt ens les dècades dels 40 i 60, però actualment ja no són vàlids. El principal problema del trànsit és que no s’ha trobat cap altre model millor que els esmentats, i per tant no s’han pogut substituir els models anteriors per cal altre. El problema de modelitzar el trànsit és que intervenen tants factors diferents que el fet de poder-los expressar tots de forma matemàtica o física resulta molt complicat. Alguns dels factors que intervenen en la regulació del trànsit són els que comentarem a continuació.

El model del factor humà fa referència a totes les variables que afecten en el flux del trànsit i són conseqüència de les deicions que els conductors prenen continuament en la conducció. És a dir, el temps de frenada, el temps de percepció i reacció d’un senyal, el temps de resposta per girar, visualitzar els senyals, la resposta a la dinàmica d’altres vehicles (com canvis de dirrecions, girs d’altres cotxes, etc.). Tots aquests temps depenen de factors individuals del conductor: edat, sexe, entrenament, motivaciosn, discapacitats, etc. Per tant tenim una gran aleatorietat a l’hora de realitzar la simulació. Per conseqüent, trobar un model que s’ajusti a tots aquests factors amb una variabilitat tant elevada és molt complex.

El model del seguiment d’un cotxe ens indica la manera en què un vehicle en segueix un altre en un únic carril d’una carretera. La distància de seguretat que es deixa, la velocitat en que ens aproximem al vehicle de davant. Hem d’afegir que aquesta operació és la més senzilla i s’ha pogut arribar a descriure-la per mitjans matemàtics. S’han fet dos models un lineal (no té en consideració cap tipus d’acceleració) i el model no lineal (on es considera les acceleracions dels dos vehicles).

Llavors també trobem altres models com el model de flux continu, que ens indica que el flux és equivalent a un fluid compressible unidimensional. També trobem el model de flux macroscòpic que avalua el comportament del trànsit com un conjunt de punts, és a dir, com una xarxa. Llavors també podem trobar el model d’impacte que ens relaciona els accidents que ha tingut una via amb el flux generat a causa dels xocs.

3 TEORIA DE CUES

3.1 Introducció

En l'actualitat ens trobem en una societat on es dóna molta importància al temps, per això a ningú li agrada haver-se d'esperar en una cua per a ser atès. Malauradament, les cues formen part de la nostra vida quotidiana i les trobem cada dia, com per exemple quan ens aixequem pel matí i volem anar a la cambra de bany però aquesta està ocupada, quan hem d'anar a comprar menjar a un supermercat i hem d'agafar el famós paper que posa "esperi el seu torn", o quan s'agafa el cotxe per anar a treballar i pel trajecte et trobes retencions o cues en les cruïlles, etc.

Com es pot veure en els exemples anteriors, en el nostre dia a dia ens podem trobar en moltes situacions que ens facin esperar per poder ser servits, per tant haurem de fer una cua per a poder ser atesos. Per això, es defineix la teoria de cues com l'estudi dels sistemes on els recursos per poder atendre a tots els usuaris són limitats, per tant, pot ser que el nou usuari que entra en el sistema s'hagi d'esperar per poder ser atès.

Quan aquestes cues que es formen són d'objectes inanimats, (peces que esperen per ser tractades dintre d'una màquina en un taller) el problema és principalment econòmic. L'objectiu en aquest cas serà optimitzar el sistema (llargada que ha de tenir la cua d'espera, nombre de servidors que ha de tenir el taller, etc.) per obtenir un benefici màxim amb el mínim temps possible. Per altra banda, si la cua està formada per persones, el problema ja no és només econòmic sinó que ja entren aspectes psicològics de les persones, com per exemple: l'angoixa, la sensació de cansament, el fet d'enfadar-se per fer cua, etc. Tots aquests aspectes provoquen que l'optimització d'aquestes cues sigui molt més complexa i delicada que la dels objectes inanimats.

Els objectius que es busquen alhora de realitzar les anàlisis a les cues són dos: caracteritzar quantitativament i qualitativament la cua i determinar els valors adequats dels paràmetres perquè el sistema arribi a l'equilibri entre el cost i el servei que ofereix. Aquest equilibri correspon al punt de mínim cost, per tant el punt de màxim benefici, tal i com podem observar en la figura 6.

Font: De la Fuente, G., Pino, R. (2001). ***Teoría de líneas de espera: Modelos de colas. Gijón: Universidad de Oviedo***

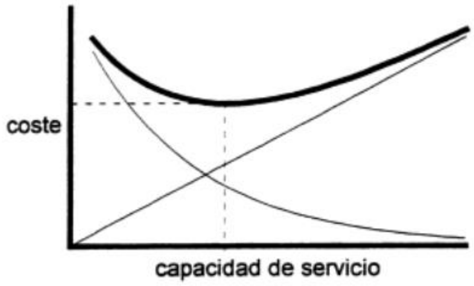

Figura 6: Representació del punt òptim dels sistemes

La quantificació d’una cua d’espera es pot fer a través d’un model matemàtic (solució analítica) o d’un procés de simulació (solució aproximada). En un model matemàtic les suposicions respecte als seus paràmetres (arribades dels clients, capacitat del servei, tipus de servei, etc.) són molt estrictes, però obtenen la solució òptima per la cua, i per tant la millor solució pel sistema. Per l’altra banda, els processos de simulació no exigeixen tantes suposicions ni aquestes són tant estrictes, però la solució que ens dóna és aproximada, en cap cas podrem assegurar amb certesa que la solució trobada sigui la millor pel sistema.

3.2 Estructura bàsica d’una línia de cua

L’estructura bàsica de la teoria de cues està composada per sis elements que són: la població, la forma en que arriben els usuaris al sistema, les característiques de les cues que es formen, el mètode amb el que es seleccionen els clients de la cua, les característiques del servei i les condicions de sortida del sistema per part dels usuaris.

3.2.1 Població

La població es basa en el lloc d’on provenen els usuaris que arriben al sistema. Aquesta població pot ser finita o infinita. La població finita la definirem com un grup limitat de clients/usuaris els quals poden entrar dintre al sistema i formar cues si és necessari. Que una població sigui finita, implica que quan entra un client en el sistema provoca una variació en la probabilitat de que n’arribi un altre, és a dir, suposem que tenim una població de 20 persones, la probabilitat que tenim que arribi un client nou és de 20/20, que equival a un 100%. Però ara imaginem que el servidor està ocupat i tenim 4 persones esperant a la cua, ara la probabilitat que tenim que arribi un client nou és de 15/20 (75%), ja que els altres 5 usuaris ja són dintre al sistema. Com podem veure amb l’exemple, la probabilitat ha disminuït del 100% al 75%.

Per tant definirem una població finita quan l'acció d'entrar usuaris en el sistema provoqui una variació en la probabilitat que n'arribin de nous.

Per altra banda, la població infinita no és aquella on els usuaris són il·limitats, ja que a la realitat no existeixen les poblacions infinites. La població infinita és una població a on podem considerar que el nombre d'usuaris que hi intervenen té una mida prou gran perquè el fet que entri o no un usuari nou en el sistema, no impliqui cap variabilitat en la probabilitat, és a dir, que la mostra de la població és tant gran que el fet d'entrar un nombre concret de clients al sistema, provoca una variació pràcticament nul·la de la probabilitat que n'entri un de nou .

3.2.2 Arribades al sistema

Les arribades al sistema de cues provenen d'un procés estocàstic, és a dir, que tenen un caràcter d'aleatorietat i poden arribar en qualsevol instant i en qualsevol quantitat, seguint però, una distribució de probabilitat que les defineix.

Les arribades poden ser independents al sistema o dependents. Direm que les arribades són independents quan les arribades no tinguin cap tipus de relació amb els usuaris que estiguin dintre el sistema, mentre que direm que les arribades són dependents quan la quantitat d'usuaris que hi hagi en el sistema modifiqui la velocitat d'arribada dels usuaris. Un exemple seria la caixa d'un supermercat. Imaginem que un usuari ha acabat de comprar i es disposa a anar a la caixa a fer el pagament, però hi ha dues caixes i les dues amb molta cua; si l'usuari decideix fer una altra volta pel supermercat per no haver-se d'esperar a la cua, estaríem parlant d'arribades dependents, en canvi, si el comprador independentment de la cua que es trobi en les caixes es posa a esperar, llavors parlaríem d'arribades independents.

L'arribada dels usuaris en el sistema és un factor important per a l'anàlisi de la teoria de cues. Aquestes arribades és determinen mitjançant 4 característiques: l'estructura, la mida, el patró de distribució i el nivell de paciència, tal i com es pot veure en la figura 7.

Font: De la Fuente, G., Pino, R. (2001). ***Teoría de líneas de espera: Modelos de colas. Gijón: Universidad de Oviedo***

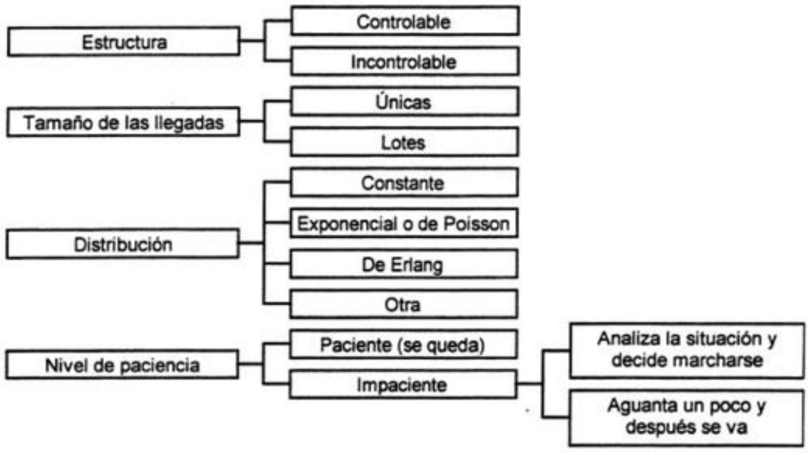

Figura 7: Esquema general de les arribades al sistema.

En l'estructura hi trobem dos tipus d'arribades: les controlables i les incontrolables. Direm que un sistema té una estructura controlable quan podem preveure, amb més o amb menys exactitud, les arribades que es produiran; en canvi, quan les arribades al sistema siguin imprevisibles i no les puguem arribar a conèixer, llavors es tractarà d'un sistema incontrolable.

Fent referència a la mida de les unitats d'arribada també tenim dos tipus. Per un costat tenim les arribades on cada client equival a una única unitat (una persona que entra en un restaurant) o les arribades per lot, on cada arribada consta d'un número múltiple de la unitat anterior (un grup de 5 persones que entren en un restaurant), en aquest cas hi ha una única entrada però de 5 persones alhora.

Llavors també ens trobem amb el tema del nivell de paciència. Hi ha dos tipus de clients en aquest aspecte, el pacient i l'impacient. El client pacient és aquell que espera a la cua el temps que faci falta i no marxa fins que no és atès per un servidor; mentre que, el client impacient és aquell que marxa abans de ser atès en el sistema. Diem que un client té un comportament de refús quan arriba al sistema i marxa sense haver-hi entrat, en canvi definirem que un client ha abandonat quan el client hagi entrat en el sistema, però durant la cua hagi decidit marxar.

Ara pararem en un dels temes més importants en la caracterització de les arribades a un sistema: les distribucions. Les distribucions de probabilitat són funcions que ens defineixen quina és la probabilitat que una variable aleatòria pugui tenir èxit. En la teoria de cues, les distribucions ens serviran per poder preveure quina és la probabilitat de que arribi un usuari nou al sistema. Hi ha moltes distribucions però en mencionarem només les més utilitzades per a la teoria de cues.

3.2.3 Distribucions de probabilitat

Aquests sistemes es modelen mitjançant dos processos estocàstics o aleatoris: el procés d'arribades dels usuaris i el procés del servei demandat. Normalment els dos processos són independents entre sí.

El procés d'arribades dels usuaris ens marca amb quina distribució de probabilitat ens arriben els nous clients en el sistema, mentre que el procés de servei demandat ens indica el temps que tarda el servidor del sistema a atendre als clients. Aquestes dues distribucions en la majoria dels sistemes, com hem mencionat anteriorment, són independents entre elles. Les principals distribucions que s'utilitzen pel sistema de cues són:

1- Distribució constant: la distribució d'arribades constant és aquella on el temps que transcórrer entre una arribada i la següent és sempre el mateix temps. Per tant, ens arribarà un client nou passat un interval de temps concret. S'utilitza molt en clients no animats, és a dir, objectes, peces en una màquina, etc.

2- Distribució d'Erlang: la distribució d'Erlang és molt semblant a una exponencial, però a diferencia d'aquesta té un paràmetre de velocitat d'arribades per acabar d'ajustar-se bé en cas que les arribades no concordin estrictament amb una distribució exponencial. La Erlang està composada per un conjunt d'exponencials. Quan el valor k de la distribució Erlang és molt gran, aquesta distribució s'aproxima a la distribució normal.

3- Distribució exponencial: la distribució exponencial és aquella que ens informa del temps que transcórrer entre una arribada i la següent, on la probabilitat de tenir les arribades segueix una funció exponencial.

4- Distribució Poisson: La distribució Poisson ens informa de quantes arribades aleatòries ha tingut el sistema en un interval concret de temps.

La distribució exponencial i la distribució Poisson van molt lligades, ja que la inversa del temps de la mitjana de l'exponencial ens dóna la mitjana d'arribades de la distribució de Poisson. És a dir, que les arribades de la distribució Poisson estan relacionades entre elles mateixes amb el temps de la distribució exponencial. Per exemple, en el cas que tinguem una mitjana d'arribades de 10 cotxes durant una hora en un taller mecànic, i aquesta mitjana d'arribades segueixi una distribució Poisson, tenim que el temps que transcórrer entre una arribada d'un vehicle i el següent segueix una distribució exponencial amb una mitjana de probabilitat de 1/10. Per això diem que la distribució Poisson i la distribució exponencial estan lligades.

A més a més la distribució Poisson té una proporcionalitat en el llarg del temps que provoca que sigui una distribució molt utilitzada en aquest camp. És a dir, si la probabilitat en un interval de temps concret és de 3 èxits; si doblem l'interval de temps serà de 6 èxits i si el dividim a la meitat serà de 1,5 èxits. Una altre propietat tant de la distribució Poisson com de l'exponencial és que no tenen memòria. Això significa que la probabilitat que tinguem en cada interval concret de temps és independent a la que haguem tingut a l'anterior. Si la mitjana de la probabilitat que tenim en un interval concret és de 3 èxits, aquesta probabilitat seguirà sent la mateixa independentment que a l'interval anterior hagi tingut 0 èxits o n'hagi tingut 15. Cada interval és independent dels altres sense influenciar-se pel que hagi pogut transcórrer en l'interval anterior.

Per aquestes condicions que acabem d'esmentar, la distribució de Poisson s'utilitza molt per a definir les arribades aleatòries en un sistema de cua.

3.2.4 Característiques de la cua

Les cues en els sistemes de cues vénen definides per dos paràmetres: número de cues que té el sistema i la longitud o la capacitat que poden arribar a tenir cada una d'elles.

Un sistema pot tenir una única cua d'espera o pot tenir-ne múltiples. En cas de tenir-ne múltiples es poden repartir de diferent manera. Podem tenir múltiples cues paral·leles, on cada cua vagi a un servidor en particular, o podem tenir múltiples cues que es trobin en un únic servidor. El fet de tenir múltiples cues provoca que els usuaris puguin canviar de cua si veuen que una altra cua va més ràpida que a la que estan situats. Aquests canvis de cues dificulten la modelització dels sistema, per això quan es modelen aquests sistemes, no es considera l'opció d'anar canviant de cua.

Pel que fa a la longitud de la cua, aquesta pot ser infinita o limitada. Parlarem d'una cua finita quan hi hagi restriccions de capacitat màxima, la qual cosa impedirà que la cua sigui superior a un valor (normalment en aquests casos les restriccions solen ser legals), en canvi, una cua infinita serà aquella que no tindrà cap restricció, per tant tot usuari nou que entri en el sistema podrà col·locar-se a la cua per esperar el seu torn.

3.2.5 Disciplina de les cues

La disciplina en una cua és la regla de prioritat que serveix per determinar l'ordre en el qual seran atesos els usuaris que es troben esperant en una cua. La disciplina més coneguda i més utilitzada és la FIFO (First In, First Out). Aquesta disciplina estableix que la prioritat ha de ser l'odre cronològic en el qual els usuaris arribin al sistema, és a dir, que el primer que arriba a la cua serà el primer en ser atès. Però no sempre s'utilitza la FIFO, com per exemple en les urgències dels hospitals, on el primer que s'atén és el més urgent i no el primer que arriba. A part de les mencionades també tenim altres tipus de disciplines que esmentarem a continuació:

SIFO és la disciplina que significa (Shortest In First Out). Aquesta disciplina ens marca l'ordre d'atenció degut al temps que necessita l'usuari per ser atès. El primer que entra per ser atès és aquell que necessita el mínim temps. Un exemple d'aquesta disciplina podria ser un taller mecànic. Imaginem que tenim un cotxe en espera que necessita un temps de 4 hores de servei, però llavors ens arriba un altre cotxe que necessita una revisió d'oli, que amb un servei de 10 minuts ja el tindríem acabat. En aquest cas la millor opció és comença pel cotxe que se li ha de fer una revisió d'oli, independentment de l'ordre d'arribada al sistema. D'aquesta manera s'optimitzen molt més els temps, ja que no és al mateix que un cotxe que necessita 4 hores de servei el fem esperar 10 minuts que un cotxe que necessita un servei de 10 minuts el fem esperar 4 hores.

Llavors també tenim la LIFO (Last In First Out). Aquesta disciplina funciona al revés que les altres, ja que l'últim client en arribar al sistema és el primer en ser atès. És una disciplina una mica contradictòria i per això no estem gaire acostumats amb ella. Aquesta disciplina s'utilitza quan la cua no hi intervé el factor humà, ja que no tindria molt de sentit que els primer clients portessin molta estona esperant per ser atesos, i cada vegada que entrés un client nou aquest fos atès. És una disciplina molt utilitzada per les columnes d'objectes, com per exemple una pila de plats. Si ens hi fixem, el primer plat que agafem en un pila és l'últim que hem col·locat, per tant té una disciplina de LIFO.

3.2.6 Temps de servei

Els serveis que podem trobar en els sistemes es caracteritzen per diversos trets: el número de cues que s'hi poden formar, la quantitat de fases que necessiten els clients per poder ser atesos, les bifurcacions que contingui el sistema, etc.

Direm que un servei és d'una única fase quan el client únicament necessiti passar per un servidor per a ser atès. Mentre que definirem un servei multifase quan el client necessiti passar per més d'un servidor per poder completar la seva necessitat.

Els serveis poden estar formats únicament per una única cua d'espera o per múltiples. Quan només n'hi ha una, només tindrem un servidor que atendrà a tots els clients que entrin en el sistema, mentre que si la cua és múltiple, llavors podem tenir diversos servidors en paral·lel per poder atendre a tots els usuaris del sistema.

A més a més, les cues poden tenir bifurcacions. Les bifurcacions consisteixen en tenir llocs on hi ha una única cua i de sobte es divideix en vàries cues, o al revés, tenir moltes cues en un lloc i que llavors s'uneixen en una única fila. Un exemple d'aquests casos poden ser els peatges de les autopistes, on una única cua es bifurca en tantes cues com carrils tingui el peatge, o en el cas d'un pont que podem tenir múltiples cues d'espera però per travessar el pont s'han d'unir en una de sola.

Definirem el temps de servei com el temps que transcorre entre que un client entra en el sistema i és atès. Aquest paràmetre serà molt important alhora de realitzar la modelització, ja que d'aquí traurem els paràmetres que serviran per calcular les característiques del sistema. Aquest temps de servei pot ser constant (cada client ocupa la mateixa quantitat de temps en el servidor) o aleatori, llavors cada client tardarà el temps que li correspongui segons la seva densitat de probabilitat.

Igual que ens succeïa amb els temps d'arribada de clients nous al sistema, en el cas que el temps de servei es pogués modular com una distribució exponencial, es simplificaria la complexitat de la modelització, ja que en una distribució exponencial de paràmetre λ, segons la propietat de Markov, la mitjana del temps de servei seria de $1/\lambda$.

3.2.7 Sortida del sistema

Un cop els clients ja han estat atesos pels servidors, ara només els hi queda marxar del sistema. Hi ha dos possibles vies quan un client ja ha estat atès i surt del sistema. Una és que el client torni a la població i immediatament es converteixi en un candidat per tornar a entrar en el sistema i l'altre és que un cop acabat el seu pas pel sistema, la seva probabilitat de torna a entrar ja no sigui la mateixa que la de la població (fet que succeeix quan la població és finita). Un exemple és la reparació d'una màquina, un cop la màquina surt del sistema (ha estat reparada), ja no té la mateixa probabilitat que les altres de tornar-se a espatllar. En aquest cas, s'hauria de tornar a analitzar tot el problema de nou, ja que la probabilitat d'arribades al sistema quedaria modificada per la màquina reparada.

3.3 Modelització

3.3.1 Introducció

La modelització d'un sistema és un tipus de mètode científic que es basa en intentar explicar una realitat observable mitjançant unes fórmules matemàtiques. Una modelització no es tracta únicament de modelitzar el sistema, sinó que també serà necessari modelar les arribades al sistema i modelar el temps de servei mitjançant dos processos estocàstics. Un procés estocàstic, com hem explicat anteriorment, és un procés a on les variables són aleatòries. Aquests processos estocàstics tenen les seves pròpies funcions de distribució, que són les que ens serviran per poder estudiar i avaluar els sistemes aleatoris amb un interval de confiança determinat.

En el nostre cas de la modelització del trànsit d'una cruïlla, haurem de modelitzar els automòbils que arriben a les cruïlles (arribades al sistema) i la distribució dels temps dels semàfors (temps de servei del sistema) per poder realitzar una modelització completa de la cruïlla. Els dos models estocàstics hauran de tenir dades independents entre elles, ja que sinó no es tractaria d'un procés aleatori, i per tant no tindria sentit el fet del modelitzar el sistema. Per aquest motiu suposarem que les dades dels dos models a analitzar són independents.

3.3.2 Notació i terminologia dels models

Com hem comentat anteriorment, la modelització dels sistemes és un procés aleatori, per tant no es coneix amb exactitud les arribades dels usuaris ni el temps de servei de manera precisa. És per això que s'han de descriure mitjançant distribucions de probabilitat.

En la teoria de cues s'utilitzen majoritàriament 4 tipus de distribucions de probabilitat.

1- Distribució Exponencial (M): també anomenada distribució de Markov, s'utilitza per a descriure esdeveniments aleatoris amb la peculiaritat que són independents degut a la seva característica de falta de memòria, com ja hem mencionat en l'apartat de les arribades al sistema.

2- Distribució degenerada/determinista: els esdeveniments succeeixen de forma regular i sense canvi. No intervé cap factor d'aleatorietat en aquests models.
3- Distribució Erlang: s'utilitza per a descriure el temps d'espera fins arribar a un esdeveniment (k) en concret en una distribució de Poisson.
4- General: qualsevol altra distribució de probabilitat.

El matemàtic britànic Maurice George Kendall va proposar un sistema abreviat per tal de poder identificar qualsevol tipus de model en un sistema. Aquesta notació és la següent:

A/B/C/D/E/F

On:

A: Distribució de probabilitat que tenen les arribades en el sistema.
B: Temps que necessita el servei per poder atendre el client.
C: Nombre de servidors que té en paral·lel el sistema.
D: Disciplina que forma la cua (FIFO, LIFO, SPT, etc.)
E: Capacitat màxima que pot tenir el sistema.
F: Mida de la població

Un exemple de model seria el model M/M/s/FIFO/∞/∞. Aquest model ens està dient que les arribades en el sistema segueixen una distribució de Markov, igual que el temps de servei. Que hi ha *s* servidors per atendre a la cua. Que la disciplina de la cua és la FIFO, i que la capacitat i la mida de la població són infinites.
Per tant les fórmules que hauríem d'aplicar per a la realització d'aquest model serien les que podem veure en la figura 8.

Font: Martin Fernández, Jose Antonio. (1963). *Modelització i simulació en l'enginyeria.* [Apunts acadèmics]. UdGMoodle.

M/M/s/GD/∞/∞:

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \qquad \lambda_e = \lambda \qquad \text{Si } 0 \le \rho < 1 \quad \pi_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^i}{i!} + \frac{(s\rho)^s}{s!(1-\rho)}}$$

$$\pi_j = \frac{(s\rho)^j \pi_0}{j!} \text{ per } j = 1,2,\ldots,s\,; \qquad \pi_j = \frac{\rho^j s^s \pi_0}{s!} \text{ per } j \ge s+1$$

$$P(j \ge s) = \frac{(s\rho)^s \pi_0}{s!(1-\rho)} \qquad L_q = \frac{P(j \ge s)\rho}{1-\rho} \qquad L_s = s\rho \qquad W_q = \frac{L_q}{\lambda} \qquad W = \frac{1}{\mu} + W_q$$

Figura 8: Fórmules del model M/M/s

En cas que tinguéssim unes altres característiques diferents, hauríem de buscar el model que s'adeqüés més a les noves característiques i a través del model trobar les fórmules necessàries per resoldre el sistema. Els paràmetres que veiem en la figura 8, els explicarem amb més detall en el següent apartat, per poder fer-nos una idea del que significa cada un.

3.3.3 Paràmetres i mesures de rendiments

Com podem veure en la figura 8, els models ens serveixen per calcular els rendiments dels sistemes a estudiar. Ara anirem a explicar que simbolitza cada paràmetre i quina funció té en el sistema.

Els paràmetres més important que cal destacar són:

λ: Taxa d'arribada en el sistema expressat en número de clients/unitat de temps.

λ_e: Taxa de clients que ha entrat al sistema expressat en número de clients/unitat de temps.

s: Nombre de servidors que té el sistema.

μ: Taxa de servei o nombre de sortides de clients expressat en número de clients/unitat de temps.

π_n: probabilitat que hi hagi n clients en el sistema.

Per altra banda també tenim les mesures del rendiment del sistema, que és el que realment ens dirà si el sistema funciona correctament o no. Igual que hem fet amb els paràmetres, mencionarem breument la seva simbologia.

ρ: Percentatge d'ocupació del sistema.

W/ W_q/ W_s: Temps d'estada dintre al sistema/Temps d'estada a la cua/Temps d'estada als servidors.

L/ L_q/ L_s: Nombre de clients dintre al sistema/Nombre de clients fent cua/Nombre de clients atesos pel servidor.

3.3.4 Modelització d'una cruïlla

En aquest apartat analitzarem com es podria modelitzar una cruïlla semafòrica mitjançant la teoria de cues. Per fer-ho hauríem d'analitzar els apartats que acabem d'estudiar a l'apartat anterior.

Primer cal identificar cada paràmetre de la teoria de cues amb el seu element a la realitat. Els clients/usuaris del sistema equivaldrien als vehicles que arriben a la cruïlla, el servidor del sistema seria el semàfor, la línia d'espera seria la cua de vehicles que es formaria quan el semàfors no es trobés de color verd i el temps de servei seria el temps de duració de la fase verda del semàfor de la cruïlla.

Les arribades dels vehicles en el sistema, com ja hem explicat, es corresponen a unes arribades amb les característiques de la distribució de Poisson, i per tant, el temps entre cada arribada segueix un temps exponencial.

Respecte el temps del servei el podem definir també com una distribució exponencial perquè dependrà del moment en què arribi el vehicle a al cruïlla. És a dir, si arriba un vehicle just quan el semàfors s'ha posat vermell, aquest s'haurà d'esperar tot el temps fins que el semàfor es torni a posar de color verd, mentre que, si un altre vehicle arriba quan el semàfor es posa verd, només s'haurà d'esperar el temps que tarda a passar els cotxes que té davant seu, i si no té cua a davant, podrà ser atès tant bon punt arribi al sistema. El fet que el temps vingui donat per les arribades, i al ser les arribades de vehicles un temps exponencial, ena quests casos es produeix una simplificació del model i també es defineix el temps de servei com un temps exponencial.

Per l'altra banda tenim que cada cua que es forma en la cruïlla és independent a la del costat, ja que no tots els carrils tenen la mateixa intensitat amb el flux de vehicles, per tant haurem de tractar cada carril com un sistema únic amb un servidor a cada un, que equival al semàfor.

Per tant, el model a seguir alhora de modelitzar una cruïlla seria el model M/M/1. Les fórmules del model es poden veure en la figura 9:

Font: Martin Fernández, Jose Antonio. (1963). ***Modelització i simulació en l'enginyeria.*** **[Apunts acadèmics]. UdGMoodle.**

M/M/1/GD/∞/∞:

$$\rho = \lambda / \mu \qquad \pi_j = \rho^j (1-\rho) \quad \text{per } j = 0,1,\ldots \qquad \lambda_e = \lambda \qquad \mu_e = \mu$$

$$L = \frac{\rho}{1-\rho} \qquad W = \frac{1}{\mu-\lambda} = \frac{1/\mu}{1-\rho} \qquad L_q = \frac{\rho^2}{1-\rho} \qquad L = \frac{\rho}{1-\rho} \qquad L_s = \rho \qquad W_s = \frac{1}{\mu}$$

Figura 9: Fórmules del model M/M/1

Aquestes fórmules seran les que utilitzarem més endavant en l'apartat de simulació.

4 CRUÏLLES SEMAFÒRIQUES

4.1 Introducció

Actualment a la societat, quasi totes les famílies disposen d'un cotxe, o a vegades més d'un. Aquest fet provoca que cada dia trobem per les ciutats una gran quantitat de vehicles. Tot aquest flux de moviments s'ha de guiar en diferents direccions, per aquest motiu es van posar les cruïlles. Una cruïlla és un zona on es creuen dos o més vies de circulació. Però qui té la preferència en un cruïlla? Aquesta pregunta és la que va donar lloc a una reglamentació del trànsit, per tal de poder-lo organitzar correctament. Aquesta reglamentació està basada en els senyals de circulació que n'hi ha de dos tipus: per un costat trobem les senyals de trànsit (cediu el pas, pas de vianants, senyals "stop", etc.) i per l'altre trobem els semàfors que és la part que analitzarem més endavant. En el nostre cas d'estudi, ens fixarem només en les cruïlles que estiguin regulades per semàfors.

4.2 Tipologia de cruïlles semafòriques

4.2.1 Cruïlles segons el nombre de fases

Ara anirem a definir les cruïlles semafòriques que ens podem trobar segons el nombre de fases que puguin tenir. A la ciutat de Girona, exceptuant la cruïlla del carrer Caldes de Montbui amb la carretera Barcelona que és de quatre fases, les cruïlles són de dos o de tres fases.

Començarem definint la intersecció de dues fases. Aquesta intersecció la definirem així perquè que cada cicle estarà composat per dos moviments. Un exemple d'una intersecció de dues fases és la intersecció entre el carrer Emili Grahit i el carrer de la Rutlla.

Font: Elaboració pròpia.

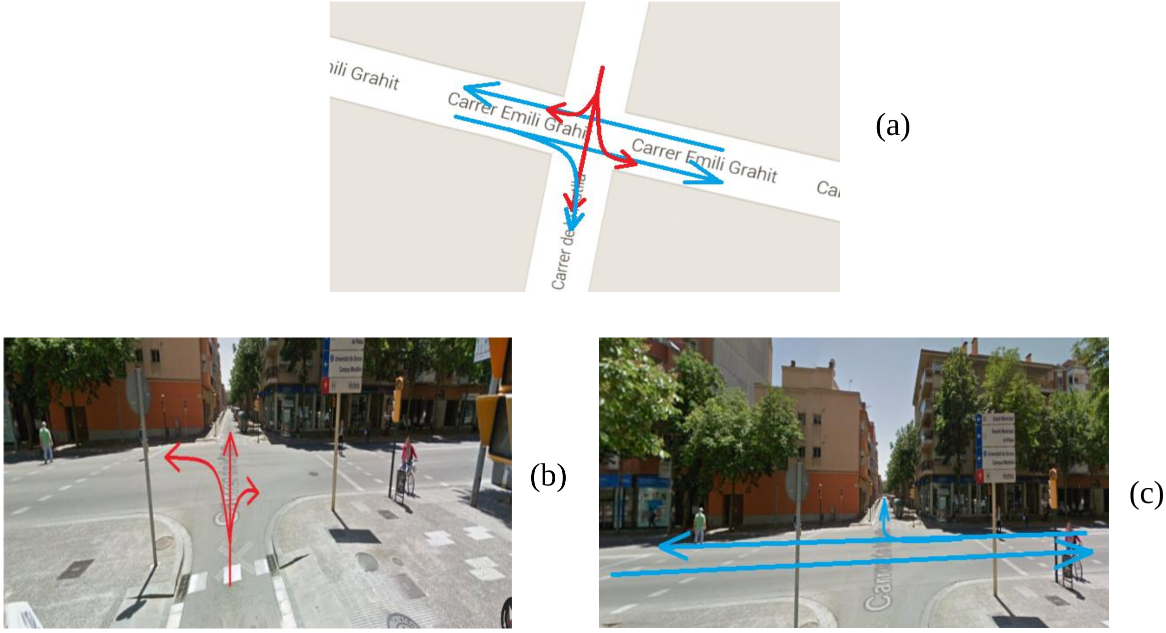

Figura 10: Cruïlla de dues fases entre el carrer Emili Grahit i el carrer de la Rutlla.

Com podem veure en la figura 10 es tracta d'una cruïlla de dues fases. Mentre el trànsit blau té moviment, el trànsit vermell es troba parat ja que té el semàfor de color vermell. Quan el temps de verd del trànsit blau s'acaba, es posa el semàfor de color vermell i ja no pot passar. Tot seguit es posa el semàfor verd del trànsit vermell i llavors és el trànsit vermell que té moviment. Quan el temps de verd del trànsit vermell s'acaba, se l'hi posa el semàfor en vermell i torna a començar el procés.

Veiem que es tracta d'un cicle de dos moviment: un moviment del color blau i un moviment del color vermell, per això definirem aquest temps com a intersecció de dues fases.

Llavors també tenim les cruïlles amb un temps de cicle compost per tres fases, que seran aquelles que cada cicle constarà de tres moviments. El funcionament és el mateix que l'anterior, es tracta que els semàfors han d'anar regulant el pas de circulació de cada moviment de manera periòdica, jugant amb els temps de fase en verd i fase en vermell. Un exemple serà la intersecció entre el carrer Migdia i el carrer Emili Grahit com es pot veure en la figura 11.

Font: Elaboració

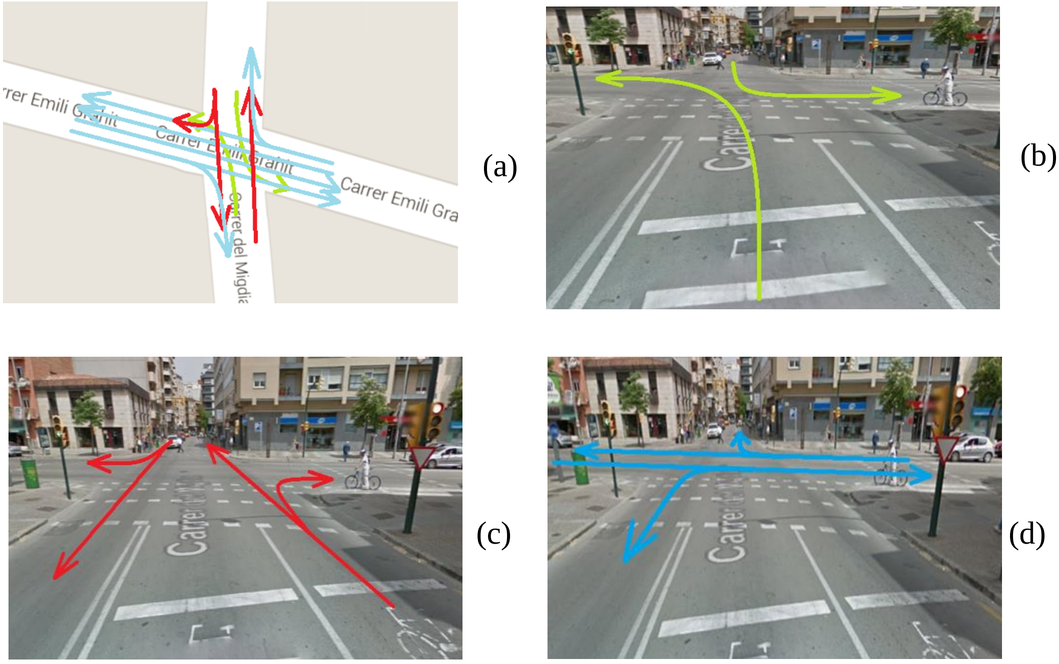

Figura 11: Cruïlla de tres fases que trobem en la intersecció entre el carrer Migdia i el carrer Emili Grahit.

4.2.2 Cruïlles semafòriques segons el servei

Les cruïlles a part de definir-se amb el nombre de fases també és defineixen amb el nivell de servei. Aquesta classificació és una mesura qualitativa que ens indica en quines condicions opera el flux vehicular. Ens aporta una idea de si la densitat i el flux que circulen per la cruïlla són adequats o no. Per fer-ho s'utilitza el temps de demora que tenen els vehicles aturats degut als semàfors amb períodes de 15 minuts. La classificació ens dóna 6 tipus de serveis diferents atribuint una lletra a cada servei (A,B,C,D,E i F) que va de millor a pitjor.

Nivell de servei A: el temps de parada no arriba a cinc segons per vehicle. La gran majoria dels vehicles que arriben a la intersecció es troben el semàfor en verd, i només paren en casos excepcionals. Els semàfors tenen cicles molt curts, i per això poden aconseguir que no parin ni cinc segons. Un exemple podria ser el semàfor que serveix per controlar la velocitat dels vehicles que es posa vermell quan detecta que hi ha un vehicle que excedeix la velocitat de la via, però quan el vehicle redueix la velocitat, el semàfors es torna a posar de color verd sense necessitat de parar en alguns casos.

Nivell de servei B: el temps de demora es troba entre 5 i 15 segons per vehicle. En aquesta cruïlla ja comencen a aparèixer les primeres restriccions i els vehicles es comencen a aturar.

Nivell de servei C: el temps de demora és entre 15 i 25 segons per vehicle. Molt utilitzada per a fer una regulació del trànsit on les dues vies tenen una importància similar. Les longituds dels cicles són llargues i aquest fet provoca que es formin unes cues que ja comencen a ser significatives. El cotxes ja es troben parats durant un període de temps important.

Nivell de servei D: té un temps de demora entre 25 i 40 segons per vehicle. En aquest nivell ja es pot observar que les cues són més freqüents, les longituds de cicles són més llargues i la relació entre el volum i la densitat és elevada.

Nivell de servei E: El temps de demora ja es troba entre els 40 i els 60 segons per vehicle. Aquest nivell és el límit del nivell dels serveis que es considera com a acceptable, ja que es considera que haver d’esperar-se entre 40-60 segons és el màxim que s’hauria d’esperar un vehicle. Com hem mencionat anteriorment, aquesta és una qualificació qualitativa.

Nivell de servei F: Descriu situacions a on el temps de demora és superior a 60 segons per vehicle. Aquest nivell és considerat inacceptable per a la gran majoria dels conductors. Perquè els temps de demora sigui tant alts, significa que hi ha hagut un sobresaturació, és a dir, que el flux d’arribada ha sobrepassat a la capacitat suposada per la via, i s’han format cues llargues i amb uns temps d’espera bastant importants.

4.3 **Semàfors**

4.3.1 Introducció

Un semàfor és un dispositiu electromagnètic o electrònic amb la utilitat de poder regular el trànsit tant per a vehicles com per a vianants. El seu funcionament es basa en la il·luminació de tres colors, verd (permís per passar), groc/ambre (avís que s’està a punt de posar vermell) i vermell (prohibit el pas). El color del semàfor es va combinant en un cicle, i així tots els vehicles o vianants tenen una franja de temps per poder passar mentre els altres esperen el seu torn.

4.3.2 Tipus de semàfors

Actualment s’utilitzen tres tipus de semàfors diferents.

El primer que comentarem és el semàfors de temps fix. Com indica el seu nom tenen un temps de cicle constant definit per a cada franja horària. Són els semàfors més utilitzats en les zones urbanes, sobretot quan hi ha una cadena de semàfors, degut a la seva senzillesa. Aquests semàfors que formen la cadena tenen una coordinació molt precisa entre ells, i per això són molt regulars alhora de controlar el trànsit. El desavantatge que tenen és que no incorporen detectors per poder anar lligats al número de vehicles que hi passen, per tant no es poden modificar en cas que hi hagi un excés de vehicles en hores concretes. Evidentment, al no tenir els detectors, aquests semàfors són els més assequibles econòmicament i els que tenen un cost de conservació menor.

L'altre tipus de semàfors que podem trobar són els semàfors accionats pel trànsit. Aquests sí que tenen detectors per tal de poder-se adaptar al nombre de vehicles que es troben en el sistema. A través de la intensitat i del flux que detecta el semàfor, ells decideixen les accions que faran: si canviar de fase, si dura més temps en verd, etc. Existeixen limitacions en el tema del temps, el semàfor té assignat un temps mínim i un temps màxim per a cada fase per tal de poder regular amb cert control el trànsit i evitar llargues esperes a una de les vies. Aquests tipus de semàfors s'utilitzen sobretot en interseccions on el nombre de vehicles que podem trobar és molt irregular.

L'últim tipus de semàfor que podem trobar actualment per les carreteres és el semàfor que té control centralitzat. Aquests semàfors són controlats per un ordinador central, que sol controlar tota una zona de semàfors. Aquest ordinador central llegeix els detectors que estan col·locats per la zona i dissenya una seqüenciació no d'un semàfors, sinó de tota una zona. Són semàfors que s'utilitzen molt en les gran ciutats i en zones molt poblades, on el trànsit és molt irregular i complex.

4.3.3 Modelització d'un cicle de semàfor

En el nostre projecte, un dels nostres objectius era intentar reduir el temps d'espera dels vehicles en la cruïlla que analitzem. Una manera d'aconseguir l'objectiu és canviar els temps de cicle dels semàfors i observar si podem trobar alguna combinació que ho aconsegueixi. Per fer-ho necessitarem calcular un temps de cicle i llavors comprovar en la simulació si realment la proposta que hem fet és millor o no que l'actual.

Per la elecció del programa hem decidit escollir el programa que correspongui a una franja horària on el flux de vehicles sigui més intens. En la programació com veurem més endavant, tenim dos programes que es fan servir quan el flux és molt intens, que són el programa 1 i el programa 3. El programa 1 s'utilitza a la franja horària del matí, concretament de les 7:00 a les 9:30, mentre que el programa 3 s'utilitza entre les 16:30 i les 20:30. En aquest cas, el programa 1 no té una intensitat regular de vehicles, ja que té un creixement de la intensitat a partir de les 8:30. Abans els valors són una mica baixos, per això alhora de fer la mitjana ens trobem que és inferior a la del programa 3, ja que per la tarda el trànsit es manté intens durant tota el temps. Per tant hem decidit agafar el programa 3 per intentar aplicar la nostra proposta de millora.

En les taules 1 i 2 trobem la representació dels semàfors en la cruïlla i els seus temps de fase actuals. Veiem que el programa 3 consta d'un temps de cicle de 110 segons. Aquest temps es reparteix en diferents parts: la fase en verd, la fase d'ambre, la fase de tot vermell i la fase de vermell. Com es pot veure la fase en verd no està repartida equitativament, aquest fet és degut que el flux de trànsit en la carretera Barcelona és més gran que el que podem trobar en el carrer Emili Grahit, i per tant se li dóna un temps de verd major per intentar equilibrar així les cues que es formen.

A més a més podem veure que la fase d'ambre ens ocupa 8 segons del temps de cicle i el temps de tot vermell ens n'ocupa 6. Aquests temps sí que es reparteixen equitativament ja que com veurem més endavant no depenen del flux.

Font: Elaboració pròpia

Grup\Fase			1	a	b	2	a	b
1			V	A	R	R	R	R
2			V	A	R	R	R	R
3			R	R	R	V	A	R
4			R	R	R	V	A	R
5			V	A	R	R	R	R
6			V	A	R	R	R	R
7			R	R	R	V	A	R
8			R	R	R	V	A	R

(a)

Grups		
1		Carretera de Barcelona dir. Sud
2		Carretera de Barcelona dir. Nord
3		Sortida carrer Emili Grahit
4		Sortida carrer passeig d'Olot
5		Pas de vianants Emili Grahit
6		Pas de vianants Passeig d'Olot
7		Pas de vianants carretera Barcelona.
8		Pas de vianants carretera Barcelona.

(b)

Taula 1: Representació del semàfors en la cruïlla.

Font: Elaboració pròpia

FASE			1	a	b	2	a	b	Des.	Cicle.
Programes			>	4	3	>	4	3		
3			50			46			108	110

Taula 2: Cicle del semàfor actual

Per a la realització d'un estudi d'un cicle d'un semàfor en una cruïlla s'han de seguir alguns passos i anar calculant alguns valors fins a obtenir el nou programa semafòric. A mesura que anem avançat cada pas anirem explicant en què consisteix i anirem calculant els valors que ens vagin sortint.

<u>Pas 1: Obtenció del factor de vehicles pesats.</u>

El primer que ens farà falta serà calcular el factor de vehicles pesants que tindrem a la via. Per fer-ho utilitzarem l'equació 7:

$$f_{vp} = \frac{100}{100 + P_c(E_c - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)} \qquad \text{(Eq.7)}$$

On:

f_{vp}: Factor d'ajustament per defecte dels vehicles pesats.
P_c: Percentatge de camions a la via
P_B: Percentatge d'autobusos a la via
P_R: Percentatge de vehicles recreatius a la via
E_c: Automòbils equivalents a un camió
E_B: Automòbils equivalents a un autobús
E_R: Automòbils equivalents a un vehicle recreatiu

Lògicament no requereix el mateix temps ni ocupa el mateix espai en una via de circulació un cotxe que un autobús o un camió. A més a més, alhora d'accelerar aquests vehicles pesants són més lents i ocupen més espai, per tant la cua serà més llarga i retardarà el temps de la cua.

Per trobar el percentatge que tenim de vehicles pesants a la nostra cruïlla he hagut de fer una extrapolació. En el treball "La mobilitat quotidiana a les comarques Gironines" de Gutiérrez, O. es troba la taula 3. Aquesta taula ens indica els percentatges d'utilització dels mitjans de transport en la província de Girona. En el meu cas he extrapolat aquestes dades referents a tota la província de Girona, i les he tractat com si, a la ciutat de Girona, es complís exactament la mateix proporció.

Font: Gutiérrez, O. (2008). ***La mobilitat quotidiana a les comarques Gironines.***

	Dia feiner		Dia festiu	
Mitjà de transport principal	**Desplaçaments**	**%**	**Desplaçaments**	**%**
A peu	818.124	39,9	515.674	35,6
Bicicleta	35.332	1,7	19.793	1,4
Modes no motoritzats	**853.456**	**41,6**	**535.467**	**37,0**
Autobús urbà	17.965	0,9	5.889	0,4
Autobús interurbà	14.368	0,7	4.369	0,3
Metro	1.906	0,1	895	0,1
Tramvia	69	0,0	160	0,0
FGC	980	0,0	943	0,1
Rodalies Renfe	17.074	0,8	5.371	0,4
Autobús empresa	5.715	0,3	942	0,1
Autobús escolar	25.054	1,2	2.366	0,2
Autocar (excursions)	1.815	0,1	6.518	0,5
Taxi	2.023	0,1	1.755	0,1
Tren regional/llarg recorregut	2.970	0,1	2.127	0,1
Avió	211	0,0	657	0,0
Altres transport públic	0	0,0	137	0,0
Transport públic	**90.151**	**4,4**	**32.129**	**2,2**
Amb cotxe com a conductor	802.038	39,1	534.996	37,0
Amb cotxe com a acompanyant	206.095	10,1	289.436	20,0
Amb moto com a conductor	73.307	3,6	38.579	2,7
Amb moto com a acompanyant	4.002	0,2	5.310	0,4
Furgoneta/camió	18.024	0,9	6.893	0,5
Altres vehicle privat	2.308	0,1	5.066	0,3
No ho sap / No contesta	26	0,0	0	0,0
Transport privat	**1.105.800**	**54,0**	**880.280**	**60,8**
Total	**2.049.407**	**100,0**	**1.447.875**	**100,0**

Font: elaboració a partir de les dades de l'ATM, Generalitat de Catalunya i IERMB, 2006.

Taula 3: Percentatge de transports utilitzats a les Comarques Gironines

En la taula 3 podem veure com el 53% de la gent es desplaça amb cotxe o moto. Si agafem aquest valor com el de referència per el nostre projecte obtenim que un 5,04% dels automòbils són els autobusos i el 1,7% dels vehicles que circulen per la nostra cruïlla són vehicles pesants. Entenem com a vehicle pesant els vehicles que tenen una mida superior a la mida d'un cotxe, alguns exemples poden ser camions, grues, furgonetes grosses, vehicles amb remolc, etc.

Un cop hem obtingut el percentatge de vehicles, ara ens falta donar valor als paràmetres d'automòbils equivalents per a poder obtenir el factor de vehicles pesants. Per fer-ho anirem a la taula 4:

Font: Tapia, J. G., Veizaga, R. D. (2006). ***Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la assignatura de Ingeniería de tráfico.***

FACTOR	VALOR	OBSERVACION
E_C, E_B	1,4 a 1,6	Valores comúnmente utilizados, sin embargo, pueden ser mayores.
E_C, E_B	1,5	Para accesos con pendientes cercanos al 0% con predominio de camiones livianos o medianos.
E_V	1,4 a 1,6	Para vueltas hacia la izquierda.
E_V	1 a 1,4	Para vueltas hacia la derecha.
FHMD	0,95	Para proyecto y diseño de planes de tiempos del Semáforo.

Ref. Ingeniería de tránsito de Rafael Cal y Mayor R. & James Cárdenas G.

Taula 4: Paràmetres d'automòbils equivalents i de girs.

Dels paràmetres dels automòbils equivalents hem escollit pels dos casos el valor de 1.5, ja que la taula 4 ens dóna un marge de valor entre 1,4 i 1,6.

En el nostre cas, la cruïlla no permet cap gir a l'esquerra per tant el valor $E_{ve} = 0$, mentre que pel paràmetre del gir dret li donarem el valor de $E_{vd} = 1.4$, ja que com veurem més endavant considerarem una proporció elevada de cotxes que giren a la dreta. El factor d'hora de màxima demanda (FHMD) serà de 0,95, ja que ens trobem dissenyant els temps dels semàfors.

Un cop ja tenim tots els paràmetres localitzats ja podem anar a trobar el factor de vehicles pesants:

$$f_{vp} = \frac{100}{100 + P_c(E_c - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)} = \frac{100}{100 + 1.7(1.5 - 1) + 5.04(1.5 - 1)}$$

$$\boldsymbol{f_{vp} = 0.97} \qquad \text{(Eq.8)}$$

Pas 2: Fluxos directes equivalents.

Com és lògic pensar, no tarden el mateix temps els vehicles que segueixen recte que els vehicles que giren a la dreta a l'hora de travessar una cruïlla. Els vehicles que giren cap a un costat han de frenar i han de maniobrar. Aquestes accions provoquen que tardin més i per tant ho tindrem en consideració. Per això hem utilitzat les dades que ens ha enviat l'Ajuntament de Girona, i a través de la suma i de les restes de vehicles de cada carril hem pogut arribar a esbrinar quin és el percentatge dels vehicles de cada carril que gira cap a la dreta. En la nostra cruïlla no existeix cap gir cap a l'esquerra.

Ara anirem a calcular el percentatge de girs que trobem a la cruïlla, per fer-ho utilitzarem la figura 12 com a guia.

Font: Departament de Mobilitat, Ajuntament de Girona.

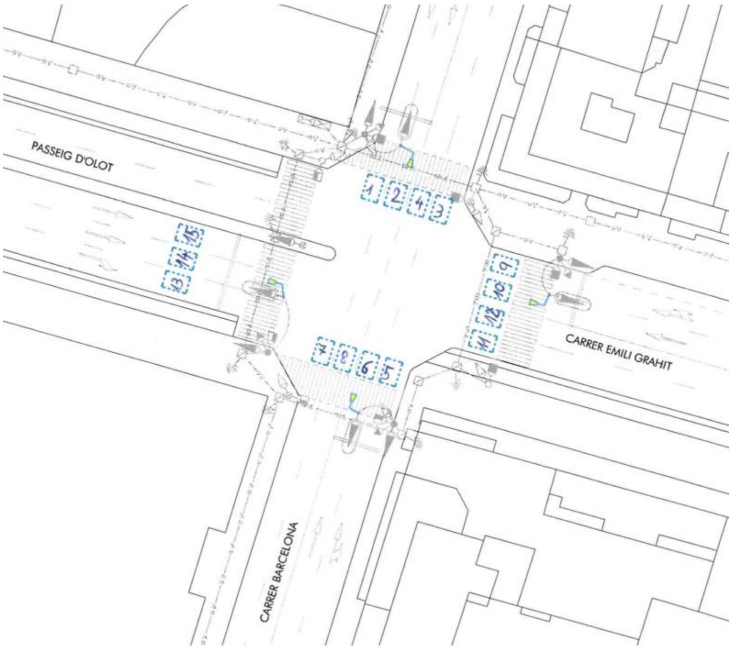

Figura 12: Situació dels carrils de la cruïlla.

Com podem veure a la figura 12 hi ha un punt que ja sabem el percentatge de gir, ja que no hi ha cap altra alternativa. El passeig d'Olot (carrils 13-15), únicament té un sentit per a cada carril. Per tant les dades del carril 13 ens indiquen els vehicles que han girat i les dades dels carrils 14 i 15 ens indiquen els vehicles que han seguit rectes. En canvi, en el carrils 1, 5 i 9 haurem de calcular el percentatge de vehicles que giren. Començarem pel carril 1.

$$Carril\ 7 = Carril\ 13 + Carril\ 1 - Carril\ 1\ (gir)$$

$$Carril\ 1\ (gir) = -Carril\ 7 + Carril\ 13 + Carril\ 1$$

Si fem la suma de tots els vehicles que giren obtenim que ens giren 1741 vehicles. Tenint en compte que el nombre total de vehicles que passen pel carril 1 és de 6489, obtenim que un 21,15% dels vehicles del carril 1 giren cap a la dreta.

Ara farem el mateix procediment amb el carril 5.

$$Carril\ 11 = Carril\ 14 + Carril\ 5\ (gir)$$

$$Carril\ 5\ (gir) = Carril\ 11 - Carril\ 14$$

Pel carril 5 obtenim que ens giren 2335 vehicles. Tenint en compte que el nombre total de vehicles que hi passen és de 6488, obtenim que un 26,46% dels vehicles del carril giren cap a la dreta i se'n van cap a la carretera Barcelona.

Ja per acabar tornarem a repetir al mateix procediment pel carril 9.

$$Carril\ 3 = Carril\ 5 - Carril\ 5\ (gir) + Carril\ 9\ (gir)$$

$$Carril\ 9\ (gir) = Carril\ 3 - Carril\ 5 + Carril\ 5\ (gir)$$

Pel carril 9 tenim hem tingut un problema i és que hem tingut un nombre de vehicles que giren superior als que passen pel carril 9. Aquest fet pot ser perquè les dades del carril 3 no siguin del tot correctes. Però veient que els altres dos carrils el percentatge de gir és de 21,15% i de 26,46% hem decidit agafar un valor entre els dos que coneixem. Així suposarem que pel carril 9 el percentatge de vehicles que giren cap a la dreta serà la mitjana dels dos percentatges anteriors, per tant de 23,80%. Això significa que tindrem 1157 vehicles que giren, per un total de 4861 vehicles que té el carril 9.

Un cop ja sabem els vehicles que giren farem una taula equivalent per comptabilitzar tots els vehicles que tiren recte amb els vehicles que giren, i així poder mirar quin és el carril que tarda més en travessar la cruïlla. Aquest carril serà amb el que ens basarem per crear el cicle del semàfor.

Per a poder realitzar aquesta equivalència utilitzarem al següent fórmula:

$$q_{ADE} = \frac{VHMD}{FHMD}\left(\frac{1}{f_{vp}}\right) * E_v \qquad \text{(Eq.9)}$$

On:

q_{ADE}: flux d'automòbils directes equivalents.
E_v: factor per moviment de volta.
$FHMD$: factor d'hora de màxima demanda
$VHMD$: Volum horari de màxima demanda
f_{vp}: factor d'ajustament per vehicles pesats.

A través de l'equació 9 hem construït la següent taula 5 que ens indica els automòbils directes equivalents (ADE) de cada carril. El VHMD l'hem tret de les dades que ens ha proporcionat l'Ajuntament de Girona. Hem utilitzat el valor màxim multiplicat per 4, ja que ha de ser vehicles/hora i les nostres dades els teníem cada 15 minuts.

Font: Elaboració pròpia

	Carril	Moviment	VHMD Automòbils/h	FHMD	f_{vp}	E_v ADE	q_v ADE/h	q_t ADE/h
Fase 1	Carril 1	Recte	410	0,95	0,97	1	445	612
		Dreta	110	0,95	0,97	1,4	167	
	Carril 2	Recte	632	0,95	0,97	1	686	**686**
	Carril 5	Recte	371	0,95	0,97	1	403	605
		Dreta	133	0,95	0,97	1,4	202	
	Carril 6	Recte	512	0,95	0,97	1	556	556
Fase 2	Carril 9	Recte	302	0,95	0,97	1	328	471
		Dreta	94	0,95	0,97	1,4	143	
	Carril 10	Recte	448	0,95	0,97	1	486	**486**
	Carril 13	Dreta	64	0,95	0,97	1,4	97	97
	Carril 14	Recte	408	0,95	0,97	1	443	443
	Carril 15	Recte	232	0,95	0,97	1	252	252

Taula 5: Valors dels automòbils directes equivalents per a cada carril

NOTA: Els valors en negreta són els fluxos crítics o màxims de cada fase, equivalen a q_i màx.

Per tant, per a la realització de la nostra proposta del semàfor haurem d'utilitzar un flux equivalent de 686 vehicles equivalents/h per la carretera Barcelona i de 486 vehicles equivalents/h pel carrer Emili Grahit.

Pas 3: Càlcul de l'interval de canvi de fase.

L'interval de canvi de fase té la funció d'alertar al conductor que es produirà un canvi en la senyalització de la intersecció. Aquest canvi de fase ha de considerar el temps de percepció-reacció del conductor, el temps dedicat a la frenada i el temps necessari per a poder creuar la intersecció sense patir cap tipus de perill.

Per el càlcul d'aquest interval utilitzarem la fórmula:

$$y = \left(t + \frac{v}{2a}\right) + \left(\frac{W+L}{v}\right) \qquad \text{(Eq.10)}$$

$\left(t + \frac{v}{2a}\right)$: Equival al temps on el semàfor es troba en groc. És el temps necessari perquè el vehicle pugui recórrer la distància de frenada amb seguretat.

$\left(\frac{W+L}{v}\right)$: És el temps on totes les senyalitzacions de la cruïlla es troben en vermell, s'anomena temps de tot vermell. És el temps necessari perquè el vehicle que ha creuat el semàfor en ambre pugui travessar la cruïlla amb seguretat.

On:

y: Interval de canvi de fase (s)
t: Temps de percepció-reacció del conductor (normalment s'agafa 1 segon)
v: velocitat a la qual s'aproximen els vehicles a la cruïlla (m/s)
a: Taxa de desceleració dels vehicles (usualment 3,05m/s^2)

W: Amplada de la intersecció (m)
L: Longitud del vehicle (com a mitjana és sol agafar 6,10 m)

En el nostre cas, tot i tenir el límit de velocitat a 50 km/h, a l'haver-hi un radar de semàfor que indica si et passes el semàfor en vermell i en cas afirmatiu en quina velocitat l'has passat, penso que els conductors al passar per allà disminueixen la velocitat d'arribada a la cruïlla. Per aquest motiu he decidit prendre com a valor de la velocitat d'arribada a la cruïlla 40 km/h. Respecte la part de la fórmula que ens parla del temps de tot vermell, en la nostre intersecció tenim dues amplades diferents, ja que a la carretera Barcelona hi trobem 4 carrils mentre que al passeig d'Olot n'hi trobem 5. Per tant, tindrem dos intervals de fase un per a cada sentit.

L'interval de fase de la carretera Barcelona és:

$$y = \left(t + \frac{v}{2a}\right) + \left(\frac{W+L}{v}\right) = \left(1 + \frac{11{,}11}{2*3{,}05}\right) + \left(\frac{2{,}80*4+6{,}10}{11{,}11}\right) \qquad \text{(Eq.11)}$$

$$y = 2{,}82 + 1{,}55 = 4{,}37$$

Per tant assumirem que el temps d'ambre hauria de ser de 3 segons i el temps de tot vermell hauria de ser de 2 segons. En el cas que preguéssim la velocitat d'arribada a la cruïlla la velocitat límit permesa, és a dir, 50 km/h, llavors tindríem un temps de 3,28 segons, i per tant hauríem de tenir un temps en ambre de 4 segons. En el nostre cas deixarem els 3 segons en ambre, ja que considero que els 4 segons és excessiu per vies de 50 km/h. També reduirem el temps de tot vermell de 3 segons a 2 segons. Per tant tindrem que l'interval de canvi de fase serà de 5 segons.

L'interval de fase del passeig d'Olot és:

$$y = \left(t + \frac{v}{2a}\right) + \left(\frac{W+L}{v}\right) = \left(1 + \frac{11{,}11}{2*3{,}05}\right) + \left(\frac{2{,}40*5+1{,}5^{*}+6{,}10}{11{,}11}\right) \qquad \text{(Eq.12)}$$

$$y = 2{,}82 + 1{,}63 = 4{,}45$$

Tot i tenir més amplada en les vies del passeig d'Olot, obtenim el mateix interval de canvi de fase pels dos sentits, ja que s'arrodoneixen cap al valor més alt, i la diferència entre les amplades del carrer no és prou gran com per haver d'augmentar el temps de tot vermell. Per tant seguirem tenint un temps de canvi de fase de 5 segons.

A partir de l'interval de canvi de fase podem calcular el temps total perdut per cicle (L), que equival a la suma dels 4 temps que acabem de calcular, els dos temps d'ambre i els dos temps de tot vermell.

* En aquest cas, el carrer té com una mica d'illeta al mig dels dos sentits.

$$L = 3 + 2 + 3 + 2 = 10\ segons \qquad \text{(Eq.13)}$$

Per a cada cicle de semàfors tenim un temps perdut de 10 segons.

Pas 4: Relació entre el flux màxim equivalent i el flux de saturació (s).

Els fluxos màxims equivalents són els valors que hem calculat a la taula 5. Aquests valors seran els que relacionarem amb el flux de saturació per obtenir una relació entre el pas de cada fase. El flux de saturació és defineix com el màxim de vehicles que poden travessar una intersecció semafòrica per un o més carrils, sempre que el semàfor es trobi en verd. Mitjançant aquest valor, llavors podrem arribar a conèixer el temps de cicle en verd de cada fase.

Per obtenir aquest valor tant significatiu hi ha diferents factors que haurem de considerar. El que farem és començar amb el flux de saturació ideal (1900 veh/h de carril verd/ carril), i llavors anirem aplicant factors d'ajustament, per tal d'obtenir un flux de saturació real i que representi les condicions de la nostra intersecció.

$$S_i = S_0 \cdot N \cdot F_w \cdot F_{HV} \cdot F_g \cdot F_p \cdot F_{bb} \cdot F_a \cdot F_{LU} \cdot F_{LT} \cdot F_{RT} \cdot F_{Lpb} \cdot F_{Rpb} \qquad \text{(Eq.14)}$$

On:

S_i: Flux de saturació per un grup de carrils.
S_0: Flux de saturació ideal per carril.
N: Nombre de carrils

Ara explicarem en que consisteix cada factor d'ajustament i com es calcula.

F_W: Factor d'ajustament per l'amplada del carril

L'amplada del carril té una importància significativa alhora d'obtenir el flux de saturació ja que en carrils estrets el flux de saturació és menor que en carrils amplis. Per aquest motiu es fa un ajustament del flux depenent de l'amplada del carril. Per fer-ho utilitzarem la fórmula següent:

$$F_w = 1 + \frac{W-3,6}{9} \qquad \text{(Eq.15)}$$

On la W significa l'amplada del carril. En el nostre cas, tenim uns carrils de 2,4 metres i uns de 2,8 metres. En aquest cas utilitzarem el carril amb una amplada de 2,8 metres perquè és el carril que té el flux és més gran de la cruïlla.

$$\boldsymbol{F_w} = 1 + \frac{W-3,6}{9} = 1 + \frac{2,8-3,6}{9} = \mathbf{0,91} \qquad \text{(Eq.16)}$$

F_{HV}: Factor d'ajustament per vehicles pesants.

Calculat anteriorment en el pas 1:

$$\boldsymbol{F_{HV} = 0,97} \qquad \text{(Eq.17)}$$

F_g:Factor d'ajustament per pendent.

Aquest factor determina a través de la pendent de la cruïlla, si serà més fàcil o menys que travessi el flux de vehicles, és a dir, si la pendent és molt elevada la velocitat dels vehicles serà menor, i per tant el flux disminuirà. A més a més provocarà un augment en el temps d'espera a ,a cruïlla i un augment en el temps de les cues. El la nostra cruïlla no tenim cap mena de pendent, per la qual cosa aquest factor serà igual a 1.

$$\boldsymbol{F_g} = 1 + \frac{\%G}{200} = 1 + \frac{0}{200} = \boldsymbol{1} \qquad \text{(Eq.18)}$$

F_p:Factor d'ajustament per estacionament del carril.

Aquest factor té en consideració els vehicles que s'estacionen en un carril, impedint el pas del flux. En el nostre cas els vehicles estacionats a la cruïlla són nuls, per tant:

$$\boldsymbol{F_p} = \frac{\left(N - 0{,}1 - \frac{18Nm}{3600}\right)}{N} = \frac{\left(2 - 0{,}1 - \frac{18 \cdot 0}{3600}\right)}{2} = \boldsymbol{0,95} \qquad \text{(Eq.19)}$$

On :

N: Simbolitza el nombre de carrils

Nm: Simbolitza els cotxes estacionats en la cruïlla.

En el sentit de la via amb més flux (carril 2), tenim dos carrils i zero cotxes estacionats, per tant obtenim un factor d'estacionament de 0,95.

F_{bb}:Factor d'ajustament per bloqueig de parades d'autobús.

Aquest factor indica l'impacte que tenen les parades de l'autobús en la cruïlla. Perquè puguem considerar que una parada d'autobús efecte al flux de la cruïlla, aquesta s'ha de trobar a menys de 75 metres i ha de generar una cua de vehicles quan l'autobús es pari.

En el nostre cas tenim una parada d'autobús, que genera cua en el carril 13 (carril que serveix per girar a l'esquerra). L'autobús urbà passa cada 15 minuts per aquesta zona, per tant cada hora realitzarà 4 paredes.

$$\boldsymbol{F_{bb}} = \frac{\left(N - \frac{14.4Nb}{3600}\right)}{N} = \frac{\left(1 - \frac{14.4 \cdot 4}{3600}\right)}{1} = \boldsymbol{0,984} \qquad \text{(Eq.20)}$$

On :

N: Simbolitza el nombre de carrils afectats.

Nb: Número de parades d'autobusos que afecten a la cruïlla cada hora.

F_a:Factor d'ajustament per tipus d'àrea.

Aquest factor serveix per calcular els canvis de flux que poden arribar a patir els carrils, és a dir, aquest factor té en compte si tenim una reducció del carril, s'hi ha molts aparcaments, si trobem vehicles que poden arribar a bloquejar el trànsit, si tenim activitat de taxis i de busos elevades, etc. Aquest factor es consideraria significatiu si ens trobéssim pel centre de Girona o en gran centres comercials, però no és el nostre cas. Per tant,

$$\boldsymbol{F_a = 1} \qquad \text{(Eq.21)}$$

F_{LU}:Factor d'ajustament per la utilització del carril.

El factor d'ajustament del carril mesura la diferència que hi ha en la distribució d'arribades de vehicles per a cada carril en un grup de carrils. Aquest factor es basa en el flux del carril amb el volum més alt i s'utilitza la següent expressió:

$$\boldsymbol{F_{LU}} = \frac{V_g}{V_{g1} \cdot N} \quad (Eq. 10) \qquad \text{(Eq.22)}$$

On:

F_{LU}: Factor d'ajustament d'utilització del carril

V_g: Percentatge del flux de demanda sense ajustar per al grup de carrils (veh/h)

V_{g1}: Percentatge del flux de demanda sense ajustar per un únic carril, amb el volum més elevat en el carril (veh/h)

N: Número de carrils en el grup de carrils.

$$\boldsymbol{F_{LU}} = \frac{V_g}{V_{g1} \cdot N} = \frac{632+520}{632 \cdot 2} = \boldsymbol{0,911} \qquad \text{(Eq.23)}$$

F_{LT} *i* F_{RT}:Factors d'ajustament per girs a l'esquerra i a la dreta.

El factor de gir a l'esquerra en la nostra cruïlla és 1, ja que no es pot fer cap tipus de gir cap a l'esquerra.

$$\boldsymbol{F_{LT} = 1} \qquad \text{(Eq.24)}$$

Per altre banda, sí que tenim girs a la dreta, per tant haurem d'analitzar el factor d'ajustament per girs a la dreta. Aquest factor determina la implicació que té el volum de vianants que creuen la via mentre els vehicles estan girant. Aquest fet provoca una disminució de la velocitat per part del vehicles que es tindrà en consideració.

A més a més, aquest factor haurem de considerar dos factors més: si el gir a la dreta és d'un carril exclusiu o compartit, i el nombre de vehicles en proporció que decideixen fer el gir.

En aquest cas trobem diferents equacions segons si el carril és exclusiu de gir o si és compartit. En el nostre cas es tracte d'un carril compartit, per tant utilitzarem la fórmula següent:

$$\boldsymbol{F_{RT}} = 1 - (0{,}15) \cdot P_{RT} = 1 - (0{,}15) \cdot 0{,}2646 = \mathbf{0{,}96} \qquad \text{(Eq.25)}$$

On $\boldsymbol{F_{RT}}$ fa referència al percentatge de vehicles que giren cap a la dreta, que es tracte d'un 26,46%.

$\boldsymbol{F_{Lpb}}$ ***i*** $\boldsymbol{F_{Rpb}}$**: <u>Factors d'ajustament per conflicte de vianants/ciclistes en el gir d'esquerra i dreta.</u>**

Igual que en el cas anterior, al no tenir gir a l'esquerra, el valor passa a prendre el valor 1.

$$\boldsymbol{F_{Lpb} = 1} \qquad \text{(Eq.26)}$$

Aquests dos factors determinen el conflicte que pot causar un vianant o una bicicleta travessant la via. Simbolitza el temps que es perdria en frenar, esperar que aquests passessin i seguir la marxa. Aquest factor només es té en consideració quan el flux de la via queda tallat o pels vianants o per les bicicletes.

En la nostra cruïlla, penso que ni els vianants ni les bicicletes tallen el flux de vehicles, per tant considero que el factor de conflicte en el gir a dreta també pren el valor 1.

$$\boldsymbol{F_{Rpb} = 1} \qquad \text{(Eq.27)}$$

Un cop hem definit ja tots els factor que intervenen en el càlcul del flux de saturació, ara anirem a trobar el seu valor. Per fer-ho introduirem tots els valors del factors que acabem de trobar en l'equació del flux de saturació:

$$S_i = S_0 \cdot N \cdot F_w \cdot F_{HV} \cdot F_g \cdot F_p \cdot F_{bb} \cdot F_a \cdot F_{LU} \cdot F_{LT} \cdot F_{RT} \cdot F_{Lpb} \cdot F_{Rpb}$$

$$S_i = 1900 \cdot 1 \cdot 0.91 \cdot 0.97 \cdot 1 \cdot 0.95 \cdot 0.984 \cdot 1 \cdot 0.911 \cdot 1 \cdot 0.96 \cdot 1 \qquad \text{(Eq.29)}$$

$$\boldsymbol{S_i = 1429\ \text{veh/h verda/carril}}$$

Un cop tenim el flux de saturació, ara podem anar a trobar la relació que hi ha entre els dos carrils amb el volum màxim de vehicles directes equivalents.

$$\boldsymbol{\beta_1} = \frac{q_{1màx}}{s} = \frac{686}{1429} = \boldsymbol{0,4801} \qquad \text{(Eq.30)}$$

$$\boldsymbol{\beta_2} = \frac{q_{2màx}}{s} = \frac{486}{1429} = \boldsymbol{0,3401} \qquad \text{(Eq.31)}$$

Pas 5: Càlcul de la longitud del cicle òptim (C_0)

Per conèixer el cicle òptim de la nostra intersecció hi ha una fórmula:

$$\mathbf{C_0} = \frac{1,5 \cdot L + 5}{1 - \sum_i^{\varphi} \beta_i} = \frac{1,5 \cdot 10 + 5}{1-(0,4801+0,3401)} = \boldsymbol{111,78} \ \approx \boldsymbol{110\ s} \qquad \text{(Eq.32)}$$

Hem d'agafar un temps de cicle múltiple de 5 segons, ja que els temps de cicles han de ser múltiples de 5 segons. Per tant, aproximarem els 111, 78 segons a un cicle òptim de tenir 110 segons.

Temps de fase en verd efectiu (g_T) equival al temps de cicle total menys el temps total perdut, per tant:

$$\boldsymbol{g_T} = 110 - 10 = \textbf{100 segons} \qquad \text{(Eq.33)}$$

Pas 6:Repartiment del temps verd efectiu entre les dues fases.

Per saber quin temps en verd li correspon a cada fase utilitzarem les equacions següents:

$$\boldsymbol{g_1} = \frac{\beta_1}{\beta_1+\beta_2} \cdot g_T = \frac{0,4801}{0,4801+0,3401} * 100 = 58,53 \ \approx \boldsymbol{59\ s} \qquad \text{(Eq.34)}$$

$$\boldsymbol{g_2} = \frac{\beta_2}{\beta_1+\beta_2} \cdot g_T = \frac{0,3401}{0,4801+0,3401} * 100 = 41,47 \ \approx \boldsymbol{41\ s} \qquad \text{(Eq.35)}$$

Un cop hem trobat els temps de fase en verd de cada carril, ara representarem la nostra proposta de millora.

Font: Elaboració pròpia

(a)

Grup\Fase			1	a	b	2	a	b
1			V	A	R	R	R	R
2			V	A	R	R	R	R
3			R	R	R	V	A	R
4			R	R	R	V	A	R
5			V	A	R	R	R	R
6			V	A	R	R	R	R
7			R	R	R	V	A	R
8			R	R	R	V	A	R

(b)

Grups		
1		Carretera de Barcelona dir. Sud
2		Carretera de Barcelona dir. Nord
3		Sortida carrer Emili Grahit
4		Sortida carrer passeig d'Olot
5		Pas de vianants Emili Grahit
6		Pas de vianants Passeig d'Olot
7		Pas de vianants carretera Barcelona.
8		Pas de vianants carretera Barcelona.

Taula 6: Representació del semàfors en la cruïlla.

Font: Elaboració pròpia.

FASE			1	a	b	2	a	b	Cicle.
Programes			>	3	2	>	3	2	
3			59			41			110

Taula 7: Cicle del semàfor de la nostra proposta de millora

En les taules 6 i 7 tenim representada la nostra proposta de millora. Com podem veure en la taula 2 (programa actual del semàfor), els dos semàfors tenen el mateix temps de cicle, però repartits de manera diferents. El programa actual no marca una diferència tant significativa entre els dos temps en verd, aquesta diferència és de 4 segons, mentre que la nostra proposta té uns 18 segons de diferència. Part d'aquest augment tant significatiu és pel fet de reduir el temps d'ambre i el temps de tot vermell un segon cada un. D'aquesta manera hem augmentat el temps de pas del semàfor en 4 segons en el seu global i hem tingut un temps major per repartir entre les fases en verd. Tot i això, la nostra proposat dóna més importància a la fase en verd de la carretera Barcelona que a la fase en verd del carrer Emili Grahit.

Anàlogament, com s'ha fet aquesta millora per aquest programa es poden fer les altres millores pels altres programes semafòrics però, degut a la repetibilitat i al volum de temps que seria necessari per poder duu a terme aquesta feina, s'ha cregut innecessari repetir-la.

Un cop hem finalitzat la nostra proposta del temps de cicle del semàfor, ara caldrà analitzar-la si realment és millor o no que la programació actual. Per fer-ho caldrà estudiar-la mitjançant les simulacions, que ens indicaran si podem arribar a complir l'objectiu de reduir les cues d'espera o si per contra, la nostra proposta les empitjora.

5 SIMULACIÓ DE LA CRUÏLLA

5.1 Introducció

5.1.1 Conceptes bàsics

L'objectiu de molts dels estudis que es realitzen consisteix en trobar relacions entre les entitats que formen el sistema, mesurar les prestacions i analitzar quin comportament té el sistema quan s'alteren les seves funcions. Aquest estudi és pot realitzar de dues formes: amb el sistema real o amb un model.

En cas que tinguem el sistema real, llavors l'estudi es basa en fer experiments a sobre el sistema per tal de veure quin comportament té. Perquè això passi, a part de poder tenir el sistema, hem de ser capaços de poder alterar les seves condicions, és a dir, en cas que jo volgués fer un estudi sobre la modificació de la salinitat del mar o sobre la modificació de la temperatura en una ciutat, aquestes condicions no les podria alterar, per tant no es podria fer l'estudi sobre el sistema real. A més a més, a vegades fer l'estudi de la realitat pot suposar un cost molt elevat. En aquests casos tampoc s'estudia directament de la realitat, sinó que primer es fa un model i llavors un cop acabat l'estudi sobre el model, s'extrapola a la realitat. Aquests models que s'utilitzen per substituir els sistemes reals solen ser de dos tipus: matemàtic o físic.

El models físics es basen en crear un prototip o un model a escala per tal de fer-li les proves i els canvis desitjats. És fa servir molt en l'àmbit de l'aeronàutica i de l'automoció. Per altra banda, els models matemàtics són models més teòrics que representen una realitat a través de relacions quantitatives i lògiques. En el nostre cas hem utilitzat un model matemàtic.

Un cop tenim el model matemàtic que representa la realitat, primer mirarem quina complexitat té. En cas que el model fos relativament senzill, podríem arribar a resoldre'l i llavors obtindríem una solució analítica. Sempre que sigui possible, tant a nivell de complexitat com a nivell econòmic, es prefereix la solució analítica abans que una simulació. No obstant, la elevada complexitat dels sistemes reals dificulta que un model que s'adeqüi correctament a la realitat sigui un model senzill. Per tant, és habitual que ens trobem amb les simulacions. Una simulació consisteix en recrear varies evolucions temporals del model per poder obtenir el seu comportament mitjançant unes condicions.

5.1.2 Tipus de models de simulació

Existeixen diferents tipus de models de simulació i es poden classificar en diferents grups:

1- Segons l'instant de temps que representen. Trobem dos tipus: els estàtics que només representen un únic instant de temps; i els dinàmics que representen l'evolució d'un sistema al llarg d'un període de temps.
2- Segons la aleatorietat dels seus paràmetres. Per una banda tenim els models deterministes que són aquells que no tenen cap paràmetre a on hi intervingui el factor aleatori, i per l'altra banda tenim els models estocàstics o aleatoris que tenen almenys una variable aleatòria en el sistema.
3- Segons la manera en que evolucionen les variables al llarg del temps. Igual que amb els casos anteriors tenim dos tipus. Uns són els models discrets o models d'esdeveniments discrets que són els models a on les variables d'estat varien amb intervals concrets de temps. Els altres són els models continus que són aquells models que les variables d'estat van variant de manera contínua amb el temps de la simulació.

5.1.3 Avantatges i inconvenients de les simulacions

La utilització d'un sistema de simulació porta uns grans avantatges alhora de poder realitzar l'estudi del comportament del sistema. Esmentarem els principals avantatges de les simulacions:

1- Permet simular el comportament d'un sistema sota unes condicions específiques que a la realitat poden arribar a ser molt complicades de posar en pràctica.
2- Permet comparar dissenys i escollir el que obtingui uns resultats més favorables.
3- La simulació d'un sistema ens permet tenir un millor control sobre les condicions a la que es vol estudiar el sistema. Fins i tot, es pot arribar a tenir més control de les condicions a través d'una simulació que realitzant l'estudi directament sobre el propi sistema de la realitat.
4- Permet adequar el marc temporal ja sigui contraient-lo o expandint-lo segons ens convingui. Normalment es contrau el temps quan l'evolució del sistema és molt lenta i s'expandeix quan l'evolució del temps sol ser massa ràpida.

No obstant, la simulació d'un procés també té alguns inconvenients que esmentarem a continuació:

1- El disseny dels models de simulació és un procés laboriós, tant econòmicament com temporalment.
2- Les simulacions incorporen una variant aleatòria. Per això cap de les simulacions té el mateix resultat. Per aquest motiu mai es podrà obtenir el model òptim de la realitat mitjançant simulacions, ja que tots els resultats tindran una part d'aleatorietat. Es podrà arribar a obtenir un model que s'aproximi molt al resultat òptim, però no deixarà de ser una aproximació.
3- Les simulacions són sistemes aproximats al sistema real. Per aquest fet, depenent de l'aproximació que haguem fet alhora de dissenyar les simulacions, podria arribar a tenir solucions que no fossin correctes en el sistema real; per tant, sempre s'ha de validar el model de la simulació abans d'acceptar-lo com a correcte.

5.1.4 Simulador ARENA

L'Arena és un sistema de simulació que permet la construcció de models de simulació amb una gran varietat de camps. Tot i ser un programa amb un nivell de dificultat baix, permet desenvolupar un gran ventall de funcions per a obtenir una bona simulació, tals com animacions, anàlisis d'entrada, anàlisis de sortida, verificació del model, etc.

Els seus principals avantatges són:

- Té una eina i una capacitat de simulació molt bona i variada. Tant pot simular una fàbrica de cotxes com una sala d'espera en un hospital.
- Té una bona i senzilla interfície gràfica que permet comprendre amb més facilitat el disseny del model sense tenir uns coneixements previs de programació.
- Permet obtenir resultats estadístics abans, durant i després de la simulació.
- És un simulador intuïtiu ja que les simulacions estan basades en la col·locació i unions gràfiques dels diferents mòduls de processos.
- Té compatibilitat amb productes de Microsoft Office.

Tot i això, el programa de simulació Arena també consta d'alguns inconvenients:

- Té una compenetració molt baixa amb els altres programes de simulació, és a dir, que ens costaria molt poder obrir un programa fet amb el programari d'Arena amb un altre simulador.
- L'edició per estudiants té moltes limitacions (mòduls, blocs, entitats, etc.)

- El servei d’ajuda que transmet el simulador d’Arena és poca i no és suficientment clara com per poder resoldre els dubtes.

5.2 **Tractament de dades**

Per a la realització d’aquesta simulació, vam demanar les dades a l’Ajuntament de Girona, concretament al departament de Mobilitat. Aquest òrgan ens ha facilitat les dades tant semafòriques com de vehicles de les diverses cruïlles que tenien detectors i a les quals l’Ajuntament de Girona analitzava. De totes les cruïlles que teníem dades hem escollit la cruïlla entra la carretera Barcelona i el carrer Emili Grahit de Girona, ja que era l’única que hi havia dades per a cada carril.

Alhora de realitzar la simulació començarem simulant el conjunt de totes les dades de la cruïlla i no de la nostra proposta del semàfor, ja que només hem proposat una millora per a un programa semafòric, la qual cosa equival a una petita franja horària en un dia sencer i a nosaltres ens interessa saber com funciona la intersecció globalment. D’aquesta manera podrem observar el comportament de la intersecció amb diferents intensitats de fluxos, amb diferents franges horàries, podrem observar l’evolució del trànsit en un dia sencer, etc.

Per a poder realitzar les simulacions ens faran falta dos tipus de dades: les dades semafòriques de la cruïlla i les dades de trànsit.

5.2.1 Dades semafòriques

Per poder conèixer la regulació semafòrica em van enviar diferents tipus de dades: els programes que es feien servir per dia, les franges horàries en les quals tenien lloc, el temps de cicle, com estava distribuït cada programa, els punts a on els detectors detectaven els vehicles en la cruïlla, etc. Aquestes dades les veurem en el següent apartat.

Font: Departament de Mobilitat, Ajuntament de Girona.

Grup\Fase			1	a	b	2	a	b
1			V	A	R	R	R	R
2			V	A	R	R	R	R
3			R	R	R	V	A	R
4			R	R	R	V	A	R
5			V	A	R	R	R	R
6			V	A	R	R	R	R
7			R	R	R	V	A	R
8			R	R	R	V	A	R

(a)

FASE			1	a	b	2	a	b	Des.	Cicle.
Programes			>	4	3	>	4	3		
1			50			46			6	110
2			46			40			97	100
3			50			46			108	110
4			42			34			80	90
5			27			24			8	65
6			27			24			8	65

(b)

Grups			
1			Carretera de Barcelona dir. Sud
2			Carretera de Barcelona dir. Nord
3			Sortida carrer Emili Grahit
4			Sortida carrer passeig d'Olot
5			Pas de vianants Emili Grahit
6			Pas de vianants Passeig d'Olot
7			Pas de vianants carretera Barcelona.
8			Pas de vianants carretera Barcelona.

(c)

Taula 8: Cicle dels semàfors en la cruïlla amb la seva distribució

Com podem observar a la taula 8 tenim el temps de cada fase per a cada programa utilitzat i tenim els diferents tipus de programa que s'utilitzen per aquesta cruïlla.

La fase a simbolitza el temps on el semàfors es troba de color groc i la fase b simbolitza el temps de tot vermell, que com hem explicat anteriorment és el temps necessari per creuar la cruïlla amb seguretat en cas que travesséssim el semàfor en groc.

A més a més, també em van enviar la llista de programes de semàfors. Cada programa com podem veure a la taula 8, es composa d'un temps de cicle diferent i per tant s'aplica a diferents franges horàries depenen del volum de tràfic que circula per a la via. Un programa que té un temps de cicle llarg, i que per tant, té un temps de fase en verd gran s'utilitza en franges horàries a on el trànsit és elevat. Mentre que, els programes que contenen un cicle curt s'utilitzen en hores on el flux de vehicles és mínim.

Font: Departament de Mobilitat, Ajuntament de Girona.

(a)

	Tipus de Programa	Franja horària
Tipus dia 1	PROGRAMA 5	5:45
	PROGRAMA 4	7:00
	PROGRAMA 1	9:30
	PROGRAMA 2	16:30
	PROGRAMA 3	20:30
	PROGRAMA 4	23:30
	PROGRAMA 5	ENDAVANT

(b)

	Tipus de Programa	Franja horària
Tipus dia 2	PROGRAMA 5	6:00
	PROGRAMA 4	7:00
	PROGRAMA 1	9:30
	PROGRAMA 2	16:30
	PROGRAMA 3	20:00
	PROGRAMA 2	22:00
	PROGRAMA 4	ENDAVANT

(c)

	Tipus de Programa	Franja horària
Tipus dia 3	PROGRAMA 4	2:00
	PROGRAMA 5	7:00
	PROGRAMA 4	9:00
	PROGRAMA 1	13:00
	PROGRAMA 2	17:00
	PROGRAMA 3	20:30
	PROGRAMA 2	22:00
	PROGRAMA 4	ENDAVANT

(d)

	Tipus de Programa	Franja horària
Tipus dia 4	PROGRAMA 4	2:00
	PROGRAMA 5	7:30
	PROGRAMA 4	16:30
	PROGRAMA 2	20:30
	PROGRAMA 4	23:30
	PROGRAMA 5	ENDAVANT

Taula 9: Programació dels semàfors durant la setmana

A la taula 9 podem trobar els programes semafòrics separats per a cada franja horària i separats en 4 tipus de dies diferents. El tipus de dia ens indica en quin dia de la setmana ens trobem. El tipus de dia 1 s'aplica de dilluns a dijous, el tipus 2 als divendres, el tipus 3 als dissabte i el tipus 4 als diumenge.

A més a més, cada tipus de dia té la seva pròpia organització de programes semafòrics. Un exemple és que en els dies feiners, veiem com a les 7:00 ja entra en joc el programa 1, que és el programa que s'utilitza quan el trànsit és intens, ja que la gent va a treballar, porta els nens a l'escola, etc. Mentre que, si observem la programació del tipus 4, que equival als diumenges, el canvi de programa el tenim a les 7:30 i amb un programa de intensitat mitjana com és el programa 5. Per tant podem veure que cada dia de la setmana té el seu propi programari en funció de la intensitat de trànsit que circuli per la via.

Cal remarcar que en cas que aparegui algun dia festiu entre setmana la programació no ho té en consideració. Com ja veurem més endavant, el dilluns de Pasqua té el mateix programari que un dilluns feiner tot i que la intensitat de flux entre els dos dies és completament diferent. Aquí hi hauria una possible millora de cares a fer un treball futur, ja que com veurem més endavant, per molt que sigui un dilluns, al ser festiu, el trànsit és completament diferent.

5.2.2 Dades de trànsit

Un cop ja hem explicat tota la informació que hem tingut referent al sistema de la programació dels semàfors en la nostra cruïlla, ara explicarem també les dades que ens ha enviat l'Ajuntament de Girona sobre el trànsit.

Font: Departament de Mobilitat, Ajuntament de Girona

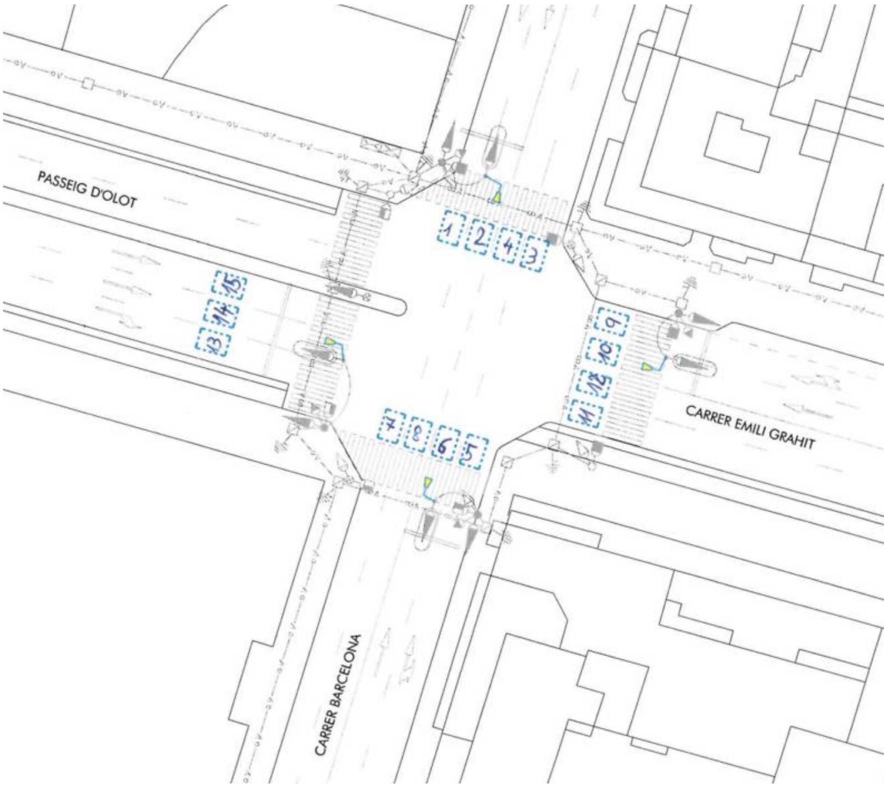

Figura 13: Situació d'on es troben els detectors.

A la figura 13 podem veure tots els carrils que tenim a la nostre cruïlla i el lloc en concret a on s'han agafat les dades. Això és important, tal i com hem explicat en l'apartat de *4.4.3 Modelització d'un cicle de semàfor*, per tal de poder calcular els cotxes que giren i d'aquesta manera poder trobar un cicle adequat per a aquesta cruïlla. A més a més, hem pogut observar per a quins carrils trobem més intensitat de vehicles i per quin menys.

L'Ajuntament de Girona em va passar dades dels 15 detectors que podem veure en la figura 13. Les dades venien donades amb el nombre de cotxes que passaven cada 5 minuts pel detector, durant tot l'any 2015.

Per a la realització del nostre projecte només hem escollit els dilluns de tot l'any, ja que com veurem a continuació, les dades no eren del tot correctes i vam necessitar fer 2 tractaments per acabar obtenint unes dades fiables.

Font: Elaboració pròpia

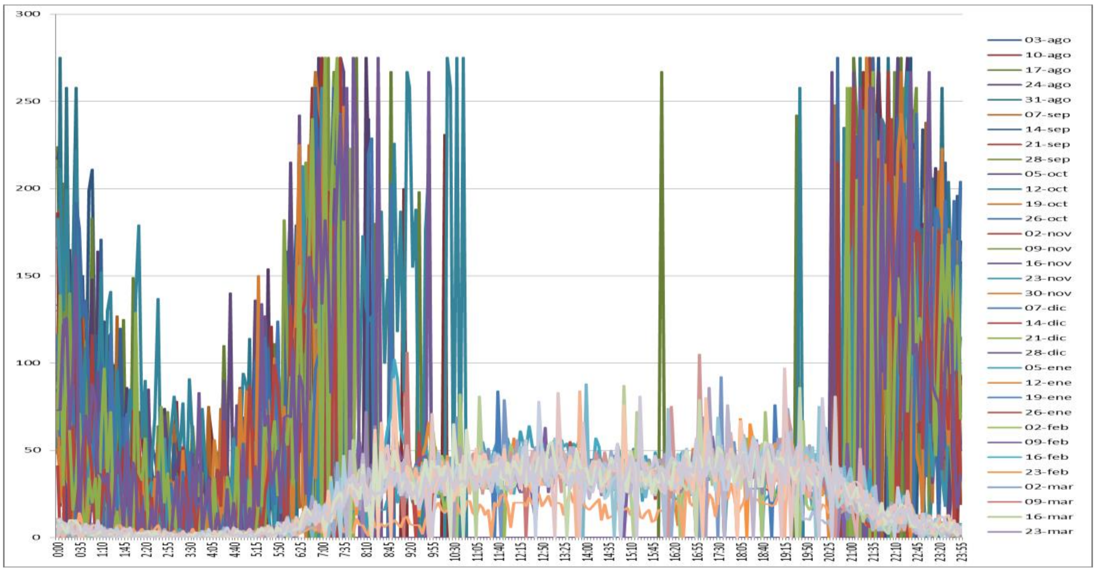

Figura 14: Dades inicials del carril 1

A la figura 14 tenim representades les dades de tots els dilluns de l'any 2015 que em va passar l'Ajuntament de Girona. Com es pot observar, les dades són completament diferents entre elles mateixes. Clarament hi ha dos grups diferents de dades; el primer grup que ens diu que a la matinada i durant la nit el trànsit de cotxes és molt intens, fins el punt de que poden arribar a passar més de 250 vehicles en 5 minuts, i que llavors durant la tarda no passa cap cotxe, són unes dades que no tenen cap mena de sentit; ja que el trànsit està vinculat en l'activitat humana, per tant a la nit és quan hi hauria d'haver un trànsit molt baix, i al matí/tarda és quan el trànsit hauria de tenir els valors més alts. Aquesta intuïció que tenim és precisament l'altre grup de dades que podem veure a la figura 14. Per tant hem decidit filtrar totes les dades i quedar-nos amb les que seguien un comportament similar a l'activitat humana.

Font: Elaboració pròpia

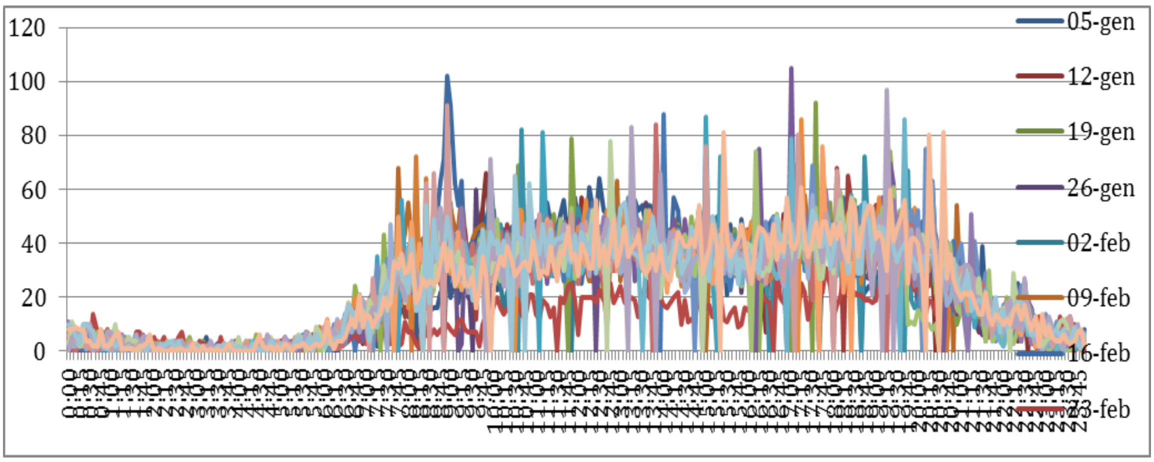

Figura 15: Dades del carril 1 un cop aplicat el primer filtre.

Un cop hem eliminat tots els dies que no eren coherents, ens ha quedat la figura 15. Com hem mencionat anteriorment, aquesta silueta de les dades és molt coherent amb l’activitat humana, i per tant l’acceptem com a bona. El problema que tenim en aquesta gràfica són els zeros puntuals i els pics espontanis que marxen de la normalitat de les dades. Tots els pics que podem veure venien precedits d’un zero, per la qual cosa ens ha fet indicar que també estaven malament. Ens hem trobat dos casos per fer aquest filtrat:

Font: Elaboració pròpia

05/01/2015	17:25	33
05/01/2015	17:30	30
05/01/2015	17:35	32
05/01/2015	17:40	0
05/01/2015	17:45	34
05/01/2015	17:50	27
05/01/2015	17:55	28

Taula 10: Valor del 0 aïllat

02/03/2015	17:20	49
02/03/2015	17:25	45
02/03/2015	17:30	0
02/03/2015	17:35	90
02/03/2015	17:40	0
02/03/2015	17:45	81
02/03/2015	17:50	50
02/03/2015	17:55	48
02/03/2015	18:00	37

Taula 11: Valor del zero precedit d’un pic

El procediment en el cas que ens trobéssim un zero sense pic, com és l’exemple de la taula 10, ha estat introduir directament un valor aproximat a les dades que hi havia al voltant del zero per intentar alterar les dades al mínim possible. En el cas de la taula 10, al trobar-nos un zero entre el 32 i el 34, hem posat un 33 de valor, que equival a la mitjana entre els dos valors més propers.

En el cas de la taula 11, que equival a trobar-nos un zero seguit d’una valor més alt dels que hi ha al voltant, hem decidit repartir el número de vehicles del pic entre dos valors. És a dir, en l’exemple de la taula 11, el 90 el convertiríem en dos 45, mentre que el 81 posaríem o un 40/41 o un 41/40. D’aquesta manera hem aconseguit també eliminar els zeros i els pics inicials alterant el mínim les dades inicials.

Font: Elaboració pròpia

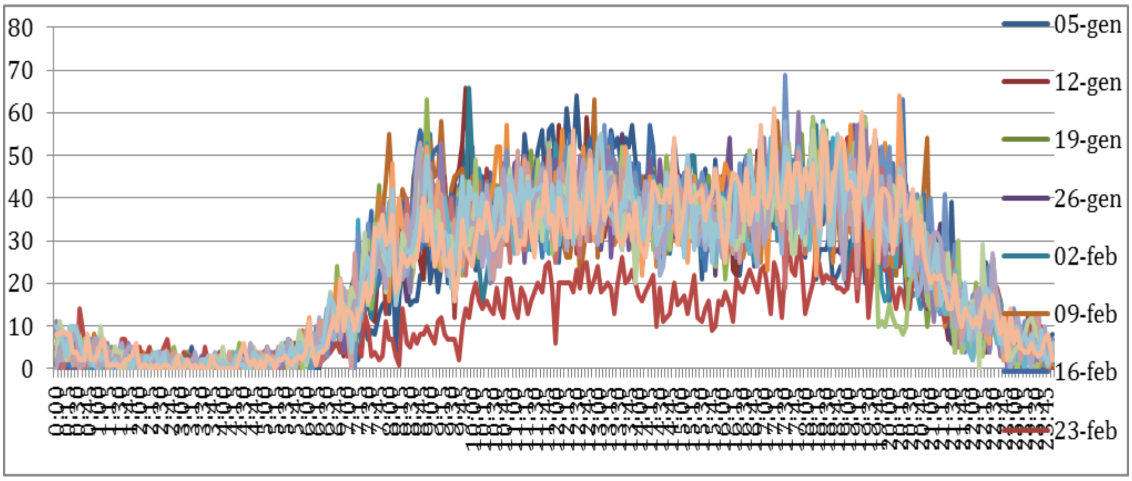

Figura 16: Dades del carril 1 un cop filtrades.

Un cop hem filtrat tots els zeros i els pics que teníem en les dades ens queda una gràfica com la figura 16. Com es pot observar aquestes dades són molt lògiques i semblen molt coherents, però hi ha un dia que es surt de la rutina. Aquest dia és el dilluns dia 6 d'abril, que coincideix amb el dilluns de Pasqua. En ser un dia festiu, el trànsit és molt diferent que qualsevol altre dilluns laborable. L'hem deixat a l'estudi perquè segons ens van informar des de l'Ajuntament de Girona, el fet que un dia laborable sigui festiu no implica cap tipus de canvi en la programació, per tant, encara que fos un dilluns festiu la programació semafòrica que va tenir va ser la de qualsevol dilluns laborable, i per aquest motiu l'hem tingut en consideració alhora de fer la simulació.

Per tal de poder utilitzar les dades per fer la simulació hem hagut de realitzar un agrupament d'elles. L'Ajuntament de Girona ens ha passat dades del trànsit de la cruïlla en intervals de 5 minuts, però nosaltres alhora de fer la simulació els hem agrupat amb grups de 15 minuts. Per tant, hem hagut d'anar sumant les dades de tres en tres. Llavors hem agafat tots els dies que teníem i hem fet una mitjana dels vehicles que arribaven cada 15 minuts. Aquesta mitjana de tots els dies serà la que introduirem en l'Arena per tal de poder realitzar la simulació de tots els dilluns.

5.3 **Explicació del programa**

5.3.1 Introducció

Un cop hem tingut totes les dades filtrades de tots els carrils dels dilluns, les hem entrat dintre el programa de simulació d'Arena.

Com he mencionat anteriorment ens l'apartat dels inconvenients dels programa Arena, la versió d'estudiant de l'Arena té moltes limitacions, i en el nostre cas ho hem notat a l'hora fer la simulació de la cruïlla.

Les limitacions que tenen a veure amb la versió estudiantil són: la capacitat màxima de mòduls permesos són 150, el nombre màxim d'objectes cinemàtics és 300 i el nombre màxim d'entitats que circulen pel sistema al mateix temps és de 150. En el nostre cas, quan la intenció era simular tota la cruïlla unida passàvem les dues primeres restriccions (la tercera no ho sabem perquè no vam arribar a poder simular el programa). Per tant, hem hagut de dividir la cruïlla en els dos parts i utilitzar dos programes diferents. D'aquesta manera hem pogut realitzar la simulació estan dintre de les limitacions.

Un cop explicat això, ara procedirem a explicar les diferents parts del programa.

5.3.2 Explicació del la part semafòrica

Per a la realització dels canvis de programes i dels canvis de cicles dels dilluns hem utilitzat l'esquema que es mostra a la figura 17:

Font: Elaboració pròpia

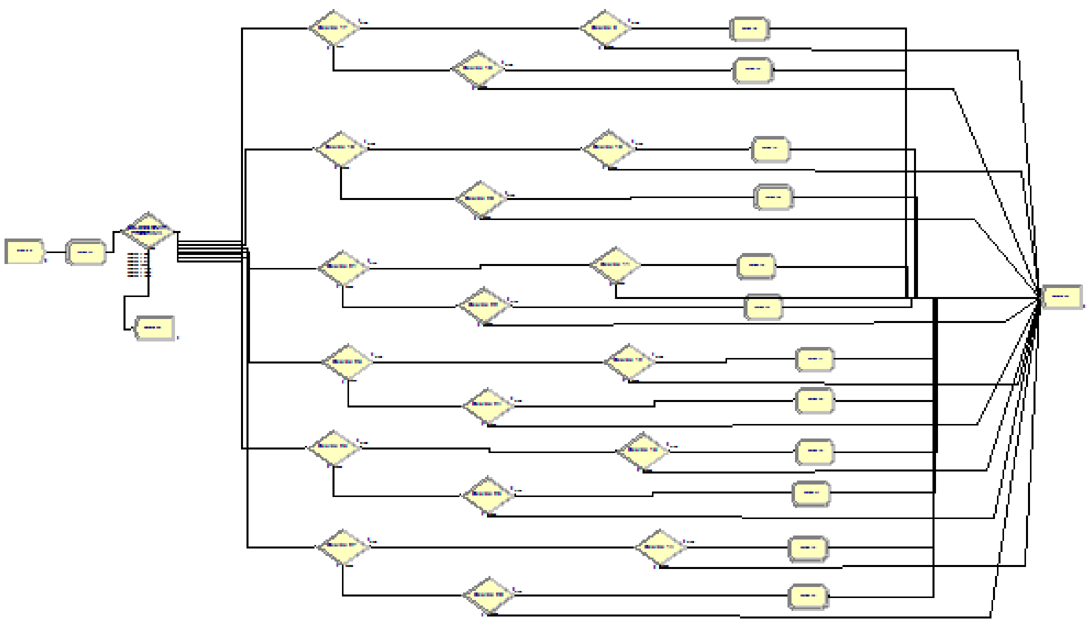

Figura 17: Esquema del programa del canvi de la programació dels semàfors

L'esquema de la figura 17 funciona de la següent manera. Hi ha un mòdul Create al principi que té la funció de crear una entitat cada segon, aquesta entitat passa per un mòdul Assign, on el que es fa és incrementar unitàriament una variable anomenada "CONTADOR". Aquesta variable en servirà més endavant per a poder definir la duració dels cicles dels semàfors. Llavors un cop ha incrementat unitàriament la variable "CONTADOR", la entitat entra en el mòdul Decide. Aquest mòdul permet donar una direcció a les entitats que hi entren mitjançant una condició. El nostre cas aquesta condició és la variable TSIMULACIÓ. Aquesta variable està lligada directament amb el temps de simulació del programa, ja que està definida que prengui el valor de TNOW, (variable el programa que marca el temps de la simulació), és a dir, ens marca el temps de la simulació. D'aquesta manera aquest mòdul Decide envia l'entitat que li entra segons la franja horària a on es troba. Aquest mòdul el podem veure a la figura 18.

Font: Elaboració pròpia

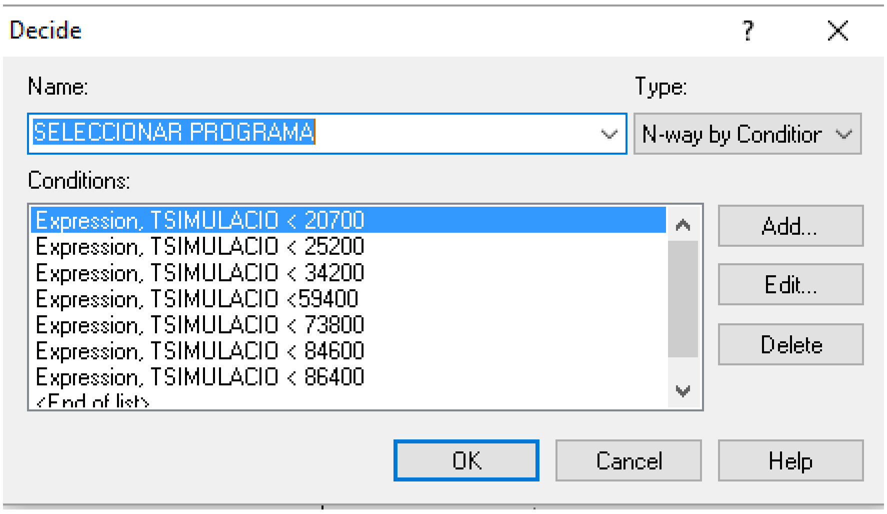

Figura 18: Funcionament del mòdul Decide per la tria del programa dels semàfors.

Un cop ja sabem la franja horària ara només hem d'introduir el temps de cicle del semàfor corresponen al programa que li toca. El problema que ens hem trobat en aquest punt ha estat que el temps que el semàfor es troba verd i el temps en que no ho està són diferents. Per tant, per poder regular aquest canvi de temps, hem hagut de diferenciar dos comptadors, un per la fase en verd i l'altre per la resta de la fase. Per poder-ho simular hem introduït un altre model Decide, el qual li hem assignat el valor del senyal com a condició, és a dir, si el valor del senyal és zero, i amb aquest valor el trànsit té el semàfor verd, el mòdul Decide l'enviarà cap a la zona a on el comptador té el temps de fase verd assignat. Passat el temps de fase en verd, el senyal passarà a valdre el valor 1, i llavors el Decide l'enviarà cap a l'altre zona on hi haurà un comptador amb un temps diferent que equivaldrà a la suma de tots els temps a on el semàfor no es troba en verd.

Ara l’única cosa ens falta explicar és com hem definit els temps de fase. Per fer-ho hem utilitzat novament un altre Decide, però aquesta vegada la condició que hi trobarem serà amb la variable “CONTADOR”, tal i com podem veure en la figura 19:

Font: Elaboració pròpia

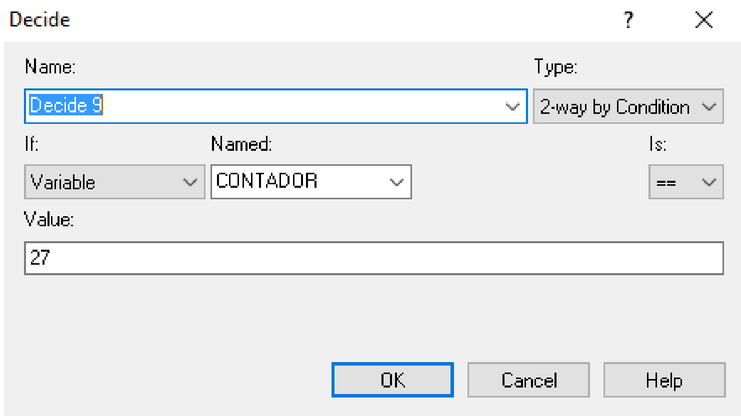

Figura 19: Representació del mòdul Decide per a programar el temps de cicle del semàfor.

Aquest valor de la variable “CONTADOR” equival al temps de fase que ha de tenir el semàfors. D’aquesta manera si ens fixem amb el procediment, veiem que cada segon es crearà una entitat, però no serà fins que li toqui fer el canvi de color al semàfor que l’entitat no passarà el mòdul Decide com a vertader. Un cop entri com a cert, llavors l’entitat es trobarà amb un mòdul Assign, que farà canviar el valor de la variable “SENYAL” i d’aquesta manera canviarà el semàfor, de verd a vermell o de vermell a verd. En el mateix mòdul Assign també inicialitzar el valor de la variable “CONTADOR” a zero un altre vegada, perquè no pugui passar el mòdul Decide fins que no hagi complert una altre vegada el temps de fase del semàfor. D’aquesta manera hem pogut simular els diferents programes i els diferents temps de fases de cada un d’ells.

5.3.3 Explicació del funcionament del trànsit

Per a la realització del trànsit hem utilitzat l’esquema que es pot veure a la figura 20:

Font: Elaboració pròpia

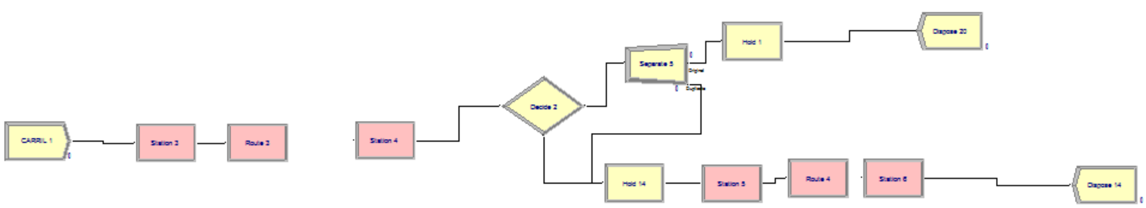

Figura 20: Esquema de la simulació de la part del trànsit

En aquest apartat hem de distingir els blocs de color groc amb els de color rosa. Els blocs de color groc són els mòduls lògics que ens permeten tractar el flux de la simulació, per tant, podem dir que intervenen activament en la simulació. Els blocs de color rosa pertanyen al grup de transferència, i en aquest cas, serveixen per a resolució de la interfície gràfica del model. Els mòduls de transferència es basen en dos tipus que són Station i Route. Station és el lloc a on aniran les entitats i el Route ens indica amb quins paràmetres hi arribaran: amb quina velocitat, amb quina seqüència, etc.

L'esquema comença amb un mòdul Create, aquest mòdul ens indica les arribades dels vehicles que tindrem, és a dir, els vehicles que arriben a la cruïlla els dilluns. Aquestes dades les traurem de les dades que ja tenim filtrades.

Hem hagut de fer una petita variació a les dades originals per a poder-les adaptar correctament al programa. Les dades enviades per l'Ajuntament de Girona ens donaven el número de vehicles que creuaven la cruïlla en intervals de 5 minuts. En canvi, per poder-les entrar a l'Schedule, les vam haver d'agrupar cada 15 minuts. Per fer-ho hem agrupat les dades de tres en tres i llavors hem fet la mitjana de tots els dilluns. Aquesta mitjana equival al valor λ de l'exponencial, ja que com hem mencionat anteriorment, les arribades dels vehicles segueixen una distribució exponencial, que es pot veure representada en la figura 21.

Es pot apreciar que el perfil de les dades de la figura 21, segueix tenint una relació amb l'activitat humana i per tant, també el seu perfil és similar al de les dades de la figura 16.

Font: Elaboració pròpia

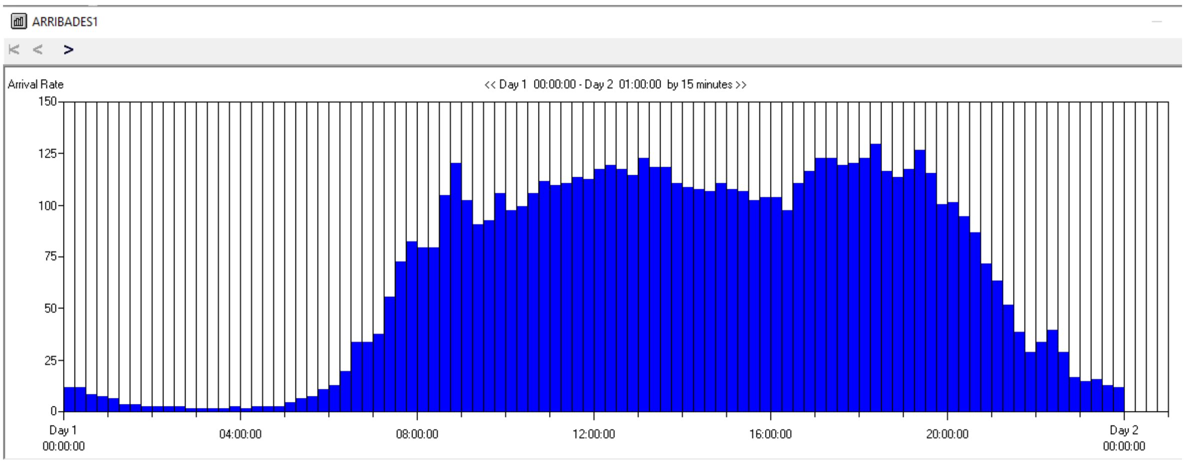

Figura 21: Representació d'un Schedule amb la gràfica de les dades d'arribades de vehicles.

Un cop les dades són creades arriben a un mòdul Decide. Aquest mòdul va en funció del valor que té la variable senyal, i ens indica si els vehicles que arriben poden passar directament (ja que es troben el semàfor en verd) o si per contra s'han de parar i fer cua. Ens cas que es trobin el semàfor en verd com es pot veure a la figura 20 van directament a la seqüència Station-Route-Station, d'aquesta manera surten per la interfície gràfica i llavors desapareixen dels sistema a través del mòdul Dispose. En canvi, les que es troben el semàfor de color vermell han de fer cua. La cua l'hem simulada amb el mòdul Hold. Aquest mòdul ens permet tenir les entitats que hi arriben retingudes fins a esperar una senyal o una condició per a ser alliberades. En el nostre cas, com es pot veure a la figura 22, la condició d'alliberament de les entitats equival al valor que pren la variable "SENYAL", que ve controlada en l'apartat dels semàfors.

Font: Elaboració pròpia

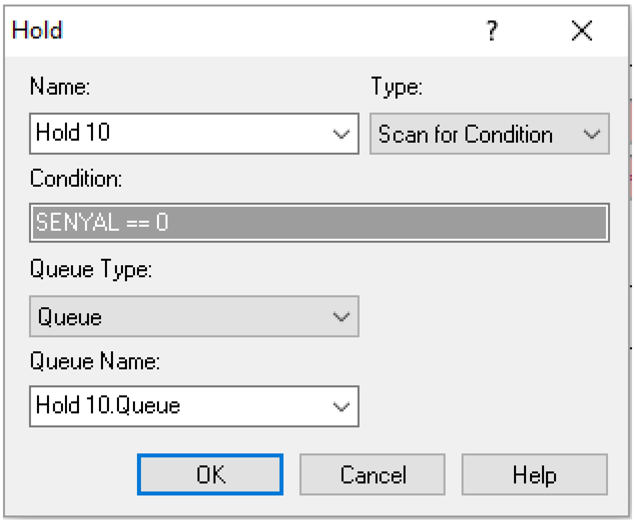

Figura 22: Esquema del funcionament del mòdul Hold.

El mòdul Hold però té un petit inconvenient i és que allibera totes les entitats de cop, amb el temps de la simulació aturat, és a dir, quan la condició del Hold es compleix, el temps de simulació es para i el Hold allibera les entitats que tenia retingudes. Per això hem fet que quan les entitats quedin alliberades se'n vagin a un altre Hold (on hem posat que la condició d'alliberament sigui quan la variable senyal prengui el valor 0, és a dir, quan tinguin el semàfor de color verd), així aquestes entitats es podran ajuntar amb les que venen creades en el Create i d'aquesta manera totes les entitats passaran per la interfície gràfica. Tot i això, la única cua que ens interessarà serà la del primer Hold, aquesta segon mòdul simplement serveix per unir les entitats i que es pugin veure per la interfície gràfica.

6 RESULTATS

En aquest apartat veurem els resultats que obtindrem de realitzar la simulació de la cruïlla semafòrica. Començarem fent una simulació global amb totes les dades que tenim filtrades per poder observar el funcionament de la cruïlla durant els dilluns. D’aquesta manera podrem veure el comportament del trànsit durant les 24 hores del dia i a més a més podrem analitzar la cruïlla amb diferents taxes d’arribades, ja que a la matinada les arribades són molt petites però durant el dia augmenten considerablement.

Un cop haguem analitzat la cruïlla globalment, llavors anirem a simular només la franja horària del programa 3, que és el programa que hem intentat millorar mitjançant el nou temps de cicle que hem proposat. I així podrem veure si realment la nostra proposta és millor que la del programa actual o no.

En les simulacions tindrem dos paràmetres que haurem d’analitzar per tal de poder obtenir uns bons resultats. Aquests paràmetres són el període d’escalfament o Warm - Up i el nombre de rèpliques que caldrà fer a la simulació per acabar obtenint una bona precisió amb els resultats. Aquests dos paràmetres s’explicaran a continuació.

6.1 **Warm - Up**

Per a poder realitzar de manera més precisa els resultats del nostre programa haurem d’eliminar el Warm-Up. El Warm-Up consisteix en el període inicial de la simulació a on el sistema es troba buit i és quan arriben les primeres entitats. Aquest factor s’elimina quan el model a simular es tracta d’un model d’estat estacionari, això significa que és un model que funciona les 24 hores del dia, i per tant, s’ha de realitzar la seva simulació en funcionament i no arrancant de parat. Per aquest motiu, el primer període de temps fins que el sistema no es troba en funcionament normal s’ha d’eliminar, ja que sinó es fa, les estimacions que es prenen alhora de fer la simulació com per exemple rendiment del sistema o l’ocupació dels servidors quedarien afectades per la part inicial que es troba buida. Per aquest motiu, i per tal d’obtenir una precisió més bona en la simulacions s’elimina aquesta part. En el nostre cas, al tenir una simulació de trànsit que es troba en tot moment en funcionament l’haurem d’eliminar.

Per eliminar-lo utilitzarem el programa Output Analyzer de Arena. Aquest programa és un programa incorporat amb el paquet Arena que ens serveix per analitzar estadísticament els models que simulem. Aquest programa ens permetrà conèixer la durada del temps del Warm-Up i poder-lo eliminar.

Hem fet una simulació de dues rèpliques en el programa i hem introduït els valors de la mitjana del temps d'espera de les cues en l'Output Analyzer i hem obtingut el resultat de la figura 23:

Font: Elaboració pròpia

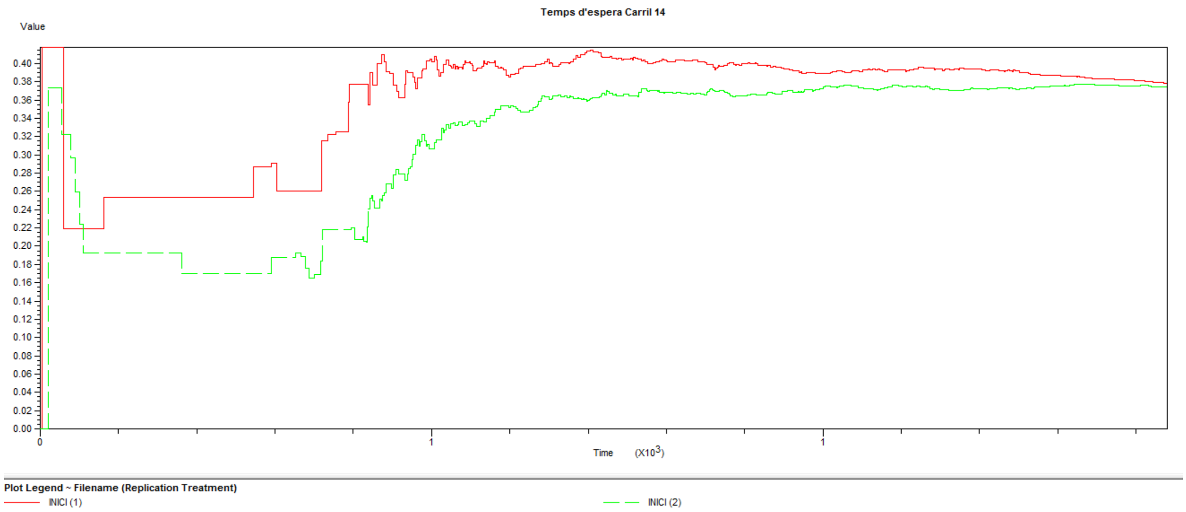

Figura 23: Gràfica de la representació de la mitjana del temps en espera del carril 14.

Com podem veure en la figura 23, el comportament del sistema comença amb uns canvis bruscs i llavors s'acaba estabilitzant a un valor estable. Suposarem que a tots els carrils els hi succeeix al mateix, tant els carrils del carrer Emili Grahit com els de la carretera Barcelona. Aquests canvis bruscs del principi és el que s'anomena Warm-Up i és el que hem d'eliminar de la nostra simulació.

Per tant, veient la figura 23 hem decidit que a partir del minut 10 de la simulació els resultats ja són estables. Així que hem decidit donar aquest valor al Warm – Up i eliminar els primers 10 minuts de cada rèplica de la simulació.

6.2 Nombre d'iteracions a la simulació

Un altre paràmetre que hem de tenir en compte alhora de realitzar la simulació és el nombre de rèpliques que hem de simular perquè el resultat sigui fiable.

En el nostre cas hem començat utilitzant una simulació amb 2 rèpliques i ara analitzarem si el nombre de rèpliques és suficientment gran o n'hem de fer més.

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.4999	0,09	0.4927	0.5071	0.00006477	1.06
Hold 13.Queue	0.4782	0,39	0.4473	0.5091	0.01527032	1.06
Hold 14.Queue	0.5128	0,01	0.5123	0.5133	0.00013745	1.06
Hold 15.Queue	0.5029	0,06	0.4984	0.5073	0.00065658	1.06
Hold 9.Queue	0.5117	0,01	0.5112	0.5122	0.00019648	1.06

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.2442	0,08	0.2383	0.2501	0.00	7.00
Hold 13.Queue	0.03739376	0,01	0.03631298	0.03847454	0.00	2.00
Hold 14.Queue	0.2295	0,02	0.2283	0.2307	0.00	6.00
Hold 15.Queue	0.1219	0,10	0.1140	0.1298	0.00	5.00
Hold 9.Queue	0.2575	0,00	0.2574	0.2575	0.00	6.00

Taula 12: Resultats de la simulació del carrer Emili Grahit utilitzant dues rèpliques.

En la taula 12, podem veure els resultats que hem obtingut al simular la intersecció del carrer Emili Grahit utilitzant dues rèpliques. Si ens fixem en els resultats, podem veure que tenim un interval d’error bastant gran. Per exemple en el carril 13, veiem que la mitjana del temps d’espera del semàfor és de 0,4782 minuts amb una precisió de 0,39 minuts, és a dir, tenim una mitjana de 28,69 segons d’espera amb una precisió 23,4 segons. En aquest cas considero que no podem acceptar aquesta precisió com a bona, i per tant serà necessari augmentar el nombre de rèpliques.

Ara anirem a veure quins són els resultats obtinguts per la simulació de la carretera Barcelona també utilitzant les dues rèpliques.

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.4626	0,16	0.4499	0.4753	0.00246225	0.9[illegible]
Hold 2.Queue	0.4630	0,03	0.4604	0.4657	0.00022611	0.9[illegible]
Hold 5.Queue	0.4673	0,03	0.4646	0.4700	0.00077373	0.9[illegible]
Hold 6.Queue	0.4678	0,05	0.4637	0.4719	0.00042878	0.9[illegible]

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.2918	0,01	0.2907	0.2928	0.00	7.0[illegible]
Hold 2.Queue	0.2681	0,03	0.2659	0.2703	0.00	8.0[illegible]
Hold 5.Queue	0.2828	0,03	0.2803	0.2852	0.00	8.0[illegible]
Hold 6.Queue	0.2206	0,01	0.2199	0.2214	0.00	8.0[illegible]

Taula 13: Resultats de la simulació de la carretera Barcelona utilitzant dues rèpliques.

A la taula 13 podem veure els resultats que hem obtingut al simular la intersecció de la carretera Barcelona utilitzant dues rèpliques. Si ens fixem en els resultats, podem veure que la precisió en aquesta simulació és més bona que a l'anterior. En aquest cas, la precisió més dolenta que tenim es tracta de 0,16 minuts, que equival a 9,6 segons. Com hem mencionat anteriorment, necessitem un nombre superior de rèpliques per intentar baixar aquesta precisió fins a un valor acceptable.

En el nostre cas, buscarem una precisió inferior al 0,033 que equival a 2 segons. L'estudi experimental ens ha donat que hem de fer 10 rèpliques per a obtenir la precisió volguda. Per tant, hem realitzat 10 rèpliques per a cada simulació. Els resultats que hem obtingut en les simulacions de les cruïlles estudiades es poden veure en les taules 13 i 14 respectivament:

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.5091	0,01	0.4920	0.5257	0.00006477	1.06
Hold 13.Queue	0.4832	0,03	0.4215	0.5253	0.00038552	1.06
Hold 14.Queue	0.5024	0,01	0.4797	0.5133	0.00013745	1.06
Hold 15.Queue	0.5115	0,01	0.4730	0.5364	0.00004542	1.06
Hold 9.Queue	0.5056	0,01	0.4933	0.5209	0.00019648	1.06

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.2500	0,01	0.2383	0.2633	0.00	8.00
Hold 13.Queue	0.03593600	0,00	0.03131933	0.04020827	0.00	4.00
Hold 14.Queue	0.2295	0,01	0.2026	0.2447	0.00	7.00
Hold 15.Queue	0.1232	0,01	0.1065	0.1332	0.00	5.00
Hold 9.Queue	0.2546	0,00	0.2451	0.2631	0.00	7.00

Taula 14: Resultats de la simulació del carrer Emili Grahit utilitzant 10 rèpliques.

Un cop realitzada la simulació pel carrer Emili Grahit utilitzant les 10 rèpliques hem obtingut els resultats que observem a la taula 14. L'interval de confiança que anteriorment era de 0,39 minuts ara és de 0,03. Hem passat de 23,4 segons a 1,8 segons. A més a més, veiem que és l'únic interval que es troba per sobre del 0,01 minuts, és a dir, de més d'1 segon d'error. Els altres carrils tenen una precisió inferior al segon. Per tant, podem dir que utilitzant 10 rèpliques en la nostra simulació obtenim uns resultats de temps d'espera que són bastant precisos.

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.4669	0,01	0.4499	0.4812	0.00019871	0.99
Hold 2.Queue	0.4744	0,01	0.4544	0.4902	0.00002808	0.99
Hold 5.Queue	0.4617	0,00	0.4480	0.4700	0.00005020	0.99
Hold 6.Queue	0.4679	0,01	0.4413	0.4865	0.00003878	0.99

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.2908	0,01	0.2740	0.3014	0.00	8.00
Hold 2.Queue	0.2765	0,01	0.2567	0.2951	0.00	8.00
Hold 5.Queue	0.2776	0,01	0.2548	0.2890	0.00	8.00
Hold 6.Queue	0.2209	0,01	0.2092	0.2354	0.00	8.00

Taula 15: Resultats de la simulació de la carretera Barcelona utilitzant 10 rèpliques.

Com podem observar en la taula 15, els resultats per la carretera Barcelona tenen una precisió inferior a un segon per cada carril. Per tant, acceptarem aquests resultats com a bons. Un fet curiós d'aquests resultats és que el nombre màxim de cotxes que es troben en espera és de 8 vehicles per als 4 carrils. A més a més, el temps d'espera que tenen els vehicles en el semàfor és molt similar entre ells.

Comparant els resultats de les taules 14 i 15 podem observar que, tot i que el temps de fase en verd de la carretera Barcelona és més gran, es formen més cues en la carretera Barcelona que en el carrer Emili Grahit. Aquest fet ens indica que el trànsit que circula per la carretera Barcelona és major que el que circula pel carrer Emili Grahit.

Si ens fixem amb els resultats podem veure que pel carrer Emili Grahit es forma una cua màxima d'uns 7 o 8 cotxes en l'hora punta, mentre que en el passeig d'Olot aquesta cua disminueix a 5 o 7 cotxes depenen del carril. El carril del passeig d'Olot que només serveix per girar a la dreta té la cua més petita de la cruïlla amb un màxim de 4 cotxes. En canvi, per la carretera Barcelona tenim que tots els carril tenen cues màximes formades per 8 cotxes a l'hora puntal.

Observant aquestes dades podem concloure que el trànsit en la carretera Barcelona és més regular i més intens per tots els carrils, mentre que en el carrer Emili Grahit el trànsit que trobem dependrà del carril per on passem.

6.3 **Simulació de la proposta del programa 3**

Ara analitzarem la proposta de millora que hem modelitzat en l'apartat *4.4.3 Modelització d'un cicle de semàfor*. Per poder realitzar correctament aquest anàlisi farem la simulació únicament del programa 3. Per fer-ho hem hagut de definir unes noves entrades de vehicles mitjançant Schedule (igual que havíem fet per entrar totes les dades d'arribades dels vehicles dels dilluns). En aquest cas, només hem considerat les arribades de vehicles durant la franja horària a on intervé el programa 3, que és de les 16:30 a les 20:30.

En aquesta simulació, en reduir el temps de simulació i al tenir menys dades d'arribades, hem decidit augmentar el nombre de rèpliques ja que sinó la precisió dels resultats disminuiria. Hem començat augmentant la simulació a 20 rèpliques, i llavors ja decidirem si acceptem els intervals de confiança com a bons, o si per contra, haurem d'augmentar el nombre de rèpliques.

Igual que en el cas anterior, començarem pels resultats que hem obtingut en el carrer Emili Grahit.

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.5324	0,01	0.4895	0.5625	0.00067313	1.06
Hold 13.Queue	0.5291	0,03	0.3843	0.6601	0.00071726	1.05
Hold 14.Queue	0.5363	0,01	0.4851	0.5786	0.00013840	1.06
Hold 15.Queue	0.5456	0,02	0.4756	0.6373	0.00038285	1.06
Hold 9.Queue	0.5350	0,01	0.4968	0.5665	0.00025931	1.06

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.4791	0,02	0.4150	0.5346	0.00	8.00
Hold 13.Queue	0.06468348	0,01	0.03676136	0.08894602	0.00	3.00
Hold 14.Queue	0.3881	0,02	0.3142	0.4638	0.00	7.00
Hold 15.Queue	0.2107	0,01	0.1529	0.2757	0.00	6.00
Hold 9.Queue	0.4572	0,02	0.3766	0.5326	0.00	8.00

Taula 16: Resultats de la programació actual en la franja horària de 16:30-20:30 del carrer Emili Grahit utilitzant 20 rèpliques.

En la taula 16 tenim els resultats de la simulació del carrer Emili Grahit en la franja horària de 16:30 a 20:30 utilitzant 20 rèpliques amb el programa actual. D'aquestes dades hem d'extreure algunes característiques importants, que després seran les que compararem amb la millora proposada per saber si la nostra proposta realment és millor o no.

El paràmetre que analitzarem dels resultats de la taula 16 seran els temps de cua que pateixen els vehicles de cada carril.

Cal esmentar abans d'entrar amb els resultats, que en el nostre cas no tenim cap tipus de temps de servei (W_s), és a dir, que tot el temps que es perd en la nostra simulació és el temps que es perd en la cua. Això a la vida real no passaria, perquè hauríem de tenir en compte el temps d'arribada a la cruïlla, el temps de creuar-la i sobretot el temps d'arrencada de la cua. Aquest temps es podria considerar com el temps de servei del procés. Que depenent de la posició es tardaria un temps o un altre. A més a més, aquest temps es podria calcular de dues maneres diferents, una seria donant un temps aproximat a cada posició de la cua, és a dir, el primer cotxe tarda 5 segons, el segon cotxe perd 4 segons, el tercer 3 segons i a partir del quart cotxe tots tarden 2 segons (es considera que un cop els cotxes ja han arrancat, el temps que passa entre un cotxe i l'altre equival al temps que es tarda en recórrer la distància de seguretat entre els dos vehicles). O es podria analitzar les arrancades dels vehicles en la cua i donar una distribució de probabilitat segons la posició en que es trobés el vehicle, ja que al intervenir el factor humà mai es podria considerar com un temps exacte. A vegades el primer es despista i arranca més tard, o té pressa i arranca fins i tot abans de que es posi verd, a vegades és el segon cotxe que es despita, etc. Per tant, no es pot assegurar un temps fix per a cada vehicle de la cua, i el que es fa es extreure unes dades d’arrancades i llavors trobar una distribució de probabilitat o un model que s’ajusti a les dades.

En el nostre cas però utilitzarem una simplificació. En la nostra simulació considerarem aquest temps zero, ja que només tindrem en compte el temps que es perd en la cua quan el semàfor es troba en vermell. Si s’analitza bé, el temps de servei entre la programació actual i la proposta de millora seria el mateix, per tant, per saber si una proposta semafòrica és millor que l’altra no cal el temps de servei, només ens fa falta el temps dedicat a la cua quan el servidor (el semàfor) es troba en vermell. Per aquest motiu, tot el temps perdut que tindrà cada vehicle en el sistema equivaldrà únicament al temps perdut en la cua.

Ara anirem a analitzar el temps de cua que tenim després d’introduir la nostra proposta del nou cicle del semàfor. Igual que a l’apartat anterior, simularem la franja horària de 16:30 a 20:30 utilitzant 20 rèpliques.

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.5726	0,01	0.5444	0.5976	0.00067313	1.14
Hold 13.Queue	0.5733	0,03	0.4720	0.6821	0.00071726	1.14
Hold 14.Queue	0.5779	0,01	0.5338	0.6101	0.00013840	1.15
Hold 15.Queue	0.5814	0,02	0.4956	0.6726	0.00038285	1.14
Hold 9.Queue	0.5751	0,01	0.5325	0.6054	0.00025931	1.14

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 10.Queue	0.5535	0,02	0.4790	0.6062	0.00	8.00
Hold 13.Queue	0.07552200	0,01	0.05130521	0.0987	0.00	3.00
Hold 14.Queue	0.4510	0,02	0.3708	0.5337	0.00	7.00
Hold 15.Queue	0.2395	0,01	0.1817	0.2900	0.00	6.00
Hold 9.Queue	0.5282	0,02	0.4536	0.6033	0.00	8.00

Taula 17: Resultats de la simulació de la nostra proposta de millora en la franja horària de 16:30-20:30 del carrer Emili Grahit utilitzant 20 rèpliques.

En la taula 17 tenim els resultats de la simulació del carrer Emili Grahit en la franja horària de 16:30 a 20:30 utilitzant 20 rèpliques amb la nostra proposta de millora. D’aquests resultats podem extreure que el temps d’espera en la cua són més alts. Això és lògic perquè hem de pensar que hem donat més temps en la fase en verd de la carretera Barcelona, el fet que implica que la fase que estem analitzant tingui un temps en vermell més elevat, i per tant és lògic que els temps en les cues hagin augmentat. Per contra, quan analitzem la fase de la carretera Barcelona llavors hauríem de veure com els temps de cua disminueixen.

Referint-nos els resultats, crearem la taula 18 per veure les diferències entre els dos temps de cicle que tenim.

Font: Elaboració pròpia

	Temps de cua de la fase actual [s]	Temps de cua de la proposta de millora [s]	Augment del temps en espera [s]
CARRIL 9	32,100	34,506	+ 2.406
CARRIL 10	31,944	34,356	+ 2,412
CARRIL 13	31,746	34,398	+ 2.652
CARRIL 14	32,178	34,674	+ 2,496
CARRIL 15	32,736	34,884	+ 2,148
TOTAL			**+ 12,114**

Taula 18: Comparació dels temps de cua entre la fase actual i la nostra proposta de millora.

Un cop hem analitzat la fase semafòrica del carrer Emili, ara anirem a observar els resultats a la carretera Barcelona.

Per fer-ho farem el mateix que hem per la primera fase: entrarem les dades en un nou Schedule (amb la franja horària de 16:30 a 20:30) i utilitzarem una simulació amb 20 rèpliques.

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.4971	0,01	0.4752	0.5326	0.00023379	0.99
Hold 2.Queue	0.4978	0,01	0.4538	0.5344	0.00013808	0.99
Hold 5.Queue	0.4983	0,01	0.4623	0.5271	0.00019574	0.99
Hold 6.Queue	0.4968	0,01	0.4737	0.5183	0.00001638	0.99

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.5332	0,02	0.4749	0.6045	0.00	8.00
Hold 2.Queue	0.5294	0,02	0.4575	0.5975	0.00	8.00
Hold 5.Queue	0.5168	0,02	0.4345	0.5934	0.00	10.00
Hold 6.Queue	0.4213	0,02	0.3579	0.5054	0.00	7.00

Taula 19: Resultats de la simulació actual en la franja horària de 16:30-20:30 de la carretera Barcelona utilitzant 20 rèpliques.

Com podem veure a la taula 19 tenim els resultats de la simulació de la carretera Barcelona durant la franja horària de 16:30 a 20:30 utilitzant 20 rèpliques i pel programa actual. Ara anirem a comprar aquests resultats amb el que obtindrem amb la nostra proposta.

Font: Elaboració pròpia

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.4255	0,01	0.3978	0.4576	0.00004969	0.84
Hold 2.Queue	0.4276	0,01	0.4016	0.4578	0.00020211	0.84
Hold 5.Queue	0.4248	0,01	0.3920	0.4507	0.00000314	0.84
Hold 6.Queue	0.4258	0,01	0.3864	0.4558	0.00003658	0.84

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold 1.Queue	0.3840	0,01	0.3427	0.4433	0.00	8.00
Hold 2.Queue	0.3821	0,01	0.3310	0.4413	0.00	7.00
Hold 5.Queue	0.3723	0,01	0.3057	0.4340	0.00	10.00
Hold 6.Queue	0.3039	0,01	0.2580	0.3682	0.00	6.00

Taula 20: Resultats de la simulació de la nostra proposta de millora en la franja horària de 16:30-20:30 de la carretera Barcelona utilitzant 20 rèpliques.

En la taula 20 podem observar els resultats dels temps al aplicar-hi la nostra proposta del temps de cicle. Com hem esmentat anteriorment, igual que la fase anterior ha empitjorat els temps de cua ja que el temps en vermell era més llarg, en aquesta fase és al contrari, al haver augmentat el temps de fase en verd, el temps de cua ha disminuït. Ara igual que hem fet amb la fase anterior, anirem a analitzar quina diferència de temps hi ha hagut entre els dos cicles.

Font: Elaboració pròpia

	Temps de cua de la fase actual [s]	Temps de cua de la proposta de millora [s]	Disminució del temps en espera [s]
CARRIL 1	29,826	25,530	- 4,296
CARRIL 2	29,868	25,656	- 4,212
CARRIL 5	29,898	25,488	- 4,410
CARRIL 6	29,808	25,548	- 4,260
TOTAL			**- 17,178**

Taula 21: Comparació dels temps de cua entre la fase actual i la nostra proposta de millora.

Com podem veure en la taula 21, en aquesta fase i trobem una reducció del temps d'espera de les cues en 17,178 segons.

Si analitzem els resultats de la cruïlla globalment, podem veure que hem aconseguit disminuir el temps d'espera en les cues 5,064 segons. Remarcar que aquests 5,064 segons són una mitjana de tota la cruïlla, amb la nova proposta els vehicles que travessessin la cruïlla pel carrer Emili Grahit o pel passeig d'Olot haurien de fer més cua que la que fan actualment, però per contra, els que la travessessin per la carretera Barcelona s'estalviarien temps de cua.

Com hem vist alhora de fer la nostra proposta, hem reduït tant el temps del semàfor en ambre com el temps de tot vermell en 4 segons. Aquest temps és un temps que no hem considerat que podia passar cap cotxe, per tant estem reduint un temps perdut i l'estem augmentant en el temps efectiu de circulació. Per tant era d'esperar que els temps de cua disminuïssin.

El fet important de la reducció del temps era saber si podíem arribar a reduir el temps global de la cruïlla en més de 4 segons, per poder afirmar que la nostra proposta era millor que l'actual. I com veiem en els resultats, l'hem aconseguit disminuir en 5,064 segons. Per tant es pot considerar que la nostra proposta és millor que la programació actual.

7 CONCLUSIONS

Després d'haver acabat aquest projecte hem pogut concloure diferents conclusions.

Començarem per les conclusions que hem pogut extreure de les dades dels vehicles. Com hem suposat des d'un principi, el flux de vehicles que circula per les vies està relacionat amb l'activitat humana. Tenim que la intensitat de vehicles a la matinada i a la nit és molt baixa, mentre que durant el dia és més elevada. Amb dos franges horàries importants que són les que trobem entre les 8:30-9:00 i les 16:30-17:00. Aquestes franges horàries equivalen a les principals activitats humanes, que són anar a treballar i sortir de treballar. Per tant, és normal que el flux sigui màxim durant aquestes hores.

També extraurem conclusions de la nostra proposta del nou temps de cicle del programa 3. Com hem pogut observar a l'hora de fer la nostra millora del programa, ens ha sortit al mateix temps de cicle que en la programació actual. Per tant podríem assumir que el temps de cicle actual és bo. La diferència que hem tingut amb la nostra proposta de millora ha estat que en la nostra proposta tenim una diferència de temps més gran entre els dos temps de fase en verd. Això significa que la millora proposada dóna un percentatge de temps en verd més elevat a la carretera Barcelona i treu temps en verd al carrer Emili Grahit. Aquests canvis de temps ens han aparegut perquè la nostra proposta ha donat una importància més significativa en el fet que el trànsit de la carretera Barcelona sigui major que el del carrer Emili Grahit.

Unes altres conclusions que podem extreure d'aquest projecte són les que trobem a l'hora de simular tota la cruïlla. D'aquesta simulació hem pogut concloure que encara que la carretera Barcelona tingués una proporció del temps en fase de verd més alta que la del carrer Emili Grahit, s'hi formen més cues. Aquest fet ens demostra que el trànsit que circula per la carretera Barcelona és major que el que circula pel carrer Emili Grahit. A més a més, observant les cues que s'han format en la simulació, podem veure que el trànsit que circula per la carretera Barcelona és bastant similar a cada carril, en canvi, en el passeig d'Olot observem diferents longituds de cua depenent del carril a on ens trobem. Aquest fet pot ser degut que al passeig d'Olot incorpora un carril que només permet el gir cap a la dreta, i per tant, provoca que el flux de vehicles no sigui tant homogeni com el de la carretera Barcelona.

La següent conclusió que hem obtingut d'aquest projecte ha estat a l'hora d'anar a mirar el resultat de la simulació de la proposta de millora del programa 3, per saber si realment la nostra proposta era millor o no a la programació actual.

Com hem vist alhora de fer la nostra proposta, hem reduït tant el temps del semàfor en ambre com el temps de tot vermell en 4 segons. Aquest temps és un temps que no hem considerat que podia passar cap cotxe, per tant estem reduint un temps perdut i l’estem augmentant en el temps efectiu de circulació. Per tant era d’esperar que els temps de cua disminuïssin.

El fet important de la reducció del temps era saber si podíem arribar a reduir el temps global de la cruïlla en més de 4 segons, per poder afirmar que la nostra proposta era millor que l’actual.

El resultat de la simulació ens ha donat que hem aconseguit disminuir el temps global de la cruïlla uns 5,064 segons, per tant podem afirmar que la nostra proposta és millor que la que es troba actualment a la cruïlla.

Aquest fet ens demostra que la programació inicial que es troba actualment en la cruïlla és bona, ja que només l’hem pogut reduir 1 segon en el seu global (sense comptar els 4 segons de les fases en ambre i de tot vermell). Remarcar que aquest segon és una mitjana de tota la cruïlla, això vol dir que amb la nova proposta, els vehicles que travessessin la cruïlla pel carrer Emili Grahit o pel passeig d’Olot haurien de fer més cua que la que fan actualment, per contra els que la travessessin per la carretera Barcelona s’estalviarien temps de cua.

El que sí que es podria millorar, que és un dels canvis que hem introduït en la proposta, és la reducció del temps en ambre i del temps de tot vermell. Trobo excessiu el fet de tenir 4 segons en ambre i 3 segons de tot vermell en una cruïlla de dos fases a una ciutat petita com és Girona. Si estiguéssim parlant d’una ciutat on el trànsit fos molt gran, com podria ser el cas de la ciutat de Barcelona, llavors potser sí que seria convenient mantenir els temps originals, però al tractar-se de Girona i del flux que té, considero que es podrien reduir aquests temps.

8 TREBALLS FUTURS

Ara comentarem algunes possibles millores que es podrien fer en aquest projecte o en altres projectes similars, però per la repetibilitat del procés o per la seva complexitat no les hem pogut arribar a complir.

Una de les propostes seria que en lloc d’analitzar una cruïlla semafòrica aïllada com hem fet en aquest projecte, s’analitzés un tram de carrer amb els seus respectius semàfors. En el nostre cas ens hem trobat que al tenir un semàfor abans d’arribar a la nostra cruïlla, les arribades es tornaven nul·les quan el semàfor anterior es col·locava vermell. Per tant, considero que al fet d’estudiar un tram de la via amb els seus respectius semàfors i el fet de passar d’estudiar un flux microscòpic a un flux macroscòpic (com és el flux real) donaria un valor molt més realista als resultats del projecte.

Una altra proposta de cares a millorar aquest projecte seria fer un pas més en la complexitat de la cruïlla i anar a estudiar i analitzar alguna cruïlla que incorporés girs a l’esquerra. Una possible cruïlla podria ser que la trobem entre el carrer Caldes de Montbui i la carretera Barcelona. Aquesta cruïlla és la única cruïlla de la ciutat de Girona que té un cicle de semàfor compost per 4 fases. A més de que permet girar a l’esquerra en pràcticament qualsevol direcció. Com es pot veure amb la informació que acabo de donar, la complexitat d’aquesta cruïlla és més elevada que la que hem realitzat.

Seguint per augmentar el tema de complexitat, també trobaria una bona proposta analitzar alguna rotonda, i quins fets decideixen que en una intersecció i hagi d’anar una rotonda, un semàfor, un stop, etc. El fet d’analitzar i estudiar una rotonda no vol dir deixar de fer la part semafòrica i analitzar només el flux. Hi ha rotondes que incorporen semàfors. Un exemple (tot i que no seria per la primera que hauríem de començar degut al seu grau de complexitat) seria la rotonda que trobem entre el carrer Santa Eugènia i el carrer del Riu Güell. Aquesta rotonda equival a una de les rotondes més complexes de la ciutat de Girona degut a tots els semàfors i a tots els carril que la formen. Per tant, seria un bon estudi el fet de realitzar simultàniament l’anàlisi del funcionament de la rotonda amb la seva modelització dels semàfors.

Un altre estudi que seria interessant i que hem suposat com a cert en aquest projecte per simplificar-lo, és analitzar si realment el flux que arriba de dilluns a dijous es pot considerar tant similar, com perquè se’ls hi pugui aplicar el mateix programa semafòric. Per poder analitzar aquest fet, s’haurien d’haver filtrat totes les dades de tots els dilluns, de tots els dimarts, de tots els dimecres i de tots els dijous. Per poder netejar totes aquestes dades haguéssim necessitat de molt de més temps del que podíem arribar a disposar.

Una altre estudi que crec que podria ser interessant és analitzar si el flux de vehicles que circulen per l’estiu és menor que a la resta de l’any. Segons la meva opinió el tràfic es redueix, però la pregunta és si aquesta reducció és significativa. En cas afirmatiu, llavors s’hauria de mirar si realment caldria utilitzar un programa semafòric diferent degut a aquesta reducció del trànsit.

Ja per acabar les propostes, trobaria interessant també el fet d’analitzar si el fet de posar un radar de semàfor en la cruïlla, ha produït una disminució del trànsit en aquella zona. Pels que no estan al cas, un radar de semàfor és aquell que analitzar si t’has passat el semàfor en vermell o no, i en cas afirmatiu indica també amb quina velocitat s’ha travessat la cruïlla. Pels que no estiguin tampoc el corrent, si aquests radars de semàfors et multen, la multa és de 200€ i la retirada de 4 punts del carnet de conduir. Per tant, no sé si realment els conductors prefereixen donar una mica més de volta, perdre una mica més de temps i evitar el radar o passar per la cruïlla. Per aquest motiu penso que també seria un bon factor a analitzar.

9 BIBLIOGRAFIA

- Agueda, J. (2009). *Introducción a procesos estocásticos y sistemas de líneas de espera.* Recuperat de

  http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/6022/ROSETE LIMA JULIA AGUEDA Tesis 2009.pdf?sequence=1

- Chanca, J.A., Castellanos, J.A. (2004). *Simulación microscópica de tráfico urbano y su aplicación en un área de la ciudad de Zaragoza. Recuperat de*

  http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXV/documentos/34-ososareast.pdf

- Costa, X. (2009). *Estudi i simulació de xarxes urbanes de transport sota situacions de canvis de la xarxa viària (tall de carrers, emergències, tancament de carrers al trànsit, etc.) mitjançant el programa Aimsun.* Recuperat de

  http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7753/PFC%20Xavier%20Costa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- De La Fuente,G., Pino,R. (2001). *Teoría de líneas de espera: Modelos de colas.* Gijón: Universidad de Oviedo.

- Fábregas,A., Wadnipar,R., Paternina,C., Mancilla,A.. (2003). *Simulación de sistemas productivos con Arena.* Barranquilla,Colombia: Uninorte.

- González, M., Sepulveda, E. J. (2010). *Aplicación de Teoría de Colas en los semáforos para mejorar la movilidad en la carrera 7 entre calles 15 y 20 de la Ciudad de Pereira.* (Treball final de grau). Recuperat de

  http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2008/1/51982G643.pdf

- Greenberg, H. An analysis of traffic flow, Oper. Res., 7 (1959), pp. 79–85.

- Greenshields, B.D.; A study of highway capacity. Proceedings Highway Research Record, Washington Volume 14, pp. 448-477, 1935.Gutiérrez, O. (2008). *La mobilitat quotidiana a les comarques Gironines.* Recuperat de https://ddd.uab.cat/pub/prmb/18883621n48/18883621n48p28.pdf

- Jaime, J. A. (2013). *Teoría de líneas de espera en el sector avícola para el diseño de muelles de despacho.* Recuperat de
  http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11013/1/L%C3%ADneas%20de%20espera.pdf

- Jaramillo, D. (2005). *Simulación y control de tráfico vehicular por semaforización.* (Treball final de grau). Recuperat de
  http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/832/835/4941.pdf

- Martin Fernández, J. A. (1963). *Modelització i simulació en l'enginyeria.* [Apunts acadèmics]. UdGMoodle. http://moodle2.udg.edu/course/view.php?id=12393

- Martínez, C. E. (2009). *Análisis de redes de colas modeladas con tiempos entre llegadas exponenciales e hiper Erlang para la asignación eficiente de los recursos.* Recuperat de http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis285.pdf

- Martínez, S., Karina, L. (2012). *Logística vial aplicada a la zona centro del municipio de Envigado.* (Treball final de grau). Recuperat de
  http://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/392/1/INDU0179.pdf

- Mozo, J. (2011). *Análisis de Nivel de Servicio y Capacidad de Segmentos Básicos de Autopistas, Segmentos Trenzados y Rampas de acuerdo al Manual de Capacidad de Carreteras HCM2000 aplicando MathCad.*(Tesis professional). Recuperat de

  http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/417/A4.pdf?sequence=4

- Pazos, J.J., Suárez,A., Díaz,R.P. (2003). *Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos.* Madrid: Pearson Educación.

  Pineda, D. *Sistema de control de la producción basado en tarjetas para entornos de tipo taller: estudio del sistema COBACABANA y propuesta de mejora. Recuperat de* http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70447/fichero/Capitulo+5.pdf

- Sanchez, J. H. (2011). *Estimación de la afectación de la capacidad en intersecciones sanforizadas como consecuencia del estado del pavimento.* (Treball final de grau). Recuperat de http://www.bdigital.unal.edu.co/3898/

  Sayago, A.F. (2014).*Determinación del efecto de las motos en el flujo de saturación en intersecciones sanforizadas de dos carriles.*(Tesis de grau). Recuperat de http://repository.udem.edu.co/handle/11407/136

  Solano, A. J. (1999). *Caracterización del Flujo Vehicular en Autopistas.* (Treball llicenciatura). Recuperat de http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/923/1/19663.pdf

  Tapia, J. G., Veizaga, R. D. (2006). *Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de Ingeniería de tráfico.* Recuperat de http://www.mediafire.com/download_repair.php?dkey=etx5r9udsce&qkey=pcl8wjw4v1aasj

Annex A PRESSUPOST

Concepte	Temps (h)	Cost unitari (€/h)	Preu (€)
Filtració de les dades	140	10	1400
Recerca bibliogràfica	110	0	0
Redacció del document	160	10	1600
Amortització d'equipaments	-	-	0
Llicències de programes informàtics	-	-	0
Base imposable			3000
Despeses indirectes (13%)			390
IVA (21%)			630
PRESSUPOST TOTAL			**4020**