

Anàlisi del trànsit de vehicles a una illa d'Igualada

Treball guanyador d'un premi CIRIT (Edició 2006)

Alumna: Sandra Lagén Morancho
Tutor: Marcel Jorba Jorba (Tecnologia)
Nivell: 2n Batxillerat
Centre: IES Pere Vives Vich - Igualada
Curs: 2005-2006

RESUM

Havent detectat un punt especialment conflictiu quant al trànsit de vehicles a la ciutat d'Igualada, hem observat que s'hi donaven diferents règims de circulació. Ens hem interessat particularment per dos: el primer, règim dens però fluid i el segon, règim congestionat.

Un cop feta l'observació, hem procedit a l'anàlisi numèrica corresponent, amb l'objectiu de quantificar els fenòmens, determinar la capacitat màxima d'absorció de trànsit de la zona i extreure conclusions raonades sobre les dades obtingudes, de manera que puguin servir com a estudi per a una millor regulació del trànsit a la zona.

RESUMEN

Habiendo detectado un punto especialmente conflictivo en cuanto al tráfico de vehículos en la ciudad de Igualada, hemos observado que allí se daban distintos regímenes de circulación. Nos hemos interesado particularmente por dos de ellos: el primero, régimen denso pero fluido y el segundo, régimen congestionado.

Una vez hecha la observación, hemos procedido al análisis numérico correspondiente, con el objetivo de cuantificar los fenómenos, determinar la capacidad máxima de absorción de tráfico de la zona y sacar conclusiones razonadas sobre los datos obtenidos, de manera que puedan servir como estudio para una mejor regulación del tráfico en la zona.

ABSTRACT

Having detected a specially conflictive point for vehicle traffic in the city of Igualada, we have noticed that different driving conditions were taking place. We have focused particularly on two of them: the first one, free-flow (but dense) traffic, and the second one, jammed traffic.

After our observation, we have proceeded to its numerical analysis, aiming to quantify these phenomena and draw reasoned conclusions on the obtained data in order to be useful as a study for a better traffic regulation in the zone.

ÍNDEX

1.- Agraïments	Pàg. 4
2.- Presentació	Pàg. 5
3.- Introducció	Pàg. 7
4.- La modelització matemàtica	Pàg. 8
4.1.- Introducció	
4.2.- Alguns models matemàtics	
4.3.- Mètodes de Programació Lineal	
5.- Descripció del model i les variables	Pàg. 10
5.1.- Variables bàsiques del trànsit de vehicles	
5.2.- La llei fonamental del trànsit	
5.3.- Les eines estadístiques	
6.- Anàlisi de les característiques del sistema	Pàg. 16
6.1.- Vista de la illa real	
6.2.- Esquema de la illa	
6.3.- Característiques de la illa	
7.- El sistema semafòric d'Igualada i de la nostra illa	Pàg. 21
8.- Metodologia	Pàg. 23
9.- Mesura durada cicles semafòrics	Pàg. 25
10.- Mesura intensitats d'entrada i sortida (externes al sistema)	Pàg. 26
10.1.- Recompte de dades	
10.3.- Estudi comparatiu intensitats	
10.3.1.- Intensitats d'entrada	
10.3.2.- Intensitats de sortida	
11.- Mesura intensitats internes	Pàg. 31
11.1.- Recompte de dades (intensitats)	
11.2.- Representació gràfica intensitats	
11.3.- Distribució freqüencial intensitats	
11.4.- Estudi comparatiu intensitats internes	
12.- Mesura velocitats mitjanes	Pàg. 38
12.1.- Recompte de dades (temps-velocitats)	
12.2.- Distribució freqüencial temps	
12.3.- Estudi comparatiu temps mitjans	
12.4.- Estudi comparatiu velocitats mitjanes	
13.- Càlcul densitats	Pàg. 45
13.1.- Càlcul de densitats	
13.2.- Estudi comparatiu densitats	
14.- Estudi comparatiu de tots els resultats dels dos règims	Pàg. 47
15.- Conclusions	Pàg. 48
16.- Bibliografia i webliografia	Pàg. 50

1.- AGRAÏMENTS

La realització d'aquest treball no hagués estat possible sense l'ajuda aportada pel meu tutor del treball de recerca, el professor de tecnologia de l'institut, Marcel Jorba. Ell ha sigut qui m'ha orientat i m'ha ensenyat a fer un bon treball en tot moment amb tota la seva ajuda possible. Gràcies per haver compartit moltes hores de treball.

També vull donar les gràcies a la meva professora de física, i tutora de l'any passat, Rosa Recasens, per ajudar-me al principi alhora d'escollir el tema amb cura i amabilitat i, sobretot, per adreçar-me al meu tutor definitiu del treball.

Per altra banda, vull agrair a persones especialitzades en l'estudi del trànsit i l'àmbit que l'envolta. Em refereixo concretament a tot l'equip del Centre d'Innovació del Transport (CENIT) de Barcelona; especialment a l'enginyer de camins, canals i ports, Francesc Soriguera, per haver-me atès el més aviat possible i per l'ajuda aportada alhora d'orientar-me cap al text de referència sobre l'anàlisi numèrica del trànsit, el Highway Capacity Manual (HCM).

També donaré les gràcies a l'Ajuntament d'Igualada, sobretot a la Regidora de Via Pública, la Sra. Silvia Torreblanca, i l'Enginyer Marc Pujol; dues persones que, tot i el seu treball, ens van concedir ràpidament una entrevista a partir de la qual en vam treure molt de profit. Gràcies per la seva amabilitat.

Personalment, vull donar gràcies a la meva mare, per haver-me donat la primera idea i per animar-me a seguir treballant en tot moment.

2.- PRESENTACIÓ

L'entrada de L'Escola Municipal de Música de Igualada és un punt especialment conflictiu de cara al trànsit. Sobretot, a les hores d'entrada i sortida de les classes quan els pares i mares deixen o recullen els nens. En aquests moments es formen col·lapses que repercuteixen a tota la illa. Aquesta illa és una illa molt cèntrica d'Igualada, situada al mig del Passeig Verdguer.

Aquesta situació és troba en moltes d'altres ciutats. Si ens parem a pensar aquests fenòmens, veurem que els podem veure contínuament quan circulem per la ciutat. Es donen a punts on, a hores concretes, es formen importants col·lapses. És, per aquest motiu, que aquest treball no servirà únicament per estudiar aquesta illa, sinó que pot servir com a referent per a estudis més complexos en vies similars.

Detectat aquest punt conflictiu, el que pretenc és fer un estudi i quantificar les dades per poder, si és possible, explicar el perquè d'aquests col·lapses i intentar proposar unes millores o solucions. La intenció de quantificar les dades correspon a precisar molt més allò que es desprèn de la simple observació, que ha estat el meu punt de partença.

Per a fer aquest estudi és necessari un model matemàtic; jo faré servir les bases extretes de Highway Capacity Manual (HCM). El HCM és un document editat pel Transportation Research Board dels Estats Units que estableix a partir de dades estadístiques totes les relacions i analogies entre els fenòmens per estudiar la capacitat tant de carreteres com de vies urbanes.

L'estudi es basarà en comparar dos règims de circulació diferents:

1. Règim congestionat (caòtic), és el moment de l'entrada d'alumnes a l'Escola de Música a les 17:30, que coincideix amb la sortida de les escoles. Es podia observar que la densitat de vehicles és elevada i els vehicles, fins i tot, es col·lapsen.
2. Règim dens però fluid (ordenat), és l'hora de sortida d'alguns alumnes de l'Escola, a les 18:30 i es dona una hora més tard que l'altre. Tot i que els règims només es diferencien en una hora, es pot observar a simple vista que hi ha variacions. En aquest règim la circulació no s'acostuma a col·lapsar, tot i ser densa.

Totes les mesures es prendran manualment, i les que no puc prendre manualment (per falta de mitjans) les determinaré a partir de les altres, mitjançant equacions matemàtiques determinades.

Els objectius d'aquest treball són diversos. Personalment vull aprendre a fer un estudi ben fet d'un tema que mai havia analitzat, el trànsit, així com també fer una anàlisi que pugui ajudar a evitar problemes circulatoris.

Per altra banda, quant a l'àmbit de treball, vull arribar a analitzar acuradament l'illa objecte del meu estudi treure'n unes conclusions coherents, fent una bona comparació dels dos règims i arribant a veure les semblances i les diferències que impliquen. Finalment, si és possible, vull arribar a donar unes alternatives al conductor, o uns consells des del punt de vista matemàtic per evitar les congestions, i donar solucions per a la planificació del trànsit de vehicles en illes d'aquest tipus.

El motiu pel qual he fet el meu treball sobre el trànsit és per una clara raó: la meua inclinació per la física i les matemàtiques, m'és més apassionants des del meu punt de vista, que fa uns anys van despertar el meu interès i per això he tingut molt clar, des d'un principi, que seria el tema a partir del qual enfocaria el meu treball.

Crec que la física és un tema considerat per moltes persones com un tema que no té quasi relació amb la vida quotidiana, moltes persones creuen que la física i les matemàtiques només estudien coses sense interès per a la vida. Per aquest motiu vaig creure oportú el tema de l'anàlisi del trànsit. Volia trobar un tema amb què poder plasmar com es regeix, en part, per lleis físiques i matemàtiques una cosa tan quotidiana com és la circulació de vehicles d'una ciutat. I, d'aquesta manera, arribar a demostrar la utilitat d'aquestes matèries tan interessants per a la vida.

La idea va sortir un dia que anàvem amb cotxe amb la meua mare i ella em va suggerir la idea d'estudiar el trànsit, un estudi peculiar. Vaig creure que podia ser interessant, ja que, tot hi haver vist molts treballs de recerca, no havia sentit a parlar mai de cap treball que parlés del trànsit. A partir d'aquí, aquesta idea que en principi semblava poca cosa, va anar agafant cos i, després de moltes hores de dedicació, estic molt satisfeta del resultat. En aquest treball podrem veure l'ampli estudi que es pot fer d'un punt conflictiu qualsevol d'una ciutat.

3.- INTRODUCCIÓ

Començarem el treball fent una bona descripció dels models matemàtics que s'acostumen a emprar a l'hora d'estudiar el trànsit de vehicles a les ciutats (Capítol 4).

Un cop feta aquesta explicació ens inclinarem per un model senzill que estigui a l'abast del nivell de 2n de Batxillerat, en el qual només es fa referència a les variables macroscòpiques observades en un sistema obert, en el nostre cas, una illa. Aquesta modelització matemàtica i les seves característiques (definició de variables, etc.) es troben exposades exhaustivament al llarg del Capítol 5.

Com que és inevitable fer diverses mesures (mostres) per tal de tenir resultats fiables haurem de recórrer a l'estadística. En l'esmentat capítol també tractarem les eines estadístiques a utilitzar.

Posteriorment, al Capítol 6, passarem a un estudi de les característiques concretes de l'illa que hem triat per al treball com a punt conflictiu.

Per poder fer aquest estudi d'una manera precisa i acurada, abans vam preferir fer una entrevista a la regidora d'Igualada amb la intenció de que ens expliqués el sistema semafòric d'Igualada i, si era possible, de la nostra illa. Les parts i conclusions més importants de la entrevista queden explicades al Capítol 7.

En el Capítol 8, farem una breu explicació de la metodologia que seguirem per a fer l'estudi, tots els passos queden explicats segons la intenció i la manera com es faran.

Seguidament començarà ja el treball de camp.

Per començar mesurarem la durada dels cicles semafòrics (Capítol 8), per tal de comprovar que la informació que la regidora ens havia donat anteriorment era correcta i, també, per poder fer l'estudi segons els cicles semafòrics.

Un cop vist que el sistema és coherent, farem l'estudi de les variables del trànsit. Primer mesurarem les intensitats d'entrada i de sortida del sistema, és a dir, les intensitats externes, que ens demostraran que les intensitats que entren són aproximadament les que en surten, la qual cosa donarà validesa al model matemàtic escollit. Aquesta comprovació es troba en el Capítol 10.

Tot seguir, caldrà calcular les intensitats internes del sistema per fer-ne l'estudi comparatiu entre dos règims (Capítol 11).

La segona variable que mesurarem són les velocitats mitjanes, que quedaran determinades pel temps mitjà que els vehicles triguen en creuar el carrer i per la seva llargada. Aquestes mesures les farem en el Capítol 12, on també podrem veure la distribució freqüencial de temps.

Com a últim càlcul, determinarem la variable restant: les densitats. Les densitats les calcularem a partir de les altres dues variables, la seva determinació es pot veure en el Capítol 13.

Finalment, al Capítol 14, farem un estudi comparatiu general de tots els resultats entre els dos règims esmentats (fluid i congestionat), per tal de veure'n una idea global.

4.- LA MODELITZACIÓ MATEMÀTICA

4.1.- INTRODUCCIÓ

Per avaluar el trànsit de vehicles d'un sistema de circulació és necessita un model o mètode matemàtic. És a dir, hauré de seguir algun mètode de modelització matemàtica que pugui ser aplicat a qualsevol condició de trànsit.

La modelització matemàtica és un mètode molt utilitzat. Consisteix, breument, a formular un problema de la vida quotidiana o situació tècnica en termes matemàtics, i, a partir d'aquí, resoldre'l si és possible i interpretar els resultats en termes del problema i de la situació plantejada. Aquesta és la intenció d'aquest treball. Per il·lustrar el procés de modelització podem observar el següent procés:

Situació del món → Model del món real → Model matemàtic → Conclusions

El procés de modelització es basa en els punts següents:

- Presentació d'una situació simplificada del món real.
- Traducció de la situació en terminologia matemàtica i obtenció del model.
- Treballar sobre el model i resolució del problema.
- Presentació de la solució en termes no matemàtics.

Així, es pretén avaluar una situació real, el trànsit, a través d'un model matemàtic per poder-ne treure unes conclusions coherents.

4.2.- ALGUNS MODELS MATEMÀTICS

Per aconseguir un model matemàtic s'han d'aplicar els models d'optimització, o models de programació matemàtica. Aquests es classifiquen en tres grups:

- Models de Programació Lineal: el problema de flux de màxim cost (problemes d'assignació, el problema de transport, el problema de flux màxim, problemes de routes mínimes, problemes de flux en xarxes amb cost convex, el problema de programació de producció, el problema de portafolio, etc.)
- Models de Programació Lineal-Sencera Mixta: models de localització, el problema Knapsack 0-1, el problema del venedor viatger, problema de producció d'inventari amb cost fix, problemes de seqüències, l'anomenat "set-covering problem", etc.
- Models de Programació No Lineal: el problema d'assignació de tràfic, el problema d'equilibri en xarxes, el problema de balanceig de matrius, problemes geomètrics, problemes mecànics, problemes elèctrics.

Els mètodes per solucionar aquests models de programació matemàtica són:

- Mètodes de Programació Lineal: Repàs, la teoria de Grafos, el mètode Simplex, la teoria de cues, els autòmats cel·lulars, etc.
- Mètodes de Programació Lineal-Sencera Mixta: el mètode Branch and Bound (Repàs), Plans Tallants, Relaxació Lagrangeana, Generació de Columnes,

Heurístiques. Aplicacions (predespachament de sistemes hidrotècnics, planificació de vols, ruta de vehicles).

- Mètodes de Optimalitat i Dualitat en Programació No Lineal: condicions necessàries de optimalitat, condicions suficients i convexitat, dualitat (teoria i il·lustració de dualitat i separabilitat).
- Mètodes de solució en Programació No Lineal: problemes sense restriccions, problemes amb restriccions, aplicacions (flux de potència òptim, equilibri en xarxes de transport, optimització i flux en xarxes).

Els models que podem aplicar han de ser mètodes de Programació Lineal o de Programació No Lineal. Tot i això el mètode d'optimització Lineal (o Programació Lineal) és el model matemàtic més utilitzat per estudiar el trànsit, ja que la Programació No Lineal és un mètode més eficient però menys fiable i, de vegades, amb resultats imprevisibles (conduïx a resultats inestables).

4.3.- MÈTODES DE PROGRAMACIÓ LINEAL

Com hem dit anteriorment, els mètodes de Programació Lineal són els més utilitzats per analitzar el trànsit perquè ens porta a resultats fiables i reals. Vegem-ne alguns:

- **Teoria de cues**

La teoria de cues és l'estudi matemàtic del comportament de línies d'espera, són models que proporcionen un servei. Aquestes línies d'espera o formació de cues solen ocórrer quan la demanda real del servei és superior a la capacitat que existeix per donar aquest servei, això passa en cruïlles de dues vies de circulació, en semàfors, etc.

Tot i això, la Teoria de cues és un sistema massa complex per a poder-lo estudiar amb els coneixements que tenim a l'abast.

- **Autòmats Cel·lulars**

Els autòmats cel·lulars (AC) són sistemes dinàmics discrets en les seves components: espai, temps i variables(s) d'estat. Permeten descriure fenòmens complexos però les seves regles tendeixen a ser senzilles, en certa mesura, qualitatives i amb el mínim aparell matemàtic possible. Els AC es plantegen, així, com un sistema de modelització alternativa (microscòpica) al convencional (macroscòpic), basat en l'especificació d'equacions diferencials en un context continu.

Per aquest motiu aquest mètode no és l'apropiat per fer el nostre estudi, ja que l'estudi es basarà en l'anàlisi de les variables macroscòpiques, i no microscòpiques.

- **Llei de nusos de Kirchhoff**

Aquesta llei consisteix en un principi de conservació que assegura que no es genera ni es destrueix càrrega en els nusos del circuit. Per tant, el que entra en cada nus és igual al que surt d'aquest. La suma de les intensitats que conflueixen en un nus ha de ser igual a zero.

Aquest mètode ens pot ser molt útil en el nostre cas, ja que podem assimilar els nusos elèctrics a les interseccions entre carrers. Tot i això no és suficient, ja que hi ha més variables que hem de tenir en consideració. Per això es necessari complementar-ho amb altres mètodes, que explicarem en l'apartat (5.2.), i que estan extrets del ja esmentat manual HCM.

5.- DESCRIPCIÓ DEL MODEL I LES VARIABLES

5.1.- VARIABLES BÀSIQUES DEL TRÀNSIT DE VEHICLES

Existeix un gran nombre de factors implicats en la dinàmica del trànsit de vehicles, tant a les vies a les vies urbanes com a les interurbanes, entre els quals podem esmentar:

- Les característiques de cada vehicle:
 - Dimensions (llargada, amplada i alçada)
 - Potència
 - Pes
 - Estat de conservació
 - Etc.
- Les característiques de la via:
 - Dimensions (llargada, amplada i nombre de carrils)
 - Obstacles a la circulació (semàfors, passos de zebra, senyals de stop i de “cediu el pas”, altres senyals, etc.)
 - Estat del ferm (per exemple, l'asfalt)
 - Visibilitat
 - Etc.
- Els factors relatius al conductor o conductora:
 - Temps de reacció (que depèn de molts factors, com per exemple, l'edat)
 - Els aspectes psicològics (que també depenen de molts altres factors, com per exemple, l'hora del dia)
 - Etc.
- Les condicions meteorològiques
- Etc.

Tenir en compte tots aquests factors ens portarien a una anàlisi realment molt acurada de la realitat del trànsit, però, naturalment, l'abast d'aquest treball de recerca no ens permet portar a terme un estudi d'aquest nivell de complexitat. És per això que haurem de recórrer a un sistema que simplifiqui els factors a tenir en compte, però que alhora constitueixi una aproximació raonable.

Suposem un segment de via urbana de llargada l en el qual portem a terme una sèrie de mesures durant la circulació de vehicles:

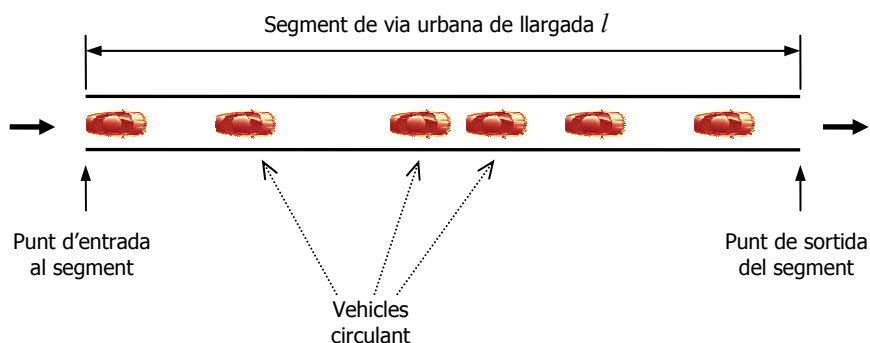


Figura 5.1

Adonem-nos que, per tal de simplificar la situació, hem considerat un segment rectilini d'un sol carril i amb un sol sentit de circulació.

Seguint les indicacions del HCM, podem establir tres variables macroscòpiques principals a l'hora d'analitzar el trànsit en aquest segment, aquestes són:

- **La intensitat de vehicles, també anomenada flux (*flow*):** És el nombre de vehicles que passa per un punt en una unitat de temps.

$$q = \frac{n_q}{\Delta t_q} \quad [1]$$

On: q = intensitat, en vehicles/segon (s^{-1}) o bé en vehicles/h (h^{-1})
 n_q = nombre de vehicles que passa per un punt (adimensional)
 Δt_q = increment de temps: l'interval de temps en el qual passen n vehicles per un punt, en segons (s) o bé en hores (h)

- **La velocitat mitjana d'un vehicle (*mean speed*):** És el quocient entre la llargada del segment de via a analitzar i el temps des que aquest vehicle entra al segment fins que en surt.

$$v_m = \frac{l}{\Delta t_v} \quad [2]$$

On: v_m = velocitat mitjana d'un vehicle al llarg del seu recorregut pel segment (en m/s o bé en km/h)
 l = llargada del segment (en m)
 Δt_v = increment de temps: el temps que tarda un vehicle des del moment que entra fins que surt del segment (en s)

- **La densitat de circulació (*density*):** És el nombre de vehicles per unitat de longitud que es troba en el segment de via.

$$d = \frac{n_d}{l} \quad [3]$$

On: d = densitat de circulació en vehicles/metre (m^{-1}) o bé en vehicles/quilòmetre (km^{-1})
 n_d = nombre de vehicles que es troben dins el segment considerat (adimensional)
 l = llargada del segment (en m o km)

Prenent aquestes tres variables com a base del nostre estudi, pensem que podrem arribar a unes conclusions prou acurades. Cal aclarir, doncs, que ens limitarem a fer un estudi macroscòpic.

5.2.- LA LLEI FONAMENTAL DEL TRÀNSIT

Suposem el segment de longitud l de la figura 1 en les següents condicions ideals:

- Els vehicles van entrant i sortint contínuament del segment, recorrent-lo tots a la mateixa velocitat mitjana v_m .
- Al seu interior sempre s'hi troba el mateix nombre de vehicles n_d circulant endavant (per tant, tants com hi entren, en surten).

Com que els vehicles s'estan movent, resulta difícil comptar-ne el nombre n_d que es troba dins el segment. Si coneguéssim, però, la densitat d del trànsit en el segment, podríem calcular-lo sense problemes, segons l'equació [3]:

$$n_d = d \cdot l \quad [4]$$

La dificultat radicaria en conèixer la densitat d .

Una altra manera més fàcil de comptar el nombre de vehicles n_d consistiria a fer dues operacions:

1.- Cronometrar el temps Δt_v que tarda un vehicle des que entra al segment fins que en surt.

2.- Comptar durant un interval de temps Δt_q^1 el nombre n_q de vehicles que surten del segment (que és idèntic al nombre dels que entren, tal com hem suposat). Això ens permetrà calcular la intensitat q dels vehicles que circulen pel segment segons l'equació [1]:

$$q = \frac{n_q}{\Delta t_q} \quad [1]$$

Cal adonar-nos que, si es compleixen les condicions establertes, la intensitat també respondrà a l'equació:

$$q = \frac{n_d}{\Delta t_v} \quad [5]$$

Ja que, si tots els vehicles circulen a la mateixa velocitat mitjana v_m , qualsevol vehicle i que entri al segment trigarà un temps Δt_v a sortir-ne. Si tal com hem suposat, sempre hi

¹ Per a ser estrictes, el temps Δt_q hauria de ser múltiple del temps Δt_v , ja que hem suposat que tots els vehicles travessen el segment a la mateixa velocitat mitjana, però no necessàriament a la mateixa velocitat instantània en cada moment, per tant, el pas dels vehicles per un determinat punt del segment pot ser irregular. En el nostre cas ens conformarem amb l'aproximació $\Delta t_q \gg \Delta t_v$, ja que, del contrari, resultaria molt difícil aconseguir aquesta proporcionalitat.

ha el mateix nombre de vehicles n_d a dins del segment, des del moment que el vehicle i hi entri fins que en surti hauran passat exactament n_d vehicles pel punt de sortida.

Per tant, segons aquesta darrera equació podem calcular el nombre de vehicles n_d dins el segment d'aquesta manera:

$$n_d = q \cdot \Delta t_v \quad [6]$$

Igualant les equacions [4] i [6]:

$$d \cdot l = q \cdot \Delta t_v \quad [7]$$

Per tant:

$$d = \frac{q \cdot \Delta t_v}{l} = \frac{q}{l / \Delta t_v} \quad [8]$$

I, substituint a partir de l'equació [2], podem concloure que:

$$d = \frac{q}{v_m} \quad [9]$$

Aquesta equació és coneguda com la **lleï fonamental del trànsit**. Tal com podem veure, ens permet calcular qualsevol de les tres variables a partir de les altres dues.

Adonem-nos que la variable més difícil de mesurar és la densitat, ja que els mitjans a utilitzar són complexos: caldria fer fotografies aèries i comptar els cotxes. En canvi, mesurar la **intensitat** i la **velocitat mitjana** és molt més senzill. A partir d'aquestes dues mesures podem calcular la **densitat** sense necessitat de mesurar-la, utilitzant l'equació [9].

A la realitat, cap de les dues condicions ideals que hem suposat es compleix:

- No tots els vehicles travessen el segment a la mateixa velocitat mitjana v_m .
- El nombre de vehicles n_d que es troba dins el segment no és constant.

Això ens obligarà a fer moltes mesures (mostres estadístiques) i fer la mitjana de totes per tal de poder treure unes conclusions el més generals i fiables possible.

5.4.- LES EINES ESTADÍSTIQUES

Com hem dit a la introducció, és inevitable fer diverses mesures (mostres). I, per tant, per obtenir uns resultats fiables haurem de recórrer a l'estadística. Les eines estadístiques que farem servir quedaran definides a continuació.

- **Les mostres:** hem realitzat moltes mesures per tal de garantir la precisió de les dades preses manualment.

Les mitjanes aritmètiques: Els resultats de l'anàlisi s'han donat en forma de mitjana aritmètica de mesures. La mitjana aritmètica és la mesura de concentració més important, ja que simbolitza el valor central de tota la distribució. Respon a l'expressió:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

on:

- \bar{x} :és la mitjana aritmètica
 - x_i :correspon a cada una de les mesures realitzades
 - n :és el nombre de mesures
- **Les mitjanes ponderades:** en ocasions, la diferent llargada dels trams ens ha obligat a fer les mitjanes tenint en compte aquestes llargades, ja que del contrari els resultats es veurien distorsionats. Per a això, utilitzarem les mitjanes ponderades.

$$\bar{x}_p = \frac{l_1 x_1 + l_2 x_2 + \dots + l_n x_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i x_i}{\sum_{i=1}^n l_i}$$

on:

- \bar{x}_p :és la mitjana ponderada
 - x_i :correspon a cada una de les mesures realitzades
 - l_i :és la llargada de cada tram
 - n :és el nombre de mesures
- **La desviació mitjana:** La desviació mitjana és un índex de dispersió respecte a la mitjana aritmètica. En la fórmula està en tant per 1, però, generalment la utilitzarem en tant per 100 (%). Com més gran és, més diferències hi ha entre les diferents mesures, per tant, més caòtic serà el règim estudiat:

$$\sigma_m = \frac{|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \dots + |x_n - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

- **Els gràfics de barres:** Els utilitzarem per quantificar de forma visual les mitjanes (aritmètiques o ponderades) de les mesures preses, i ens serviran per comparar els resultats en els diferents règims de circulació observats.
- **Els gràfics de dispersió:** En aquest gràfics fem aproximacions contínues de la distribució de les mesures preses (discretes). Representen la separació del conjunt de mesures respecte a la mesura que més es repeteix (moda). Un gràfic de dispersió ideal tindria la forma de la campana de Gauss, que és el que s'anomena "distribució normal" i és aquell que obtindríem si el nombre de mesures fos infinit.

Utilitzarem aquests gràfics bàsicament per estudiar el comportament del trànsit, de manera que l'àrea del gràfic correspondrà al nombre de vehicles quantificats. En els casos on el nostre gràfic presenti més d'una cresta, podrem parlar de comportament bimodal, trimodal, etc., la qual cosa indicarà que alguns vehicles no es comporten com la resta per alguna raó en particular, cosa que comentarem quan s'escaigui.

6.- ANÀLISI DE LES CARACTERÍSTIQUES DEL SISTEMA

Per fer l'estudi, primer haurem d'analitzar les característiques més importants del punt conflictiu observat. El punt conflictiu, el nostre sistema, és una illa molt cèntrica d'Igualada. Per tenir-ne una idea farem una visió de la illa real, un esquema matemàtic dels sentits, les vies, els semàfors, etc. i per acabar, una anàlisi de les variables que hi intervenen i com queden definides.

6.1.- VISTA DE LA ILLA REAL

Vegem la ubicació de l'illa que estudiarem en el plànol de la ciutat:



Figura 6.1

Adonem-nos que la illa escollida segueix la forma d'un quadrangle irregular, ja que, en general els diferents segments d'una illa no acostumen a tenir la mateixa llargada. Un exemple d'excepció seria l'exemple de Barcelona, on la majoria d'illes són quadrats gairebé perfectes.

A través de la Figura 6.1. es poden observar les característiques següents de la illa:

- Tots els trams tenen un sol sentit de circulació.
- Els sentits de circulació permeten que es pugui donar voltes sense abandonar l'illa (trànsit circular en sentit antihorari).
- Tots els trams tenen el mateix nombre de carrils (dos).
- Totes les interseccions (cruïlles) tenen de forma simètrica el mateix sistema de preferència de pas (semàfor, stop, cedeu el pas, preferència per defecte, etc.)
- Els trams anterior i posterior de cada un dels quatre trams de l'illa tenen el mateix sentit de circulació que el seu tram corresponent de l'illa (són vies de sentit únic).

- S'hi pot observar regularment diferents règims circulatoris: lliure, fluid, congestionat...

Amb aquestes característiques aconseguirem que:

- Es pugui entrar i sortir al subsistema des de l'exterior (el sistema complet, o sigui, el sistema viari de tot el municipi) en els quatre sentits de circulació.
- Els resultats de les mesures que realitzem a cada tram es puguin comparar amb les mínimes interferències possible amb els dels altres tres trams.
- Podem realitzar mesures de trànsit en diferents règims circulatoris.

Podríem dir que és una illa bastant perfecta, perquè compleix moltes condicions, i tot i ser un quadrangle irregular, dos dels seus trams fan la mateixa llargada, i els altres dos varien en pocs metres.

Vegem-ne la fotografia aèria de l'illa per satèl·lit:

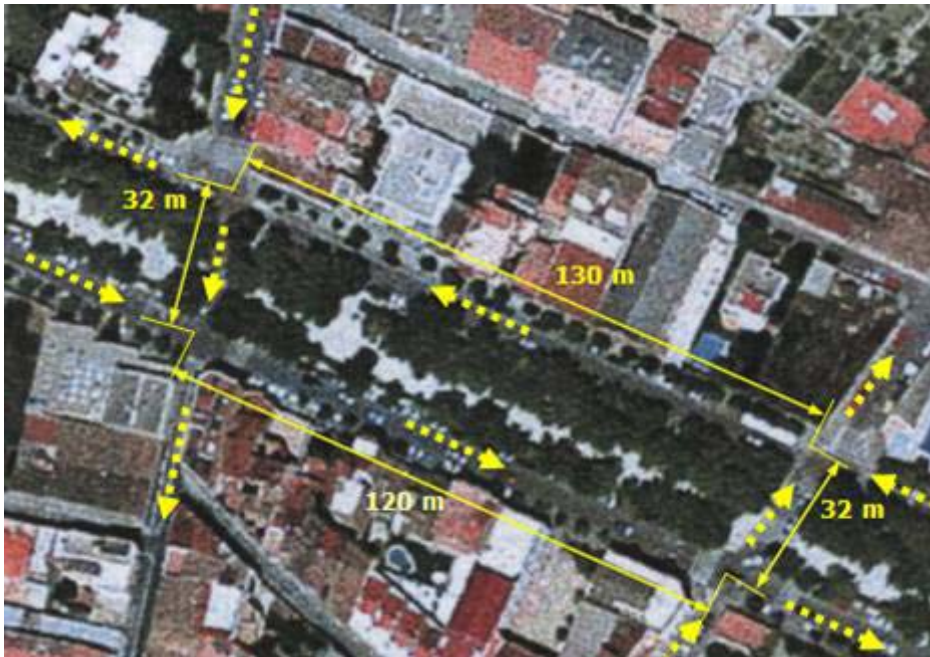


Figura 6.2

A través de la Figura 6.2 podem observar la llargada de cada tram o segment, una de les constants del sistema. Com hem dit anteriorment es tracta d'un quadrangle irregular i, per tant, la llargada (l) de cada segment és diferent:

$$\begin{aligned}l_a &\rightarrow 120 \text{ m} \\l_b &\rightarrow 32 \text{ m} \\l_c &\rightarrow 130 \text{ m} \\l_d &\rightarrow 32 \text{ m}\end{aligned}$$

6.2.- ESQUEMA DE LA ILLA

Il·lustrarem la simetria de l'illa amb un esquema en què es pot veure la situació dels semàfors, els sentits de les vies, el nombre de carrils, etc. Cada una de les vies té dos carrils, amb la qual cosa, l'esquema del sistema és el següent:

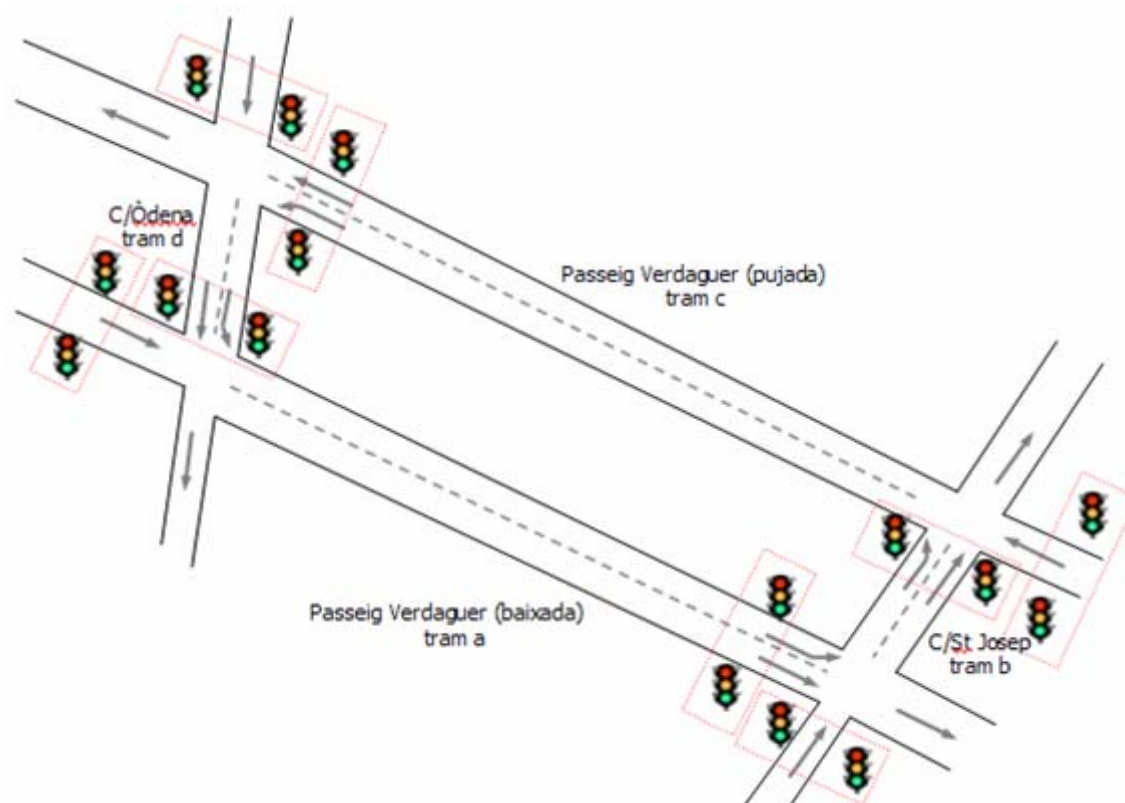


Figura 6.3

En el dibuix, els semàfors han estat agrupats per parelles.

Podem observar-hi vuit grups de semàfors: quatre que dirigeixen els vehicles que circulen pel sistema (ja sigui per a continuar dintre del conjunt o bé per a sortir-ne), i els altres quatre semàfors que dirigeixen els vehicles que entren al sistema des de l'exterior (ja sigui per entrar al sistema o bé per no arribar-hi a entrar).

6.3.- CARACTERÍSTIQUES DEL SISTEMA

Començarem definint les diferents variables implicades (segons l'apartat 5.1.) i la nomenclatura per referir-nos a cada lloc de la illa quan fem el recompte manual. Vegem-ho en el següent dibuix:

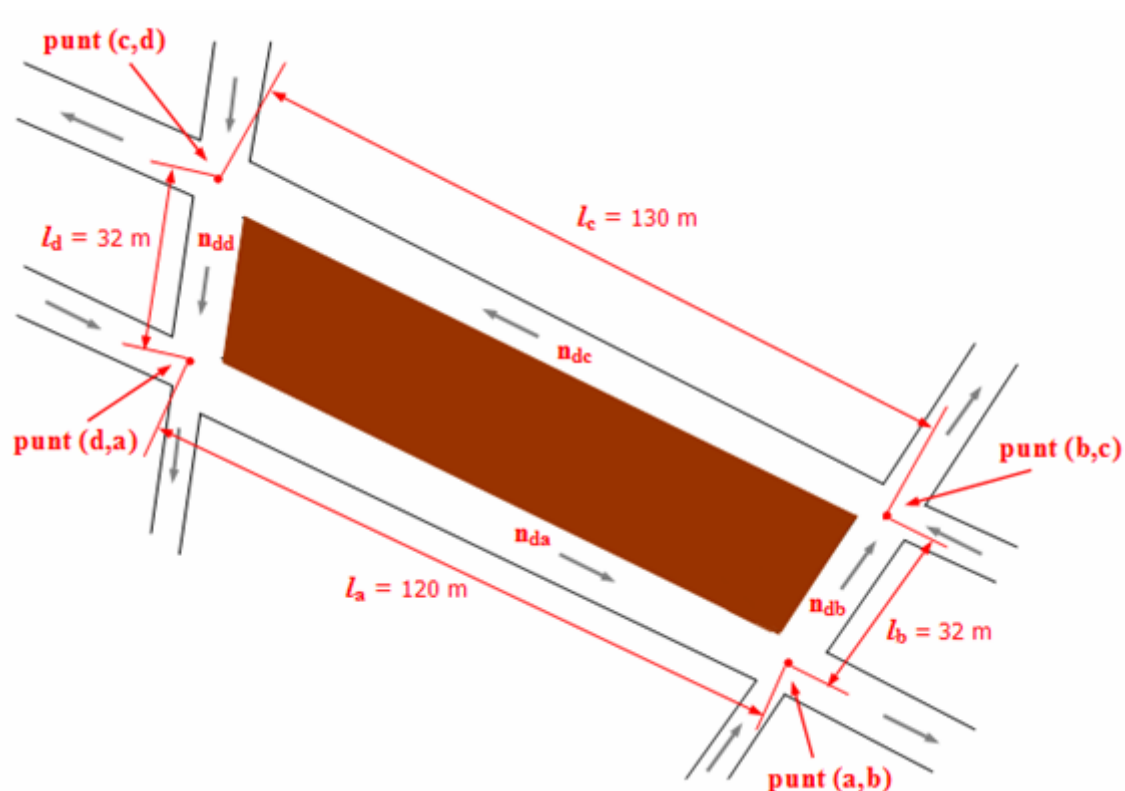


Figura 6.4

En el dibuix hem definit:

- Llargada l_x : llargada del tram x.
- Nombre de vehicles n_{dx} : nombre de cotxes que es troben dins el tram x.
- Punt (x,y): Intersecció (cruïlla) dels trams x i y.

També definirem les següents variables:

- n_{qinx} : nombre de vehicles que entren al tram x des de fora del sistema.
- n_{qoutx} : nombre de vehicles que surten del tram x cap a fora del sistema.
- n_{qx} : nombre de vehicles que passen pel punt de sortida del tram x. (Per exemple, tots els cotxes que, provenint del tram a, passen pel punt (a,b), surtin o no del sistema).

Adonem-nos que en aquesta definició de variables no tenim en compte els vehicles que:

- No arriben a entrar al sistema.
- Romanen dins el sistema sense sortir-ne

Ho il·lustrarem amb el següent gràfic que simbolitza la cantonada (intersecció o cruïlla) (a,b):

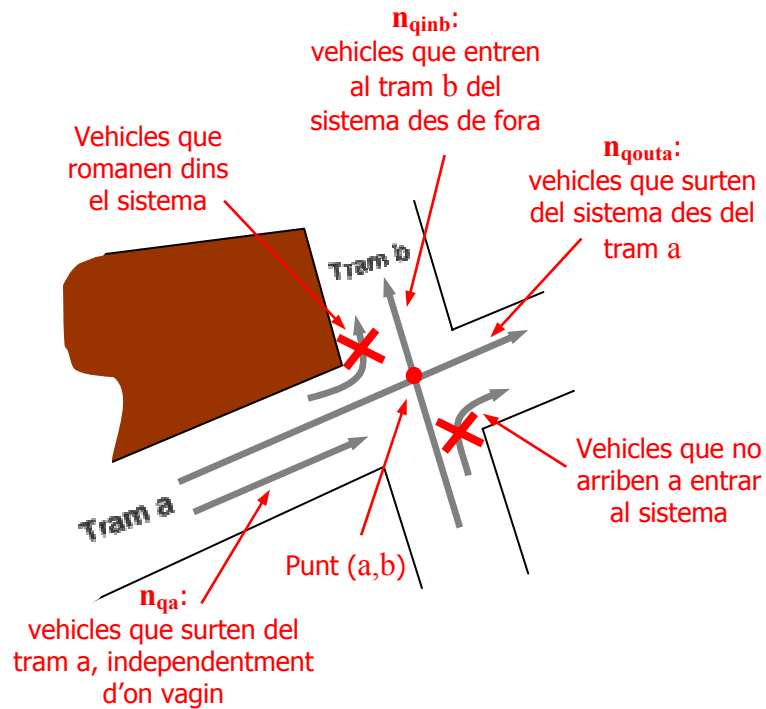


Figura 6.5

Les darreres variables que definirem corresponen a la llei fonamental del trànsit (equació [9]):

- v_{mx} : mitjana de les velocitats mitjanes dels vehicles pel tram x.
- d_x : densitat de vehicles dins el tram x.
- q_x : intensitat (flux) de vehicles pel tram x.
- q_{inx} : intensitat (flux) de vehicles que entren al tram x del sistema.
- q_{outx} : intensitat (flux) de vehicles que surten del sistema pel tram x.

Les primeres tres (v_{mx} , d_x i q_x) ens serviran per fer un estudi comparatiu de la circulació a l'**interior de l'illa** en diferents règims de circulació a base de mesurar la velocitat mitjana i la intensitat, i calcular, a partir d'aquestes dues, la densitat aplicant l'esmentada llei en cada tram i en cada règim de circulació.

Les altres dues (q_{inx} i q_{outx}) ens serviran per dues coses:

- Per estudiar els **fluxos d'entrada i sortida** de vehicles del nostre sistema en diferents règims circulatoris.
- Per comprovar la coherència del sistema.

7.- EL SISTEMA SEMAFÒRIC D'IGUALADA I DE LA NOSTRA ILLA

Un cop escollida l'illa que volíem estudiar, vam sol·licitar una entrevista amb la regidora de via pública de l'Ajuntament d'Igualada, la Sra. Sílvia Torreblanca. Els dos objectius principals d'aquesta entrevista eren:

- Conèixer els sistemes i models que s'apliquen a la ciutat d'Igualada per tal de regular el trànsit, especialment per allò que fa a la regulació dels semàfors.
- Conèixer les particularitats de l'illa concreta que volíem estudiar: si era un "punt negre" de la circulació d'Igualada, si tenia algun problema concret de trànsit, si s'havien fet estudis sobre aquesta illa, quins i com, etc.

La regidora ens va concedir ràpidament l'entrevista i es va interessar molt pel treball. Per tal de tractar als detalls tècnics va demanar la participació a la reunió de l'Enginyer Marc Pujol, tècnic de viabilitat i encarregat dels temes de circulació, cosa que aquest va fer molt amablement.

L'entrevista va ser molt profitosa i les principals informacions que en vam obtenir van ser les següents:

- a) Els sistemes per optimitzar el trànsit tant de vehicles com de vianants es decideixen a les reunions de la comissió de viabilitat. Aquesta comissió té representants de tres estaments: l'equip polític, l'equip tècnic i la Policia Local. Aquests representants són:
- Equip polític: generalment, la regidora de via pública (l'entrevistada).
 - Equip tècnic: l'enginyer de viabilitat (també entrevistat) i el cap d'àrea d'urbanisme.
 - Policia Local: El cap de la Policia Local.

Les funcions d'aquesta comissió són resoldre problemes de trànsit, de seguretat, etc. tant en vies existents com en obres públiques de nova construcció. Entre d'altres coses s'ocupen dels passos de zebra, senyals de trànsit, temporitzacions dels semàfors, de decidir sistemes d'intersecció (rotondes, cruïlles, etc.), d'establir sentits de circulació, i de tots els temes relacionats.

Els estudis sobre el terreny els realitzen els dos darrers estaments: l'equip tècnic te viabilitat conjuntament amb els agents de la Policia Local. Quan la complexitat d'un estudi, sigui teòric o sobre el terreny ultrapassa les possibilitats d'aquests estaments es contracta els serveis d'empreses externes especialitzades en aquests temes (se'ns va mostrar un exemplar d'un dels estudis fets).

- b) A diferència de ciutats grans com Barcelona, a Igualada no existeix cap model matemàtic/informàtic global del trànsit de la ciutat que permeti fer previsions ni simulacions. Per tant, les diferents zones es tracten de manera aïllada, tot i que es procura tenir en compte la influència de les decisions preses a les zones adjacents o les artèries (les vies circulatòries principals) de la ciutat. Quan el sistema es porta a la pràctica, es prova durant un temps i si el resultat no resulta satisfactori es busca la manera de corregir-lo.

Tampoc es disposa d'un sistema informàtic centralitzat que permeti controlar els semàfors de la ciutat, ja que el sistema resultaria massa car per a les possibilitats de l'Ajuntament.

El que sí que hi ha és diversos tipus de semàfors. En general, tot el conjunt de semàfors corresponents a una zona determinada es troben sincronitzats mitjançant un sistema electrònic. Els tipus principals existents a Igualada són:

- Els de temporització fixa: Porten un sistema electrònic que permet regular la durada del cicle dels semàfors i el temps que es troba en verd i en vermell cada un, però un cop regulat aquests cicles queden fixats les 24 hores del dia. Són els més corrents i econòmics.
- Els de temporització variable: El seu sistema electrònic és més sofisticat i per tant molt més car. S'acostumen a posar a les zones de nova construcció, especialment a les vies amb gran volum de circulació. No solament permeten regular els cicles semaforics igual que els anteriors, sinó que, a més, es poden programar per canviar aquests cicles al llarg del dia, la qual cosa resulta molt útil en hores punta, o bé en hores que hi ha més circulació en uns sentits que en els altres.
- Els que disposen de sensors (detectors): Poden ser dels dos tipus anteriors, però, a més, incorporen algun dispositiu que pot alterar el cicle en qualsevol moment. Com a exemples hi ha els semàfors amb botó per a vianants o els que porten un detector de vehicles. L'avantatge que presenten és que aquests dispositius addicionals serveixen perquè el semàfor es posi verd el més aviat possible.

Tal com hem dit abans, a Igualada no hi ha semàfors amb control informàtic centralitzat.

- c) El sistema semaforic de la nostra illa correspon al primer tipus (el més senzill), com la majoria dels semàfors de la ciutat. Més endavant, en la part experimental farem una comprovació d'aquesta informació.

El disseny dels cicles de l'illa (i també de tot el Passeig Verdaguer i carrers adjacents) el van fer conjuntament l'equip tècnic de viabilitat de l'Ajuntament i la Policia Local. El seu objectiu va ser evitar al màxim la congestió de la via, fent que els trams amb més volum de circulació (intensitat q , en el nostre llenguatge tècnic) trobessin en verd el màxim de semàfors seguits possible.

Aquest objectiu el van aconseguir per a la major part del dia, però van observar que, en certs moments (algunes hores punta), el volum de trànsit era tan elevat que l'illa no podia absorbir tots els vehicles amb fluïdesa. En aquests moments, qualsevol petit incident, com un cotxe aturat en doble fila, un vehicle estacionant, un vehicle gran ocupant els dos carrils, etc. provocava congestió, no solament a l'illa, sinó també al segment anterior de la via (entrada al tram amb l'incident).

Tota aquesta informació que se'ns va donar a l'entrevista ens ha estat de gran profit a l'hora de realitzar el treball.

8.- METODOLOGIA

El trànsit, es pot analitzar seguint diferents metodologies. Com hem explicat en l'apartat 5.1., la nostra metodologia es basarà en l'anàlisi de les variables macroscòpiques del sistema mitjançant el mètode matemàtic proposat al HCM.

S'ha de tenir present però, que l'anàlisi consistirà a comparar l'estudi en dos règims diferents (ambdós de densitat considerable): fluid i congestionat.

Per aconseguir aquest anàlisi s'ha de seguir un ordre a l'hora d'analitzar les variables macroscòpiques i els altres factors que hi intervenen.

El ordre que seguirem en aquesta recerca serà:

- 1r pas → Determinarem la durada dels semàfors. Amb un cronòmetre mesurarem el temps que els semàfors estan en verd i el temps que estan en vermell, així també podrem determinar quant dura un cycle semafòric. Farem quatre mesures a diferents hores del dia, per tal d'aconseguir la màxima precisió possible en la determinació d'aquests temps, i després en calcularem la mitjana. Com podem veure a la Figura 8, hi ha vuit grups de semàfors, però només caldrà analitzar-ne quatre, els quatre semàfors de dins del sistema, és a dir, els que regeixen la circulació de vehicles dins del sistema, i no pas els que regulen l'entrada de vehicles al sistema.
- 2n pas → Mesurarem les intensitats (q_x). Per mesurar les intensitats haurem de seguir unes bases constants:
 - Mesurarem sempre deu cycles semafòrics.
 - Les mesures es faran al llarg de 12 dies (el temps que trigaria una persona sola a fer el recompte). Però, en aquest cas el tutor em va ajudar, ja que en dotze setmanes, la climatologia podia variar molt. D'aquesta manera ho vam poder fer en 6 dies (en realitat, un mes i mig).
 - Totes les mesures es faran el mateix dia de la setmana, concretament en dimarts (escollit sense cap raó concreta).
 - Es faran mesures a dues hores diferents, ja que per observació vam veure que l'Escola de Música (situada al mig del Passeig) ocasionava grans col·lapses, cues i congestions quan els pares hi portaven els seus fills. Per això hem triat dues hores concretes:
 - Les 5:30, considerant-lo trànsit dens i congestionat.
 - Les 6:30, considerant-lo trànsit dens i fluid.
 - Les mesures es faran en condicions climatològiques iguals (si hi ha un dia de pluges, el recompte s'haurà de posposar per al següent dimarts, etc.)

Aquestes són les bases que seguirem per a fer les següents mesures:

- Comptarem el nombre de vehicles que entren al sistema ($n_{q_{inx}}$) i el nombre de vehicles que surten del sistema ($n_{q_{outx}}$). Ens col·locarem a les entrades i sortides exteriors al sistema, i des de allí comptarem els vehicles que entren i que surten al sistema a cada cycle semafòric, negligint els que no arriben a entrar i els que segueixen per dintre del sistema. Amb aquestes mesures podrem demostrar la coherència del conjunt, relacionant-lo amb l'exterior.
 - Calcularem la intensitat de vehicles que entren (q_{inx}) i que surten (q_{outx}) al sistema des de l'exterior, a partir del recompte del nombre de vehicles que entren i que surten.
 - Comptarem el nombre de vehicles que circulen pel sistema (n_{qx}), és a dir, els vehicles que passen per cada tram o segment. Ens col·locarem a la sortida de cada segment i comptarem vehicle per vehicle quants en passen a cada cycle semafòric.
 - Calcularem la intensitat de cada tram (q_x) i total, a partir del recompte de vehicles anterior.
- 3r pas → Mesurarem les velocitats (v_{mx}). Per calcular les velocitats s'hauran de seguir les mateixes bases utilitzades per mesurar les intensitats (vegeu constants del 2n pas).

En aquest cas, les mesures que s'hauran de fer són:

- Comptar el temps que triguen els vehicles a recórrer cada tram o segment. Amb un cronòmetre mesurarem el temps des de que el paraxocs posterior entra en un dels trams fins que el paraxocs posterior surt d'aquell mateix tram.
 - Calcular la mitjana de temps a cada tram (Δt_x).
 - Calcular la velocitat mitjana de cada tram (v_{mx}), a partir dels temps i la longitud del segment.
- 4t pas → Calcularem les densitats (d_x), seguint la llei fonamental del trànsit, a partir de les intensitats i les velocitats mitjanes.
 - 5è pas → Finalment, un cop mesurades totes aquestes variables i extreure'n les lògiques conclusions, farem un estudi comparatiu dels dos règims, fluid i congestionat, amb totes les seves variables.

9.- MESURA DURADA CICLES SEMAFÒRICS

Per poder fer càlculs necessitem conèixer el temps que duren els cicles dels quatre grups de semàfors del sistema.

Farem les mesures amb un cronòmetre i manualment (d'aquí vindran les diferències en les dècimes, perquè no es pot ser completament exacte en el temps de reacció alhora de prémer el botó del cronòmetre). En farem quatre per tal d'aconseguir la màxima precisió possible en la determinació del temps dels cicles.

Cal tenir present que les mesures seran preses a diferents hores del dia, per comprovar la seva continuïtat al llarg del mateix dia; però tenint en compte que sempre es faran en el mateix dia; en dimarts.

Podem veure les mesures a la taula següent:

	Semàfor a Verd	Semàfor a Vermell	Semàfor b Verd	Semàfor b Vermell	Semàfor c Verd	Semàfor c Vermell	Semàfor d Verd	Semàfor d Vermell
<u>Cronometratge</u>								
1r	36,31	58,98	44,45	50,85	44,89	50,47	43,92	51,07
2n	35,83	58,98	44,24	50,77	44,93	50,12	43,98	51,06
3r	36,14	58,63	44,12	50,80	44,93	50,39	43,94	51,07
4t	35,11	59,82	44,15	50,94	44,36	50,08	43,99	51,09
Temps mitjans [s]	35,85	59,1	44,24	50,84	44,78	50,27	43,96	51,07
Percentatge del cicle	37,8%	62,2%	46,5%	53,5%	47,1%	52,9%	46,3%	53,7%
CICLE (verd+vermell)	94,95		95,08		95,04		95,03	
Temps mitjà d'un cicle [s]	95,025				≈ 95 s			

Observant aquestes dades en podem extreure dues conclusions importants:

- Els semàfors tenen temporització fixa tot el dia, ja que les mesures han estat preses a diferents hores diàries i sempre han donat aproximadament el mateix valor. Això vol dir que el sistema electrònic només permet regular el temps del cicle i el percentatge de verd i vermell dels semàfors, però no pot alterar automàticament els cicles semafòrics al llarg del dia (si pogués alterar el cicle semafòric potser es solucionarien alguns problemes de congestió).
- Per simplificar considerarem tots els cicles de 95 s, que de fet és exactament el que duren, ja que les 0,02 centèsimes són un error degut probablement al temps de reacció del dit al prémer el botó del cronòmetre, ja que les mesures van ser preses experimentalment. Això ens indica que els quatre semàfors tenen el mateix cicle, encara que uns estiguin en verd més estona que altres, i per tant podrem fer les mesures adequades tot guiant-nos a partir dels cicles semafòrics.

10.- MESURA INTENSITATS D'ENTRADA I SORTIDA (EXTERNES AL SISTEMA)

Per a què el nostre estudi sigui vàlid caldrà primer comprovar la validesa de les mesures realitzades. Això ho anomenarem "coherència del sistema". Per poder fer-ho haurem de comprovar la correcció de les mesures observant la relació del sistema amb l'exterior.

La relació del nostre sistema amb l'exterior es basa en comparar els vehicles que entren al sistema i els que en surten.

Per comprovar que el sistema és coherent el sistema haurà de complir aproximadament la següent equació:

$$\sum q_{inx} - \sum q_{outx} = 0 \quad [10]$$

S'ha de tenir en compte que les mesures s'han fet en diferents dimarts i que no hem tingut en compte els vehicles que aparquen i els que surten d'estacionament de cada tram intern. Aquest fet farà que l'equació [6] no es compleixi exactament.

Donarem per sistema coherent una diferència màxima del 5%.

$$| \sum q_{inx} - \sum q_{outx} | < 5\% \quad [11] \rightarrow \text{sistema coherent}$$

Per poder determinar les intensitats, cal mesurar el nombre de vehicles que entren i surten del sistema, sense considerar els vehicles que no arriben a entrar al sistema ni els que romanen dins el sistema sense sortir-ne, tal com ho il·lustra la Figura 6.4.

Farem les mesures al llarg de deu cicles semafòrics. I després en calcularem les intensitats (fluxos) que entren i surten.

Per determinar la intensitat de vehicles; cal dividir el nombre de vehicles pel temps en hores (vehicles/hora), aplicant l'equació 1:

$$q = \frac{n_q}{\Delta t_q} \quad [1]$$

On: q = intensitat

n_q = nombre de vehicles que surten o entren

Δt_q = increment de temps en el qual passen n vehicles, en aquest cas deu cicles, és a dir: 0,284 h.

10.1.- RECOMPTE DE DADES

Fent el recompte obtenim els resultats de les taules següents. En **règim fluid**:

Inici: 18h:32' - Fi: 18h:48' - Durada cycle semafòric: 95s

$$\Delta t_q = 950s = 15:50" = 0,284 \text{ h}$$

	Punt a,b		Punt b,c		Punt c,d		Punt d,a		Suma	
<u>Cicle semafòric</u>	n_{qina}	n_{qouta}	n_{qinb}	n_{qoutb}	n_{qinc}	n_{qoutc}	n_{qind}	n_{qoutd}	Σn_{qinx}	Σn_{qoutx}
1r	7	16	11	5	10	12	14	9	42	42
2n	8	7	9	8	4	21	11	3	32	39
3r	5	8	16	6	8	12	13	5	42	31
4t	3	16	7	7	4	14	11	6	25	43
5è	7	14	13	7	6	13	21	5	47	39
6è	4	10	15	6	7	11	16	10	42	37
7è	4	9	18	5	4	15	12	6	38	35
8è	3	16	8	6	7	12	25	8	43	42
9è	4	19	10	7	11	11	17	7	42	44
10è	6	13	8	4	12	12	15	1	41	30
TOTAL	51	128	115	61	73	133	155	60	394	382
MITJANA VEHICLES										
(n [vehicles])	5,10	12,80	11,50	6,10	7,30	13,30	15,50	6,00	39,40	38,20
Valor mínim	3	7	7	4	4	11	11	1	25	30
Valor màxim	8	19	18	8	12	21	25	10	47	44
Desviació Mitjana σ_m	1,52	3,44	3,20	0,92	2,36	2,02	3,40	2,00	4,64	3,96
Desv. Mitjana σ_m (%)	29,8%	26,9%	27,8%	15,1%	32,3%	15,2%	21,9%	33,3%	11,8%	10,4%
INTENSITATS MITJANES										
$q_x = n_{qx} / \Delta t_q$ [vehic./h]	179,6	450,7	404,9	214,8	257,0	468,3	545,8	211,3	1387,3	1345,1
INTENSITATS MITJANES										
$q_x = n_{qx} / \Delta t_q$ [vehic./h]	179,6	450,7	404,9	214,8	257,0	468,3	545,8	211,3	1387,3	1345,1
			Σq_{inx}		Σq_{outx}					
Diferència mitjana q_x in i out [vehicles/h]			1387,3	-	1345,1	=	42,25		(3,09%)	

Podem veure que el nombre de vehicles, així com les intensitats, que entren i que surten del sistema són aproximadament iguals.

El sistema, en règim fluid, és coherent, ja que la diferència és d'un 3,09% (menor a 5%).

Si fem el recompte en el **règim congestionat**:

Inici: 17h:29' - Fi: 17h:45' - Durada cycle semafòric: 95s

$\Delta t_q = 950s = 15:50'' = 0,284 \text{ h}$

	Punt a,b		Punt b,c		Punt c,d		Punt d,a		Suma	
Cicle semafòric	n_{qina}	n_{qouta}	n_{qinb}	n_{qoutb}	n_{qinc}	n_{qoutc}	n_{qind}	n_{qoutd}	Σn_{qinx}	Σn_{qoutx}
1r	5	15	13	11	5	6	13	4	36	36
2n	3	10	9	6	8	13	14	9	34	38
3r	4	11	14	5	10	13	16	7	44	36
4t	4	15	18	3	6	18	15	7	43	43
5è	5	17	12	8	10	15	13	6	40	46
6è	6	7	15	7	5	11	23	5	49	30
7è	1	12	7	4	6	16	10	9	24	41
8è	4	19	17	9	8	12	6	5	35	45
9è	5	13	15	7	8	12	17	12	45	44
10è	5	15	21	5	13	9	20	7	59	36
TOTAL	42	134	141	65	79	125	147	71	409	395
MITJANA VEHICLES (n [vehicles])	4,20	13,40	14,10	6,50	7,90	12,50	14,70	7,10	40,90	39,50
Valor mínim	1	7	7	3	5	6	6	4	24	30
Valor màxim	6	19	21	11	13	18	23	12	59	46
Desviació Mitjana σ_m	1,00	2,80	3,10	1,90	1,92	2,50	3,50	1,74	7,10	4,30
Desv. Mitjana σ_m (%)	23,8%	20,9%	22,0%	29,2%	24,3%	20,0%	23,8%	24,5%	17,4%	10,9%
INTENSITATS MITJANES										
$q_x = n_{qx} / \Delta t_q$ [vehic./h]	147,9	471,8	496,5	228,9	278,2	440,1	517,6	250,0	1440,1	1390,8
Diferència mitjana	Σq_{inx}		Σq_{outx}							
q_x in i out [vehicles/h]	1440,1		-	1390,8	=	49,30	(3,48%)			

De la mateixa manera que passa en el règim fluid, en règim caòtic comprovem que el nostre sistema és coherent i que, per tant, es pot analitzar i estudiar correctament.

La diferència és major que en el règim fluid (3,48%), però tot i així segueix sent inferior al 5%.

Podem observar a partir de les dues taules que les desviacions mitjanes, tant en règim fluid com congestionat, són molt semblants, és a dir, comencem a observar que no hi ha gaire diferència entre els dos règims en quant a nombre de vehicles que circulen per les vies i, conseqüentment, entre les intensitats (fluxos).

10.2.- ESTUDI COMPARATIU INTENSITATS

Farem un estudi per comparar quantitativament les intensitats d'entrada i de sortida del règim fluid respecte el règim congestionat.

10.2.1.- Intensitats d'entrada:

	fluid	cong.
	q_{inx}	q_{inx}
TRAM a	179,6	147,9
TRAM b	404,9	496,5
TRAM c	257,0	278,2
TRAM d	545,8	517,6
TOTAL (Σq_{inx})	1387,3	1440,1

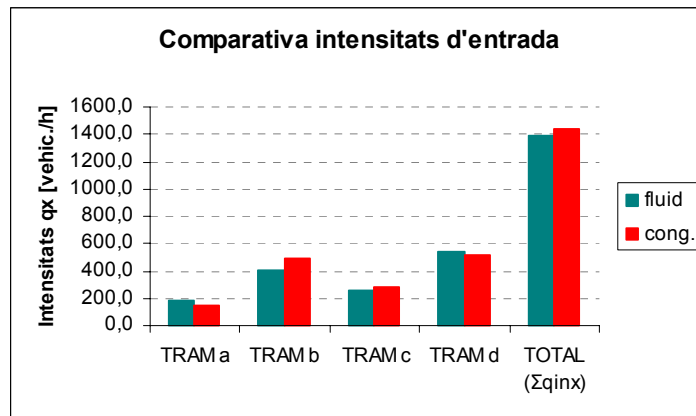


Figura 10.1

A partir del gràfic podem veure que pràcticament no hi ha diferències entre el règim fluid i congestionat.

Aquest fet ens porta a la conclusió de que el sistema no pot absorbir més intensitat de l'exterior. Per més que els vehicles vulguin entrar, les intensitats d'entrada estan limitades hi ha un nombre màxim de vehicles que poden entrar al sistema. Si volguessin entrar més vehicles es formarien congestions i col·lapses a l'exterior del sistema perquè el sistema no pot absorbir aquests vehicles. Que de fet, això és el que passa en el règim congestionat: es col·lapsa l'exterior del sistema, i els vehicles s'han de quedar davant d'un semàfor verd sense poder avançar.

En la Figura 10.1 podem observar que el tram a és el tram que té menys capacitat d'absorció, motiu pel qual el passeig es col·lapsa. El tram c també és causa dels col·lapses al passeig, però no tant com el tram a perquè té una mica més de capacitat d'absorció. El tram que té més capacitat d'absorció és el tram d.

→ Recomanaríem al conductor que volgués entrar a l'illa que s'introduís pels trams b i d i no pels trams del Passeig Verdaguier (a i c), d'aquesta manera trigaria menys temps en entrar, és a dir, entraria amb més facilitat i en menys temps.

10.2.2.- Intensitats de sortida:

	fluid	cong.
	Q_{outx}	Q_{outx}
TRAM a	450,7	471,8
TRAM b	214,8	228,9
TRAM c	468,3	440,1
TRAM d	211,3	250,0
TOTAL (ΣQ_{outx})	1345,1	1390,8

Representem els valors en un gràfic:

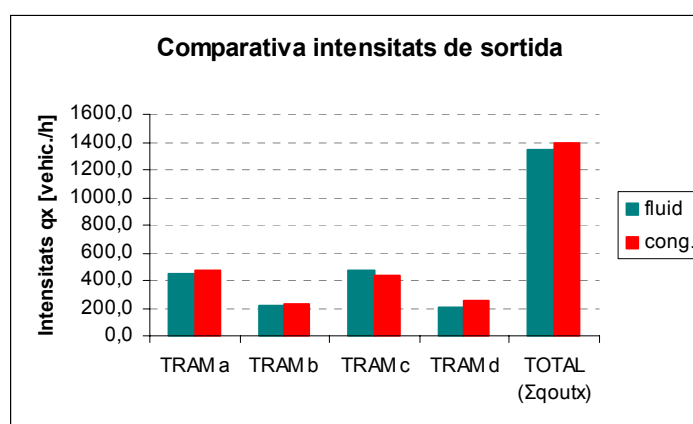


Figura 10.2

Observant el gràfic de la Figura 10.2 podem veure que tampoc hi ha gaire diferència en les intensitats de sortida del règim fluid respecte el congestionat. Això ens porta a la conclusió que el sistema no pot extreure més vehicles de els que indica la taula de valors corresponent.

Podem concloure que els trams que extreuen més vehicles a l'exterior són els trams a i c, els trams més llargs i per on circulen també més vehicles. En canvi, els trams b i d no extreuen tants vehicles a l'exterior.

Si comparem les Figures 10.2 i 10.1 podem observar que les intensitats d'entrada i de sortida totals són gairebé iguals. Per contra, podem veure clarament com en les intensitats d'entrada els trams amb valors més alts són els trams que tenen valors més baixos en les intensitats de sortida, és a dir, els trams b i d. I el mateix passa a la inversa, els trams per on entren menys vehicles són els trams per on surten més vehicles (els trams a i c).

→ En aquest cas, recomanaríem al conductor sortir pels trams a i c (els trams del passeig), ja que és per on més vehicles poden sortir a l'exterior del sistema.

11.- MESURA INTENSITATS INTERNES

En l'apartat 10 acabem de comprovar la coherència del sistema de mesures que hem adoptat. Tot seguit ens dedicarem a l'estudi de les seves variables internes.

La primera variable a estudiar és la intensitat (q_x), definida a l'apartat 5.1.

Calcularem la Intensitat de vehicles que circulen per l'interior del sistema analitzant el nombre de vehicles (n_{qx}) que passen per cada segment o tram.

Per mesurar el nombre de vehicles que surten del segment a cada cicle ens vam col·locar successivament als quatre punts extrems del sistema (punt a,b, punt b,c, punt c,d i punt d,a, com il·lustra la Figura 6.3) i comptarem el nombre de vehicles que passen cada cop que el semàfor d'aquell punt està en verd.

Vam decidir mesurar deu cicles, ja que anteriorment havíem observat que els dos règims analitzats (fluid i congestionat) es mantenen aproximadament uns 15 minuts a les hores punta. Naturalment, fer les mesures diversos dies i després fer la mitjana seria estadísticament més acurat, però la magnitud d'aquesta feina ens ho va fer impossible.

Es van comptar tots els vehicles que sortien de cada tram, bé per seguir dins del sistema o bé per sortir-ne.

Després calcularem la intensitat de la mateixa manera que ho hem fet a l'apartat anterior 10, aplicant l'equació 1:

$$q = \frac{n_q}{\Delta t_q} \quad [1]$$

On: q = intensitat

n_q = nombre de vehicles que passen per cada tram

Δt_q = increment de temps en el qual passen n vehicles, en aquest cas deu cicles, és a dir: 0,284 h.

11.1.- RECOMPTE DE DADES (INTENSITATS)

En la circulació densa però fluïda, els vehicles passen sense cap problema per tots els trams, només són interromputs per la presència dels semàfors. Recull de dades en **règim fluid**:

Inici: 18h:32' - Fi: 18h:48' - Durada cicle semafòric: 95s

Temps total $\Delta t_q = 950s = 15':50'' = 0,284 \text{ h}$

Llargada tram x (l_x [m])	120	32	130	32	314
	Tram a	Tram b	Tram c	Tram d	Mitjana (ponderada)
Cicle semafòric	n_{qa}	n_{qb}	n_{qc}	n_{qd}	n_{qm}
1r	19	9	20	14	17,89
2n	19	11	17	15	16,95
3r	23	10	21	10	19,52
4t	20	11	16	7	16,10
5è	21	8	22	8	18,76
6è	22	15	18	7	18,10
7è	20	5	23	9	18,59
8è	18	14	17	6	15,96
9è	19	12	16	15	16,64
10è	21	13	17	10	17,41
TOTAL	202	108	187	101	175,92
INTENSITAT MITJANA q_x [vehic./h]	711,3	380,3	658,5	355,6	619,4
MITJANA NOMBRE DE VEHICLES	20,2	10,8	18,7	10,1	17,59
Valor mínim	18	5	16	6	15,96
Valor màxim	23	15	23	15	19,52
Desviació Mitjana σ_m	1,24	2,24	2,24	2,74	0,98
Desviació Mitjana σ_m (%)	6,1%	20,7%	12,0%	27,1%	5,6%

En règim fluid, observem que els trams a i c són molt més regulars, ja que tenen una desviació mitjana menor, i especialment el tram a és bastant continu. Al contrari, els trams b i d són més irregulars, ja que són trams molt curts. Tot i això, el total de la illa té una desviació mitjana molt petita (5,6%), fet que ens demostra la fluïdesa amb què els vehicles circulen pel sistema, ja que com més petita és la desviació més continuïtat té el conjunt.

Per altra banda, en la circulació densa i congestionada es pot observar clarament que els vehicles no circulen amb fluïdesa; perquè es formen cues molt llargues que arriben al següent semàfor, provocant que un vehicle davant del segon semàfor, estant el semàfor en verd, el vehicle no pot circular i els de darrere seu, òbviament, tampoc.

Aquesta és la causa per la qual, tant en règim fluid com congestionat, el nombre de vehicles (n_x) és quasi igual en valors.

Ho veurem a continuació en la taula de dades del **règim congestionat**:

Inici: 17h:29' - Fi: 17h:45' - Durada cicle semafòric: 95s

Temps total $\Delta t_q = 950s = 15':50'' = 0,284 \text{ h}$

Llargada tram x (l_x [m])	120	32	130	32	314
	Tram a	Tram b	Tram c	Tram d	Mitjana (ponderada)
Cicle semafòric	n_{qa}	n_{qb}	n_{qc}	n_{qd}	n_{qm}
1r	19	9	23	10	18,72
2n	15	11	18	10	15,32
3r	14	13	13	11	13,18
4t	22	8	16	15	17,38
5è	11	5	22	16	15,45
6è	23	8	16	9	17,15
7è	26	20	14	10	18,79
8è	18	14	17	10	16,36
9è	19	10	21	11	18,10
10è	24	12	22	12	20,73
TOTAL	191	110	182	114	171,17
INTENSITAT MITJANA q_x [vehic./h]	672,5	387,3	640,8	401,4	602,7
MITJANA NOMBRE DE VEHICLES	19,1	11	18,2	11,4	17,12
Valor mínim	11	5	13	9	13,18
Valor màxim	26	20	23	16	20,73
Desviació Mitjana σ_m	3,72	3,00	3,04	1,76	1,63
Desviació Mitjana σ_m (%)	19,5%	27,3%	16,7%	15,4%	9,5%

En règim congestionat podem veure que les desviacions mitjanes són, en general, molt més altes, fet que ens condueix a la idea de caos, ja que hi ha moltes diferències en el comportament dels diferents vehicles. Això passa en tots els casos excepte al tram d, ja que és un tram molt curt on és impossible que els vehicles es col·lapsin, ja que baixen del carrer St. Josep tenint el semàfor anterior en verd, i passen fluidament, tot i pertànyer a una hora en la qual el sistema global es troba en règim congestionat.

Si observem la desviació mitjana total podem veure que és de 9,5 %, respecte el 5,6% del règim fluid, veiem que és quasi el doble. Això vol dir que hi ha moltes més diferències i que, per tant, és més irregular. (règim congestionat → més caòtic)

11.2.- REPRESENTACIÓ GRÀFICA INTENSITATS

Si il·lustrem les dades recollides manualment, podem obtenir els dos gràfics d'intensitats corresponents als dos règims: fluid i congestionat.

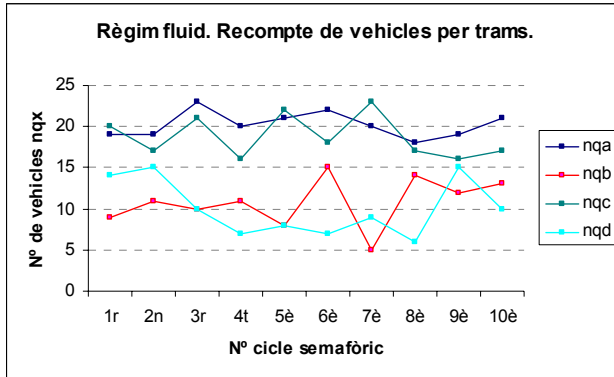


Figura 11.1

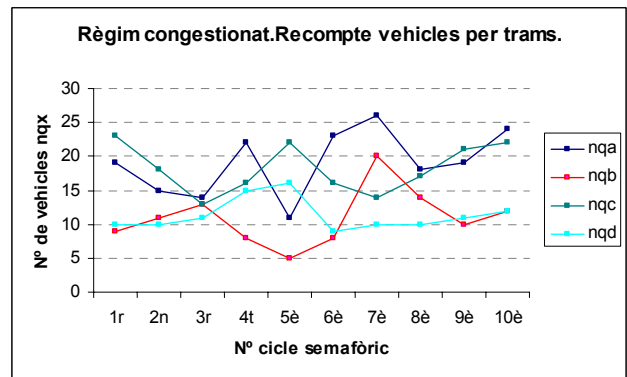


Figura 11.2

En el règim fluid, podem observar que en la globalitat del el sistema es redueix la dispersió.

A partir de la Figura 11.1 veiem que en els trams a i c la el nombre de vehicles està per la part superior del gràfic, ja que són els trams més llargs (els del Passeig) i pels quals hi passen més vehicles. En canvi, en els trams b i d, que estan per la part inferior del gràfic, són els trams més curts i no hi ha tanta quantitat de vehicles circulant.

En aquest gràfic podem observar que el tram a és molt regular (la seva desviació és molt petita), això ens porta a la conclusió de que la temporització semafòrica està optimitzada per al tram a (per a la seva regularitat), ja que és el tram més conflictiu de tots, sobretot quan entrem en hora caòtica perquè és el tram on s'ubica l'Escola de Música.

També podem veure que en el tram c hi ha una tendència a què, quan un cicle té una intensitat alta, el següent cicle té una intensitat baixa i viceversa.

En canvi, si observem el gràfic del règim congestionat ja no podem parlar de cap tipus d'optimització, perquè en règim congestionat es pot observar que cap tram segueix una pauta concreta. En aquest règim és impossible establir cap base ni mètode a seguir, ja que en règim congestionat tots els valors es disparen d'una manera o d'una altra cap al caos. Tal i com ens havia raonat l'enginyer tècnic de vialitat (vegeu apartat 7), en règims anormals (com en aquest cas, el congestionat) resultaria molt difícil fer un estudi matemàtic ja que els resultats no són fiables.

Si comparem els dos gràfics, podem veure que, en règim congestionat, les línies dels trams a i c ja no queden diferenciades dels trams b i d (tal com succeïa en règim fluid). En aquest gràfic veiem que totes les línies de valors queden barrejades les unes amb les altres. A partir d'aquest fet podem començar a veure com el règim congestionat és un règim caòtic.

També es pot observar que en el gràfic de la Figura 11.2 hi ha una desviació mitjana bastant més elevada que en el de règim fluid. Es pot veure com els valors són molt més variats, tot i que la mitjana aritmètica és quasi la mateixa.

Tot seguit, calcularem la mitjana ponderada del nombre de vehicles que passen per tota la illa.

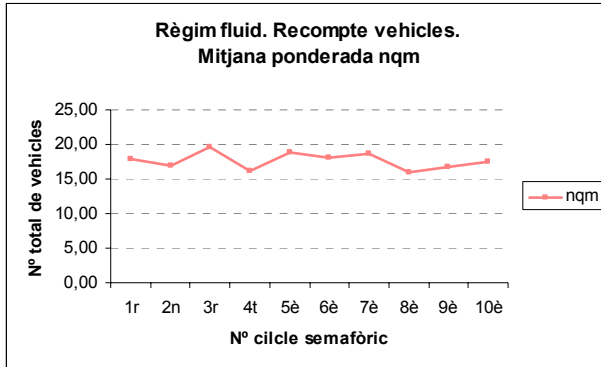


Figura 11.3

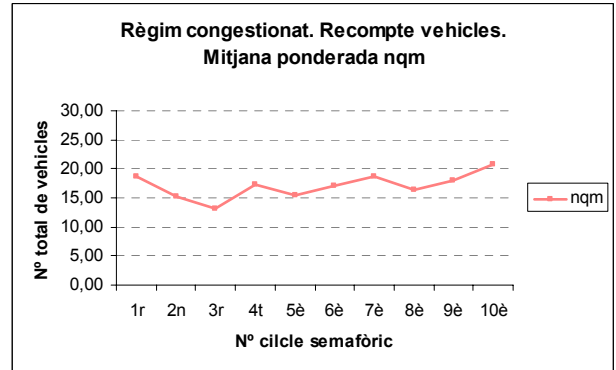


Figura 11.4

La Figura 11.3 correspon a la mitjana en el règim fluid, i la Figura 11.4 al règim congestionat.

Es pot observar que en el primer gràfic (règim fluid) la línia que forma la suma de les intensitats és bastant contínua, i la desviació total en règim fluid és de 5,6 %, és un règim bastant regular com podem veure. En canvi, en la Figura 11.4 observem que la desviació mitjana és major que en el règim fluid, l'abast de valors és més gran, o sigui, que té més discontinuïtat.

En el gràfic de la Figura 11.3 s'observa, també, que la tendència que es mostrava en el tram c de la Figura 11.1 també es manifesta amb una desviació menor.

11.3.- DISTRIBUCIÓ FREQUÈNCIAL INTENSITATS

Totes aquestes dades les il·lustrarem, tot seguit, en un gràfic de freqüències o de dispersió, per tal de veure les diferències entre els dos règims més clarament.

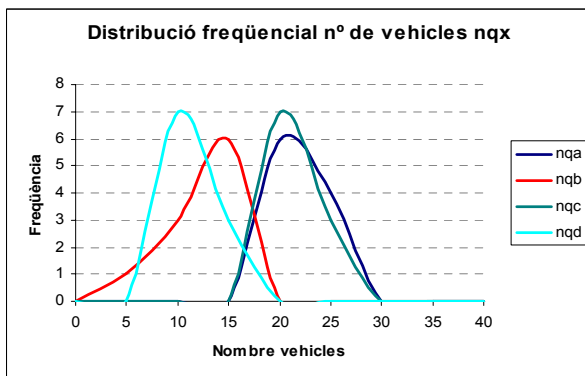


Figura 11.5

Gràfic de dispersió per a trànsit fluid

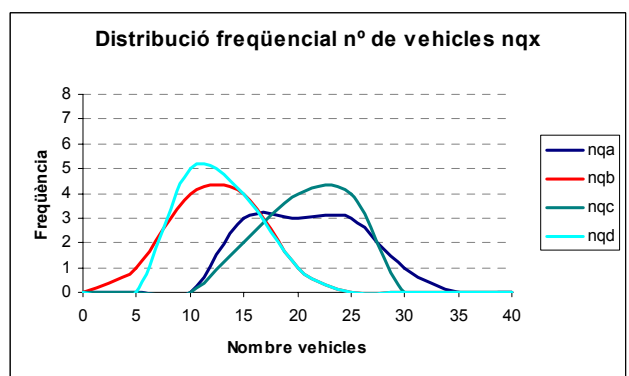


Figura 11.6

Gràfic de dispersió per a trànsit congestionat

Si observem el gràfic de dispersió de la Figura 11.5 veiem que les campanes són bastant estretes i altes (com més estretes i altes, ens indiquen més regularitat). Si ens fixem en els màxims de les campanes veurem que a cada ciclo passen: Tram a, 21 vehicles, Tram b, 15 vehicles, Tram c, 20 vehicles i Tram d, 10 vehicles. Això depèn, en gran mesura, dels percentatges de temps de semàfor verd del ciclo de cada semàfor.

Les diferències freqüencials són relativament petites en règim fluid. A més, podríem dir que les freqüències del tram a i c són quasi iguals.

Per altra banda, en el règim congestionat (Figura 11.6) podem veure que les campanes són més amples i més baixes que al gràfic de la Figura 11.5 del règim fluid. Aquesta diferència ens indica més irregularitat en règim congestionat. Les campanes, també tenen un abast horitzontal (a l'eix d'abscisses) més gran, de 20 a 25 vehicles, mentre que en règim fluid era d'uns 15 vehicles.

Basant-nos en el mateix gràfic de la Figura 11.6 podem veure que en el tram a es pot observar un doble màxim. No podem determinar les circumstàncies concretes per les quals apareix. Caldria estudiar les circumstàncies que el provoquen, per tal de evitar aquest doble màxim. Pot ser culpa de les interaccions entre semàfors, l'increment de vehicles aturats en doble fila (sobretot a l'Escola de Música), pels vehicles grans, com autobusos, etc.

De la mateixa manera que hem representat les intensitats mitjanes de tota l'illa, calcularem les distribucions freqüencials de tota l'illa, en els dos règims:

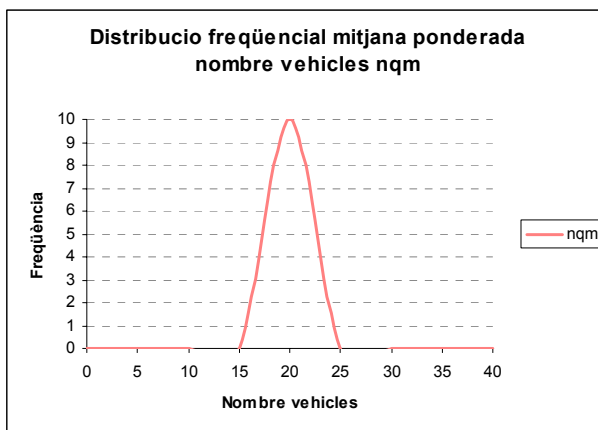


Figura 11.7
Gràfic de dispersió en règim fluid

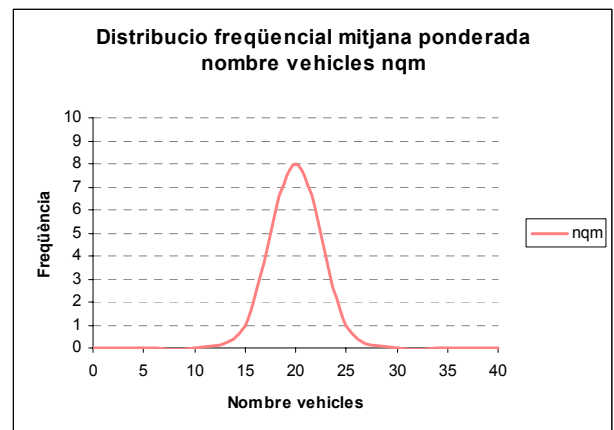


Figura 11.8
Gràfic de dispersió en règim congestionat

La campana del règim fluid (corresponent a la Figura 11.7) arriba a un màxim que correspon a que la majoria de vegades passen 20 vehicles, aquest fet succeeix concretament 10 cops. També podem veure com l'abast de la campana en fluid és mínim.

Mitjançant el mateix gràfic observem que la línia de freqüències descriu una campana quasi perfecta. És clar que no és un sistema perfecte, per això hi ha una sèrie de circumstàncies que ocasionen una mica de distorsió de la campana. Aquestes circumstàncies poden ser culpa de les interaccions entre semàfors, de la irrupció de vehicles grans (autobusos), d'aturades de vehicles en doble fila, etc. Tot i això podem

observar que s'aproxima molt a la campana de Gauss, el model de la distribució normal. Aquesta aproximació ens indica que en règim fluid el mètode aplicat és vàlid.

En el gràfic de règim congestionat es pot observar una distribució amb forma quasi idèntica a la distribució del gràfic de la Figura 11.7. També és una campana bastant perfecta, aproximant-se a la campana de Gauss (de la distribució normal).

Tot i això, en aquest gràfic la campana és més ampla i més baixa, per tant, tornem a comprovar que hi ha més irregularitat. El màxim d'aquesta campana coincideix en 20 vehicles (com al règim fluid), però amb una freqüència de 8 vegades (inferior que el fluid). I l'abast d'aquesta campana és un interval de 15 vehicles, respecte els 10 vehicles de diferència en el fluid.

11.4.- ESTUDI COMPARATIU INTENSITATS INTERNES

Atenent als valors anteriors farem un estudi per comparar les intensitats interiors del sistema en cada tram i globals, comparant el règim fluid respecte el règim congestionat.

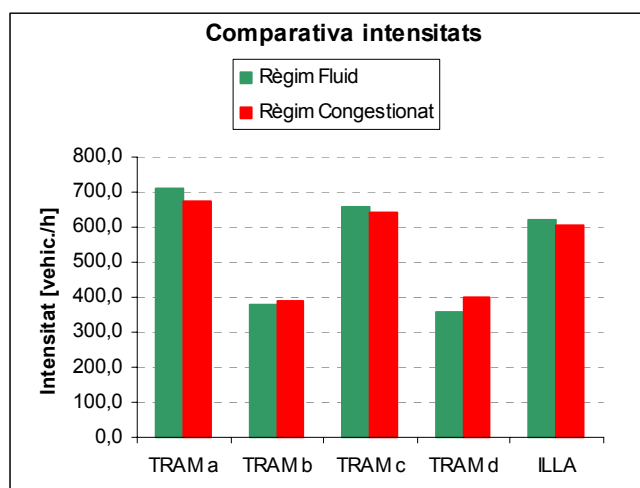


Figura 11.9

Els resultats d'aquest Figura 11.9 són clarament observables i molt importants: Les intensitats en règim fluid i congestionat són gairebé iguals (de la mateixa manera que hem pogut observar en l'apartat 10, amb les intensitats d'entrada i sortida).

Això es degut a que, encara i que en règim congestionat sembla que hagin de passar més vehicles, a la pràctica això no succeeix.

En realitat, en règim congestionat, els vehicles es col·lapsen i han d'anar més lents (trigant més temps entrar al sistema i a creuar-lo pel tram que sigui), de manera que passen menys vehicles dels que podríem arribar a suposar: gairebé els mateixos vehicles que en règim fluid. És una dada curiosa, que més endavant ens servirà per comparar i explicar altres variables.

12.- MESURA DE LES VELOCITATS MITJANES

La velocitat és la segona variable a estudiar (v_{mx}), definida a l'apartat 5.1. Per poder calcular-la, s'ha de mesurar el temps que triguen els vehicles en travessar cada tram. Òbviament estem parlant del temps mitjà. Amb aquest temps mitjà podrem calcular la velocitat mitjana amb què circulen aquests vehicles, i així obtenir la segona variable de la llei fonamental del trànsit.

Per mesurar el temps (Δt) que triga un vehicle escollit a l'atzar des de que el paraxocs posterior del vehicle entra a un tram del sistema fins que en surt, ens vam col·locar successivament a quatre punts centrals de cada segment, i des de allí cronometràvem el temps des que el vehicle entrava fins que sortia. Així successivament amb diversos (concretament 10) vehicles, per poder-ne calcular la mitjana del temps.

Un cop calculat el temps mitjà, determinarem la velocitat mitjana amb què els vehicles circulen per cada tram o segment aplicant la següent fórmula, a partir de la longitud del segment i el temps mitjà que triga un vehicle a passar el segment. Seguirem l'equació 2:

$$v_m = \frac{l}{\Delta t_v} \quad [2]$$

On: v_m = velocitat mitjana

l = llargada del tram

$l_a \rightarrow 120$ m

$l_b \rightarrow 32$ m

$l_c \rightarrow 130$ m

$l_d \rightarrow 32$ m

Δt_v = temps mitjà que els vehicles triguen a travessar cada tram

Cal tenir en compte, però, que en aquest apartat, tot i que la variable que ens interessa és la velocitat, estudiarem més a fons el temps mitjà. Ja que és la mesura que em pres i que, en definitiva, determina la velocitat ja que aquesta variarà segons el temps mitjà dels vehicles a cada tram.

12.1.- RECOMPTE DE DADES (TEMPS-VELOCITATS)

Vegem el recompte dels temps i el càlcul de les velocitats mitjanes en **règim fluid**:

	TRAM a	TRAM b	TRAM c	TRAM d
Llargada tram x (l_x [m])	120	32	130	32
	Δt_a	Δt_b	Δt_c	Δt_d
	[s]	[s]	[s]	[s]
	Mesura			
1a	30,97	5,09	24,85	15,59
2a	20,40	3,39	57,21	2,70
3a	69,11	34,92	10,28	7,03
4a	25,18	3,85	9,99	10,63
5a	38,94	5,11	54,49	6,46
6a	22,77	3,10	13,01	3,77
7a	49,80	8,73	61,09	4,29
8a	26,78	3,19	13,73	3,75
9a	22,29	2,67	11,68	43,29
10a	37,71	21,53	53,17	5,58
TEMPS MITJÀ (Δt_{vmx} [s])	34,40	9,16	30,95	10,31
Valor mínim	20,40	2,67	9,99	2,70
Valor màxim	69,11	34,92	61,09	43,29
Desviació Mitjana σ_m	11,60	7,63	20,43	7,72
Desviació Mitjana σ_m (%)	33,7%	83,3%	66,0%	74,9%
VELOCITAT MITJANA v_{mx} [km/h]	12,56	12,58	15,12	11,17

Podem evidenciar que els temps que triguen els vehicles en creuar els trams a i c són molt majors, ja que són els trams de més llargada, en canvi els trams b i d són els que es creuen més ràpidament.

Degut a aquest fet, podem veure que les desviacions dels trams b i d són molt més altes, ja que podem trobar valors molt diversos, ja que molts vehicles es troben el semàfor en verd i molts altres en vermell.

Les velocitats mitjanes, però, són quasi iguals a tots els trams de la illa.

Ara veurem el recompte en el **règim congestionat**:

	TRAM a	TRAM b	TRAM c	TRAM d
Llargada tram x (l_x [m])	120	32	130	32
	Δt_a	Δt_b	Δt_c	Δt_d
	[s]	[s]	[s]	[s]
Mesura				
1a	44,31	3,42	78,87	4,60
2a	87,96	23,82	73,00	11,45
3a	33,73	10,82	94,16	6,78
4a	70,90	3,76	27,56	56,41
5a	27,35	22,79	61,97	2,60
6a	84,54	3,58	16,14	3,04
7a	30,41	18,71	90,43	2,47
8a	64,57	29,21	20,78	3,44
9a	42,78	5,49	67,40	45,16
10a	61,76	12,56	21,86	11,10
TEMPS MITJÀ (Δt_{vmx} [s])	54,83	13,42	55,22	14,71
Valor mínim	27,35	3,42	16,14	2,47
Valor màxim	87,96	29,21	94,16	56,41
Desviació Mitjana σ_m	19,12	8,17	26,91	14,43
Desviació Mitjana σ_m (%)	34,9%	60,9%	48,7%	98,1%
VELOCITAT MITJANA v_{mx} [km/h]	7,88	8,59	8,48	7,83

Podem observar que tots els temps han pujat (alentint el trànsit en règim congestionat).

També veiem que les velocitats mitjanes han baixat, en règim congestionat són menors. Aquesta diferència és deguda a que els temps són més alts i això fa que, en el mateix tram de longitud l , la velocitat surti inferior.

Passen el mateix nombre de vehicles que en règim fluid, però molt més a poc a poc (tarden més temps).

Queda comprovat, per tant, que com més vehicles hi ha al sistema més difícil és la circulació a l'interior i l'exterior d'aquest, ja que els vehicles col·lapsen el conjunt i no poden passar fluidament, depenent únicament dels semàfors, com succeïa en l'apartat 12.1 en el règim fluid.

També podem observar que els vehicles del tram a són els que passen a menor velocitat, és el segment més caòtic de tot el sistema per la presència de l'Escola Municipal de Música (que és un focus inequívoc de col·lapses).

Les desviacions mitjanes respecte a la taula de règim fluid, són més elevades. En règim congestionat hi ha més variabilitat de dades. El caos ocasiona la irregularitat, i viceversa.

12.2.- DISTRIBUCIÓ FREQUÈNCIAL DELS TEMPS

En la segona variable, que és la velocitat, com que no l'hem mesurada directament, és a dir, no hem calculat les velocitats mitjanes de cada vehicles (si no que hem calculat els temps mitjans que triga cadascun a creuar els trams) no es necessari representar les dades en gràfics, ja que aquestes dades no tenen gaire valor per si soles. Per això en calcularem les dispersions.

Il·lustrarem els valors mesurats (temps que triguen els vehicles) en uns gràfics de freqüències:

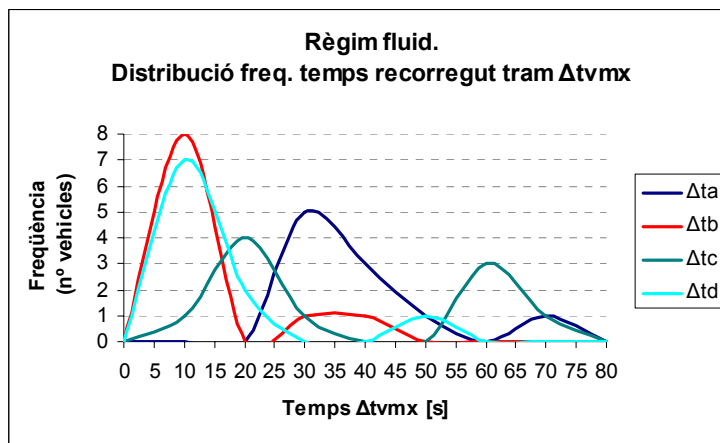


Figura 12.1

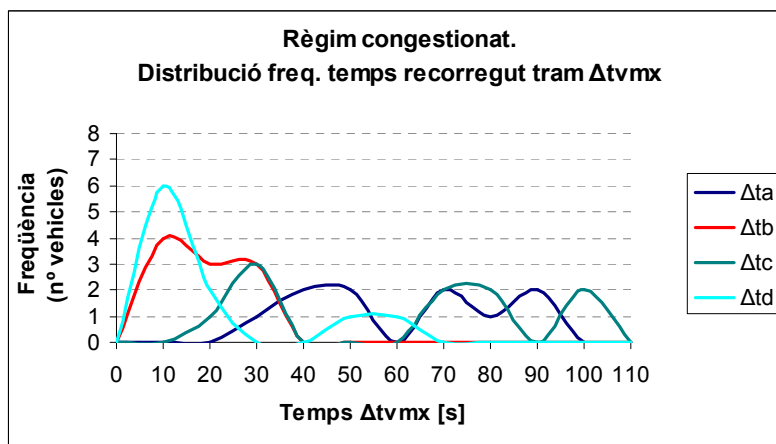


Figura 12.2

A partir dels dos gràfics, podem observar la freqüència dels temps que triguen els vehicles a creuar cada segment.

Fixem-nos primer en la Figura 12.1. Observem que cada línia descriu dues campanes (una de més alta i una altra més baixa):

- La campana grossa indica el temps que triguen la majoria dels vehicles que passen el carrer fluidament sense obstacles (en tots els casos són la majoria de vehicles).
- La altra campana, la petita, indica el temps que triguen els vehicles que es troben el semàfor en vermell. Com es pot observar, són els vehicles que triguen més temps en creuar el corresponent tram.

Per tant, podem afirmar que, en règim fluid, són més vehicles els que creuen els trams amb el semàfor en verd, que no pas els que s'han d'aturar amb el semàfor en vermell. Això s'observa amb més diferència en els trams b i d.

També veiem que la diferència dels dos pics de cada línia és aproximadament al temps que el corresponent semàfor es troba en vermell i, per tant, els vehicles que triguen un temps més gran d'aquesta diferència es troben el semàfor en vermell. Això és molt evident en el tram c, on més o menys la meitat de vehicles se'l troben en verd, i l'altra meitat, en vermell. Podem observar que els vehicles que triguen més temps a creuar el carrer són els dels trams a i c. I els vehicles que triguen menys temps són els del tram b.

Per altra banda, a partir de la Figura 12.2 observem un gràfic en el qual es defineix clarament el caos. Ja no s'ajusta a cap pauta, ni podem establir cap regularitat comuna a tots els trams.

En el gràfic de la Figura 12.2 hi ha múltiples pics. És un gràfic molt dispers i amb molts valors diferents. No s'aproxima gens a un gràfic perfecte (d'una sola moda), sinó que cada línia de freqüència provoca varies crestes. Aquests múltiples pics no solament ens indiquen la presència de semàfors, sinó també altres factors que intervenen en l'aparició del caos.

En canvi, el tram d és totalment idèntic en règim fluid que en congestionat, això és degut a que és un tram bastant curt on no es fa tant present la irregularitat.

Observem detalladament que en els trams a i c hi ha tres pics. Aquest fet ens indica que en els trams a i c, hi ha vehicles que es troben dos vegades el semàfor en vermell, cosa que també es podia observar a l'hora de prendre les mesures, ja que es formaven grans col·lapses que feien augmentar el temps en règim congestionat.

Si ens fixem en aquesta tercera moda, i concretament en el tram a, podem observar que la diferència entre les dues modes és de 20 segons, és el temps que un pare o mare està parat mentre deixa al seu fill a l'escola de música. Aquesta cresta tan estranya, ens indica que aquest vehicle es troba el semàfor en vermell dues vegades des de el moment en què entra al tram a. Aquest fenomen peculiar que succeeix al tram a, podem veure com es repercuteix al principi del tram c, és a dir, el fenomen observat al tram a, fa que els vehicles s'enredreixin tant al tram a com al tram c, i provoca que aquesta diferència de 20 segons entre les dues modes es trobi també representada en el tram c.

Aquesta tendència no repercuteix al tram b, ja que els trams b i c són més regulars i no podem observar tant clarament el caos. Segueixen descrivint dues campanes com en règim fluid. Tot i que podem observar que en el tram b, aquestes dues campanes queden quasi unides. Podem repetir, tal i com hem afirmat en l'apartat 11.2, que el tram d és una excepció, i segueix mostrant-se bastant regular (en comparació amb el règim fluid).

Per aquests motius, recomanaríem al conductor que, en règim congestionat, intentés evitar els trams a i c, els més conflictius, ja que dificulten més el pas dels vehicles: "Deixi al seu fill en els trams b o d, i avançarà més ell caminant que vostè deixant-lo just davant de l'Escola".

12.3.- ESTUDI COMPARATIU DELS TEMPS MITJANS

Atenent als valors anteriors farem un estudi per comparar l'increment de temps que triguen els vehicles del sistema en cada tram i els globals de l'illa del règim fluid respecte el congestionat.

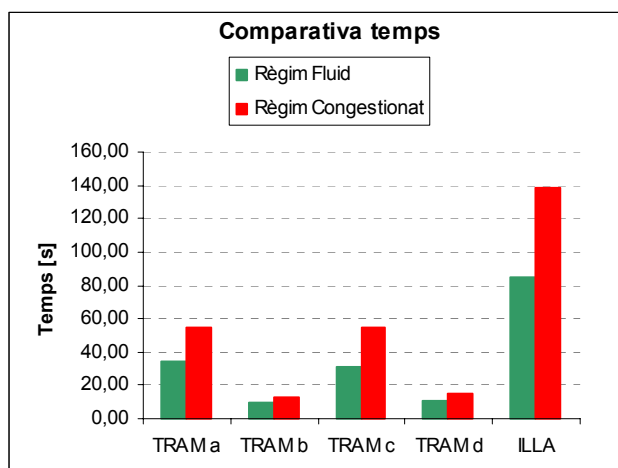


Figura 12.3

A partir del gràfic podem veure que els temps que els vehicles triguen en règim congestionat són més alts, degut a les cues i col·lapses que formen els mateixos vehicles, ocasionant un augment de temps per als següents vehicles. La diferència és òbvia en el total de l'illa.

Com hem observat en l'apartat 11.3., tot i passar gairebé el mateix nombre de vehicles en règim fluid i en règim congestionat, els vehicles del règim congestionat triguen més temps a passar per cada tram. Aquí sorgeix una diferència important entre el règim fluid i congestionat. Això ens indicarà que els vehicles romanen més temps dins de cada tram (com veurem més endavant en l'estudi de les densitats).

Observant el gràfic de la Figura 12.3 també podem veure que, així com en els trams a i c (i en el total de la illa) es pot veure clarament la diferència de temps, en els trams b i d, la diferència és molt poca. Aquesta mínima diferència és conseqüència que aquests dos trams són massa curts per poder-hi fer mesures acurades, a més són dos trams on no s'acostumen a produir congestions ni col·lapses i això fa que la diferència entre ells sigui mínima. Els col·lapses i cues són típics dels trams a i c (sobretot del tram a), els trams del Passeig Verdaguer.

12.4.- ESTUDI COMPARATIU DE LES VELOCITATS MITJANES

Ara en farem l'estudi comparatiu de les velocitats mitjanes del règim fluid i del congestionat. Lògicament, molt relacionats amb l'estudi del temps mitjà de l'apartat anterior, 12.3.

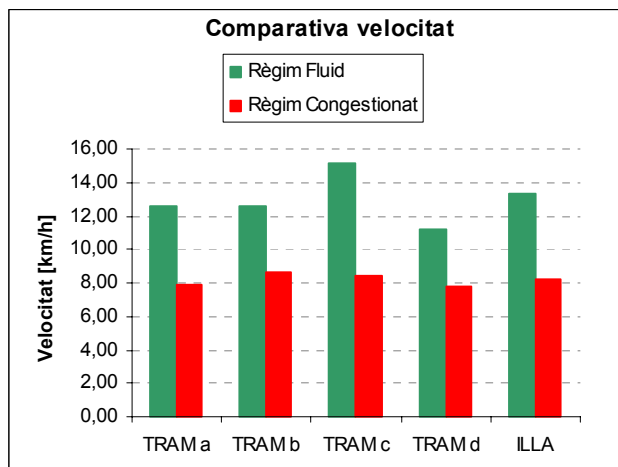


Figura 12.4

En la Figura 12.4 podem observar com les velocitats del règim fluid estan clarament per sobre de les velocitats mitjanes d'un vehicle que circula en règim congestionat.

Aquests resultats són conseqüència dels temps que acabem de comparar. Ja que la velocitat mitjana depèn de dues variables: l (llargada del tram) i Δt (període de temps que triguen els vehicles a travessar el carrer). Com hem estudiat, la llargada de cada tram és la mateixa (és una variable pròpia del sistema i impossible de modificar) tant en règim fluid com congestionat, i el temps és major en règim congestionat. Això fa que la velocitat mitjana sigui inferior en règim congestionat. Són dues variables dependents i inversament proporcionals.

A la pràctica es pot observar clarament que, en règim congestionat, els vehicles circulen a una velocitat mitjana inferior. Si anem en un vehicle per aquesta illa en hora fluïda trigarem menys temps a creuar-la, i per tant, tenim menys probabilitat de trobar-nos amb un semàfor en vermell. La velocitat mitjana en règim fluid és més alta perquè els vehicles no es troben amb tants obstacles davant dels quals s'hagin d'aturar i romandre per uns minuts en $v_m=0$.

És per aquests motius que recomanaríem al conductor travessar la illa en règim fluid, és a dir a les 6:30, que no pas en règim congestionat a les 5:30, si el que es pretén és estar el menys temps possible aturat i creuar-lo amb una velocitat mitjana major. És obvi que el conductor no esperarà a que es faci la hora exacta per a creuar el carrer, però tot i així, el que volem és que el conductor arribi a la conclusió que en règim congestionat és millor triar una altra alternativa a aquests trams, o sigui, anar al seu destí triant un altre camí.

13.- CÀLCUL DENSITATS

La densitat (d_x) és la tercera i última variable que queda per calcular. Les densitats es podrien mesurar pràcticament realitzant fotografies aèries i comptant el nombre de vehicles que hi ha a cada tram a cada fotografia i fer-ne la mitjana aritmètica, però per aplicar aquest mètode necessitaríem aparells de mesura i recursos que no estan al nostre abast. Per això hem d'aplicar la llei fonamental del trànsit (vegeu apartat 5.2.):

$$d = \frac{q}{v_m} \quad [9]$$

On: q = intensitat
 d = densitat
 v_m = velocitat mitjana

Si observem l'equació, tant la intensitat com la velocitat mitjana són valors que ja hem calculat en els apartats anteriors, per a cada tram x . D'aquesta manera podrem calcular la densitat senzillament aplicant l'equació.

Després per calcular la densitat de vehicles, és a dir, el nombre de vehicles que hi ha en el corresponent tram haurem de multiplicar la densitat calculada per la llargada (l) del segment en quilòmetres utilitzant una regla de 3 (considerant X la incògnita):

$$d_x = q_x \text{ (vehic/h)} / v_{mx} \text{ (km/h)} = X \text{ (vehic)} / l \text{ (llargada tram } x \text{ en km)} \rightarrow X \text{ (vehic/tram)}$$

13.1.- CÀLCUL DE DENSITATS

En **règim fluid**:

	TRAM a	TRAM b	TRAM c	TRAM d
Intensitat mitjana ($q_x = n_{qx} / \Delta t$) [vehic/h]	711,27	380,28	658,45	355,63
Velocitat mitjana ($v_{mx} = l_x / \Delta t$) [km/h]	12,56	12,58	15,12	11,17
Densitat ($d_x = q_x / v_{mx}$) [vehic/km]	56,63	30,23	43,55	31,84
Vehicles per tram ($d_x' = d_x \cdot l_x$) [vehic/tram]	6,80	0,97	5,66	1,02

En **règim congestionat**:

	TRAM a	TRAM b	TRAM c	TRAM d
Intensitat mitjana ($q_x = n_{qx} / \Delta t$) [vehic/h]	672,54	387,32	640,85	401,41
Velocitat mitjana ($v_{mx} = l_x / \Delta t$) [km/h]	7,88	8,59	8,48	7,83
Densitat ($d_x = q_x / v_{mx}$) [vehic/km]	85,35	45,09	75,57	51,27
Vehicles per tram ($d_x' = d_x \cdot l_x$) [vehic/tram]	10,24	1,44	9,82	1,64

Observem com en règim dens i congestionat les densitats són molt més elevades.

Això es causa de la diferència en les velocitats mitjanes, ja que les intensitats són quasi les mateixes tant en règim fluid com congestionat, però les velocitats són més baixes en règim congestionat, fet que provoca que les densitats siguin més altes.

Experimentalment es pot observar que, en hora caòtica, hi ha molts més vehicles en el segment per la presència dels semàfors i de l'Escola de Música (on molts pares al davant i ocasionen cues que arriben al següent semàfor), en canvi, en règim fluid, els vehicles circulen de manera pràcticament contínua i no hi ha tants vehicles alhora en el mateix tram.

Si observem el nombre de vehicles presents dins de cada tram, també podem veure que n'hi ha menys en règim fluid, ja que amb les congestions, els vehicles triguen més temps en creuar el sistema i, per això, romanen més temps dins el conjunt ocasionant una densitat per tram major.

Podem observar que, en règim caòtic, hi ha una mitjana de deu vehicles en els trams a i c, i una mitjana d'1,5 vehicles en els trams b i d. Això també es pot veure aproximadament per observació directa si no considerem els vehicles que es troben estacionats, els quals, a la pràctica, també observem que en hora densa i fluïda més o menys coincideixen. Hem de tenir present, però, que aquestes aproximacions estan fetes per simple vista, no tenim mètodes per comprovar-les.

13.2.- ESTUDI COMPARATIU DENSITATS

Compararem els resultats dels dos règims:

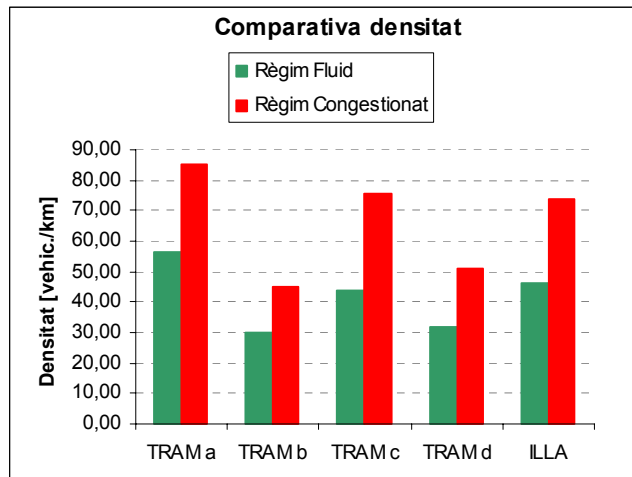


Figura 13.1

A partir del de la Figura 13.1 podem observar com les densitats són majors en règim congestionat, perquè (com hem explicat en l'apartat anterior 13.2.) els vehicles romanen més temps dins del segment, les seves velocitats són menors i això fa que les densitats siguin més elevades que en règim fluid (seguim tenint present que les intensitats són quasi iguals, i això fa que la densitat només depengui per a ser comparada de l'altra variable, la velocitat mitjana).

14.- ESTUDI COMPARATIU DE TOTS ELS RESULTATS DELS DOS RÈGIMS

Per acabar, farem un recull de totes les dades calculades al llarg del treball per poder-ne fer un estudi comparatiu. Compararem els dos règims: fluid i congestionat.

- RÈGIM FLUID

Inici: 18h:32' - Fi: 18h:48'

	TRAM a	TRAM b	TRAM c	TRAM d	ILLA
LLARGADA TRAM x (l_x [m])	120	32	130	32	314
INTENSITATS MITJANES (q_x [vehic./h])	711,3	380,3	658,5	355,6	619,4
TEMPS MITJÀ TRAM x (Δt_{vmx} [s])	34,40	9,16	30,95	10,31	84,81
VELOCITATS MITJANES (v_{mx} [km/h])	12,56	12,58	15,12	11,17	13,33
DENSITATS MITJANES (d_x [vehic./km])	56,63	30,23	43,54	31,82	46,47

- RÈGIM CONGESTIONAT

Inici: 17h:29' - Fi: 17h:45'

	TRAM a	TRAM b	TRAM c	TRAM d	ILLA
LLARGADA TRAM x (l_x [m])	120	32	130	32	314
INTENSITATS MITJANES (q_x [vehic./h])	672,5	387,3	640,8	401,4	602,7
TEMPS MITJÀ TRAM x (Δt_{vmx} [s])	54,83	13,42	55,22	14,71	138,17
VELOCITATS MITJANES (v_{mx} [km/h])	7,88	8,59	8,48	7,83	8,18
DENSITATS MITJANES (d_x [vehic./km])	85,36	45,11	75,61	51,24	73,67

En aquestes dues taules podem observar les semblances i diferències entre els dos règims.

Semblances:

- La llargada del tram x (l_x) és la mateixa. Aquesta és una variable fixa del sistema i pròpia de cada segment que no es pot alterar.
- Les intensitats mitjanes (q_x) són molt semblants en els dos règims.

Diferències:

- El temps mitjà (Δt_{vmx}) és major en règim congestionat, ja que els vehicles triguen més temps en creuar cada tram perquè es troben amb col·lapses i congestions dins del sistema.
- Les velocitats mitjanes (v_{mx}) són més elevades en règim fluid. Això és degut al fet que els vehicles circulen més fluidament amb una velocitat mitjana més elevada. Ho hem calculat a partir dels temps mitjans.
- Les densitats mitjanes (d_x) són més grans en règim congestionat. Els vehicles romanen més temps dintre del sistema, ja que les cues i congestions fan que no puguin avançar fluidament i hagin d'estar més temps a l'interior de cada segment.

15.- CONCLUSIONS

Després de fer moltes mesures hem pogut aplicar correctament la llei fonamental del trànsit i obtenir uns resultats molts significatius i aplicables a la pràctica. Hem pogut calcular les intensitats i els temps mitjans de manera pràctica; i amb els temps mitjans i la llargada dels carrers s'ha pogut determinar la velocitat mitjana de forma fàcil. Ara bé, a partir de les intensitats i les velocitats mitjanes hem calculat les densitats: aquí sorgeix la primera limitació que hem tingut per falta de mètodes. Vull dir que caldria haver comprovat si les densitats calculades coincideixen efectivament amb les densitats reals, però per aconseguir aquesta coincidència hauríem d'haver fet un seguit de fotos aèries; i no teníem ni aparells per fer-les, ni helicòpter, ni permís de l'Ajuntament per fer un experiment d'aquestes característiques.

Els resultats de l'estudi han resultat molt semblants als previstos per simple observació excepte en una variable. Abans de fer les mesures ja es podia suposar que un vehicle trigaria més temps a passar el carrer en règim congestionat que no pas en règim fluid. També era previsible que en règim fluid la velocitat mitjana fos més elevada (ja que és una variable que depèn del temps mitjà). I l'última variable, la densitat, també es podia suposar que sortiria més elevada en règim congestionat, ja que es podia observar clarament com els segments contenien més vehicles. La variable que ens va sobtar va ser la intensitat (flux de vehicles): Suposàvem que la intensitat seria més alta en règim congestionat (crèiem que seria un règim on, al voler circular-hi més vehicles, la intensitat augmentaria).

En aquest treball, hem pogut comprovar quantitativament que això no és veritat. La intensitat depèn del nombre de vehicles, i després de calcular el nombre de vehicles hem vist que (en aquesta illa concreta), tant en règim fluid com congestionat, passen el mateix nombre de vehicles, és a dir, la intensitat és quasi la mateixa en fluid i en congestionat. Aquest fet ens ha ensenyat que existeix una capacitat màxima d'absorció de cada tram de l'illa, especialment dels trams a i c, els més conflictius.

En quant als resultats del treball, vull comentar uns gràfics que han sigut molt interessants i dels més importants d'aquest treball, em refereixo als gràfics de la distribució freqüencial de temps (les Figures 12.1 i 12.2). És molt interessant veure com, a partir d'un gràfic, hem pogut extreure tantes conclusions, i conclusions realment importants!, com per exemple el perquè de les tres modes en els trams a i c del règim congestionat.

Els problemes bàsics amb què ens vàrem trobar en aquest treball van ser dos. El primer, definir les variables del trànsit, i el segon, poder aplicar aquestes variables i el mètode corresponent al punt conflictiu que havíem detectat.

Definir les variables del trànsit va tenir la seva dificultat. En un principi vam voler aplicar les tres variables de les lleis de Kirchhoff, però no podíem arribar a definir-les de manera que el sistema tingués coherència. Va ser per això que vam sol·licitar una cita amb un enginyer del CENIT de Barcelona, i ell ens va ajudar a definir les variables que hem utilitzat en el nostre estudi (intensitat, velocitat mitjana i densitat) i ens va proporcionar les referències bibliogràfiques necessàries.

El segon problema, que el mètode es pogués aplicar correctament al nostre sistema, no va ser difícil de solucionar. L'illa que havíem detectat com a punt conflictiu a certes hores, reunia tota una sèrie de característiques que en facilitaven l'estudi. Tot i això, hi havia altres punts de la ciutat on el mètode no era tan fàcil d'aplicar. En un principi ho havíem

intentat aplicar a una altra illa d'Igualada, però, després de fer tot l'estudi d'aquella illa, vam poder comprovar que les densitats eren mínimes i així no es podia fer un anàlisi correcta, ja que es tractava d'una illa de carrers petits d'Igualada, per on hi circulaven pocs vehicles. En canvi, l'illa que vam escollir finalment tenia unes densitats bastant elevades, i per això el mètode es va poder aplicar correctament. Abans però, vam haver de comprovar la coherència del sistema, aplicant la llei de nusos de Kirchhoff: el nombre de vehicles que entren al sistema global és igual al nombre de vehicles que en surten. Aquesta condició es complia, i per tant, no hi va haver cap problema per aplicar les nostres variables al sistema.

Personalment, estic molt satisfeta dels resultats d'aquest treball, ja que tot i que al principi no sabia gaire què en sortiria, veient els resultats, sincerament crec que hem realitzat una bona tasca d'anàlisi. És un treball essencialment pràctic, ja que, apart del manual de referència del HCM, no he necessitat gran quantitat d'informació teòrica o escrita. Per això he de dir que la bibliografia és una mica curta: només vaig utilitzar-la per descriure els models matemàtics i per saber les variables del trànsit en les quals m'havia de basar.

També n'estic molt satisfeta perquè, després de tot l'esforç i totes les hores que hi he dedicat, he pogut veure com el resultat d'una feina ben feta ha valgut la pena.

Tot i això, fent una autocrítica, crec que en podia haver fet un seguiment una mica més ampli (encara que l'estudi està acabat completament). Em refereixo, per exemple, a fer una anàlisi d'altres vies de la ciutat, o, fins i tot, de la ciutat sencera, i així poder aportar solucions de millora de la fluïdesa del trànsit a Igualada. Naturalment, per realitzar això hagués necessitat molt més temps i crec que tampoc hauria estat al meu abast.

16.- BIBLIOGRAFIA I WEBBIBLIOGRAFIA

MAERIVOE, SVEN and DE MOOR, BART. "Traffic Flow Theory". *Highway Capacity Manual* (HCM). Traffic Research Board, 15 July 2005

RED CIENTÍFICA GAIA: http://www.redcientifica.com/gaia/ac/auto_c.htm#ac (7/07/2005)

IO, GRUP INGENIERÍA D'ORGANITZACIÓ:
http://io.us.es/cio2004/comunicaciones/1063-1070_pdf (28/06/2005)

ROCKWELL AUTOMATION: <http://arenasimulation.com> (5/07/2005)

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA INDUSTRIAL:
<http://www.dii.uchile.cl/~mgo/cursos.htm> (10/07/2005)

BIBLIOTECA DE BARCELONA:
www.bcn.es/bibliotecageneral/WPAC/ENG/slinks/s001025.htm (14/08/2005)