

Regular el trànsit: missió intel·ligent

Estudi de cas de la
implantació de semàfors
intel·ligents a la
població de Rubí

Adrià Carballo González
i Roger Feliu Vert

21
PREMI DE RECERCA
MIQUEL SEGURA

Regular el trànsit: missió intel·ligent

Estudi de cas de la
implantació de semàfors
intel·ligents a la
població de Rubí

**Adrià Carballo González
i Roger Feliu Vert**

Autors:
Adrià Carballo González i Roger Feliu Vert

Edita:
Ajuntament de Rubí

Correcció de català:
David Aguilar España

Maquetació:
Estudi Anecta

Edició digital:
2022

Depòsit legal:
B 23374-2022



Ajuntament
de Rubí

Presentació Alcaldessa	7
Pròleg	9
Resum	11
1. Introducció	13
2. Marc teòric	15
2.1. Introducció als semàfors	15
2.1.1. Història dels semàfors	16
2.1.2. Tipus de semàfors	18
2.2. Semàfors convencionals	17
2.2.1. Parts d'un semàfor	17
2.2.2. Cicles, fases i intervals d'un semàfor	18
2.2.3. Obediència dels semàfors	19
2.2.4. Funcionament dels semàfors	19
2.2.5. Avantatges i desavantatges dels semàfors convencionals	21
2.3. Semàfors intel·ligents	22
2.3.1. Parts d'un semàfor intel·ligent	23
2.3.2. Avantatges i desavantatges dels semàfors intel·ligents	27
2.4. Semàfors interactius	27
2.4.1. Semàfors que es connecten amb cotxes	28
2.5. Tendències en la regulació del trànsit cap al futur	29
3. Estudi d'un cas pràctic	31
3.1. Funcionament de la cruïlla d'estudi	32
3.2. Presa de dades	34
3.3. Funció matemàtica per al funcionament del semàfor intel·ligent	36
3.4. Simulació de la cruïlla d'estudi	55
3.4.1. Simulació amb GRAFCET d'un semàfor convencional	56
3.4.2. Simulació amb Scratch d'un semàfor convencional amb temps ajustables	57
3.4.3. Simulació amb Scratch d'un semàfor intel·ligent	59
3.5. Millores aplicables al semàfor intel·ligent	62
3.6. Resultats de les simulacions	64
4. Conclusions	67
4.1. Valoració del treball	69
5. Taula de figures	71
6. Bibliografia web	73
7. Annex 1	75
8. Annex 2	77



PRESENTACIÓ ALCALDESSA

Un any més oferim a la ciutadania la publicació del treball de recerca guanyador del Premi Miquel Segura, i això és sempre garantia de qualitat. L'excel·lència de les propostes dels treballs presentats per l'alumnat dels centres de Rubí en cada convocatòria així ho demostra. Els treballs de recerca són la culminació de l'esforç de les noies i nois que cursen batxillerat. Un esforç, però, que és sempre compartit amb tota la comunitat educativa: professorat, tutors i tutores i famílies acompanyen el procés d'investigació dels i les joves de la ciutat en un camí sempre complicat, però alhora emocionant i enriquidor.

La feina compartida dona resultats magnífics. I el treball que teniu a les mans, *Regular el trànsit: missió intel·ligent*, n'és una mostra brillant. Pel tema tractat, pel mètode científic exhaustiu i rigorós emprat i per la maduresa acadèmica que demostra, aquest treball de recerca bé podria ser un treball de final de grau.

Aquest treball neix amb voluntat de servei públic. I això es nota. Pren com a camp d'estudi la ciutat de Rubí i clarament s'hi constata la intenció de millorar la nostra ciutat i la qualitat de vida dels nostres veïns i veïnes. Hi trobareu un estudi molt complet del trànsit del municipi i una bona diagnosi d'un tema molt complex: la planificació de la mobilitat, que també és un dels reptes més rellevants que les administracions públiques hem d'afrontar. En aquest estudi, hi veureu la fotografia d'una societat amb noves propostes per regular el trànsit, i que camina cap a la pacificació progressiva de l'espai públic per fer-lo més segur i més accessible a la ciutadania que tria desplaçar-se sense vehicle privat. La investigació està estretament lligada a la realitat de la ciutat i transcendeix l'àmbit estrictament acadèmic.

Regular el trànsit: missió intel·ligent és el paradigma de l'excel·lència educativa actual, una mostra de l'aprenentatge contextualitzat en la vida quotidiana. I no només això: l'estudi dona respostes al repte de la mobilitat a través de propostes realistes per millorar la vida diària dels rubinencs i les rubinenques.

Un cop més, vull reiterar el reconeixement merescut cap a tots els projectes presentats. I una felicitació per fomentar -alumnat, professorat i famílies- una cultura de l'esforç que cada cop costa més de trobar en la nostra societat.

I per acabar, i això potser és el més important de tot, aprofito aquest pròleg per desitjar èxit a tot el jovent de la ciutat, sigui quin sigui el camí que emprengueu, vitalment i formativament, entenent l'èxit com la felicitat personal i la realització de tot allò que us proposeu.

Ana María Martínez Martínez
Alcaldeessa de Rubí

El treball de recerca que presentem porta el títol “Regular el trànsit: missió intel·ligent”. Aquest treball va ser escrit, com a part dels requisits per obtenir el títol de batxillerat, en un període de temps de deu mesos, des de l’abril del 2020 fins al gener del 2021.

La motivació que va dur els alumnes a escollir aquest tema en concret va sorgir arran de la seva curiositat per saber com funcionaven els diferents tipus de semàfors i si la seva aplicació era l’adequada. Després d’analitzar el funcionament i les diferències entre els principals tipus de semàfors, van voler analitzar si el seu ús a la ciutat de Rubí era l’adequat o si introduint-ne d’un altre tipus, hi milloraria el trànsit.

Evidentment, una anàlisi exhaustiva de tot el sistema de regulació del trànsit a la ciutat és quelcom que s’escapa del nivell d’un treball de batxillerat, i per això es va decidir focalitzar-lo en un punt concret. L’objectiu era trobar un lloc bastant transitat, ja que són els més difícils de regular i on hi ha més possibilitats que es pugui millorar el sistema. En concret, van triar la cruïlla formada pels carrers de Magallanes, Calderón de la Barca i Magí Ramentol, pel fet que està en una zona propera a l’institut i complia els requisits, perquè es troba en una zona poblada, a prop del mercat i al costat d’un centre escolar gran.

Vull felicitar el Roger i l’Adrià per la feina feta durant aquests mesos, especialment complexa per l’arribada de la pandèmia, i als tutors del treball, Àngel Vidal i Enric Gimeno, per ajudar els alumnes a dur a terme aquesta tasca.

Miguel Martínez López

Coordinador de batxillerat Institut l’Estatut



RESUM

Aquest treball de recerca tracta d'un tema tan quotidià que no s'hi para atenció. Es tracta dels semàfors com a elements del mobiliari urbà que dirigeixen el trànsit per tal d'evitar accidents i embussos, és a dir, com a controladors. El seu funcionament és fàcil i permet evitar accidents en diverses situacions. Però l'eficiència a l'hora de tractar la densitat del trànsit pot semblar a vegades insuficient. Per això el present treball de recerca s'endinsa en aquest tema, per tal de comprovar si, amb les noves prestacions que ens ofereix la tecnologia, es podria millorar la densitat de trànsit que hi pot haver en qualsevol encreuament, avinguda o plaça. Volem resoldre aquest problema mitjançant un cas pràctic, amb l'objectiu principal de demostrar la validesa d'aquests elements de control a l'hora d'influir de manera positiva sobre les aglomeracions i els temps d'espera que es produeixen en qualsevol encreuament. En aquest estudi de cas, mirarem l'encreuament del carrer de Magallanes amb el de Calderón de la Barca i el de Magí Ramentol. El treball inclou una simulació virtual que representa l'esmentat encreuament.

Per desenvolupar aquest cas pràctic, hem dut a terme una recerca d'informació sobre els diversos tipus de semàfors que hi ha actualment, quines diferències hi ha entre aquests i quins avantatges i inconvenients presenta cadascun. També hem fet una investigació sobre els sistemes de control que es fan servir avui dia i sobre els programes de simulació per poder, així, enllaçar ambdós temes per proposar una simulació que s'adapti a la realitat d'aquesta situació. Finalment, a partir de la simulació determinarem l'efectivitat dels semàfors intel·ligents.

1 INTRODUCCIÓ

Els semàfors són una part sovint infravalorada del control del trànsit de les vies i de la conducció. En realitat, el seu paper és molt important en l'organització del trànsit i van ser un invent revolucionari. Per això, aquests senyals viaris són uns dels que tenen més prioritat a l'hora de conduir.

És per aquesta importància que, com més eficients siguin els semàfors, millor serà per als conductors i per a la ciutat on es trobin ubicats. També són d'ajuda al medi ambient, amb la reducció dels temps d'espera, perquè hi ha menys temps en què els motors estan consumint i emetent gasos perjudicials tant per al planeta com per als ciutadans que els puguin respirar. Per això a Barcelona, des de l'1 de gener del 2020, s'ha prohibit l'entrada dels cotxes considerats contaminants, és a dir, els no etiquetats per la Direcció General de Trànsit (DGT) amb el distintiu ambiental. Els vehicles tenen prohibida la circulació a la zona de baixes emissions (ZBE) (Ajuntament de Barcelona, 2019). De la mateixa manera, la reducció del temps d'espera als semàfors suposa una reducció del consum fantasma del vehicle, la qual cosa significa fer més distància amb el mateix dipòsit i, per tant, abaratir els costos de la conducció.

Les noves tecnologies són una eina excepcional per millorar molts aspectes de la vida quotidiana dels ciutadans. Els semàfors no en són l'excepció. Aplicant algorismes i sistemes als semàfors, després de dotar-los amb sensors, es creen els anomenats "semàfors intel·ligents", que modifiquen el temps d'espera i de pas en funció de moltes variables.

El primer objectiu del present treball és comprovar l'eficiència d'aquests semàfors empíricament en general, però usant un cas concret com a base, per extrapolat més tard els resultats a altres contextos. També es pretén millorar l'afluència del trànsit de la cruïlla de manera virtual. El segon objectiu és valorar els beneficis i els costos de millorar la cruïlla amb aquesta tecnologia per fer el balanç de si realment és rendible o fins i tot suposa una gran millora.

A continuació es presenta l'estructura del treball, que consta de tres punts:

- Part teòrica, on s'exposa tota la recerca d'informació sobre els semàfors. Primer es presenten els semàfors convencionals, i se segueix amb els semàfors intel·ligents i les diferències amb els semàfors corrents, el cost de les operacions, els programes que utilitzen, els sensors, etc.
- Cas real, on s'aprofundeix en els semàfors actuals de la cruïlla mirant el seu funcionament i temporització, com són, la seva sincronització, la fórmula matemàtica aproximada que els regeix, etc.
- Part de la simulació, on es prova de millorar l'afluència tocant paràmetres del temps i dels sensors. A partir d'aquest tercer punt s'extreuen les conclusions.

Aquesta estructura principal es correspon amb la cronologia de la recerca, ja que és l'ordre temporal amb què es va fer.

Els semàfors intel·ligents. Se n'està parlant molt, però de veritat existeixen? Hi ha alguna aplicació real o són simplement fruit de la imaginació i un model teòric?

La realitat és que sí que existeixen, tot i que no és molt extens el seu ús, almenys a Espanya. A alguns països, com ara Mèxic, Àustria, Alemanya o Colòmbia, ja estan implantats. Això pot ser degut al seu cost d'implantació. Per exemple, a Mèxic, cobrir cent punts conflictius costa 300.000 pesos (que són uns 12.000 euros). Però també és cert que els beneficis són profitosos: es millora un 30% l'afluència del trànsit, segons un canal de notícies colombiana (El Espectador, 2020), i es redueix un 20% de combustible en fer cas d'unes alertes que es rebrien al mòbil, segons suggereix la publicació National Geographic en Español (2018). Fins i tot es podrien arribar a reduir un 20% les emissions, segons altres comptes mencionats en l'article, tot i que un dels entrevistats, Christoph Hecht, responsable de trànsit del club de l'automòbil ADAC, les qualifica de poc realistes.

Per començar, cal veure què són els semàfors i conèixer la seva història, per entendre com són i per què són així actualment. El desenvolupament dels semàfors, com tot, ha estat progressiu, amb millores afegides a poc a poc al llarg del temps.

2.1. Introducció als semàfors

Un semàfor és un aparell electrònic usat per distribuir i organitzar de la forma més eficient possible el trànsit en un encreuament. Els semàfors són aparells recents i bastant innovadors, ja que fa poc més d'un segle que existeixen tal com són concebuts. En general, però, s'han convertit en uns aparells molt icònics, per indicar un munt de coses, com l'excés de soroll, per ser icones d'una ciutat (com l'Ampelmännchen de Berlín) o, més recentment, per indicar coses com la quantitat de casos de COVID-19 per municipis.

2.1.1. Història dels semàfors

L'origen dels semàfors es troba en els seus predecessors: unes torres de comunicació que es feien servir perquè era més ràpid comunicar-se mitjançant banderes o signes, des d'una torre a una altra, que enviar un cavall i un missatger. També, posteriorment, amb l'aparició del telègraf, les torres i estacions es col·locaven prop d'on maniobraven els vaixells per mantenir-hi el contacte.

Però l'any 1868 els semàfors van adoptar un altre concepte, el que està més estès avui dia i el que es tracta al llarg del present treball. Aquell any, l'enginyer John Peake Knight va desenvolupar i instal·lar el primer semàfor a Londres. No tenia la mateixa forma que els actuals, sinó que estava format per dos braços per indicar la direcció i dues làmpades de gas vermelles i verdes per al seu funcionament nocturn. A més a més, el semàfor era mecànic i necessitava que l'accionés un policia constantment. Així, en certa manera, es pot dir que el primer semàfor va ser un semàfor intel·ligent, tot i que en realitat només actuava com si ho

fos, ja que era el policia qui feia servir la seva intel·ligència. En qualsevol cas, el semàfor va fracassar. Només un mes després va explotar i va ferir el policia que el custodiava.

El 1910 se'n va millorar el disseny. Ho va fer Ernest Serrine, qui va optar per l'electricitat. També va afegir la innovació que el semàfor emetia un so en canviar d'estat. A més de la principal millora, eren automatitzats. Aquest semàfor no utilitzava llums bicolors, s'hi llegien paraules. El posterior model de Lester Wire, un policia, recuperava els llums de colors elèctrics.

En aquell moment estava començant el ràpid ascens dels semàfors a causa de la comercialització del model Ford T des de l'any 1908. Les vendes feien que el trànsit comencés a ser nombrós i fossin necessaris els semàfors. Però això succeïa principalment als Estats Units. El 1920, ja estesos arreu del món, els semàfors van apropar-se més al model actual, gràcies al fet que William Potts hi introduí el color groc (o ambre). Tot i això, encara contenia els braços i distava del model actual.

Els semàfors van continuar evolucionant al llarg de la història, i encara ho fan avui dia, adquirint característiques noves i més efectives, com la recent incorporació de llums LED en lloc de làmpades incandescent. Alguns avantatges són que consumeixen menys, que són més barats i més fàcils de canviar, que eviten que es fongui tota la placa de cop o que tenen una vida útil més llarga, entre molts d'altres.

Encara més desenvolupats són els semàfors intel·ligents, però cal dir que no s'han desenvolupat tan bé com s'esperava i per això el seu ús no és prou extens. Aquí també entren altres factors que es tracten en aquest treball.

2.1.2. Tipus de semàfors

Actualment, els semàfors es classifiquen en dos tipus: intel·ligents i no intel·ligents (o convencionals). Però també hi ha els semàfors que funcionen mitjançant un botó. Cal considerar si aquests també són intel·ligents.

El DIEC (2007) defineix el semàfor com aquell “aparell de senyalització que, per mitjà de llums de colors, serveix per a ordenar el trànsit de carrers i carreteres, especialment en els encreuaments dins els nuclis urbans, i per a regular la circulació dels ferrocarrils al llarg de les vies fèrries”). Tanmateix, encara que tots segueixen una mateixa idea i estructura, els semàfors poden ser diferents: els de les vies del tren, els que estan sempre en ambre, els que són únicament per a vianants, els que són per a bicicletes, etc. Davant d'aquesta varietat, els semàfors es poden classificar de diverses maneres, una de les quals és la següent:

- Semàfors reservats per a vianants
- Semàfors circulars per a vehicles
- Semàfors quadrats per a vehicles o de carril
- Semàfors reservats per a determinats vehicles

Però també es poden classificar per si són sonors, especials com per l'aproximació d'un tren, per a vehicles d'emergència, de carrils, d'autobusos, de trànsit ràpid, pel temps que triguen, per la seva intermitència, per la seva activació...

En resum, es classifiquen en semàfors intel·ligents, convencionals o de botó. I se subclassifica la classificació anterior dins de cada varietat. Per exemple, hi ha semàfors convencionals reservats per a vianants i per a determinats vehicles. De semàfors de botó, només n'hi ha de reservats per a vianants, i de semàfors intel·ligents només n'hi ha per a vehicles. És a

dir, de semàfors convencionals n'hi ha de tots els tipus, però de semàfors intel·ligents i de botó n'hi ha únicament d'alguns tipus. Per tant, no es faran distincions en les subcategories de semàfors intel·ligents i de semàfors de botó, però, en canvi, sí que s'inclourà tota la subclassificació en els semàfors convencionals en aquest treball.

Cal no confondre el llenguatge de comunicació anomenat també semàfor amb els semàfors físics de què parlem aquí. L'alfabet semàfor és un llenguatge inclòs en el codi internacional de senyals de l'OMI (Organització Marítima Internacional) que representa cada lletra de l'alfabet amb una posició dels braços. S'empren banderes perquè sigui més visual la senyalització si és de dia i torxes si és de nit. Aquest llenguatge és conegut per ser la inspiració per al símbol mundial de la pau, per les lletres N (dos braços en diagonal cap avall) i D (els braços en línia recta verticalment), lletres que significaven 'desarmament nuclear'.

2.2. Semàfors convencionals

Els semàfors convencionals són els semàfors més comuns; els que correntment es troben pel carrer. Tècnicament anomenats "senyals de control de trànsit", podem veure que consten d'un suport i tres llums de colors, encara que contenen uns quants components més. A continuació explicarem amb detall com són els semàfors convencionals, tant les seves parts com el seu funcionament. I seguidament farem el mateix amb els altres tipus de semàfors, però cal remarcar que, en la seva majoria, les parts dels semàfors són comunes als intel·ligents, als de botó i als normals.

2.2.1. Parts d'un semàfor

Els semàfors, com hem dit, són els senyals elèctrics constituïts per llums que tenen per objectiu el control de moviments o grups de moviment en un ambient òptim i segur. Concretament, els de trànsit tenen unes característiques i components propis:

- El cap del semàfor és l'armadura que integra les parts visibles (figura 2.1).



Fig 2.1 Representació del cap d'un semàfor

- La cara del semàfor és el conjunt de llums que enfoquen en la mateixa direcció. Habitualment en són tres, però n'hi pot haver un, o dos, o més de tres, a cada cara. Aquests llums són les unitats òptiques o s'inclouen les bombetes o díodes LED, un reflector còncav per dirigir la llum, i un vidre difusor circular, de més diàmetre si es vol reforçar la intensitat del senyal (figures 2.1 i 2.2).



Fig 2.1 Cara d'un semàfor

- La visera del semàfor, que no és imprescindible, però és molt comuna, compleix dues funcions: evitar que a certes hores la llum solar hi incideixi de tal manera que sembli que la unitat òptica està il·luminada; i evitar que la llum emesa pel semàfor sigui vista des d'angles que no siguin aquell al qual està dirigit. Per a tots dos objectius, el millor és que la visera estigui pintada d'un color negre mat per dins (figura 2.2).



Fig. 2.3. Representació del suport d'un semàfor

- El regulador és el mecanisme o dispositiu que dirigeix el canvi de color dels semàfors. N'hi ha de molts tipus, des de simples mecanismes electromecànics fins a transistors que no influeixen en cap peça mòbil.
- El detector és un dispositiu que enregistra i transmet qualsevol informació referent al trànsit o a la via. N'hi ha de diversos tipus: processadors de vídeos i imatges, acústics, ultrasònics, làsers passius, làsers actius, radars de microones, magnètics, magnetòmetres, espires inductives...
- El suport és l'estructura que aguanta el cap del semàfor. Està entre 2 i 6 metres d'altura depenent del tipus de suport. Si no és un semàfor penjant, el suport surt de la calçada dreta. Si en un mateix suport hi ha més d'un cap, la distància mínima entre aquests ha de ser de 240 cm. Si estan ubicats a un costat de la via, els suports poden ser pals o mènsules curtes. Si estan ubicats sobre la via, poden ser mènsules llargues unides a un pal lateral, cables de suspensió, estructures tipus pòrtic o pals i pedestals en illes. La figura 2.3 mostra dos suports semblants aprofitats per unir-hi un fanal i cartells.

2.2.2. Cicles, fases i intervals d'un semàfor

El cicle d'un semàfor és la quantitat de temps que passa entre dos senyals iguals. En aquest temps funcionen tots els altres senyals en un ordre. Una vegada acabat el cicle, es repeteix de nou. Per això rep aquest nom.

La fase del semàfor és una fracció del cicle, en què ocorren diversos moviments simultanis o només un.

L'interval és el temps durant el qual un llum roman encès, o dos llums romanen encesos alhora.

En són exemples l'interval vermell i l'interval verd-ambre.

El repartiment del cicle és la distribució dels cicles entre les diferents vies que formen l'encreuament.

2.2.3. Obediència dels semàfors

El semàfor que cal obeir en un encreuament és el que està situat immediatament a la dreta, sobre la calçada o sobre el carril. Si no n'hi ha cap allà i es pretén girar a l'esquerra o continuar recte, s'ha de mirar el semàfor de l'esquerra.

Igualment, si hi ha un semàfor que indica girs cap a la dreta i l'esquerra i es pretén girar a l'esquerra o continuar recte, només s'ha d'obeir el semàfor col·locat immediatament a l'esquerra.

2.2.4. Funcionament dels semàfors

El funcionament dels semàfors varia segons el tipus. És a dir, no té el mateix funcionament un semàfor per a vianants que un per a trens, tot i ser ambdós semàfors convencionals. Així doncs, explicarem el funcionament de cada semàfor separatament.

Semàfors reservats per a vianants

Aquests semàfors estan reservats per a vianants, és a dir, els altres vehicles els han d'ignorar. Encara que pugui semblar obvi el seu funcionament, hi ha casos en què no ho és tant.

Si hi ha un dibuix d'un vianant estàtic de color vermell fix, indica que no es pot creuar. Si, per contra, hi ha un dibuix d'un vianant verd fix caminant, indica que sí que es pot creuar. Si el vianant verd és intermitent, significa que qui estigui creuant disposa de pocs segons abans que ja no es pugui fer; és una alerta per avisar que aviat canviarà a vermell.

La silueta dels vianants és la més comuna, però en molts llocs han volgut innovar. A una ciutat d'Islàndia van substituir el vianant de color vermell per un cor, i, d'igual manera, en els semàfors circulars per a vehicles. A Mèxic, per Nadal, van modificar tots dos vianants, fent que el vermell fos la silueta de Santa Claus, i el verd, un arbre de Nadal. A Lisboa, per fer que la gent respectés més aquests semàfors, van fer que el vianant ballés: seguint una proposta de la marca Smart, en una plaça, van posar una estança amb una càmera que gravava el que la gent ballés a dins; després es transmetia a tota la ciutat i els semàfors reproduïen el ball de la persona quan estaven en vermell. L'efectivitat dels semàfors va augmentar en un 81% perquè la gent s'entretenia mirant el ball (Smart, 2014).

Totes aquestes variacions a les figures dels semàfors són per innovar, o bé per adaptar-se a l'època de l'any, o bé per mantenir la gent distreta i fer més amena l'espera. Però en tots els casos el color vermell es manté, per assegurar-se de fer el senyal ben entenedor per a tothom.

Els semàfors per a vianants amb un compte regressiu disposen d'uns díodes LED que van indicant quants segons queden fins que canviï el semàfor de color. Quan s'acaba el compte enrere, canvia de color.

Estan apareixent semàfors per a vianants que trenquen aquesta norma i tenen una forma especial: no inclouen ni cap, ni visera, ni suport. Són semàfors que es troben al terra, a la calçada; es tracta d'una línia de díodes LED que, situada abans d'un pas zebra, canvia de color igual que el corresponent semàfor per a vianants. La causa que apareguin és el creixent costum d'anar caminant mirant el telèfon mòbil (per tant, mirant cap avall).

Semàfors circulars per a vehicles

Si, al semàfor, hi lluu un llum vermell fix, els vehicles tenen prohibit el pas. No s'ha de depassar el semàfor, ni tampoc la línia de detenció més pròxima al semàfor, en cas que n'hi hagi. Si el semàfor es troba en un encreuament, els vehicles no s'hi han d'integrar.

Un llum vermell intermitent o dos llums vermells alternativament intermitents prohibeixen temporalment el pas als vehicles en determinades situacions, com ara abans d'un pas a nivell o d'una entrada a un pont mòbil o a un pontó transbordador, en les proximitats d'una sortida de vehicles d'extinció d'incendis o amb motiu de l'aproximació d'una aeronau a escassa altura.

Un llum ambre no intermitent indica que s'han d'aturar els vehicles com si es tractés d'un llum vermell. Només s'hi permet el pas si el vehicle no es troba en les condicions de seguretat suficients per aturar-se en encendre's el llum.

Un llum ambre intermitent o dos llums ambres alternativament intermitents indiquen que s'ha d'extremar la precaució i, si escau, cedir el pas.

Un llum verd no intermitent indica que està permès el pas amb prioritat llevat del cas en què el vehicle es pugui quedar previsiblement aturat de forma que obstrueixi la circulació transversal de vehicles, ciclistes o vianants.

Una fletxa negra sobre un llum vermell fix o ambre no canvia el significat dels llums, però els limita als moviments indicats per les fletxes.

Una fletxa verda que s'il·lumina sobre fons circular negre significa que els vehicles poden prendre la direcció i sentit indicats per aquella, independentment del llum que estigui simultàniament encès al mateix semàfor o en un altre de contigu. Qualsevol vehicle que, en encendre's la fletxa verda, es trobi en un carril reservat exclusivament per a la circulació en la direcció i sentit indicats per la fletxa o que, sense estar reservat, sigui el que ha d'utilitzar aquesta circulació, ha d'avançar en aquesta direcció i sentit.

Un semàfor de color ambre, fix o intermitent, indica que cal frenar, si fer-ho no representa una maniobra massa brusca ni perillosa. La majoria es troben en cruïlles amb un pas de vianants.

En aquest cas, cal aturar-se, fixar-se en el color del semàfor dels vianants i, si està en verd, deixar-los creuar. Si juntament amb el semàfor ambre hi ha un senyal de stop o de cedir el pas, cal respectar-lo; si no n'hi ha, cal cedir el pas a la dreta, segons la norma general de prioritats.

Semàfors quadrats per a vehicles, o de carril

Els semàfors d'ocupació de carril són uns cartells LED de forma quadrada que hi ha a les autopistes. Afecten exclusivament els vehicles que circulin pel carril sobre el qual estan situats o en el que s'indiqui al panell de senyalització variable. També reben el nom de *semàfors horitzontals*.

Un llum vermell en forma d'aspa indica que no es pot ocupar el carril indicat. Els vehicles que circulin per aquest carril l'han d'abandonar tan aviat com sigui possible.

Un llum verd en forma de fletxa apuntant cap avall indica que està permesa la circulació per aquell carril. No obstant això, aquesta indicació no eximeix l'obligació d'aturar-se davant altres senyals o marques vials que obliguin a fer-ho.

Una fletxa de color blanc o groc, fixa o intermitent, apuntant cap avall en forma obliqua indica als usuaris del carril corresponent que han d'anar, en condicions de seguretat, cap al carril que la fletxa indica.

Semàfors reservats per a determinats vehicles

Quan els semàfors presenten una silueta il·luminada d'un ciclomotor, bicicleta, tricicle o cicloturisme, les indicacions van exclusivament dirigides a aquests vehicles.

Quan un semàfor consisteix en una franja blanca sobre un fons negre circular, és un semàfor reservat per a autobusos i tramvies de línies regulars, a no ser que hi hagi un carril per a autobusos o per a autobusos, taxis i altres vehicles.

Si la franja blanca sobre el fons negre és horitzontal, es prohibeix el pas com si es tractés d'un llum vermell fix. Si la franja blanca és vertical, es permet el pas en línia recta. Quan la franja blanca il·luminada és obliqua i cap a l'esquerra, es permet el pas per girar cap a l'esquerra.

Si, al contrari, és obliqua cap a la dreta, es permet el pas per girar cap a la dreta. Si la franja blanca il·luminada és vertical, horitzontal, obliqua cap a la dreta o obliqua cap a l'esquerra i intermitent, indica que els vehicles s'han de parar com si es tractés d'un llum ambre.

Semàfors sonors

Els semàfors sonors estan connectats a un ordinador i emeten dos sons diferents per indicar quan el semàfor està en verd i quan està intermitent. Per tal de saber que un semàfor és sonor, qui tingui una discapacitat visual ha de palpar el pal a la recerca de l'altaveu. A més, alguns semàfors sonors incorporen una fletxa en relleu que vibra i indica la direcció correcta de l'encreuament per als vianants. Aquests semàfors incomoden els veïns perquè emeten sons molt estridents a totes hores. Per reduir la contaminació acústica, s'estan provant diferents mesures.

Es va provar de fer que no sonessin a la nit, però el col·lectiu invident denunciava que tenen dret a caminar segurs de nit. Està també en procés de proves un comandament a distància d'infrarojos, homologat per l'ONCE, que funciona amb qualsevol sistema de semàfors sonors.

El comandament, similar als que s'utilitzen per obrir garatges, s'activa en prémer qualsevol dels seus dos botons, i emet un senyal per confirmar que funciona i que les seves piles no estan gastades. Aquest senyal activa el so en els semàfors sonors. S'està provant d'integrar aquests comandaments en els bastons.

Una altra mesura és que els semàfors tinguin un sensor per mesurar el soroll ambiental i així regular el volum amb què emeten el so.

Semàfors especials

El funcionament d'aquests semàfors, com ara els que es troben en un peatge, és idèntic al dels semàfors més coneguts. Una vegada s'ha alçat la barrera, es posa en verd i permet el pas. En canvi, quan es posa en vermell prohibeix el pas i la barrera baixa. Els semàfors que controlen l'accés als pàrquings o a diferents recintes funcionen igual.

També són semàfors especials aquells que controlen les ferrovies, ja sigui en interseccions urbanes o fora de la ciutat. Del funcionament no cal quasi parlar-ne perquè són dos simples llums: un de vermell que prohibeix el pas i un de verd que el permet. La diferència és que aquests dos focus estan col·locats horitzontalment, un al costat de l'altre, i no verticalment, com és habitual.

2.2.5. Avantatges i desavantatges dels semàfors convencionals

Els senyals de trànsit són vitals per ajudar els vehicles i els vianants a viatjar amb seguretat.

Augmenten l'eficiència i l'ordre del trànsit per reduir el nombre d'accidents i proporcionen pautes clares pel que fa al moment en què els cotxes o els vianants poden entrar en una intersecció o quan s'han d'aturar i esperar. Si bé són necessaris per controlar el trànsit i mantenir els trajectes tan fluids com sigui possible, els semàfors presenten avantatges i desavantatges.

Els enginyers de trànsit elaboren una anàlisi de risc-benefici com a part de la determinació de la instal·lació d'un semàfor. Els enginyers han de sopesar tant els avantatges com els desavantatges dels semàfors. Igualment, farem una valoració general de tots els semàfors convencionals a continuació.

Desavantatges

- Les col·lisions de vehicles per darrere ocorren amb més freqüència quan un conductor es deté abruptament davant un llum groc o vermell i causa que un conductor distret darrere d'ell xoqui contra la part posterior del seu automòbil.
- Els semàfors poden causar demores en el trànsit. Esperar que un semàfor es posi en verd o esperar que un automòbil en un carril de gir creui una intersecció de manera segura pot provocar llargs períodes d'espera. Els retards excessius poden traduir-se en malbaratament de combustible, contaminació de l'aire i costos per als conductors.
- Ja sigui com a resultat d'un retard excessiu o com a resultat de senyals de trànsit injustificats o que no funcionen correctament, els conductors es poden tornar innecessàriament impacients i agressius en conduir. Quan això succeeix, és possible que se saltin més semàfors en vermell. La conducció agressiva pot significar un augment dels accidents, de la congestió i de la contaminació atmosfèrica i acústica.
- El cost d'instal·lar i mantenir els semàfors és molt elevat.

Avantatges

- Amb espaiaments favorables, els semàfors es poden sincronitzar per mantenir una circulació contínua.
- Permeten interrompre periòdicament els volums de trànsit intensius d'una artèria, per concedir el pas de vehicles.
- Ordenen la circulació del trànsit mitjançant una assignació apropiada del dret a l'ús de la intersecció. És a dir, permeten el trànsit ordenat i faciliten que les interseccions es puguin fer servir de manera segura.

2.3. Semàfors intel·ligents

Els semàfors intel·ligents són bastant semblants als convencionals. Els canvis més notables es veuen en el seu funcionament i rendiment, ja que les parts que els componen són pràcticament les mateixes. A causa d'aquesta semblança no explicarem els cicles, fases i intervals ni l'obediència d'aquests semàfors perquè són idèntics als dels semàfors convencionals (vegeu els apartats 2.2.2, "Cicles, fases i intervals d'un semàfor", i 2.2.3, "Obediència dels semàfors").

2.3.1. Parts d'un semàfor intel·ligent

La majoria de parts d'un semàfor intel·ligent són idèntiques a les d'un semàfor convencional; tant, que hom s'hi ha de fixar per saber de quina classe de semàfor es tracta. Les parts comunes es poden consultar en l'apartat 2.2.1, "Parts d'un semàfor".

Sistemes de control automàtics

Els sistemes de control estan compostos per diferents elements que s'anomenen de forma genèrica *automatismes*. La relació entre aquests automatismes i el procés o màquina sota control és el que anomenem *sistema de control*, l'objectiu del qual és aconseguir que la màquina o sistema funcioni amb la mínima intervenció humana.

Els components bàsics d'un sistema de control són: la unitat de control, els actuadors, els sensors i els elements auxiliars per al comandament i monitoratge.

L'autòmat programable o PLC

Un autòmat programable és una màquina electrònica dissenyada per fer, en temps real, automatismes combinacionals i seqüencials, i pensada per ser programada per personal no informàtic.

Les prestacions que ofereixen els autòmats no és homogènia, i per això podem trobar condicions favorables i desfavorables. El conjunt d'avantatges que presenta un PLC pot resumir-se en els aspectes següents:

- Possibilitat d'introduir modificacions sense haver de canviar la xarxa de connexions ni afegir-hi dispositius
- Espai d'ocupació reduït
- Reducció del cost de la mà d'obra de la instal·lació
- Reducció del temps de l'elaboració del projecte
- Possibilitat de comandar diferents màquines amb un únic autòmat
- Reducció del cost de manteniment
- Reutilització del PLC

En canvi, els inconvenients que presenta el PLC podem resumir-los en dos. D'una banda, la necessitat de disposar de personal amb un cert grau d'especialització per programar-lo i fer-ne el manteniment posterior. De l'altra, en certes aplicacions, el seu preu inicial, ja que podria ser més elevat que altres opcions tecnològiques.

Un autòmat programable és un equip electrònic de control que consta d'un maquinari, independent del procés que es vol controlar, i d'un programari, que conté la seqüència d'operacions de control que cal dur a terme. D'acord amb aquest programa de control prèviament emmagatzemat en una memòria, l'autòmat governa els senyals de sortida a partir de l'estat dels senyals d'entrada. Tant els senyals d'entrada a l'autòmat com els de sortida al procés es connecten directament en els borns de connexió del PLC.

Programació d'autòmats

L'autòmat, a més de comunicar-se físicament amb el procés mitjançant els senyals d'entrada i sortida, necessita que l'usuari estableixi la seqüència d'ordres oportuna per poder efectuar el control del procés.

La programació implicarà desenvolupar, de manera total o parcial, els apartats següents:

- Determinar què ha de fer el sistema de control i en quin ordre
- Identificar els senyals d'entrada i de sortida a l'autòmat
- Representar per mitjà d'algun model o mètode gràfic el sistema de control
- Assignar adreces d'entrada/sortida o internes a cadascun dels components que hi intervenen
- Confeccionar el programa de l'aplicació per mitjà d'instruccions o símbols intel·ligibles per a la unitat de programació
- Transferir les instruccions obtingudes en la memòria de l'autòmat des de la unitat de programació
- Provar i depurar el programa, així com obtenir-ne una còpia de seguretat

GRAFCET

En la programació d'autòmats es fan servir diferents llenguatges gràfics, com el diagrama de contactes, semblant als esquemes de relés; el diagrama lògic, que es basa en la utilització de símbols normalitzats (portes) que presenten funcions lògiques directes de l'àlgebra; el diagrama de flux, que té com a objectiu mostrar gràficament les seqüències d'evolució i presa de decisions del procés; les funcions algebraïques, que consisteixen a escriure directament les equacions algebraïques que representen l'automatisme; o el GRAFCET.

El GRAFCET representa directament la successió de les etapes dins d'un cicle de reproducció, separades per transicions o condicions de salt entre etapes. Podem considerar diversos nivells, però normalment amb dos en tindrem prou. En el nivell 1, molt més genèric, definim les etapes i les transicions, així com les accions que cal efectuar en cada etapa. En el nivell 2 precisem les entrades i les sortides de l'autòmat que intervenen en cada etapa i transició.

Sensors

Els sensors són la base de qualsevol sistema intel·ligent. Són els aparells mitjançant els quals es rep la informació que s'ha de processar i després s'emetrà una resposta. Sense l'entrada d'informació, el procés no funciona. En els humans, per exemple, els sensors són els cinc sentits, la manera de percebre i relacionar-se amb el món.

En el cas dels semàfors se solen utilitzar sensors visuals com càmeres o sensors de presència. Un exemple bastant comú són els sensors TrafíCam, més concretament el sensor TrafíCam Narrow de FLIR (figura 3.1), especialitzat en interseccions i en comptar el nombre de vehicles. Aquest sensor està format per una càmera CMOS i d'un detector de vídeo en una sola unitat.



Fig 3.1. Sensor TrafíCam Narrow

El funcionament d'aquests sensors en semàfors intel·ligents està més desenvolupat en l'article d'Armando Jacobo (2015), d'on hem extret la informació. També són exemples de tecnologia usada els sensors tipus LIDAR (*light detection and ranging* o *laser imaging detection and ranging*), que fa servir un làser polsat per mesurar la distància des d'un punt emissor (semàfor) fins a qualsevol objecte o cos (vehicle). És un sistema semblant a un radar, però que utilitza tecnologia làser en comptes d'emissió de freqüència de ràdio i calcula la distància mesurant el temps de

retard amb què arriba el làser després de la reflexió. Aquests dos sensors són de tipus òptic i solen trobar-se en el semàfor mateix, sigui al suport o a sobre del cap.

També, adherits als semàfors, s'hi poden trobar sensors tèrmics, capaços de detectar bicicletes, vianants i tota mena de vehicles amb qualsevol il·luminació (també si és nul·la). De sensors sobre els semàfors, n'hi ha de molts tipus: PIR, els que ja han estat esmentats, sensors inductius (de proximitat), sensors de moviment...

Però els sensors no tenen perquè estar adherits als semàfors, sinó que poden estar mirant una altra entrada. Això es pot donar en els casos on hi ha un semàfor per entrar en una rotonda o un encreuament de moltes entrades i sortides. També pot ser que, pel tipus de sensors, sigui necessari que aquests sensors no es trobin en l'estructura del semàfor. És també possible que els sensors no siguin visibles, fent-los gairebé tan imperceptibles que costi saber que es tracta d'un semàfor intel·ligent.

És el cas d'una altra classe de sensors utilitzats en els semàfors intel·ligents: els sensors de pressió. Amagats sota l'asfalt, són polsadors normalment oberts que, quan un vehicle o qualsevol cos amb pes suficient s'hi posa a sobre s'activen i permeten que el semàfor comenci a fer cycles. Si no està el sensor activat, significa que no hi ha cap cotxe esperant i, per tant, el semàfor roman sempre vermell. És un bon sistema, però que pot presentar certs desavantatges, per exemple quan el vehicle en la cua no té prou pes. Si és una bicicleta la que esperant, no es posa mai en verd i, de la mateixa manera, si hi ha cotxes darrere de la bicicleta, només compta la primera posició de la cua. Per això mateix, tampoc té en compte el nombre de cotxes que hi ha a la cua i, per tant, si el semàfor ha d'estar més temps en verd. És un semàfor intel·ligent menys complet.

Hi ha solucions a aquests problemes, com posar al terra marques que indiquin on s'ha d'esperar el ciclista, i en aquelles marques el sensor de pressió és més sensible o és un altre sensor de pressió també susceptible al pes de vehicles molt lleugers. Però no tots els semàfors amb aquest tipus de sensors tenen aquestes millores, com és el cas del semàfor de la cruïlla dels carrers Francisco Villaespesa i Ezequiel Solana, a Madrid.



Fig. 3.2. Sensor Vitronic

En els semàfors també s'usen diferents sensors, encara que no siguin per modificar el comportament dels semàfors segons els cotxes i el temps, sinó per evitar i registrar infraccions. Aquests sensors són molt variats. Un exemple pot ser el sensor de làser per semàfors en vermell Vitronic, que es pot ajuntar amb un sensor de velocitat PoliScan Red+Speed (figura 3.2).

Programa

Els semàfors intel·ligents utilitzen un programa, un controlador, que és el que “pren les decisions”. Com en qualsevol sistema intel·ligent, és a dir, en qualsevol sistema que actua

diferent en funció de les circumstàncies i, per tant, té la capacitat de decidir i actuar de la millor manera ajustant-se a la situació, hi ha d'haver un programa amb unes màximes. En el cas del regne animal, les màximes solen ser: “sobreviu” i “reprodueix-te”; per tant, actuen complint aquestes dues premisses, tot i que també n'hi ha d'altres, com ara “protegeix les teves cries”. En els robots, es programen perquè sàpiguen què s'ha de fer en funció de les dades que recullin els sensors. Els humans són éssers molt complexos i que actuen diferent per un munt de variables, com poden ser l'educació, el sexe, el moment, el coneixement, la cultura, la regió, l'experiència... Hi ha milions de factors que fan que, en una mateixa situació, vint persones diferents actuessin de vint maneres diferents.

En el cas dels semàfors, la cosa és més senzilla. Ha d'haver-hi un programa (figura 3.3) que determini els temps de vermell i de verd en funció d'unes poques variables, com poden ser la cua de cotxes, el temps d'espera d'aquests cotxes, l'hora del dia, la quantitat de vianants, el tipus de vehicles de la cua... S'hi poden tenir en compte tantes variables com es vulgui: com més variables hi hagi, més complex serà programar, però millor actuarà el sistema i més eficient serà.

Com que ser intel·ligent implica variar les decisions segons el context, no hi ha un programa predeterminat per a semàfors intel·ligents, perquè les cruïlles són diferents entre si, ja sigui en forma, en aflluència, en carrils, en mida, en passos zebra, etc. Per això, tot i que els programes comparteixen algunes similituds els uns amb els altres, hi ha un codi per a cada encreuament.

Perquè és molt probable que un mateix algoritme que millora el rendiment en una cruïlla empitjori el d'una altra o que simplement no sigui funcional pel fet de considerar menys variables.

Però és cert que si es fes un programa molt sofisticat, que reunís la majoria de casos, es podria fer servir en la majoria de cruïlles (sempre hi hauria excepcions) i en milloraria el funcionament.

En el cas d'aquest treball, la simulació està basada en la cruïlla d'estudi, des d'on s'ha desenvolupat l'algoritme de funcionament. Per tant, l'algoritme està dissenyat de manera específica i única per a aquella cruïlla. Tot i això, és fàcilment extrapolable a altres situacions, on hi haurà un marge d'error, però no molt significatiu.

```
// Empiezo estableciendo los pines que voy a utilizar de la placa
int rojo = 9;           // Activación de los LEDs rojos, digital
int amarillo = 8;       // Activación de los LEDs amarillos, digital
int verde = 7;          // Activación de los LEDs verdes, digital
int p_rojo = 10;        // Activación de los LEDs rojos para peatones, digital
int p_verde = 11;       // Activación de los LEDs verdes para peatones, digital
int PIR1 = 6;           // Seal del PIR1, digital
int PIR2 = 5;           // Seal del PIR2, digital
int Buzzer = 3;         // Activación de los buzzers, digital

void setup() {
  pinMode(rojo, OUTPUT);
  pinMode(amarillo, OUTPUT);
  pinMode(verde, OUTPUT);
  pinMode(p_rojo, OUTPUT);
  pinMode(p_verde, OUTPUT);
  pinMode(PIR1, INPUT);
  pinMode(PIR2, INPUT);
  pinMode(Buzzer, OUTPUT); // the loop routine runs over and over again forever:
}

void loop() {
  int i, j;              // Variables que usar en los ciclos
  if ((digitalRead(PIR1)) || (digitalRead(PIR2))) { // Si se detecta la presencia
    // Se avisa de la presencia de peatones con un cambio de color del semáforo
    digitalWrite(verde, LOW); // Se cambian los semáforos de verde
    digitalWrite(amarillo, HIGH); // a amarillo,
    delay(20000); // que se mantendrá durante 20 segundos.
    // Se permite el paso de los peatones
    digitalWrite(amarillo, LOW); // Se cambian los semáforos de amarillo
    digitalWrite(rojo, HIGH); // a verde.
    digitalWrite(p_rojo, LOW);
    digitalWrite(p_verde, HIGH);
    // Se inicia una señal sonora con un ritmo que indique el tiempo restante.
    for (i=1; i<11; i++) {
      for (j=1; j<5; j++) {
        digitalWrite(Buzzer, HIGH);
        delay(2000/i);
        digitalWrite(Buzzer, LOW);
        delay(2000/i); } // Se vuelve a permitir la circulación de vehículos
    digitalWrite(rojo, LOW); // Se apaga la luz roja
    digitalWrite(verde, HIGH); // y se enciende la luz verde
    digitalWrite(p_rojo, HIGH);
    digitalWrite(p_verde, LOW);
    delay(180000); // Se espera al menos 3 minutos a volver a habilitar el paso de peatones
    // Se permite la circulación de vehículos
    digitalWrite(rojo, LOW); // Se apaga la luz roja
    digitalWrite(verde, HIGH); // y se enciende la luz verde para vehículos
    digitalWrite(p_rojo, HIGH); // Al revs para peatones
    digitalWrite(p_verde, LOW); }
```

Fig 3.3. Codi de semàfor amb sensor PIR per a vianants amb senyal sonor.

2.3.2. Avantatges i desavantatges dels semàfors intel·ligents

En ser una nova tecnologia, els semàfors intel·ligents presenten uns avantatges respecte dels convencionals. Si aquesta moderna tecnologia fos tota avantatges, ja estarien instal·lats arreu del món i funcionant. Però, en comptes d'això, no se'n veuen gaires als carrers, ja que es troben en llocs comptats. S'entén que també hi ha una sèrie de desavantatges que frenen l'expansió de l'ús d'aquests innovadors semàfors.

Avantatges

- Estalvien un 30% del temps dels conductors i vianants (Fernández, 2018).
- Conseqüentment, hi ha un estalvi de combustible, hi ha una reducció de la contaminació de l'aire i acústica, i els conductors es troben més relaxats.
- Permeten realitzar una presa de dades constant i immediata del trànsit.
- Permeten donar prioritat a certs tipus de vehicles, com ara els de transport públic, per fomentar-ne l'ús. D'igual forma, es poden variar els temps remotament i de manera instantània per incentivar els desplaçaments a peu en campanyes.
- En cas de tall del subministrament de llum, no deixen de funcionar. En comptar amb bateria, segueixen operant durant un parell d'hores, temps durant el qual es poden solucionar les fallades elèctriques.
- Redueixen la densitat de trànsit i creen una millor afluència en les interseccions.
- Aporten prestigi a la localització on estan instal·lats.

Desavantatges

- Són molt més costosos que els semàfors convencionals, amb la instal·lació, la programació, el manteniment i la reparació quan un component causa problemes.
- En ser més complexos, són més propensos a patir un mal funcionament, per la qual cosa poden posar en risc la vida de les persones (per exemple, donant pas al vianant i al vehicle al mateix temps).
- Els semàfors convencionals tenen una mitjana de vida de vint-i-cinc anys, i per això les autoritats normalment no es plantegen canviar-los si no donen cap problema, fet que dificulta la instal·lació dels semàfors moderns.

2.4. Semàfors interactius

Els semàfors de botó per a vianants inclouen un mecanisme que ajuda els vianants a haver d'esperar el mínim de temps possible fins que es posi en verd. Majoritàriament es col·loquen en llocs amb molt de trànsit, per esperar, per la fluïdesa d'aquest, el menys possible i no haver de recórrer als cicles del semàfor sense haver-hi cap vianant.

La funció i la configuració d'aquest botó depenen dels ajuntaments i de diferents variables:

la mida de la ciutat, la zona on estigui el semàfor, l'hora, el dia de la setmana... Moltes ciutats fan que aquests botons només funcionin a la nit, quan hi ha menys trànsit i el vianant es desespera si veu que no hi ha cotxes però el seu semàfor està en vermell, però també pot passar que el botó funcioni tot el dia, si és una zona amb poc trànsit.

En els últims anys se'ls ha començat a anomenar “botons placebo”, ja que està força estesa la creença (sovint amb certesa pel mig) que es tracta de botons que en realitat no funcionen, però que compleixen la seva “funció social” en evitar accidents i en donar al ciutadà una certa sensació de control.

És possible que un botó no funcioni? Sí, és clar que és possible. Però no perquè hi hagi cap pla secret, sinó perquè moltes vegades un botó d'aquests s'espatlla i gairebé surt més barat deixar-lo allà que reparar-lo.

I és aquí on, sens dubte, entra en joc el factor psicològic. Independentment que el botó funcioni o no, el cert és que es tracta d'una sensació de control de la situació, ja que el botó aconsegueix tranquil·litzar durant un curt període de temps a qui espera i la persona té la sensació que ha fet alguna cosa per solucionar el problema. Això redueix la sensació d'intranquil·litat i ansietat que provoca haver d'esperar sense fer res per poder canviar la situació.

L'any 2004, el New York Times va demostrar que, dels prop de 3.250 botons instal·lats en els semàfors d'interseccions de Nova York, més de 2.500 no funcionaven. La BBC també va fer un estudi on es va demostrar que hi havia milers de botons al Regne Unit que tampoc no funcionaven (Tena de la Nuez, 2018).

2.4.1. Semàfors que es connecten amb cotxes

Els semàfors intel·ligents, s'entén que són aquells que modifiquen el seu comportament depenent de la situació en què es trobin. Però, a més, s'està provant una tecnologia que permet fer saber quines són les millors condicions de conducció, perquè els conductors es trobin els semàfors en verd. És gràcies al fet que el semàfor emet un senyal, la qual cosa no el fa intel·ligent del tot però tampoc convencional. Llavors són semàfors interactius, com els de botó.

Actualment, hi ha marques de cotxes que incorporen en els seus cotxes una tecnologia per poder-se connectar amb els semàfors. Aquests proporcionen al vehicle informació en temps real, com ara la velocitat ideal per arribar al llum verd o el temps restant de llum vermell.

La marca Audi ja ha incorporat en els seus nous cotxes aquesta tecnologia, anomenada GLOSA (sigles que corresponen a “assessor de velocitat per a optimització de llum verd”). La mala notícia és que només funcionarà amb els semàfors compatibles amb la tecnologia TLI (*traffic light information*), que avui dia només està disponible en poc més de 4.600 interseccions de tretze ciutats dels Estats Units.

Això és a causa que la mitjana de vida d'un semàfor és de vint-i-cinc anys, de manera que pocs governs s'estan plantejant actualitzar els semàfors actuals per incorporar-ne de nous. A més, són més cars, encara que es creu que en els pròxims anys, quan més fabricants afegeixin aquesta tecnologia als seus cotxes, començarem a veure més semàfors d'aquest tipus.

El funcionament es basa en la ubicació del cotxe mentre s'acosta a una intersecció, i si el semàfor disposa de TLI enviarà la informació al cotxe. Si, en arribar-hi, el llum està vermell, un compte enrere ens permetrà saber quant temps queda perquè canviï a color verd.

Una altra funció d'aquest sistema és l'avís de velocitat optimitzada, que ens indica quina velocitat hem de mantenir per evitar que ens toquin llums vermells (figura 4.1). Igual que l'anterior, això s'aconsegueix amb la ubicació del cotxe i la informació que envien els semàfors; a més, aquí s'hi sumen alguns càlculs, basats en els límits de velocitat, la distància de frenada i el trànsit. La idea és aprofitar al màxim el temps al volant.

Segons Audi, en properes actualitzacions de l'Audi Connect Prime, aquest es podrà connectar al sistema automàtic de parada/arrencada del motor, de manera que el cotxe sabrà quan posar-se en marxa o apagar-se en funció de la informació que rebí del semàfor. Fins i tot la plataforma seria compatible amb sistemes de navegació, el que ajudaria a calcular rutes basades no només en el trànsit sinó també en la quantitat de semàfors i el temps dels seus llums.



Fig 4.1. Nou model Audi

2.5. Tendències en la regulació del trànsit cap al futur

Està bastant clar que, a mesura que la tecnologia avança, anirà implementant-se en els senyals viaris. És el cas dels semàfors intel·ligents, que incorporen alta tecnologia per ser més eficients. Però realment és complicat que un semàfor millori el rendiment d'una manera notable. És a dir, si la carretera està aturada, el fet que un semàfor sigui intel·ligent o no ho sigui no canviarà la situació, indica Christoph Hecht en l'article de National Geographic en Español (2018).

Però sí que hi ha mesures que fan que l'espera sigui més suportable i en certs casos la tecnologia dels semàfors pot col·laborar en el bé comú.

En són exemples els semàfors amb sensors que poden detectar vehicles d'emergència (bombers, policia, ambulàncies, etc.) i atorgar-los prioritat posant la resta de semàfors en vermell. A més a més, els semàfors poden enviar informació sobre l'estat de les carreteres, el trànsit, etc., tant a les centrals logístiques com als mateixos conductors que es troben esperant.

També els semàfors que inclouen un compte enrere, en formes variades com un rellotge de sorra o un comptador regressiu, faciliten l'espera. El canvi fa que la gent estigui més receptiva i, alhora, pot ajudar a certs col·lectius, com els daltònics.

Estan sorgint noves propostes i dissenys per a semàfors que presenten millores. Per exemple, que en comptes de tres llums diferents, o tres semàfors diferents, tot s'indiqui des d'un

semàfor en un pal central que a més a més pot servir de fanal. Així es redueix la barreja de senyals visuals. Si s'incorporen formes geomètriques en comptes dels tres díodes LED rodons, es facilita la conducció als daltònics i funcionen com a unitat didàctica per als nens.

Una altra millora que està sorgint a molts llocs és la d'incorporar plaques solars als semàfors. D'aquesta manera s'estalvia energia durant el dia. Per reduir costos també es poden fer semàfors que no requereixen un suport específic. Es poden adaptar i col·locar en altres suports que no siguin un pal metàl·lic

Aquests semàfors funcionarien sense cables, amb l'energia solar que s'emmagatzema durant el dia i amb una xarxa sense fils per controlar el seu funcionament. D'aquesta manera, un semàfor podria estar col·locat en un arbre.

Altres millores enfocades a la seguretat del vianant ja estan començant a ser utilitzades a molts llocs, com ara Alemanya. Es tracta dels semàfors en la calçada, en forma de línia de díodes LED per a les persones que caminen mirant el mòbil. Aquesta millora no substituiria els semàfors, seria un afegit. I aquests semàfors no són tan remots; per exemple, a Sant Cugat ja n'hi ha.

Totes aquestes idees d'innovació per a la seguretat viària, sembla que són la tendència que se seguirà en un futur. A mesura que els semàfors actuals es vagin deteriorant o fent malbé i calgui renovar-los, s'aniran afegint millores tecnològiques com les mencionades. La ciutat s'anirà fent cada vegada més intel·ligent i tecnològica.

Aquestes són algunes idees que hi ha per millorar la circulació, però segurament en el futur pròxim en vagin apareixent de noves i millors, que revolucionin i facilitin el trànsit i els temps d'espera en vermell.

3 ESTUDI D'UN CAS PRÀCTIC

L'estudi d'un cas pràctic és una part del treball de recerca indispensable. En aquest apartat expliquem quin ha estat, i com ha estat fet, el treball de camp realitzat per complementar el treball. És la demostració empírica, la posada a la pràctica, de l'anterior recerca teòrica, l'aplicació real. El nostre treball tracta com a cas pràctic una cruïlla de Rubí, ja esmentada, que ha estat l'objecte d'estudi: la intersecció entre el carrer de Magallanes, el de Magí Ramentol i el de Calderón de la Barca.

És una cruïlla que toca tant el Col·legi Maristes Rubí com la plaça del Mercat i que es troba a les coordenades següents: $41^{\circ} 29' 24,8''$ N, $2^{\circ} 02' 07,8''$ E.



Fig. 5.1. Vista zenital i de satèl·lit de la cruïlla d'estudi

Les figures 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 i 5.6 són imatges de la cruïlla d'estudi a peu de carrer per ubicar-la més fàcilment i mostrar com són els carrers. Aquestes figures són a l'annex 1, després de la bibliografia web.



Fig. 5.6. Imatge de les tres entrades a la cruïlla, amb els semàfors enquadrats

3.1. Funcionament de la cruïlla d'estudi

L'encreuament que estudiem està format per tres entrades i dues sortides, essent dos carrers una sortida i entrada a la vegada. El carrer de Magallanes (figura 5.7, fletxa blava) és un carrer d'entrada a la cruïlla unidireccional. És el més petit i menys transitat dels tres, i per tant també el que té la fase de verd més curta. Aquest carrer també és la sortida principal, per on surten més cotxes. Passa per davant de la porta del Col·legi Maristes Rubí, la qual cosa fa que en els moments d'entrada i de sortida dels alumnes es col·lapsi la cruïlla.

El carrer de Magí Ramentol (figura 5.7, fletxa vermella) és el de més trànsit, tot i que no és el principal. S'hi formen llargues cues, però només en determinats moments del dia. Normalment, hi passen menys cotxes que al carrer de



Fig. 5.7. Vista zenital de la cruïlla d'estudi amb senyalitzacions de sentit

Calderón de la Barca. Aquest carrer té inclinació, és pujada en el sentit de direcció. És de mida petita, tot i que més gran que el carrer de Magallanes, i és unidireccional, entra a la cruïlla. Cal destacar d'aquest carrer que hi ha una parada d'autobús de les línies 2 i 5. Pel fet de ser una parada important en el recorregut d'aquestes línies, sovint es genera una cua al darrere de l'autobús.

El carrer de Calderón de la Barca (figura 5.7, fletxa verda) és un carrer bidireccional, fa d'entrada i sortida. Els vehicles que entren a través d'aquest carrer estan obligats a sortir pel carrer de Magallanes. Els vehicles que entren pel carrer de Magí Ramentol poden decidir sortir pel de Magallanes o pel de Calderón de la Barca. El mateix passa amb els vehicles que entren pel carrer de Magallanes, tot i que solen sortir també pel de Magallanes. El carrer de Calderón de la Barca és el recorregut que segueixen les línies d'autobús esmentades. A més a més, per aquest carrer entra l'autobús de la línia 4 que surt pel carrer de Magallanes. Just a pocs metres hi ha la parada de Magallanes, que també causa petits embussos temporals. Cal dir que l'afluència d'autobusos de la línia 4 és molt menor a la de les línies 2 i 5.

La cruïlla té tres semàfors: el del carrer de Calderón de la Barca (1), el del carrer de Magallanes (2) i el del carrer de Magí Ramentol (3). Tots tres semàfors s'apliquen només als vehicles que s'incorporen a l'encreuament; una vegada a dins no se'ls aplica cap semàfor. Això crea confusió en moments com l'hora de la sortida dels alumnes del Col·legi Maristes Rubí, ja que els cotxes van fent cua en la sortida del carrer de Magallanes, però els vehicles segueixen passant la línia de detenció dels altres semàfors, entrant a la cruïlla i no podent passar. La cruïlla queda, doncs, sobresaturada, però aquest fet no es deu a una ineficiència dels semàfors i, per tant, no es milloraria substituint els semàfors actuals per uns d'intel·ligents.

També hi ha semàfors de vianants (que no es tenen en compte en la presa de dades, ni per fer la funció algebraica ni per a la simulació). Els tres semàfors de vianants van coordinats amb els semàfors 1, 2 i 3 de la manera següent:

- El semàfor per travessar el carrer de Calderón de la Barca va coordinat amb el semàfor 2 (Magallanes). També, lògicament, va a la inversa del semàfor 1 (Calderón de la Barca). És a dir, està verd quan ho està el semàfor 2, i està vermell quan els semàfors 1 i 3 (Magí Ramentol) estan verds. És el que té la fase de verd més curta, com passa amb el semàfor 2.
- El semàfor per travessar el carrer de Magallanes va coordinat a la inversa amb el semàfor 2. És a dir, es troba sempre verd excepte quan ho està el semàfor 2, que és quan estan vermells els semàfors 1 i 3. Té els cicles oposats als del semàfor de vianants del carrer de Calderón de la Barca.
- El semàfor per travessar el carrer de Magí Ramentol barreja el funcionament dels altres dos. Està sempre verd excepte quan ho està el semàfor 3. Està verd si el semàfor 1 està vermell (amb el de vianants 1 també vermell), si el semàfor 1 està verd (amb el de vianants 1 encara vermell) i si el semàfor 2 està verd.

El funcionament dels semàfors de vianants no tindrà cap efecte sobre l'estudi de la cruïlla per simplificar-lo, i, per tant, s'ignoraran en la resta del treball.

3.2. Presa de dades

La presa de dades és una part essencial en moltes recerques, per poder fer un estudi estadístic i extreure'n conclusions. En el cas d'aquest treball, la presa de dades es fa per tenir una aproximació de valors de mitjana del cas real i poder aplicar-los més tard a la part de la simulació.

Aquesta presa de dades es va anar fent en diferents dies, a diferents hores al llarg d'unes setmanes, per intentar cobrir el màxim d'horaris diferents i, per tant, la quantitat més gran d'escenaris diferents en la mateixa cruïlla. Es van fer en dies com diumenge, dilluns, dimarts, dimecres, dijous i també divendres, i en horaris variats que van des de les 7 del matí fins a les 7 de la tarda.

Les dades preses són diferents variables que influeixen en la simulació:

- El nombre de vehicles que entren en el sistema (que és la intersecció) per minut, diferenciant per quin carrer entren. Això és per tenir uns valors d'afluència del trànsit perquè en la simulació no s'introdueixin números a l'atzar.
- El temps de les fases de cada semàfor, donant importància sobretot a la fase verda. A la pràctica només es fan servir la fase verda i la fase vermella, ja que la fase ambre és un intermedi que roman sempre invariable i en el semàfor intel·ligent també ho fa. El temps de cada fase és el mateix sempre, independentment del dia de la setmana i l'hora. Això fa que el semàfor sigui absolutament mecànic i menys efectiu.
- El temps d'espera dels vehicles segons la posició. És una de les dades més importants, si no la més important. Aquí es mira quant de temps s'ha esperat cada vehicle individualment, des que el semàfor es posa verd fins que el vehicle creua amb les rodes del darrera la línia de detenció. Si el vehicle s'afegeix a la cua després que s'hagi posat verd el semàfor, aquest vehicle no entra en el recompte. Es fa tant per saber quin és el temps mitjà de cada semàfor i de cada posició d'espera com per saber quina és la posició en què el temps es dispara. Cal esperar que es recorri el cicle sencer de nou fins poder tornar a passar, simplement per evitar, sempre que es pugui, que hi hagi cues de la llargada d'aquesta posició.
- Les mesures de les dimensions de la cruïlla, juntament amb el temps que es triga a creuar la cruïlla, per obtenir la velocitat mitjana dels vehicles.

Dades com la distància mitjana entre vehicles o la llargada mitjana d'un vehicle s'han extret de taules que, com la 6.1, són d'estudis anteriors sobre semàfors. Aquestes dades són usades per trobar la velocitat mitjana depenent si influeix el cotxe capdavanter o no segons unes funcions ja establertes. Aquestes funcions no afecten el present treball, que tracta sobre el temps i l'eficiència dels semàfors, no sobre la velocitat.

PARÀMETRE	MITJANA	DESVIACIÓ	MÍNIM	MÀXIM
Longitud	4,32	0,30	3,73	4,98
Amplada (m)	2,00	0,00	2,00	2,00
Màxima acceleració (m/s²)	2,72	0,34	2,13	3,61
Normal desacceleració (m/s²)	9	0,00	4,00	4,00
Màxima desacceleració (m/s²)	18	0,00	8,00	8,00

Taula 6.1. Mitjanes sobre vehicles lleugers

Les mesures preses per a aquest treball estan recollides en el document “Mesures treball de camp” (annex 2, figura A), on estan organitzades en dos tipus de taules: per mirar l’afluència (vehicles/minut) i per mirar el temps d’espera de cada posició en la cua per calcular el temps mitjà (taula 6.2).

Dc. 14.45-15.00	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Posició vehicle
1	1,60	4,32	8,62	11,18	12,63	14,45	16,93				
1	1,76	3,52	7,81	12,39	16,53	18,84	21,94				
1	3,54	6,21	10,04	13,98	16,71						
1	2,12	4,11									
2	1,86	6,50									
2	1,47	4,42	6,95								
2	1,44	3,40	7,81	10,31							
3	3,48	5,42	10,13	12,29	13,67	16,02	17,64	19,44			
3	2,16	6,13	10,56	14,69							
3	5,20	7,86	11,15	14,09	17,18	20,23	23,63	31,13	87,15	91,55	
3	1,76	3,52	7,81	12,39	16,53	18,84	21,94				
Carril											(s)

	Temps de verd (s)	Temps d'ambre (s)	Temps de vermell (s)	
Semàfor 1	30	3	51	
Semàfor 2	10	3	71	
Semàfor 3	26	3	55	

Taula 6.3. Taula dels temps de funcionament dels semàfors d’estudi

Per prendre aquestes mesures vam anar a la cruïlla en qüestió en diferents horaris i dies. Per exemple, la taula 6.2 és d'un dimecres entre les 14.45 h i les 15 h. Vam comprovar que en cap moment variaven els temps dels semàfors, sempre romanen igual:

Com ja s'ha dit, l'ambre no es considera verd, tot i que en molt pocs casos els vehicles s'esperen en aquest període; és més, molts vehicles continuen passant tot i haver-se posat en vermell el semàfor. Per exemple, en la taula 6.2, la tercera mesura del carril 3 ja s'havia posat en vermell al segon 29 i, tot i això, un vehicle passà al segon 31,13. Aquestes mesures no haurien de ser vàlides, ja que en el semàfor intel·ligent no es considerarà que es passi en vermell. És a dir, encara que això passi en la realitat, el comportament dels semàfors no pot ser influenciat per un fenomen no inclòs en el codi de circulació. Com a mesures per contrarestar aquest efecte, el primer que s'ha de fer és instaurar una càmera al costat del sensor de presència per multar els cotxes que no compleixen la normativa. Per fer aquest sistema més efectiu és necessari avisar de la presència de la càmera per posar multes. En aquesta mateixa qüestió, per augmentar la seguretat viària, es pot introduir en l'algoritme del semàfor intel·ligent un retard entre semàfors quan es detecti que un cotxe hagi passat en vermell. Aquest cotxe estaria fent que els altres haguessin d'esperar més. Amb més motiu se'l sancionaria amb una multa especificant en quina cruïlla hi ha hagut la infracció, per evitar reiteracions. Per això, també es van prendre mesures del temps que un cotxe triga a creuar la cruïlla completament, i aquest temps seria el retard entre el vermell i el verd de dos semàfors consecutius, sumat ja al retard que, per defecte, els semàfors tenen. Tot i que seria augmentar la seguretat del sistema, en aquest treball els temps de retard es mantenen fixos per no complicar tant el procediment. Incloure tres variables noves dificultaria exponencialment la creació del semàfor.

La presa de dades va ser un continu durant el treball, ja que, a mesura que avançàvem amb la seva interpretació per a la posada en pràctica en el semàfor intel·ligent, vam anar trobant que es requeria informació no adquirida i això significava tornar a anar-hi. Tot i això, el treball de camp, pel que fa a les mesures, va estar força organitzat. Portàvem tot el material preparat i vam organitzar uns horaris per anar a prendre les mesures en un rang d'hores molt gran, que incloguessin les principals hores del dia, ja fossin hores punta o hores sense tant de trànsit.

3.3. Funció matemàtica per al funcionament del semàfor intel·ligent

La idea de crear un semàfor intel·ligent per comprovar si el rendiment total de la cruïlla millora, i en quin grau, per saber si val la pena, requereix una funció matemàtica que pugui determinar el temps d'espera per a cada cotxe. Ara bé, la funció matemàtica serà per obtenir dades numèriques. Per a la programació, la funció matemàtica ha de ser traduïda a lògica. La funció serveix simplement perquè, quan els tres semàfors dels tres carrils sàpiguem quants cotxes hi ha, puguin determinar el temps d'espera de l'últim cotxe de cada fila. En rebre el processador les tres dades del temps d'espera de cada cotxe, sabent el temps actual de verd i de vermell en cada semàfor, podrà modificar-los per reduir el màxim aquest temps.

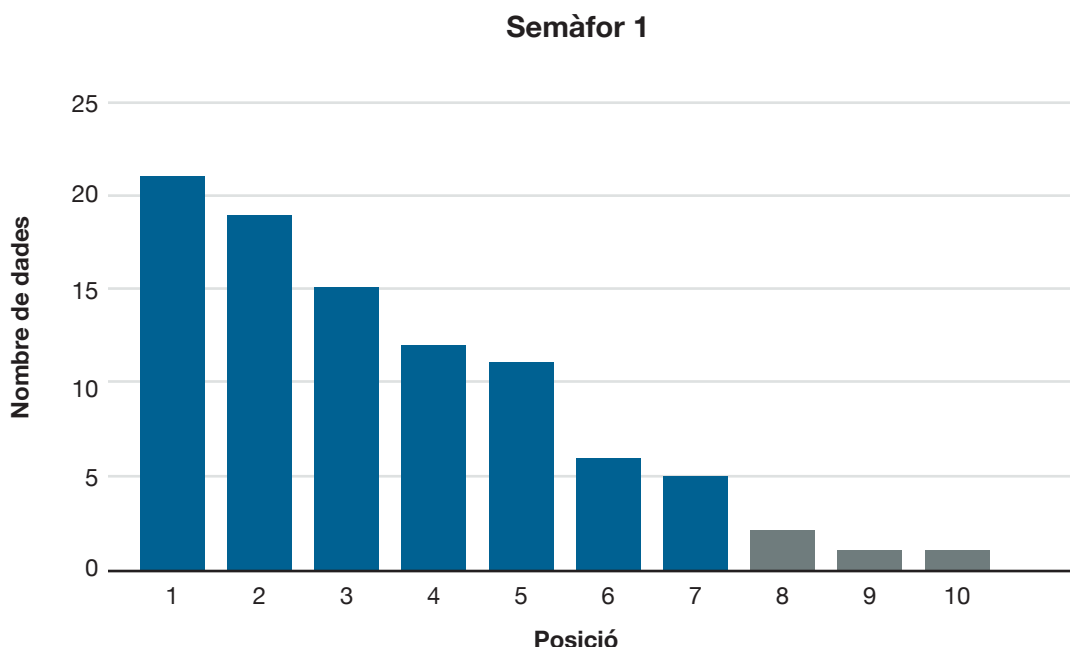
Una opció seria que el processador disposés d'intel·ligència artificial. Després d'un aprenentatge, possiblement el rendiment milloraria. Aquesta requerria un pressupost elevat, tant del processador com de personal de programació. En aquest treball s'ha optat per una segona opció, en què els semàfors aniran canviant a base de prova i error.

La funció matemàtica ajuda a determinar quin és el temps d'espera de cada cotxe. Això s'ha de fer en funció de la posició del vehicle únicament. És veritat que intervenen moltes altres variables, com la llargada dels vehicles, els reflexos del conductor, el pas d'un autobús o d'un

camió de les escombraries (que circulen més lent), fets incontrolables com ara que un vianant passi per fora del lloc o que un vehicle d'un altre carril passi en vermell... Però en el cas bàsic només interactuen els cotxes.

Per tant, l'únic que s'ha de mirar és la posició del cotxe. Es determina d'aquesta manera: el primer vehicle de la fila es troba en la posició 1; el segon, en la posició 2; el tercer en la 3...; i així successivament. No es mesuren els metres ni hi ha posiciones establertes; la posició de cada cotxe depèn de la quantitat de cotxes que té al davant; per exemple, el cotxe en la posició 5, què és el cinquè en la cua, té quatre cotxes davant.

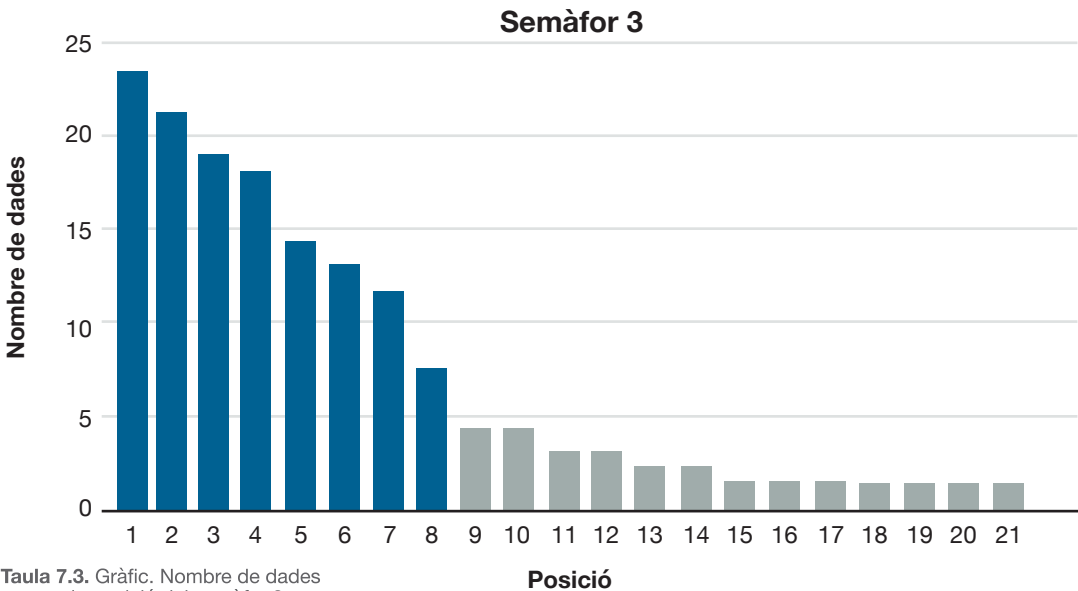
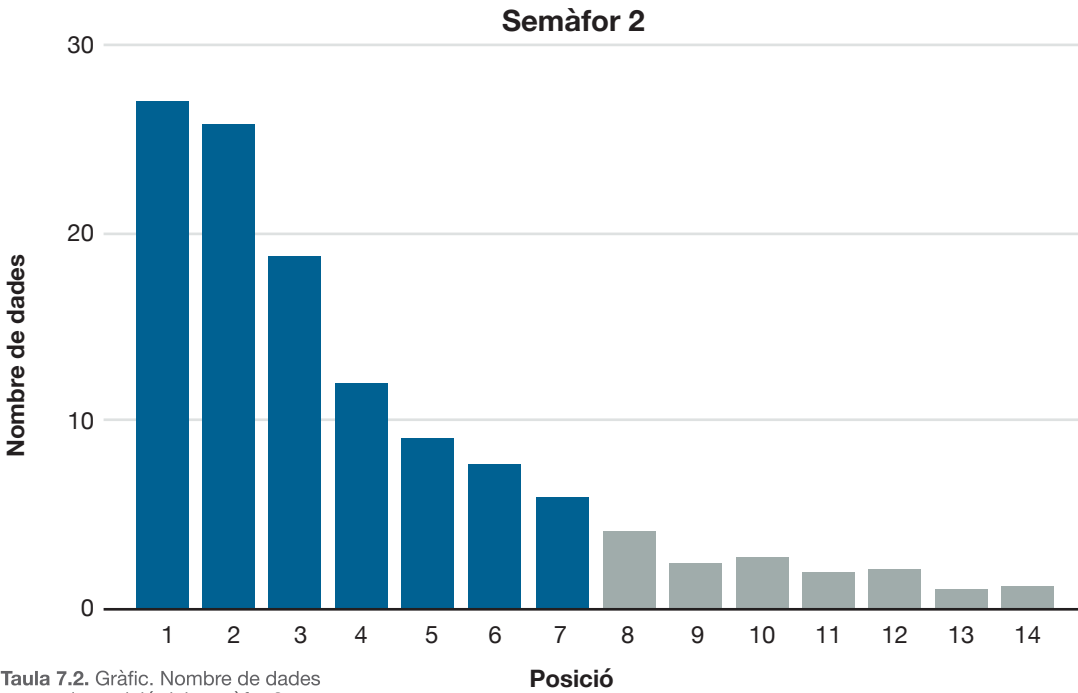
Conjuntament amb la presa de dades, hi ha el document "Processament de dades" (annex 2, figura B), on es recullen les dades dels tres carrils en tres fulls diferents i se'n fa l'anàlisi. Per a l'anàlisi vam fer tres gràfics amb cada semàfor. El primer gràfic conté el nombre de dades obtingudes per a cada posició.



Taula 7.1. Gràfic. Nombre de dades segons la posició del semàfor 1

Al gràfic de la figura 7.1 es veu com, a mesura que avancem en les posicions, el nombre de dades es redueix. Això té tota la lògica, ja que perquè hi hagi un cotxe a la posició 7 n'hi ha d'haver un a cada posició anterior, així que és normal que com més alta sigui la posició, més baix sigui el nombre de dades. És més, seria impossible que en una posició anterior hi hagués més dades que en una posició més alta. Per força ha de ser més baixa, o igual, com en les posicions 9 i 10 de la figura 7.1. En aquesta mateixa figura es veuen columnes de dos colors diferents. Les de color blau són les de les posicions en què el nombre de dades passa de 5. Les de color gris, les de les posicions en què no són més de 5. L'estudi de la cruïlla requeria un procés de presa de dades i, per tant, d'estadística mínim. Una estadística amb menys de cinc dades és una estadística massa pobre i, per tant, invàlida. Cinc és el límit que s'ha posat en aquest treball per les condicions que reuneix, tot i que amb més recursos el límit seria molt més gran.

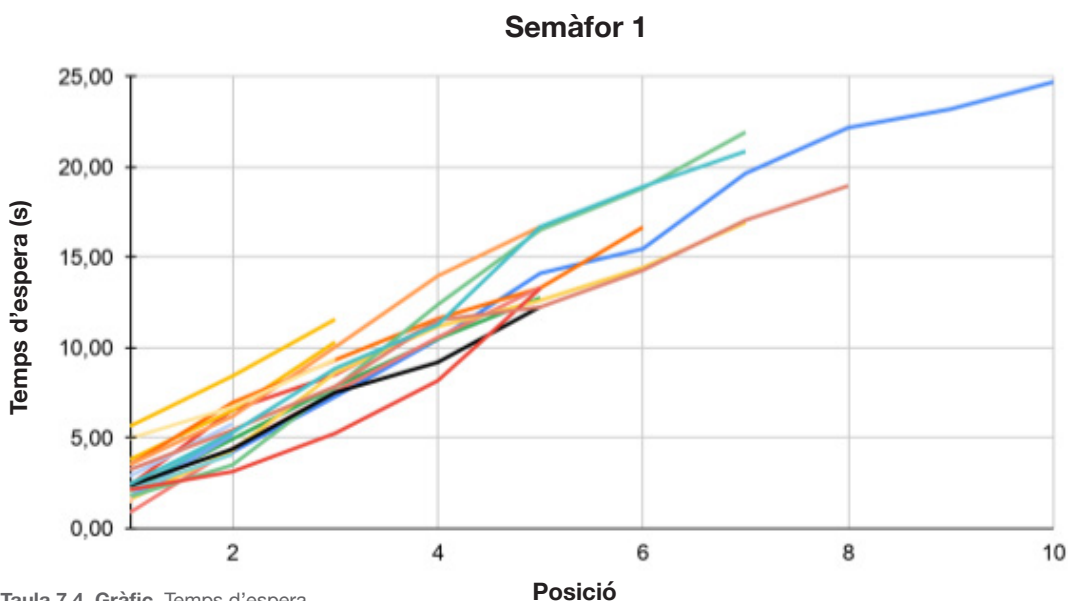
Les columnes grises, doncs, corresponen a dades preses però que no es fan servir per extreure la fórmula, ja que fer-ho distorsionaria la resta del procés i podria donar resultats enganyosos. El mateix passa amb els altres dos semàfors: les dades on el recompte per posició surt menor que 5 no són utilitzades. Les dades de les posicions no vàlides del semàfor 2 es poden veure a la figura 7.2, i les del semàfor 3, a la figura 7.3.



Com es veu en les figures, tots tres gràfics comparteixen la mateixa forma: mitja paràbola descendent en forma d'U (de fet, hauria de seguir una distribució normal de campana de Gauss, però només la meitat). Això és perquè a mesura que avancem en les posicions, és menys probable trobar vehicles en aquestes posicions. I es redueix de manera exponencial (aproximadament). Per això segueix més o menys la mateixa forma.

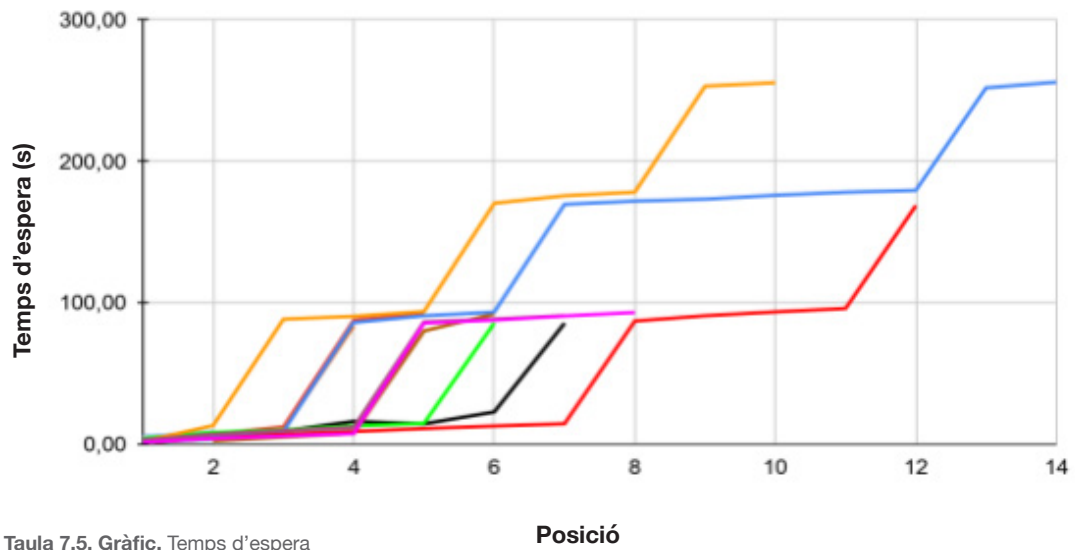
Però no és aquest el gràfic que en realitat ens interessa per a la fórmula. El gràfic que cal és el de temps d'espera segons les posicions.

En les figures 7.4, 7.5 i 7.6 es mostren les gràfiques que relacionen el temps d'espera amb la posició. On hi ha més gruix de dades és en les primeres posicions, com s'ha explicat amb les figures 7.1, 7.2 i 7.3. Ara bé, aquests gràfics donen molta més informació.



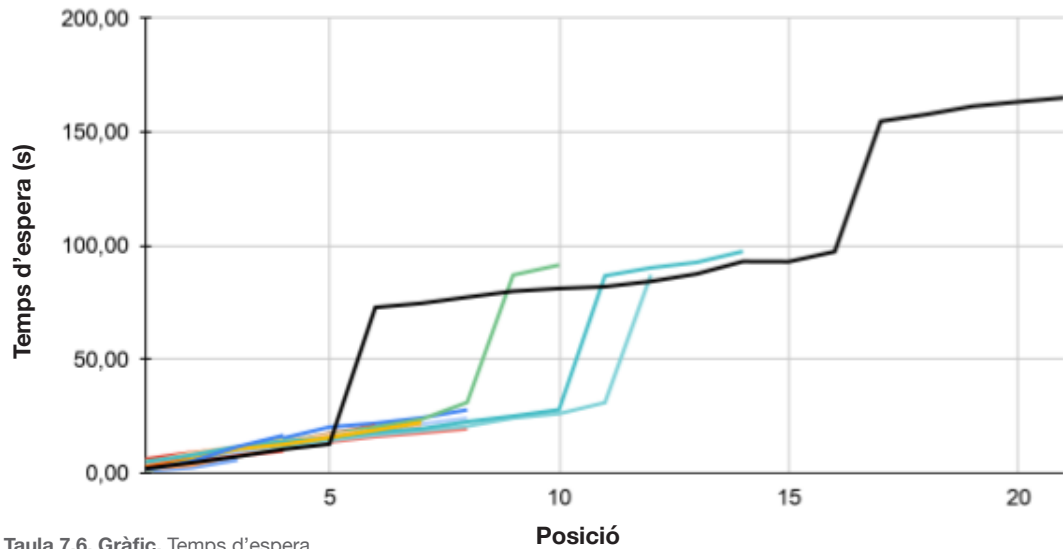
Taula 7.4. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 1.

Semàfor 2



Taula 7.5. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 2.

Semàfor 3



Taula 7.6. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 3.

Per començar, cada línia de cada gràfic és una mesura presa. És a dir, per exemple, la línia negra de la figura 7.4 mostra que a la fila en aquell moment hi havia fins a la posició 5, ergo hi havia 5 cotxes. Tots 5 passen en la fase verda del semàfor, i de manera més o menys lineal. No tots triguen el mateix (si no, seria una línia recta perfecta), però el valor del temps que triguen és semblant. En canvi, la línia groga de la figura 7.5 mesura una fila de 10 cotxes. En aquesta fila, no passaran tots els cotxes en la mateixa fase de verd, sinó que no passaran tots fins a la quarta fase verda des del moment en què es compta el temps. El simple fet d'haver d'esperar més d'un cicle (figura 7.6, línia verda) dispara el temps d'espera enormement i trenca la linealitat que portava el gràfic. Aquests salts són precisament el que es vol evitar amb el semàfor intel·ligent.

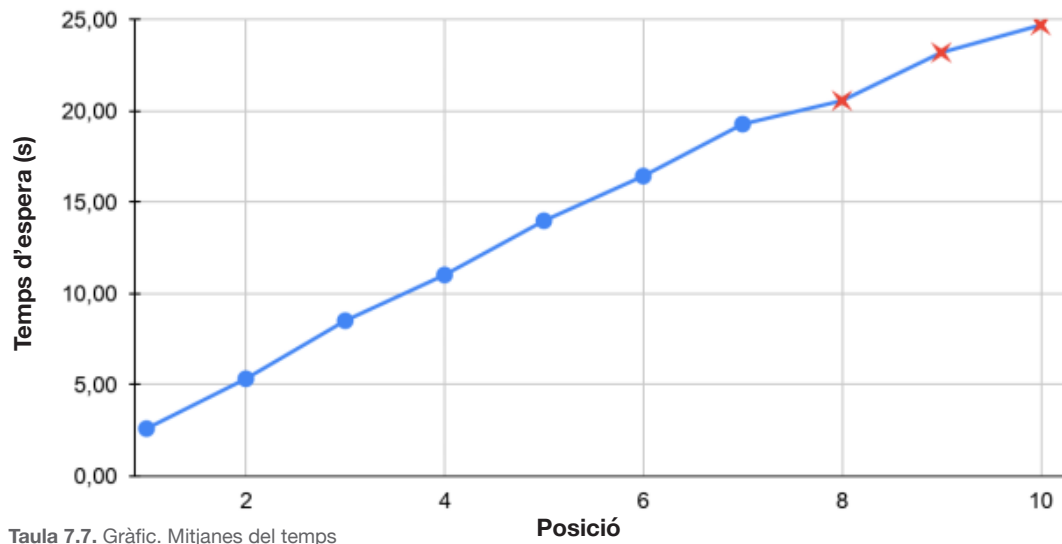
En el semàfor 1, la posició més alta registrada és la número 10 i, tot i això, no hi ha cap salt. Això implica que el semàfor està molt ben fet, els cotxes probablement esperen el menor temps possible. Això pot ser degut al fet que aquest sigui el carrer principal, el més gran i, per tant, de més importància. Pot ser que els altres semàfors estiguin adaptats a aquest i per això no es dispara el temps. Però quan en aquest carril només hi ha un parell de vehicles, llavors el semàfor està en verd massa estona, i augmenta el temps d'espera dels cotxes en els altres dos carrils innecessàriament. Per tant, el que cal saber és quin temps d'espera està assignat a cada posició, perquè quan el semàfor intel·ligent detecti fins a quina posició hi hagi vehicles, pugui determinar quin temps ha d'estar en verd. Aquesta és la idea simplificada.

En les figures 7.4, 7.5 i 7.6 hi ha més de 20 línies diferents, una per a cada mesura. El que succeeix, com en tota estadística, és que no tots els valors són iguals. En la figura 7.4 no s'aprecia del tot, però es veu clarament en la figura 7.5. Es veu que una vegada es pot disparar el temps en la posició 2 o una altra en la posició 7, i hi ha una gran diferència entre aquestes dues posicions, 5 per ser exactes. Això fa que la variació sigui massa gran per determinar una fórmula amb aquestes dades, cal ajuntar-les per treure'n una conclusió. I per fusionar-les d'aquesta manera únicament s'ha de fer la mitjana aritmètica de totes les dades.

Tots aquests càlculs i els que més endavant es facin estan especificats en el document "Processament de dades" (annex 2, figura B), en forma de cel·les amb els resultats corresponents. Pitjant sobre les cel·les es veuen les fórmules aplicades per arribar al resultat.

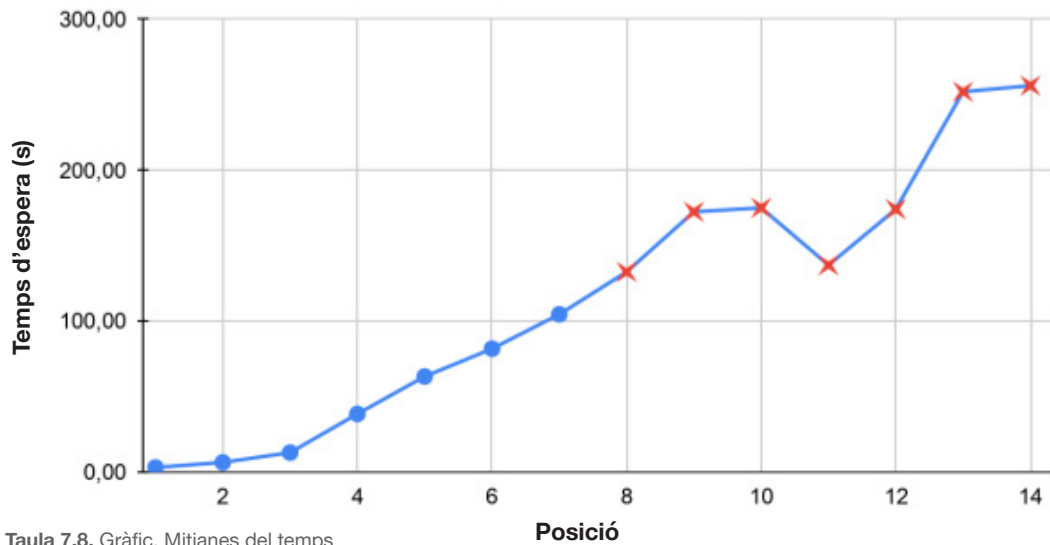
La mitjana aritmètica es calcula fent la suma de totes les mesures i dividint-les pel nombre de mesures. Així s'obté el valor mitjà. D'aquesta manera s'ha fet en aquest treball i n'han derivat tres gràfiques, una per a cada semàfor (figures 7.7, 7.8 i 7.9). Aquestes són les gràfiques definitives usades per trobar la funció matemàtica.

Semàfor 1



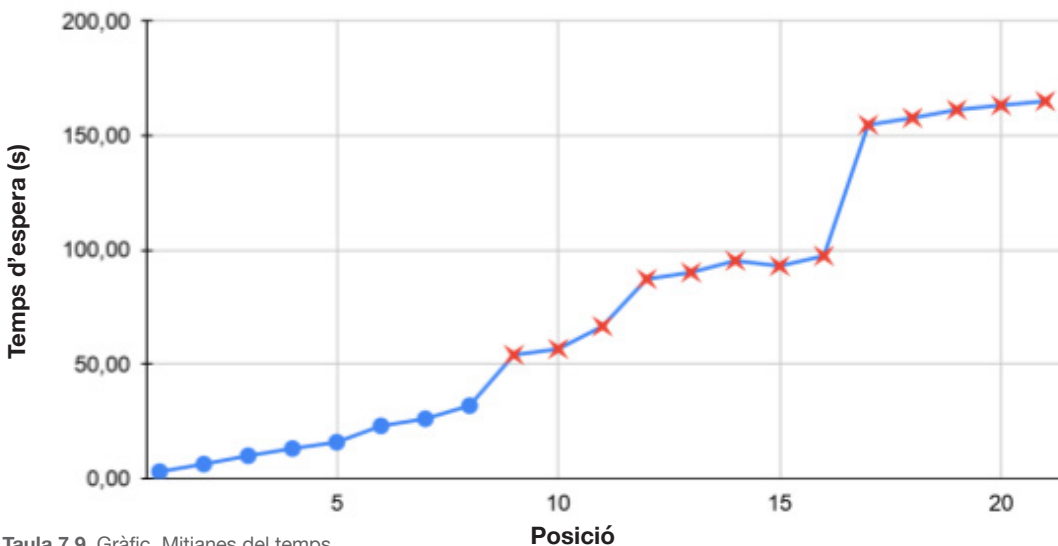
Taula 7.7. Gràfic. Mitjanes del temps d'espera segons la posició del semàfor 1.

Semàfor 2



Taula 7.8. Gràfic. Mitjanes del temps d'espera segons la posició del semàfor 2.

Semàfor 3



Taula 7.9. Gràfic. Mitjanes del temps d'espera segons la posició del semàfor 3

Es pot veure molt fàcilment en el semàfor 1 (figura 7.7). En els altres casos se segueix el mateix procediment, però, per anar pas a pas, de més senzill a més complicat, encara que en el fons siguin iguals. En el semàfor 1, la mitjana ha estat suficient per trobar el valor mitjà i la funció matemàtica, ja que no hi ha cap salt. Com que no s'arriba a disparar el temps, les mitjanes formen una línia més o menys recta. Els punts estan alineats. Això presenta un gran avantatge.

La funció matemàtica que volem treure, en adonar-nos que la gràfica és una recta, també ha de ser una línia recta. Cal fer servir l'equació de la recta en forma explícita, $y=mx+n$, que és la forma més comuna per expressar rectes. La m representa el pendent de la recta, que en el cas de la gràfica veiem que sempre és positiu, i ho ha de ser, ja que el cotxe de la posició 5 mai no pot trigar a passar menys que el cotxe de la posició 4. La n és l'ordenada en l'origen, per on es talla l'eix vertical, que en el cas particular correspondrà al temps que trigui el cotxe de la posició 1 a passar. Això és perquè quan es comença a comptar el temps (quan el semàfor es posa en verd), el primer cotxe ha d'arrencar i passar, igual que tots els altres. Per tant, la posició 1 no pot ser 0, com tampoc no ho pot ser cap de la resta, perquè sempre hi ha un temps de reacció del conductor.

En tenir la condició/supòsit de ser una recta, en el semàfor 1 (figura 7.7), el pendent d'aquesta recta serà la m de la funció. Però com que el gràfic no és una recta perfecta, s'ha de trobar el pendent que formi una recta que passi pels màxims punts possibles o que s'hi apropi més. Per fer-ho es traça el vector que va des del punt inicial fins a l'últim punt vàlid, que en el cas del semàfor 1 és el de la posició 7. Els punts no vàlids, amb dades insuficients com per ser considerats fiables, estan marcats en el gràfic amb una creu vermella. Llavors, per calcular el pendent cal fer la resta entre el punt 7 i el punt 1 i dividir el resultat entre tants números com hi hagi entre el 7 i l'1, és a dir, entre 6. Més simplificat, del punt que es vulgui menys el punt inicial dividit entre la posició del punt menys 1 (comença en la posició 1 i no la 0). Això és perquè per determinar el pendent d'un punt s'ha de dividir la segona component del vector (y) entre la primera (x) i així es té quan ascendeix per cada pas horitzontal.

Per fer això, cal el vector, i per saber-lo es fa la resta del punt final menys el punt inicial. Per tant, queda d'aquesta manera:

$$\underline{AB} = B - A = (bx, by) - (ax, ay) \\ (7,19'30) - (1,2'61) = (6,16'69)$$

I per fer el pendent:

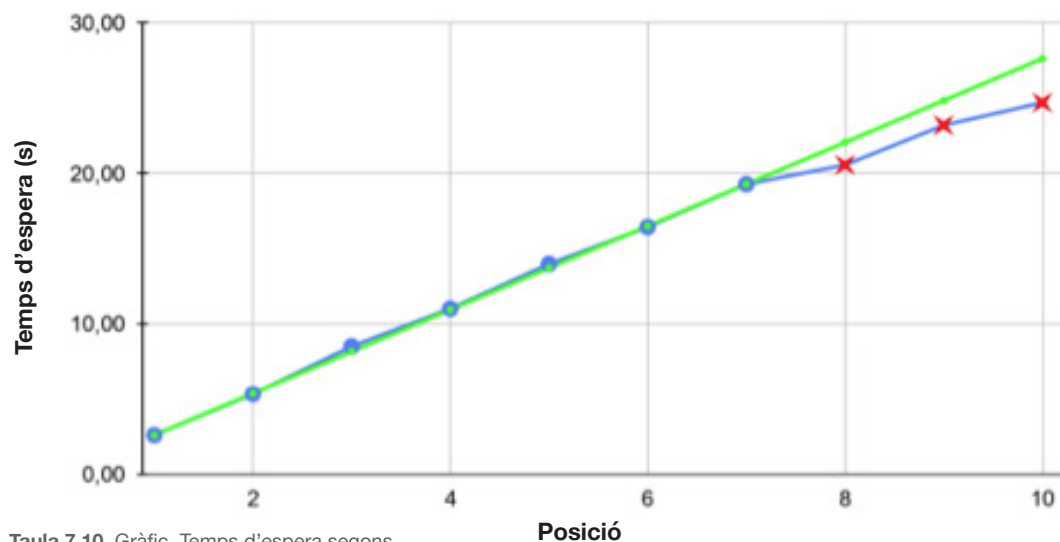
$$m = \frac{AB_y}{AB_x} \\ m = \frac{16'69}{6} = 2,78$$

Aquesta és la m en la funció que volem trobar.

I per trobar la n només cal mirar el punt on es toca l'eix vertical, que és el temps d'espera de la posició 1, $n=2'61$. No s'agafa aquest valor com a pendent per ser més precís, ja que no en totes les posicions es triga el mateix a passar de mitjana. Són valors semblants a com caldria esperar, però no iguals.

Així doncs, la recta que dibuixem queda així: $y=2'78x+2'61$. Per comprovar que aquesta recta és semblant a la de la figura 7.7, la dibuixem en el mateix gràfic (figura 7.10, línia verda.)

Comparació gràfic fórmula amb gràfic real del semàfor 1



Taula 7.10. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 1 amb el gràfic fet a partir del temps de la fórmula

Es veu com coincideix quasi perfectament, exceptuant els punts no vàlids, però, com que no són vàlids, no són rellevants. Per tant, per al semàfor 1 ja tenim la funció matemàtica per

trobar el temps (y) en funció de la posició (x). Per retocar la funció definitivament, només cal fer-li una petita modificació: $y=2'61+2'78 (x-1)$. Això és perquè comença amb la posició 1 i no la 0, que no acabaria de tenir molt de sentit perquè per a la posició 1 hi ha un cotxe a la fila. D'aquesta manera coincideix la quantitat de vehicles a la fila amb l'última posició que ocupa un cotxe.

Ara bé, en les figures 7.8 i 7.9 es pot veure que les mitjanes no són lineals i en alguns casos la funció decreix. I és una condició que físicament és impossible. Això és degut al fet que quan es dispara el temps no passa sempre en la mateixa posició, i per tant les mitjanes aquí ja no serveixen. A més, també s'esdevé un problema ja esmentat: en haver-hi més d'una fase, hi ha cotxes que poden fer infraccions. En altres paraules, com que quan hi ha un salt s'ha passat a color vermell, hi ha cotxes que se'l salten, accions que no seran considerades en el nostre semàfor.

Així doncs, cal una solució. Però abans d'arribar aquí cal mirar què passa quan el temps es dispara, ja que la funció deixa de créixer de manera lineal, ja no és una recta. Per trobar la funció corresponent a aquests gràfics només s'ha de considerar una funció a trossos. Abans i després del salt sí que es comporta com una recta, i, a més a més, de la mateixa manera. Tots els trossos de la funció són parcel·les. És a dir, abans i després del salt, el segment és idèntic. Quan hi hagi un salt només s'haurà de sumar al temps d'espera el temps de vermell.

Per tant, s'introdueix una nova variable, en el cas del semàfor intel·ligent. En el semàfor convencional, el que està ara posat, és més senzill, ja que és un nombre constant. Però com que la funció servirà perquè el semàfor pugui ajustar el temps de cada semàfor segons el temps d'espera de l'últim cotxe, aquest vindrà condicionat per tres variables: el temps de verd, el temps de vermell i la posició de l'últim cotxe.

El temps de verd també afecta, ja que, com més gran sigui, més tard es dispararà el temps. Tornant al plantejament anterior, cal crear una funció a trossos que sigui una recta i s'hi sumi el temps de vermell.

Per treure la recta cal seguir el mateix procediment que en el semàfor 1, aconseguint la m i la n . L'ordenada en l'origen s'aconsegueix de la mateixa manera, amb el temps de la primera posició. Ara bé, el pendent pateix un petit canvi. En comptes d'aconseguir-lo trobant el vector entre la posició 1 i el punt més gran vàlid, s'ha d'agafar el punt més gran vàlid abans que hi hagi cap salt. En el semàfor 2 (figura 7.8) és la posició 2, i en el semàfor 3 (figura 7.9) és la posició 5. Els pendents són 3,33 i 3,22, respectivament. Com es pot veure, són bastant semblants i lleugerament més grans que els del semàfor 1. Això deu ser degut al fet que es troben en pujada i, per tant, els vehicles triguen més a arrencar i passar el semàfor. Aquesta observació té un gran pes a l'hora de voler extrapolar la funció a qualsevol cruïlla. En parlarem més endavant.

La funció del semàfor 2 queda així: $y=3'13+3'33 (x-1)$. I la del semàfor 3, així: $y=3'03+3'22 (x-1)$. Però, com que són a trossos, cal determinar per a quines x és cada tros. Aquí cal remarcar que en el semàfor 1 també es fa una funció a trossos perquè, encara que no hagi passat, si la x és suficientment gran, també es dispararà el temps.

La posició en què el temps es dispara es calcula amb la mateixa equació. Com que se saben els temps de verd de cada semàfor, en el moment que la posició sigui tan gran que faci que el temps d'espera sigui més gran que el temps de verd, llavors aquella posició es trobarà al tros següent de la funció. És a dir, si la posició 4 del semàfor 2 triga 11 segons a passar, però el temps de verd d'aquest semàfor és 10, s'extreu que la posició 4 ja es troba en el tros següent.

Per a cada tros, cal sumar el temps en vermell d'aquell semàfor, ja que és el temps que s'haurà d'esperar de més el cotxe que no arribi a passar en verd.

La funció a trossos del semàfor convencional queda així:

$$\begin{aligned}
 \text{Semàfor 1: } f(x) &= \begin{cases} 2,61+2,7810*(x-1) & \text{si } x < 11 \\ 51+3+2,61+2,7810*(x-1) & \text{si } 10 < x < 22 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{cases} \\
 \text{Semàfor 2: } f(x) &= \begin{cases} 3,13+3,3288*(x-1) & \text{si } x < 4 \\ 71+3+3,13+3,3288*(x-1) & \text{si } 3 < x < 7 \\ 71*2+6+3,13+3,3288*(x-1) & \text{si } 6 < x < 10 \\ 71*3+9+3,13+3,3288*(x-1) & \text{si } 9 < x < 13 \\ 71*4+12+3,13+3,3288*(x-1) & \text{si } 12 < x < 16 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{cases} \\
 \text{Semàfor 3: } f(x) &= \begin{cases} 3,03+3,218315*(x-1) & \text{si } x < 9 \\ 55+3+3,03+3,218315*(x-1) & \text{si } 8 < x < 17 \\ 55*2+6+3,03+3,218315*(x-1) & \text{si } 16 < x < 25 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{cases}
 \end{aligned}$$

Com es veu, a mesura que s'avança en trossos de la funció es van sumant nombres a les funcions. Aquests corresponen al temps de vermell i d'ambre, que es poden consultar a l'apartat "Presa de dades", a la taula dels temps de funcionament del semàfor d'estudi (taula 6.3). Això és perquè quan un cotxe ha d'esperar tot el cicle del semàfor, és a dir, quan s'ha de mirar el tros següent de la funció, el cotxe que no passa ha d'esperar tot el cicle, tant el vermell com l'ambre. En el semàfor actual no passa, l'ambre s'hauria de comptar com a verd si es volgués fer aproximat a la realitat, ja que cap cotxe el té en compte com a vermell. No obstant això, com que aquestes funcions únicament són el pas previ per arribar al semàfor intel·ligent, el compte es fa seguint el codi de circulació: en l'ambre és obligatori parar.

Els punts suspensius són per indicar que hi hauria d'haver infinites funcions per a les infinites possibilitats de x . Això seria parlant teòricament, perquè a la pràctica només s'utilitzaran les x que en realitat afectin, és a dir, mai no hi haurà 1.833 cotxes en una fila, per exemple, així que és absurd tenir una funció per a un número tan gran. Per això només s'escriuen les funcions significatives, per a les quals hi ha hagut una posició registrada a la presa de dades, més alunes d'extres per si de cas.

Per acabar de fer la funció matemàtica completament, cal traslladar els nombres a variables, ja que en el semàfor convencional els temps de verd i vermell són nombres constants, però en el cas de l'intel·ligent no ho seran.

Per introduir aquestes dues noves variables cal fer petites modificacions. La més senzilla és la del temps de vermell. Per tenir en compte aquesta variable, en lloc d'anar sumant el temps de vermell, que és un nombre constant, es posa la variable *tvermell*. El temps d'ambre, que és el mateix en tots tres semàfors, serà independent als canvis del semàfor intel·ligent. És

a dir, si es decideix augmentar el temps de verd i disminuir el de vermell, no disminuirà el d'ambre, que romandrà intacte sempre. Això és perquè una variació seria quasi insignificant i no val la pena introduir tres noves variables per aquest petit canvi, i perquè és un nombre constant sempre. Cap semàfor té un temps d'ambre més petit o més gran de 3 s. Per tant, se sumará *tvermell* + 3 s a mesura que es canviï de tros.

També cal tenir en compte els temps de retard, és a dir, els temps que hi ha de seguretat entre un semàfor i l'altre. Des que un es posa en vermell fins que un altre es posa en verd hi ha un temps on ambdós estan en vermell per si un cotxe s'hagués saltat el primer semàfor. Aquests temps són de 3 s, tant en el pas del semàfor 1 al 2 com del 2 al 3 i del 3 a l'1. Per tant, en total són 9 segons. Per comprovar que són exactament aquests temps, es pot fer una sèrie de sumes.

Sabent que el temps de cicle són 84 s, es mira fàcilment. El temps de cicle s'obté sumant els temps de verd, de vermell i d'ambre d'un sol semàfor, qualsevol dels tres. En el cas del semàfor 1: $30 + 51 + 3 = 84$. El mateix passa amb els altres dos. Si se sumen els temps de verd dels tres semàfors, els d'ambre i els de retard, es compleix que duren un cicle:

$$30 + 10 + 26 + 9 + 9 = 84$$

Igualment, si se sumen els temps de verd i d'ambre de dos semàfors i els 3 s de retard o seguretat, s'obté el temps de vermell del tercer semàfor. Per exemple, en el semàfor 1:

$$t_{vermell3} = 3 * t_{retard} + t_{ambre1} + t_{ambre2} + t_{verd1} + t_{verd2}$$

$$51 = 3 * 3 + 3 + 3 + 10 + 26$$

Aquestes són les dues característiques que han de complir els temps perquè siguin vàlids. És a dir, si no es compleixen les sis equacions (una per cada semàfor de les dues equacions), els temps no quadren i seria impossible que tot plegat funcionés. Això es veu reflectit en la simulació dels semàfors convencionals amb temps ajustables, explicada a l'apartat 3.4.2., "Simulació amb Scratch d'un semàfor convencional amb temps ajustables".

Una vegada se sap que els tres temps de seguretat sumen 9 s ($3*3$), és coherent pensar que haurien d'aparèixer en la fórmula. Però només s'han de tenir en compte si no s'hi sumen els temps de vermell. És a dir, si en comptes de sumar en cada tros *tvermell* 3 s, se sumés els temps de verd i ambre dels altres dos semàfors i els de seguretat, llavors sí que apareixerien, com és evident. Però en ser-hi els vermells, els temps de retard ja hi estan inclosos, perquè al cap i a la fi els temps de retard es donen quan els semàfors estan en vermell, així que no apareixen perquè ja estan inclosos.

Per simplificar-ho tot bastant, es pot pensar com que el cotxe que no aconsegueix passar en el primer temps de verd s'ha d'esperar el que indiqui la fórmula més tot el cicle del semàfor excepte el verd. Això és perquè, com que no ha passat, s'espera tot l'ambre i també el vermell, i, a més a més, el que li quedi encara de verd segons la fórmula. Així doncs, per simplificar, només cal anar sumant el cicle total menys el temps de verd cada vegada que es canviï de tros. El que és el mateix, anar sumant 3 s cada vegada al temps de vermell. Com es veu, el temps de retard no cal.

El temps de verd té un impacte més gran, ja que, depenent de com sigui, els salts es produiran

abans o més tard. Per tant, no es veurà representat en la funció en si, sinó en quines x ha de saltar la funció.

Per fer-ho, cal crear una equació basada en la primera. Si el temps de verd (*tverd*) és més gran que el temps d'espera, llavors la funció es troba en el primer tros. Si el temps de verd és més petit que el temps d'espera, però dues vegades el *tverd* és més gran, es troba en el segon tros. I així successivament. Més visualment:

$$\text{Semàfor 3: } f(x) = \begin{cases} 3,03+3,218315^*(x-1) & \text{si } 3,03+3,218315^*(x-1) < t_{\text{verd}} \\ 84+3,03+3,218315^*(x-1) & \text{si } t_{\text{verd}} < 3,03+3,218315^*(x-1) < 2*t_{\text{verd}} \\ 2*84+18+3,03+3,218315^*(x-1) & \text{si } 2*t_{\text{verd}} < 3,03+3,218315^*(x-1) < 3*t_{\text{verd}} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{cases}$$

Si s'aïlla, per deixar-ho en funció de x , per fer-ho més senzill, de la següent manera, com una inequació normal:

$$\begin{aligned} t_{\text{verd}} &< n + m * (x - 1) \\ t_{\text{verd}} - n &< m * (x - 1) \\ \frac{t_{\text{verd}} - n}{m} &< x - 1 \\ x &> 1 + \frac{t_{\text{verd}} - n}{m} \end{aligned}$$

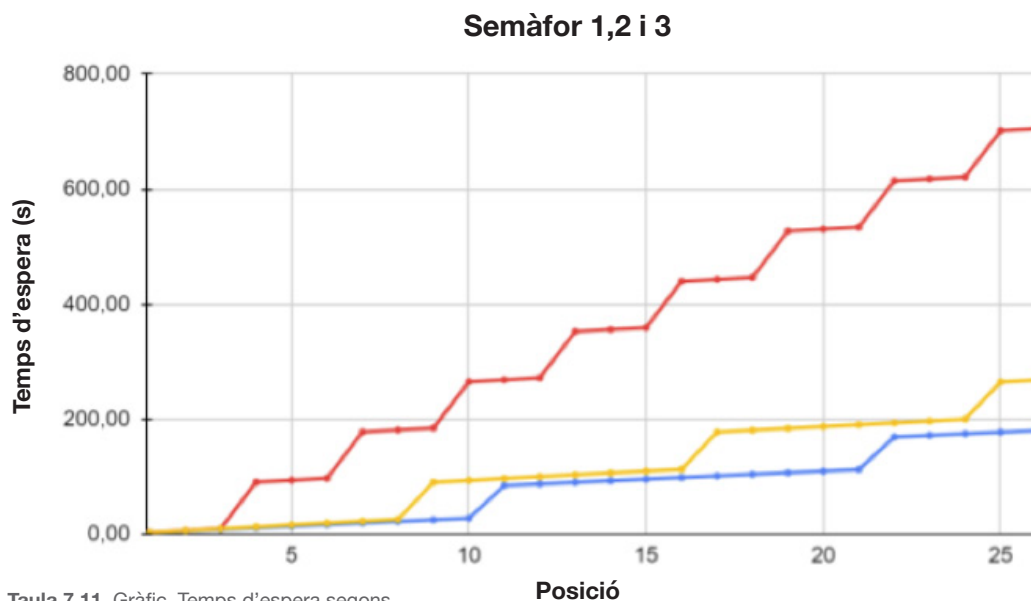
Per tant, les funcions dels tres semàfors intel·ligents quedarien d'aquesta manera:

$$\begin{aligned} \text{Semàfor 1: } f(x) &= \begin{cases} 2,61+2,7810^*(x-1) & \text{si } x > 1 + ((t_{\text{verd1}}-2,61)/2,7810) \\ 3+t_{\text{vermell1}}+3+2,61+2,7810^*(x-1) & \text{si } 1 + ((t_{\text{verd1}}-2,61)/2,7810) < x < 1 + ((2*t_{\text{verd1}}-2,61)/2,7810) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{cases} \\ \text{Semàfor 2: } f(x) &= \begin{cases} 3,13+3,3288^*(x-1) & \text{si } x > 1 + ((t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) \\ 3+t_{\text{vermell2}}+3+3,13+3,3288^*(x-1) & \text{si } 1 + ((t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) < x < 1 + ((2*t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) \\ 6+t_{\text{vermell2}}*2+3+3,13+3,3288^*(x-1) & \text{si } 1 + ((2*t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) < x < 1 + ((3*t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) \\ 9+t_{\text{vermell2}}*3+3+3,13+3,3288^*(x-1) & \text{si } 1 + ((3*t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) < x < 1 + ((4*t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) \\ 12+t_{\text{vermell2}}*4+3+3,13+3,3288^*(x-1) & \text{si } 1 + ((4*t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) < x < 1 + ((5*t_{\text{verd2}}-3,13)/3,3288) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{cases} \\ \text{Semàfor 3: } f(x) &= \begin{cases} 3,03+3,2183^*(x-1) & \text{si } x < 1 + ((t_{\text{verd3}}-3,03)/3,2183) \\ 3+t_{\text{vermell3}}+3+3,03+3,2183^*(x-1) & \text{si } 1 + ((t_{\text{verd3}}-3,03)/3,2183) < x < 1 + ((2*t_{\text{verd3}}-3,03)/3,2183) \\ 6+t_{\text{vermell3}}*2+3+3,03+3,2183^*(x-1) & \text{si } 1 + ((2*t_{\text{verd3}}-3,03)/3,2183) < x < 1 + ((3*t_{\text{verd3}}-3,03)/3,2183) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{cases} \end{aligned}$$

Així doncs, els temps d'espera en tots els semàfors queden en funció de nou variables: l'última posició dels tres semàfors, el temps de verd dels tres semàfors (*tverd1*, *tverd2*, *tverd3*) i el temps de vermell dels tres semàfors (*tvermell1*, *tvermell2*, *tvermell3*). En contenir tantes variables, la funció passa més aviat de ser matemàtica a lògica. La raó perquè la variable *tvermell* entra en joc i no se suma el temps de cicle és perquè es pot jugar també amb aquests temps. Pot ser que en un moment donat hi hagi molt pocs cotxes i la solució més eficient sigui reduir el temps total de cicle, de manera que hi hagi un canvi de semàfor

més ràpidament. Això implica complicar més el semàfor, però per fer la funció més real es deixa d'aquesta manera. Cal notar que els temps de retard no es tenen en compte perquè, com s'ha dit, estan inclosos en els temps de vermell.

Seguint aquestes funcions amb els temps dels actuals semàfors es pot treure una gràfica que es pot allargar fins a l'infinit; en el cas de la figura 7.11, fins que $x = 26$, que és molt més del que s'ha registrat. En la figura es poden veure les línies dels tres gràfics superposades.



Taula 7.11. Gràfic. Temps d'espera segons la posició dels semàfors 1, 2 i 3 a partir de les funcions amb els temps dels semàfors actuals. Blau: semàfor 1; vermell: semàfor 2; ambre: semàfor 3.

Aquesta fórmula sembla la correcta, fins que es prova de fer una fórmula general, una fórmula que sigui per trossos, que sigui genèrica. Per exemple:

$$f(x) = n * t_{vermell} + n * t_{ambre} + 3,03 + 3,2188 * (x - 1), \text{ si } 8n < x < 8(n + 1) + 1$$

Aquí, si $n = 0$, estarà en el primer tros de la funció, ja que $0 < x < 9$. I els temps de vermell i ambre també seran 0 i no se sumaran. Així doncs, n seria cada tros de la funció. Si $n = 1$, és que és el tros $8 < x < 17$. Es pot comprovar que funciona amb les fórmules de més amunt, quan encara no depenen del temps de verd.

Però quan s'intenta fer amb la fórmula del primer semàfor, no se'n pot trobar una. Perquè, segons la fórmula, durant el primer temps de verd passen 10 cotxes, però al segon en passen 11. Això és un concepte erroni, ja que, per fer les fórmules, es va partir del supòsit que tots els trossos eren segments idèntics i paral·lels. Però aquí es veu que no.

L'error està en els decimals. La funció actual, com es veu en la figura 7.11, és contínua en tots els punts, incloent-hi els decimals. Podem saber quant trigarà el 2,36è cotxe, la qual

cosa és absurda, ja que és el cotxe 2 o és el cotxe 3. El domini de la funció hauria de ser únicament el dels nombres naturals. Aquestes funcions s'anomenen *funcions discretes*. És a dir, la funció només ha de tenir sentit pels nombres 1, 2, 3... sense decimals.

L'error dels decimals en la fórmula anterior és difícil de veure. El que fa la fórmula és, quan es dispara el temps (que és quan la fórmula falla), aturar la situació. La congela, o treu una foto de com estan els cotxes en aquell moment. Si un cotxe, per exemple, està a mig passar, el clava en la posició en què està. I, després del temps de vermell i ambre, és a dir, una vegada sumats, reprèn la fotografia, descongela la situació, i, per tant, el cotxe que estava a mig passar només ha de passar l'altra meitat. En el semàfor 1 dona aquest error molt ràpid, però succeeix en tots. Si la funció s'allargués molt, es veuria com hi ha un tros, potser el que fa mil, que passa un cotxe de més. Això es veu si calcules quin cotxe ha de passar amb la fórmula que determina les x :

Semàfor 2:

$$x(\text{últimcotxequepassa}) = 1 + \left(\frac{(t_{\text{verd}} - 3,13)}{3,3288} \right)$$

$$x = 1 + \left(\frac{(10 - 3,13)}{3,3288} \right)$$

$$x = 3,06$$

Segons això, passen 3,06 cotxes durant el temps de verd. I s'arrodoneix a 3 quan es posa en la fórmula. Però els decimals s'emmagatzemen. I, si es calcula un tros número 60 o 100 o molt gran, els decimals acumulats sumen 1, i per això passa un cotxe més. En aquesta fórmula el decimal és molt petit i, per tant, negligible. Però en la del semàfor 1 és més gran i l'error es dona dins de temps que poden ser normals, i per tant sí que afecta. Es pot comprovar en la figura 7.11, comptant els punts de cada tros de la línia blava.

La solució, com ja s'ha dit, és una funció discreta. Es podria dir que el domini són només els nombres naturals i ja està, però el que fa la fórmula és seguir agafant el primer segment abans del salt i copiar-lo on comença el següent. Ara, però, en comptes de copiar un segment, es copiarien uns punts que seguirien desplaçats.

Les fórmules correctes per calcular el temps d'espera ja no caldrà que siguin a trossos, cosa que facilita la programació, ja que, si no, s'haurien d'haver posat molts trossos, per assegurar-se que en cap moment no hi hagi tants cotxes que no hi hagi cap fórmula per a aquelles x . Les fórmules correctes per a cada semàfor es compliquen una mica, però són les que s'han utilitzat per a la simulació, i són les següents:

Semàfor 1:

$$f(x) = 2,61 + 2,7810 * (x - 1 - ((\text{round}(1 + ((t_{\text{verd}} - 2,61) / 2,7810); 0)) - 1) * (\text{if}(\text{mod}(x; \text{round}(1 + ((t_{\text{verd}} - 2,61) / 2,7810); 0))) = 0; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((t_{\text{verd}} - 2,61) / 2,7810); 0))); 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((t_{\text{verd}} - 2,61) / 2,7810); 0))); 0)))) + t_{\text{cicle}} * (\text{if}(\text{mod}(x; \text{round}(1 + ((t_{\text{verd}} - 2,61) / 2,7810); 0))) = 0; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((t_{\text{verd}} - 2,61) / 2,7810); 0))); 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((t_{\text{verd}} - 2,61) / 2,7810); 0))); 0))))$$

Semàfor 2:

$$f(x) = 3,13 + 3,3288 * (x - 1 - ((\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,13) / 3,3288); 0)) - 1) * (\text{if}(\text{mod}(x; \text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,13) / 3,3288); 0)) = 0; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,13) / 3,3288); 0)); 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,13) / 3,3288); 0)); 0)))))) + \text{tcicle} * (\text{if}(\text{mod}(x; \text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,13) / 3,3288); 0)) = 0; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,13) / 3,3288); 0)); 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,13) / 3,3288); 0)); 0))))))$$

Semàfor 3:

$$f(x) = 3,03 + 3,2183 * (x - 1 - ((\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,03) / 3,2183); 0)) - 1) * (\text{if}(\text{mod}(x; \text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,03) / 3,2183); 0)) = 0; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,03) / 3,2183); 0)); 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,03) / 3,2183); 0)); 0)))))) + \text{tcicle} * (\text{if}(\text{mod}(x; \text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,03) / 3,2183); 0)) = 0; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,03) / 3,2183); 0)); 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / (\text{round}(1 + ((\text{tverd} - 3,03) / 3,2183); 0)); 0))))))$$

Com es veu, ja no s'utilitza el temps de vermell, ja que, en realitat, el temps de vermell no és una fase, sinó el temps que sobra de les altres dues fases. Tot i així, està contingut en el temps de cicle. Aquesta fórmula va molt més encarada al seu ús en la simulació, que funciona sense comptar el vermell. La traducció de la fórmula en el llenguatge per a la simulació és a la figura 7.13.

Per entendre la fórmula s'ha de desglossar. Hi ha trossos que es repeteixen. Per començar, es facilita si s'introdueix un nou concepte: PUCP (posició de l'últim cotxe que passa). Que és el càlcul que s'ha fet abans, però arrodonint a un nombre natural.

Semàfor 2:

$$PUCP = \text{round}(1 + (\frac{\text{tverd}2 - 3,13}{3,3288}))$$

$$PUCP = \text{round}(1 + (\frac{(10 - 3,13)}{3,3288}; 0))$$

$$PUCP = \text{round}(3,06) = 3$$

Semàfor 2:

Ara ja no tenim els decimals acumulant-se, ja que s'han eliminat amb un arrodoniment (per això hi ha el "; 0" final, per arrodonir a 0 decimals). Així, si el decimal de les dècimes és 5 o superior, es considera que el vehicle ha passat en arrodonir cap amunt, ja que tampoc no li donava a temps frenar. En aquest cas, està passant en ambre i legalment, ja que ja havia començat a passar, com es diu al codi de circulació. La fórmula, substituint aquest concepte, queda així:

Semàfor 1:

$$f(x) = 2,61 + 2,7810 * (x - 1 - (PUCP - 1) * (\text{if}(\text{mod}(x; PUCP) = 0; (\text{rounddown}(x / PUCP; 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / PUCP; 0)))) + \text{tcicle} * (\text{if}(\text{mod}(x; PUCP) = 0; (\text{rounddown}(x / PUCP; 0)) - 1; (\text{rounddown}(x / PUCP; 0))))$$

Semàfor 1:

Se simplifica bastant, perquè PUCP és un terme que es repeteix tres vegades en la fórmula. Aquests conceptes en la fórmula únicament són per fer-la discreta. Ja no hi ha cap decimal perquè qualsevol divisió és arrodonida. És a dir, el temps sí que té decimals, un cotxe pot esperar 3,4 s, però el nombre de cotxes que passen és un nombre natural. Si n té uns pocs decimals més (0,2, per exemple), llavors els posa a zero i la següent vegada el cotxe haurà d'arrencar de nou i fer el recorregut com tots, trigant el pendent. La resta de la funció és perquè no sigui a trossos. Fa que, substituint en aquesta mateixa fórmula tinguem tots els resultats, quelcom similar a haver buscat la fórmula genèrica per evitar els trossos anteriorment.

La resta de la fórmula també es pot resumir en el concepte del tros de la fórmula. Es fa per truncament (*rounddown*). I és la divisió entre la posició i PUCP. Així, si PUCP és més gran que x , és a dir, si no es dispara el temps, passen tots els cotxes en el primer temps de verd, la divisió és més petita que 1. I, en truncar, queda un 0. Així, com que estan multiplicant, el temps de cicle que se suma també és 0, ja que estan en el primer cicle i no cal sumar-ne cap. Igualment, no es resta res a les x en els segons sumands de la fórmula. Aquesta resta serveix per restablir la fórmula, és a dir, començar de nou, copiar el primer segment de punts. Així s'evita que els trossos puguin ser diferents, perquè literalment és el mateix tros. Si fos el segon o tercer salt, el truncament seria 1 o 2 i en multiplicar, suma el temps de cicle complet (perquè el temps de verd ja es resta en el primer truncament) i resta a la x PUCP-1, i així, si la x és 25 i passen 10 cotxes, deixa la x a 5, perquè resta dues vegades PUCP (10), i calcula el temps amb aquest nombre.

Cal aclarir dues operacions lògiques de la fórmula: *if* i *mod*. La primera és un condicional: si es compleix tal condició (el que hi hagi abans del primer punt i coma), llavors es fa el que hi ha entre el primer punt i coma i el segon. Si, en canvi, no es compleix, llavors fa el que hi ha entre el segon punt i coma i el tercer. Per tant, si es compleix que $\text{mod}(x; \text{PUCP}) = 0$, fa el truncament i li resta 1. Si no, només fa el truncament. L'operació *mod* fa el residu entre el dividend i el divisor, separats per un punt i coma.

Llavors, si la divisió x / PUCP és exacta, el residu és zero, li resta 1 al truncament, ja que l'últim cotxe sí que passa. És a dir, si hi ha 10 cotxes i $\text{PUCP} = 10$, canviaria de tros al truncament, perquè no és més petit que 1. Però el cotxe número 10 sí que arriba a passar (d'aquí el nom "posició de l'últim cotxe que passa"), i per això encara està en el tros anterior. Llavors, si se li resta en 1, s'arregla. En cas que hi hagués 20 cotxes passaria el mateix. I si n'hi hagués 21, el residu seria diferent de 0 i saltaria al tros número 3. Si n'hi hagués 19, el truncament convertiria l'1,9... en 1, perquè està en el primer tros.

Semàfor 1:

$$\begin{aligned} \text{PUCP} &= \text{round}\left(1 + \left(\frac{(\text{tverd1} - 2,61)}{2,7810}\right)\right) \\ \text{PUCP} &= \text{round}\left(1 + \left(\frac{(30 - 2,61)}{2,7810}\right)\right) \\ \text{PUCP} &= \text{round}(10,85) = 11 \end{aligned}$$

Es pot veure millor en un exemple. Suposem que els temps són els del semàfor 1 convencional: 30 de verd, 3 d'ambre i 51 de vermell (per tant, 84 de cicle). Llavors, PUCP és 11:

Semàfor 1:

I posem que hi ha 10 cotxes:

$$f(x) = 2,61 + 2,7810 * (10 - 1 - (11 - 1) * (\text{if}(\text{mod}(10;11)=0); (\text{rounddown}(10/11;0)) - 1; (\text{rounddown}(10/11;0)))) + 84 * (\text{if}(\text{mod}(10;11)=0); (\text{rounddown}(10/11;0)) - 1; (\text{rounddown}(10/11;0))))$$

Com que la divisió 10 entre 11 no és exacta, traiem l'operació *mod* i simplifiquem l'operació *if*, perquè ja sabem quina és la condició que es dona i com ha d'actuar:

$$f(x) = 2,61 + 2,7810 * (10 - 1 - (11 - 1) * (\text{rounddown}(10/11;0))) + 84 * (\text{rounddown}(10/11;0))$$

I es pot simplificar mirant el truncament:

$$\text{rounddown}\left(\frac{10}{11}; 0\right) = \text{rounddown}(0,91; 0) = 0$$

Es troba en el primer tros. Quan encara no es tenen en compte els temps de cicle, com es veu en el càlcul final:

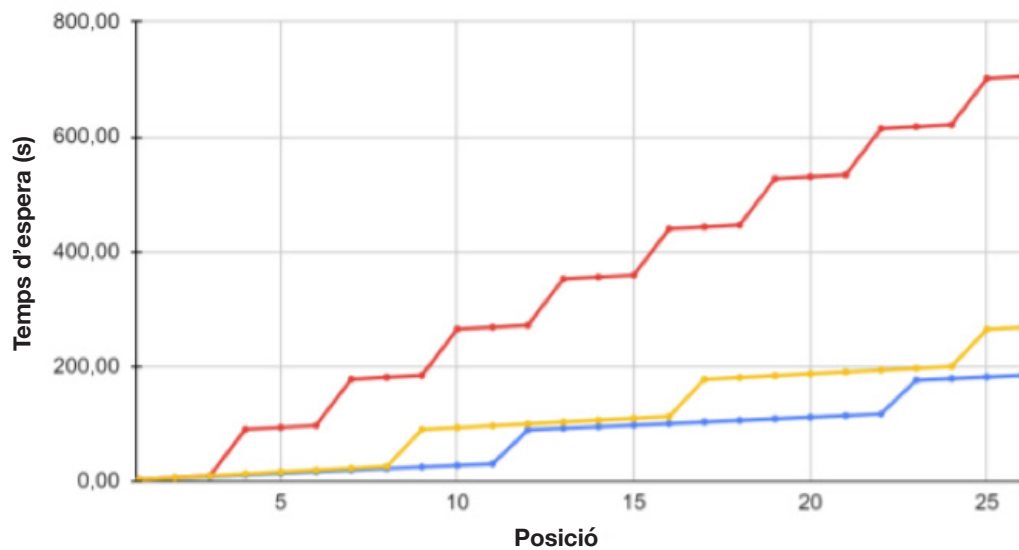
$$\begin{aligned} f(x) &= 2,61 + 2,7810 * (10 - 1 - (11 - 1) * 0) + 84 * 0 \\ f(x) &= 2,61 + 2,7810 * (10 - 1 - 10 * 0) + 0 \\ f(x) &= 2,61 + 2,7810 * 9 \\ f(x) &= 27,64 \text{ s} \end{aligned}$$

Si, en canvi, $x = 12$, llavors el truncament seria 1, perquè $12/11$ no és exacte, sinó 1,2. I en la fórmula quedaria així:

$$\begin{aligned} f(x) &= 2,61 + 2,7810 * (12 - 1 - (11 - 1) * 1) + 84 * 1 \\ f(x) &= 2,61 + 2,7810 * (11 - 10) + 84 \\ f(x) &= 2,61 + 2,7810 + 84 \\ f(x) &= 89,39 \text{ s} \end{aligned}$$

Com es veu, hi ha un gran salt, ja que està en el segons tros, perquè 12 és més gran que PUCP i llavors no passaven tots. Les fórmules completes amb els operadors *mod*, *if*, *round* i *rounddown* són fórmules per a Excel. Així es pot crear el gràfic de la figura 7.12: els tres temps combinats amb les fórmules correctes. És molt semblant a la figura 7.11, perquè l'error en aquell gràfic era molt petit, cosa de decimals. Les fórmules i el resultat segons x per formar el gràfic de la figura 7.12 estan en el full de càlcul "Processament de dades" (annex 2, figura B). Per comprovar aquests resultats calculats, es pot visitar el full de càlcul esmentat o bé buscar en la figura 7.12 la imatge de les x en la línia que pertoca.

Semàfor 1,2 i 3

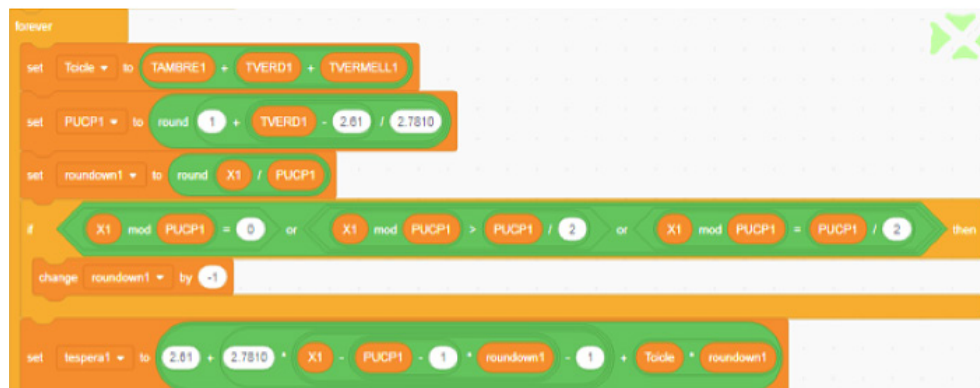


Taula 7.12. Gràfic. Temps d'espera segons la posició dels semàfors 1, 2 i 3 a partir de les funcions completes amb els temps dels semàfors actuals. Blau: semàfor 1; vermell: semàfor 2; ambre: semàfor 3.

Cal aclarir que, en ser una funció discreta, en realitat no hi hauria línies a la figura 7.12, només punts als nombres naturals. S'ha deixat així per facilitar la comparació amb la figura 7.11, i fer més visual l'error que es cometia en aquella figura. Les línies en la figura 7.12 estan buides de sentit, és a dir, només els punts són el domini de la funció.

En la simulació s'han usat les mateixes fórmules que per crear la figura 7.12, però traduïdes al llenguatge de blocs de Scratch. El bloc per establir a les variables *tespera1*, *tespera2* i *tespera3* el valor que els pertoca segons els temps de fase i cicle i la posició dels cotxes és el de la figura 7.13.

El bloc de la figura 7.13 és el mateix per a les dues simulacions intel·ligents, però no s'utilitza en cap de les simulacions dels semàfors convencionals.



Taula 7.13. Bloc de la funció del semàfor 1 traduïda a llenguatge Scratch en la simulació del semàfor intel·ligent.

3.4. Simulació de la cruïlla d'estudi

La part de crear una simulació informàtica on es poguessin ajustar paràmetres per tal de poder comprovar si realment hi ha una millora significant en les cues que es formen és la part fonamental del treball. Així doncs, s'han creat una sèrie de simulacions per poder anar fent aquestes comprovacions. S'aniran presentant aquestes simulacions de menys a més complicades.

3.4.1. Simulació amb GRAFCET d'un semàfor convencional

Com ja hem explicat en parlar dels autòmats programables o PLC, el GRAFCET és una eina de programació de sistemes de control per passos. És la que es faria servir en la realitat si algun enginyer fos encarregat de dissenyar un semàfor, i per això hem fet una simulació amb aquesta eina.

Però és una eina complicada, poc intuïtiva, i no hi estàvem gaire familiaritzats, així que la simulació consta de tres semàfors convencionals amb els temps actuals de la cruïlla en funcionament, sense cotxes.

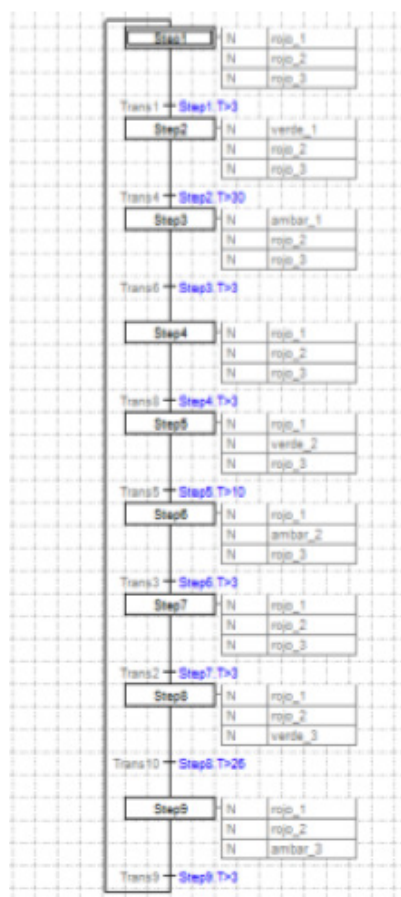


Fig. 8.1. Cicle dels semàfors convencionals fet amb SFC.

El programa utilitzat per fer aquesta simulació és Cx Programmer (i Cx Designer per fer el disseny). Cx Simulator juntaria i carregaria les programacions fetes en els altres dos i donaria peu a la simulació.

Per fer la simulació, cal que es dirigeixi tot des d'un mateix bloc, que un sol circuit vagi repetint i controli el funcionament de tots tres semàfors. Això és perquè si es programen tres semàfors independents per temps, acabaran desquadrant-se amb el temps simplement pel petit temps de retard que triga l'ordinador a fer els passos. Així doncs, el que s'ha fet és un circuit de nou passos, on només es tenen en compte els temps de verd, d'ambre i de retard, quedant els vermells a lloc simplement perquè és el temps sobrant, com està explicat en l'apartat 3.3 amb les sumes per confirmar que els temps dels semàfors són possibles.

Així doncs, en el primer pas comencen els tres semàfors en vermell durant tres segons, que és el temps de seguretat. En el segon pas es posa en verd el semàfor 1 durant *tverd1*, 30 s, mentre els altres dos romanen en vermell. El tercer pas és el mateix, però el semàfor 1 està en *ambre*, durant *tambre1*. El quart pas és idèntic al primer, torna a ser el temps de seguretat. Es repeteix el procés anterior però amb el semàfor 2 passant a verd i ambre, una altra vegada el temps de seguretat i el mateix amb el semàfor 3. Així es tanca el cicle i es torna a començar amb el temps de seguretat. Aquest circuit tancat es pot observar en la figura 8.1.

A cada pas se li assignen tres accions booleanes, una per a cada semàfor. Les accions van vinculades amb un símbol: *rojo_1*, *rojo_2*, *rojo_3*, *verde_1*... I cada símbol té assignat un valor o direcció que en el nostre cas va de l'1,00 al 9,00. Aquestes direccions van relacionades amb el Cx Designer.

En aquest programa s'han creat nou indicadors lluminosos LED, tres de cada color per crear els semàfors. I a cada indicador també se li assigna un valor o direcció. Així doncs, quan s'executa la simulació, es veu com es van il·luminant els indicadors LED a mesura que s'activen les accions de la figura 8.1 amb el mateix valor.

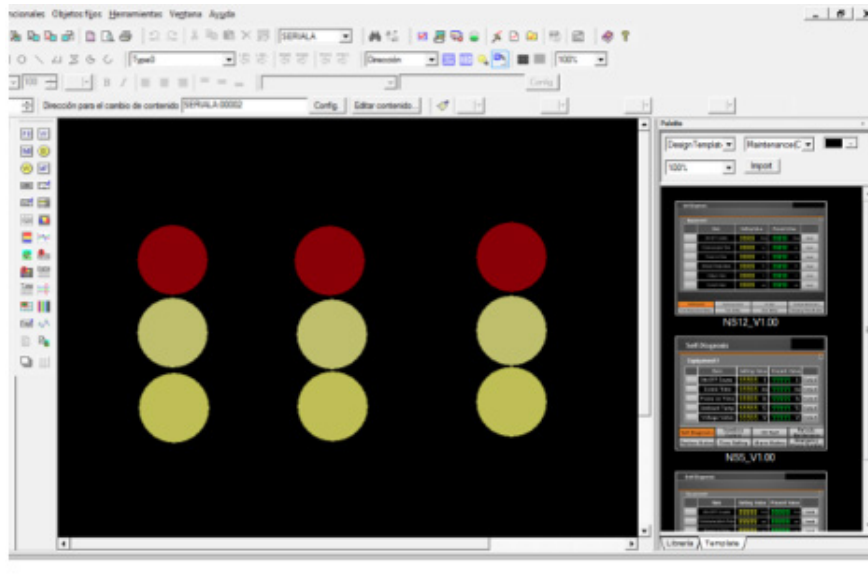


Fig. 8.2. Disseny en el programa Cx Designer dels tres semàfors d'estudi.

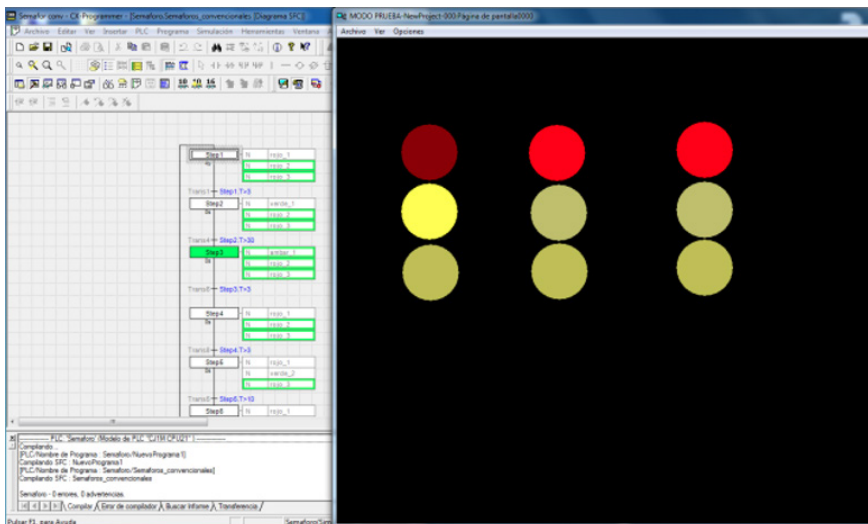


Fig. 8.3. Simulació en funcionament en el pas 3 dels semàfors de la cruïlla d'estudi.

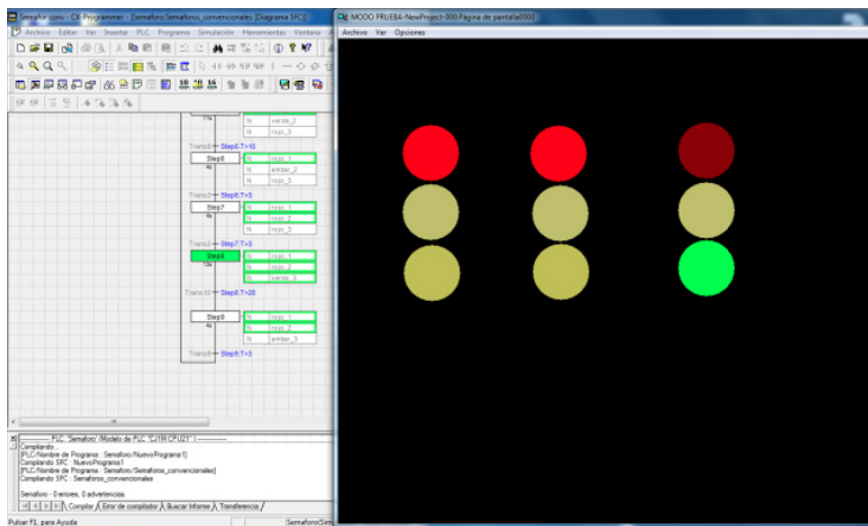


Fig. 8.4. Simulació en funcionament en el pas 8 dels semàfors de la cruïlla d'estudi.

En la figura 8.2 es pot veure el disseny amb els indicadors LED. En una de les eines de la barra superior és on s'inicia la simulació. Llavors es carrega el programa del Cx Programmer i comença la simulació. Les figures 8.3 i 8.4 són exemples de la simulació funcionant.

Fig. 8.4. Simulació en funcionament en el pas 8 dels semàfors de la cruïlla d'estudi.

En la figura 8.3 es veu la simulació en el pas 3 i per tant, amb els colors *ambre1*, *vermell2* i *vermell3* encesos. I en la figura 8.4, en el pas 8, estan encesos els llums *vermell1*, *vermell2* i *verd3*.

3.4.2. Simulació amb Scratch d'un semàfor convencional amb temps ajustables

Scratch és una eina de programació desenvolupada pel grup Lifelong Kindergarten, del MIT. És un projecte educatiu, perquè fa més fàcil i intuïtiva la manera de programar: programació en blocs. No cal escriure el codi, vas ajuntant blocs per crear el programa. A més a més, té uns apartats de variables i operacions que fan comprensible el procés de programació i és més senzill pensar com arribar al teu objectiu.

Vam escollir aquesta eina per fer la programació perquè és una eina que sovint s'ensenya a l'escola. Ja hi havíem treballat, així que era senzill tornar-ho a fer. Des d'un principi és més senzill visualitzar el codi amb aquesta eina que no pas amb GRAFCET.

Per a la posada a la pràctica, es pot utilitzar una placa Arduino, una placa de circuit imprès simple basada en el microcontrolador de codi obert. També té l'objectiu de fer més accessible la programació de circuits electrònics, per la qual cosa encaixa amb Scratch.

La primera simulació amb Scratch és igual que amb GRAFCET. L'escenari conté el programa que controla els personatges. S'utilitzen 10 variables per al procés. En aquesta programació hi ha uns comptadors al costat de cada llum per saber quant de temps li queda en funcionament.

A l'inici, en prémer la bandera verda, apareixen dos botons al costat de cada comptador: un amb el símbol (+) i un altre amb el símbol (-). En ser premuts, canvien el temps del comptador al costat del qual estan col·locats en ± 1 s. El botó "Submit" guarda els temps establerts a

l'inici i inicia la simulació en ser premut. Però només pot ser pitjat si està en blau. Si està en gris i és pitjat, informa d'un error i indica que es canviïn els temps establerts. Això passa quan els temps que es volen guardar no compleixen el que requereix una cruïlla i seria impossible coordinar-los. Per exemple, si els temps de verd són més grans que els de vermell, el botó estarà en gris, ja que si la cruïlla hagués de funcionar així hi hauria dos verds encesos alhora. Perquè els temps siguin vàlids i el botó permeti iniciar la simulació, s'han de complir les sumes que ja s'han mencionat en l'apartat 3.3:

$$\begin{aligned}
 tverd1 + tambre1 + tvermell1 &= tcicle \\
 tverd2 + tambre2 + tvermell2 &= tcicle \\
 tverd3 + tambre3 + tvermell3 &= tcicle \\
 tverd1 + tverd2 + 3 * tseguretat + tambre1 + tambre2 &= tvermell3 \\
 tverd1 + tverd3 + 3 * tseguretat + tambre1 + tambre3 &= tvermell2 \\
 tverd3 + tverd2 + 3 * tseguretat + tambre3 + tambre2 &= tvermell1
 \end{aligned}$$

El temps de seguretat també és ajustable. Hi ha infinites combinacions que són vàlides, però també n'hi ha infinites que no ho són. És difícil trobar-les, així que a sobre del botó "Submit" hi ha tres petits botons: "Set 1", "Set 2" i "Set 3". Són tres combinacions ja donades, perquè es puguin modificar els temps. Però també hi són per veure la simulació més ràpidament i no haver d'esperar tots els temps. Per això, "Set 2" i "Set 3" són combinacions amb un temps de cycle més baix. "Set 1" és la configuració que tenen els semàfors actualment en la cruïlla.

La quantitat de cotxes a cada carril es genera aleatòriament donant un número entre el 0 i el 10. Abans de posar en marxa la simulació amb el botó "Submit", però, es pot ajustar la quantitat de cotxes. Una vegada iniciada, els cotxes entren també aleatòriament, però amb més freqüència en el carril 1, menys en el 3 i encara menys en el 2. Això és perquè en la realitat, a partir de les dades, s'extreu que, aproximadament, en el carril 1 passen 3 cotxes per minut, en el 2 passen 1,62 cotxes per minut i en el 3 passen 2 cotxes per minut. Això es tradueix en el programa fent que agafi un número aleatori entre el 2 i el 40, en el semàfor 1, i aquest sigui el temps d'espera entre l'entrada d'un cotxe i la del següent. Això és perquè, en teoria, entraria un cotxe cada 20 segons per aquest carril, però per fer-ho més aleatori i real, es fa així. En el carril 2 és entre 4 i 80 segons; i en el 3, entre 3 i 60 segons.

A la part inferior dreta de la simulació hi ha tres icones: una amb un sol, una altra amb una lluna i la tercera amb un núvol de pluja. Aquests botons de "circumstàncies" o "condicions ambientals" fan variar la freqüència d'entrada dels cotxes. Quan és de dia (sol i fons verd), les condicions són normals, les explicades. Si és de nit (lluna i fons negre), la freqüència és la "meitat"; circulen menys cotxes i, per tant, en el cas del semàfor 1, entra un cotxe entre 2 i 80 segons després del predecessor. En canvi, quan plou (núvol amb pluja i fons gris), la freqüència es "dobla", perquè la gent, en comptes de caminar, agafa el cotxe; en aquest cas, els cotxes en el cas del semàfor 1 entren cada 2-20 segons. "Meitat" i "dobla" estan entre cometes perquè com s'ha indicat, els cotxes entren aleatòriament.

Enllaç a la simulació: <https://scratch.mit.edu/projects/468321211>

Per veure'n el codi, per saber com està fet el programa, cal fer-ne una còpia. Aquesta còpia sí que es pot veure per dins, i fins i tot modificar-la.

3.4.3. Simulació amb Scratch d'un semàfor intel·ligent

Scratch ofereix moltes opcions per programar. A partir dels pocs blocs predeterminats es pot arribar a crear programes realment complexos, i per això l'hem fet servir per a la simulació del semàfor intel·ligent. A més, presenta una gran facilitat per crear animacions molt visuals, com els moviments dels cotxes o la pluja quan es pitja el botó amb el núvol.

El semàfor intel·ligent detecta quants cotxes hi ha en la simulació simplement mirant la variable X, però requeriria uns sensors per detectar la quantitat de trànsit. No caldria programar-los gaire perquè només seria necessari que variés X i la resta del programa seria compatible, evidentment, traient l'entrada de cotxes i substituint aquest valor per les dades del sensor.

El funcionament abans de pitjar el botó "Submit" és igual que a l'altra simulació. Els botons amb signe + i - prop de les variables X les modifiquen en una unitat, i els botons de les condicions climàtiques regulen la freqüència d'entrada de cotxes, que és la mateixa en ambdues simulacions. L'única diferència és que no es poden variar els temps dels semàfors, ja que el programa ho farà sol més tard. Per tant, els botons "Set" tampoc no hi són.

El canvi més gran el pateix l'escenari, que és el que controla els canvis dels semàfors en les dues simulacions. El programa dels semàfors intel·ligents és molt més llarg. Això és perquè inclou una gran varietat d'opcions i també conté la fórmula per calcular els temps d'espera de l'últim cotxe de cada carril.

Els canvis en el funcionament dels semàfors segons la quantitat de cotxes es fan entre el pas 9 i l'1, just abans que el semàfor 1 es posi verd i després que el 3 es posi vermell. Els ajustos en els temps els fa a partir d'uns criteris preestablerts incorporats en el programa, que són fixos mentre no es modifiqui la programació.

Els criteris escollits perquè el semàfor variï els temps són els següents:

- Si cap temps es dispara, és a dir, si cap temps d'espera és superior al temps de verd, es deixa el semàfor tal com està, excepte en un cas: si la cua en tots tres semàfors és menor a 4, llavors es redueix el temps de cicle de 84 a 48 segons, el temps de verd passa a 10, el d'ambre es manté sempre igual i el de vermell passa a 35. Això fa que el temps de cicle sigui més petit i així esperen menys tots els cotxes. Aquesta configuració no funciona amb una gran quantitat de cotxes. Els temps dels cicles no es modificaran en cap condició més que la següent: si el temps de verd puja, baixen el de vermell i el de verd en els altres dos.
- Ara bé, si hi ha més cotxes, la cosa varia. Si hi ha una fila saturada, és a dir, hi ha més cotxes dels que passen en un temps de verd, canvia aquell temps. Si pot, és a dir, si quan els canvia no fa que les altres files se saturin, el programa suma 7 segons de verd i els reparteix (5 i 2) en la resta de files. Si no pot, perquè saturaria una altra fila, només en suma 4. Si hi ha dues files saturades, intenta sumar 7 segons a cadascuna, si pot, o 4 i 7 si no pot (o, si encara no pot, 4 segons a cadascuna). Aquests segons s'afegeixen així perquè en 4 segons passa un cotxe més, ja que els vehicles passen més o menys cada 3 segons. Sumant-hi 7 segons, passen dos cotxes més.
- Si algun carril està saturat per dos, és a dir, l'últim cotxe haurà d'esperar dos cicles, llavors el programa prova de sumar 11 segons; i si no pot, 7 segons; i si encara no, 4 segons. I si els carrils estan saturats per tres, prova 11 segons; i si no pot, només 7 segons.

Per comprovar que quan canvia els temps no fa que un altre es dispari, el programa fa servir un bloc similar al de la figura 7.13, amb la fórmula que s'ha calculat a l'apartat 3.3 i PUCP. Perquè en realitat fa els canvis en unes variables anomenades “temps hipotètics” (htemps), que de fet no afecten la simulació directament. I calcula amb la fórmula cada temps per a cada condició i, si segons els criteris és vàlida, llavors estableix els temps hipotètics com a reals.

Aquest és un petit resum de què fa la simulació; en realitat, el programa és més extens, inclou més casos. Però, en línies generals, funciona així, sumant segons a les files més plenes. Varia uns temps hipotètics, amb la fórmula calcula que els altres no s'hagin modificat molt i llavors els aplica al semàfor. Si es volen més detalls, es pot accedir a la programació.

Enllaç a la simulació: <https://scratch.mit.edu/projects/469039818>

Per veure'n el codi, per saber com està fet el programa, cal fer-ne una còpia. Aquesta còpia sí que es pot veure per dins, i fins i tot modificar-la.

Simulació del semàfor intel·ligent, versió 2

Aquesta segona versió del semàfor és quasi idèntica a la primera. Únicament canvia que el programa reconfigura els temps segons les cues tres vegades per cicle i no només una. Així s'intenta augmentar l'eficiència del semàfor.

Això és possible gràcies a una funció de l'eina Scratch on crees un bloc i així no cal triplicar el programa que calcula els temps.

La versió 1 feia la reconfiguració dels temps després del verd del semàfor 3 i abans del verd del semàfor 1. I just després del temps de seguretat, per tenir més fiabilitat en comptar els cotxes de cada fila i que no en vingui un altre mentre fa el temps de seguretat. Això dificulta la visualització de la reconfiguració dels temps.

En la versió 2, en canvi, el càlcul es fa després de cada temps de seguretat calculant tres vegades per cicle. Això, en teoria, hauria de ser una millora, ja que el programa pot comprovar si el canvi anterior ha estat fructuós o no i tornar a fer-ne un.

Enllaç a la simulació: <https://scratch.mit.edu/projects/472048067>

Per veure'n el codi, per saber com està fet el programa, cal fer-ne una còpia. Aquesta còpia sí que es pot veure per dins, i fins i tot modificar-la.

Cal tenir en compte que, en ambdues versions del semàfor intel·ligent, els comptadors vermells deixen de funcionar. Això és perquè els vermells no són una fase més del semàfor, sinó el temps que sobra mentre no estan en verd ni ambre i sí que ho estan els altres semàfors de la cruïlla. Així doncs, com que canvien els temps dels semàfors, afecten els que estan en aquell moment en vermell. Així, si a un li quedaven 3 segons per acabar, per exemple, pot veure's sumat 4 segons i el comptador perd el sentit. Sobretot en la versió 2 de la simulació del semàfor intel·ligent, ja que estarien els temps canviant constantment i els comptadors regressius servien per dificultar la comprensió de la simulació.

En canvi, es deixa el temps de vermell que hauria de durar aquella fase. Que també canviaria tres vegades per cicle, però, com que no és una regressió, no dificulta la comprensió. A més a més, facilita la visualització dels canvis que fa el semàfor. Es veu millor quan augmenta o disminueix els temps de vermell, ja que és un número fix.

Les figures 8.5 i 8.6 són imatges de la simulació intel·ligent versió 1 en diferents condicions meteorològiques. L'estètica de les tres simulacions amb Scratch són gairebé idèntiques, així

que les altres dues es veurien igual un cop iniciades. Abans de ser iniciades, com en la figura 8.6, la simulació del semàfor intel·ligent sí que és diferent pels botons per ajustar els temps.



Fig. 8.5. Simulació intel·ligent, versió 1, feta amb Scratch, en funcionament en una rèplica de la cruïlla d'estudi.

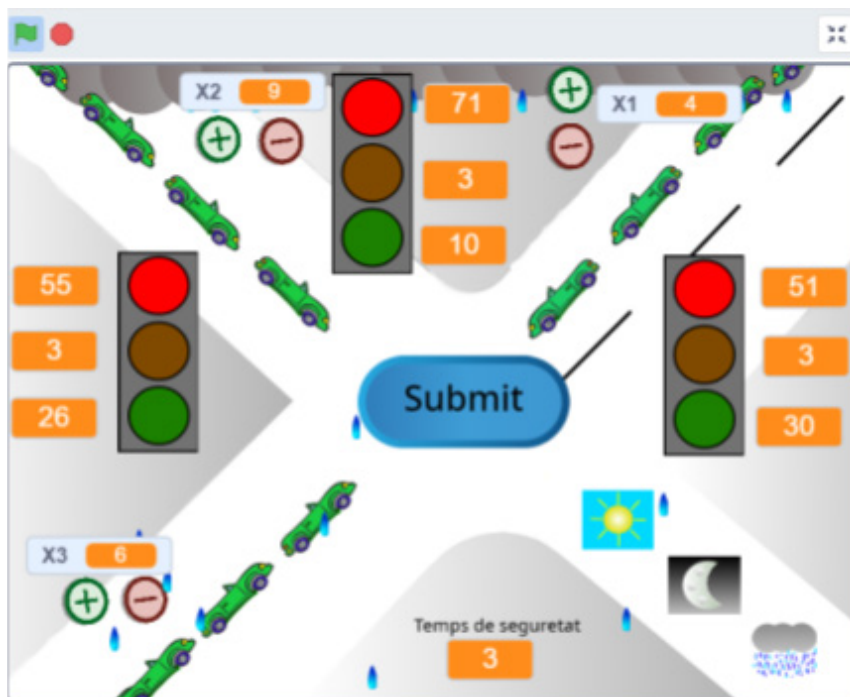


Fig. 8.6. Simulació intel·ligent versió 1 feta amb Scratch, abans d'iniciar-se en una rèplica de la cruïlla d'estudi.

Els comptadors X1, X2 i X3 indiquen el nombre de cotxes a la cua. I els comptadors al costat de cada semàfor són els temps de cada fase. En la figura 8.5, es veu que la simulació està passant del pas 1 al 2. El semàfor 2 s'ha posat en vermell i la captura s'ha pres just en acabar el temps de seguretat (a baix de tot) i per això està en 0. El cotxe que està al mig ha passat durant l'ambre perquè ja no podia frenar.

La figura 8.6 mostra la simulació abans de ser començada, esperant que es premi el botó "Submit" mentre plou.

3.5. Millores aplicables al semàfor intel·ligent

El present treball s'ha fet amb l'objectiu de comprovar si un semàfor intel·ligent millora realment el rendiment del flux del trànsit i si valdria la pena instal·lar-ne un en una cruïlla concreta de Rubí. Per a això, la simulació presenta un semàfor intel·ligent però sense un gran programari, una simulació capaç de comparar els dos tipus de semàfors correctament. Per tant, l'elaboració de la simulació era únicament una eina d'experimentació i el treball no consistia a crear un semàfor intel·ligent funcional en la realitat.

Així, ha estat possible introduir una sèrie de millores al llarg del treball que, probablement, augmentarien l'eficiència del semàfor intel·ligent i reforçarien positivament la valoració dels semàfors a favor de l'intel·ligent o, contràriament, augmentaria el pressupost i faria que valgués menys la pena.

Algunes d'aquestes millores serien les esmentades a l'apartat 2.5, "Tendències en la regulació del trànsit cap al futur". Però, més enfocat en la tecnologia actual, es podrien implementar les millores següents:

- La millora més òbvia consistiria a canviar els criteris del semàfor intel·ligent per actuar seguint-ne uns de més efectius, trobats en fer moltes proves amb la simulació, és a dir, assolir uns criteris millors que els actuals. Un exemple: en comptes que el semàfor regulés els temps sumant unes quantitats fixes de segons (com 4, 7 i 11), els canviés proporcionalment en funció de la cua. Que augmentés el verd que té un temps d'espera més gran en un 10%, per exemple. Podria ser una millora efectiva, però potser no. Caldria provar-ho. Això complicaria la simulació en l'ús de decimals i en els cicles, ja que augmentar un 10% en un carril i reduir els altres dos en el percentatge corresponent podria tenir com a resultat uns temps invàlids o absurds.
- També seria una millora la idea, ja esmentada, de detectar els vehicles que passen els semàfors en vermell, per sancionar-los adequadament amb l'objectiu que això no es repeteixi, i que, en detectar-los, es modifiquessin els temps dels semàfors, fent esperar més els altres cotxes per evitar situacions de perill.
- Per evitar fer les proves manualment i trobar els criteris d'actuació òptims segons cada cas, es podria usar intel·ligència artificial. Llavors, ja es farien les proves automàticament i molt més ràpid, en la pràctica, i el sistema aprendria més com més estona estigués funcionant. Aprendria també horaris de màxima afluència i de mínima, i reduiria o augmentaria els temps abans que els sensors detectessin cap col·lapse. Clarament, aquesta seria la millora més eficient, però també la més difícil de fer: caldrien especialistes i un alt pressupost per dur-la a terme.
- I si, a més a més, el semàfor amb intel·ligència estigués connectat amb els semàfors

propers, és a dir, amb aquells dels carrers d'on venen els cotxes, les millores podrien augmentar-se encara més. L'horari de sortida dels nens del Col·legi Maristes Rubí, per exemple, estaria registrat i es comunicaria amb els semàfors veïns, la qual cosa permetria prevenir la situació anticipadament. Ara bé, caldria renovar molta infraestructura; són molts semàfors, tant dels carrers d'on venen com dels carrers on van, i en cadena.

- Més senzilla seria la detecció de vehicles d'emergència i d'altres amb preferència. Detectar un cotxe amb la sirena engegada, amb emergència, i modificar els temps per deixar-li la via lliure abans que hi arribés suposaria un gran bé. I, encara més, si el cotxe, en posar-se en estat d'emergència (ja fos en sortir de la comissaria, l'hospital o l'estació de bombers o quan rebés una alarma estant de patrulla), activés un GPS que enviés un senyal a tots els semàfors del recorregut. Així s'establiria una configuració adequada dels semàfors per deixar passar el vehicle. O, en un cas extrem, es podrien posar tots els semàfors en vermell excepte per on hagués de passar el vehicle; es reduiria el nombre de vehicles al recorregut del vehicle i disminuirien la possibilitat de xocs en els encreuaments i la necessitat de maniobres forçoses. També es podria donar preferència a certs vehicles, com ara els autobusos, per fomentar el transport públic i evitar endarreriments d'aquest sistema.
- Una altra millora seria tenir en compte els vianants a l'hora de configurar els temps, ja que en la simulació actual no es tenen quasi en compte. Una mica sí, ja que quan en un carril no hi ha cap cotxe el semàfor es posa verd igualment, segurament menys temps, però un mínim perquè els vianants puguin creuar, ja que el semàfor de vianants per travessar el carrer de Calderón de la Barca va coordinat amb el semàfor 2, de tal manera que si un està sempre en vermell, l'altre també. Però es podrien posar també sensors en els semàfors per als vianants, més sofisticats perquè poguessin distingir qui està esperant per creuar de qui està passant. O es podria optar per una solució ben simple: posar un botó que realment funcionés i que, en ser premut, impedís que els semàfors es posessin verds.
- Una última millora que, en realitat, seria més una extensió d'aquest treball, seria arreglar les fórmules per trobar-ne una de general que funcionés amb qualsevol semàfor. Per a això caldria trobar un pendent de la funció comú, el temps mitjà que triguen els cotxes a creuar la cruïlla des de la posició 1. La n seria aquest mateix número, ja que és el que trigaria el primer cotxe a creuar, igual que la resta. Si no fos exacte, caldria trobar una ordenada en l'origen comú. D'aquesta manera, la funció seria extrapolable a altres situacions, cosa que evitaria el treball de camp i la presa de dades de cada cruïlla on es volguessin implantar semàfors intel·ligents. És clar que per trobar aquests nombres comuns caldria un gran estudi estadístic.

Una primera extrapolació difusa s'entreveu de les dades i funcions presentades en aquest treball: es veu com els pendents dels semàfors 2 i 3 són prou semblants, molt més que no pas amb el semàfor 1. Només es diferencien per 0,11 segons. D'igual forma, l'ordenada en l'origen d'aquests dos semàfors és més semblant que amb el semàfor 1 i, a més, més grans ambdós nombres, tant la m com la n .

La primera especulació és que és a causa de la inclinació del carrer, ja que el 2 i 3 estan

lleugerament en pujada mentre que l'1 és molt més pla. Això té sentit pensant que es triga més a arrencar en pujada que en baixada.

Llavors, per fer l'extrapolació s'hauria de fer per inclinacions: si el pendent del carrer és, per exemple, d'entre l'1% i el 2%, llavors cal utilitzar una fórmula amb un pendent i ordenada. Si és d'entre el 3% i el 4%, un pendent i ordenada en l'origen més grans, trobats en l'estudi estadístic. I com menys inclinació, menys temps, a no ser que fos una inclinació negativa, que s'hauria de veure si redueix més els nombres.

Fent-se d'aquesta manera, s'aconseguiria una fórmula per a cada inclinació universal. Bé és cert que caldria mirar si en altres països seria igual o els conductors (per qüestions culturals, socials, tradició...) trigarien el mateix. Segurament no seria així. En realitat, caldria mirar que no fos diferent en una altra ciutat o localització, ja que nombrosos factors poden afectar el temps de resposta, com l'edat mitjana de la població. Però d'aquesta manera s'obtindria la base universal per a les fórmules per obtenir el temps d'espera segons la posició i el temps de verd, ambre, vermell i seguretat per cada cruïlla que es volgués.

3.6. Resultats de les simulacions

Amb les tres simulacions de Scratch s'ha fet un segon estudi estadístic, mirant en cada situació com avançaven les cues en el temps. Per exemple, un cas és de dia i començant amb tres cotxes a cada carril. S'engega la simulació i, després de 5 minuts, es mira com estan les cues i s'apunta. Llavors es deixen 5 minuts més i es torna a apuntar. El mateix quan és de nit i quan plou, però aquí es deixen tres vegades 5 minuts, ja que en haver-hi més cotxes és més interessant com es desenvolupen les cues i, a més a més, triguen més a desfer-se.

Es repeteix el mateix posant un carril saturat, amb 20 cotxes, i els altres dos amb 3 cotxes. I es torna a repetir saturant els tres carrils. Encara unes altres tres vegades es mira, saturant dos carrils cada cop. Finalment, en el vuitè cas, se saturen tots tres carrils.

Així s'obté la taula del full de càlcul "Conclusions simulació" (annex 2, figura C). La taula mostra la cua de cotxes en cada cas. Llavors es fa el percentatge de la variació de les cues, de les dues simulacions intel·ligents respecte de la simulació convencional. I les mitjanes de cada cas, que donen com a resultat una mitjana per semàfor depenent de les condicions inicials. Si el percentatge és positiu, és que ha augmentat l'efectivitat en aquell tant per cent i, per tant, la cua s'ha reduït. Per contra, si el percentatge és negatiu, és que la cua ha augmentat i, per tant, l'eficiència ha disminuït en aquell tant per cent.

Llavors es pot fer una mitjana total de cada semàfor per a cada simulació. I, per últim, una mitjana d'aquestes mitjanes, que dona com a resultat el percentatge total de variació de les cues i, per tant, de l'eficàcia dels semàfors. Les taules on es veu aquesta millora són les taules 10.1 i 10.2.

Mitjanes finals semàfor intel·ligent versió 1	
Semàfor 1:	-0,19
Semàfor 2:	0,13
Semàfor 3:	-0,21
Mitjana total:	-9,39%

Taula 10.1. Percentatges totals de millores dels semàfors intel·ligents, versió 1.

Mitjanes finals semàfor intel·ligent versió 2	
Semàfor 1:	-0,02
Semàfor 2:	0,48
Semàfor 3:	0,19
Mitjana total:	21,97%

Taula 10.2. Percentatges totals de millores dels semàfors intel·ligents, versió 2.

Aquestes taules mostren la variació segons els carrils, com afecta cadascun individualment en totes les freqüències d'entrada possibles. En canvi, les taules 10.3 i 10.4 mostren el percentatge segons el clima. De tots tres carrils alhora, únicament es distingeix l'entrada per veure si, en els casos que hi ha realment complicació quant a cues, hi ha una gran millora, que és quan en fa falta una.

	DIA	NIT	PLUJA		Total
Mitjanes segons el clima:	-0,13	0,06	-0,16	Versió 1	-7,69%

Taula 10.3. Percentatges totals de millora del trànsit per la primera simulació intel·ligent.

	DIA	NIT	PLUJA		Total
Mitjanes segons el clima:	0,19	0,33	0,17	Versió 2	23,07%

Taula 10.4. Percentatges totals de millora del trànsit per la segona simulació intel·ligent.

L'atzar té un paper molt important en les entrades dels cotxes a la simulació, ja que, com ja hem explicat, el programa agafa números a l'atzar que són els segons que passen entre que un cotxe entra i ho fa un altre. Però afecta de la mateixa manera a les taules 10.1 i 10.2. Potser el semàfor intel·ligent versió 1 només ha tingut mala sort i l'atzar escollia números més baixos i hi havia més afluència de cotxes, i d'aquí el percentatge negatiu. O al revés amb la versió 2.

És molt poc probable, ja que amb la simulació era molt fàcil comptar els temps, i a aquesta segona presa de dades era més senzill dedicar-li hores, només s'havia de mirar l'ordinador cada 5 minuts. D'això resulta que els percentatges de les figures 10.1, 10.2, 10.3 i 10.4 estiguin fets amb 336 dades, en casos molt diferents, cosa que minimitza el marge d'error.

4 CONCLUSIONS

Com es veu en la figura 10.1, la millora total és negativa. Això significa que, en realitat, no millora, sinó que redueix l'eficiència. Això demostra dues coses: que el semàfor intel·ligent versió 2 és millor i que no és profitós canviar els semàfors actuals per la versió 1. És cert que empitjora molt poc, només un 9%, però tot i això rendeix pitjor que els semàfors que hi ha ara.

Ara bé, cal destacar la millora en el semàfor 2, que en la cruïlla és el que té el temps de verd més baix i on es poden fer més cues més fàcilment. El semàfor ho detecta i ho vol canviar, però no té marge d'actuació i acaba empitjorant les coses. Quan mira els temps i els reconfigura no té en compte que fins que no ho torni a fer passarà molt de temps i, per tant, molts cotxes podran entrar en el sistema i fer que els temps calculats per millorar, en realitat, empitjorin. La intel·ligència tendeix a igualar els temps dels semàfors, si més no anivellar-los segons l'afluència. Així, el més petit millora, però els més grans empitjoren.

En canvi, els semàfors intel·ligents versió 2 es nota que milloren força, un 22% en mirar-se pels semàfors. Com abans, el semàfor que té el temps més gran es veu perjudicat; és l'únic que té un rendiment negatiu, encara que és només d'un 2%.

El semàfor 2 es veu fortament afavorit, ja que es millora quasi en un 50%, que és molt. Aquest sistema intel·ligent certament millora el flux del trànsit, especialment quan hi ha pocs cotxes, però també quan n'hi ha molts. Això fa pensar que potser seria rendible instal·lar-los. Una conclusió que s'extreu és que els semàfors actuals tenen un gran marge de millora i que no estan perfectament aprofitats. No caldria canviar-los del tot, però seria un gran avantatge determinar quins són els horaris de mínima afluència i reduir els temps de cicles aquelles hores, com per exemple de nit.

Aquesta acció segurament seria rendible, ja que no requeriria una infraestructura nova i, per tant, tindria un pressupost relativament baix. Per concloure si seria una gran millora modificar el temps segons l'horari, es podria mirar de fer les mitjanes per clima, i no per semàfor. A les taules 10.3 i 10.4 es veu la variació de les cues en les dues simulacions segons l'afluència.

En aquestes taules es compara la variació de les cues segons la freqüència de cotxes d'entrada. Es veu com en el cas de la versió 1 no s'encerta molt pel que s'ha dit, canvia els temps cada 84 segons, o cada temps de cicle, i durant aquest minut i mig poden passar moltes coses, com a mínim entrar un cotxe per banda, depenent de quin clima estigui posat. Però la variació total és aproximadament la mateixa.

També ho és al semàfor intel·ligent versió 2, que presenta una millora en tots els climes i obté una variació total del 23% positiva. És a dir, quan entren menys cotxes ho fa millor, i quan n'entren més, pitjor. Torna a ser pel mateix d'abans: com menys cotxes entren, menys cotxes en el sistema que no estan comptabilitzats i, per tant, pot ser més eficient a l'hora de distribuir les cues.

La conclusió general i més òbvia és que realment els semàfors intel·ligents sí que milloren el trànsit en les cruïlles. Almenys si estan prou desenvolupats, com la versió 2. Evidentment, un semàfor intel·ligent que s'instal·li als carrers estarà prou més desenvolupat que la versió 2, així que certament millorarà el trànsit.

Ara bé, val la pena canviar els semàfors de la cruïlla per obtenir un 23% de millora? Això depèn més de la subjectivitat de cadascú i del que l'Ajuntament estigui disposat a gastar perquè els conductors s'estalviïn 1 de cada 5 segons que esperen en vermell.

Pel que fa a aquest treball, conclourem que en una ciutat de relativa importància com Rubí i en una cruïlla que no té res d'especial no valdria la pena canviar els semàfors actuals per uns d'intel·ligents que milloressin el 23% si el cost d'aquests fos més d'un 23% més gran que el cost dels semàfors convencionals.

El que sí que seria fructuós seria canviar una cruïlla de molt de pes, amb molts encreuaments i molt transitada o d'una ciutat important, per exemple a l'Eixample de Barcelona, encara que el percentatge de l'augment del cost fos més gran que el percentatge de millora. Caldria fer l'estudi concret, però en línies generals, podem dir que valdria la pena. Potser si el rendiment no augmentés com a mínim un 30% no valdria la pena. Però amb millores com les esmentades en l'apartat 3.5, "Milliores aplicables al semàfor intel·ligent", s'arribaria a superar el 30%.

Tenint en compte aquestes millores, que s'incorporarien al semàfor en instal·lar-se, sí que valdria la pena substituir els semàfors de les cruïlles més importants de Rubí. L'eficiència augmentaria bastant. El que millor funcionaria seria esperar que els semàfors necessitessin un canvi, per mal funcionament o per renovació, i llavors substituir-los per uns d'intel·ligents. S'abaratirien costos i qui sap si aleshores la tecnologia permetria encara més eficiència.

Pel que fa a la cruïlla d'estudi, és un tema subjectiu. En la nostra opinió, veiem viable l'opció d'esperar la vellesa dels semàfors convencionals i, quan calgui un canvi, introduir aquests semàfors intel·ligents amb les millores incloses i un augment de l'eficiència del 30%, si el cost d'instal·lar-los fos menys d'un 30% més gran respecte del cost de renovar els semàfors convencionals.

El primer objectiu del treball era comprovar l'eficiència dels semàfors intel·ligents empíricament en general, però fent servir un cas concret com a base per extrapolar-lo més tard a altres contextos.

La conclusió d'aquest objectiu és que l'eficiència d'aquests semàfors sí que millora respecte de la dels semàfors convencionals. L'extrapolació del cas real a tots els casos ja ha estat esmentada: amb un estudi previ adequat sobre la cruïlla a què es vulguin incorporar els semàfors, o amb una fórmula adequada i/o intel·ligència artificial, els semàfors intel·ligents millorarien la gestió del trànsit.

El segon objectiu era valorar els beneficis i els costos de millorar la cruïlla amb aquesta tecnologia per fer el balanç de si realment és rendible o suposa una gran millora. També es pretenia millorar l'afluència del trànsit de la cruïlla de manera virtual.

Aquest objectiu s'ha aconseguit, especialment la segona part. Realment s'ha pogut millorar el trànsit virtual, com es veu en les taules 10.2 i 10.4. La valoració sobre la rendibilitat ja ha estat anunciada, de manera afirmativa, però considerant cada cas concret.

Així finalitza aquest treball, amb un èxit de la intel·ligència sobre la convencionalitat en els semàfors. L'última conclusió que es pot treure de tots aquests resultats és que la tecnologia és una eina molt efectiva i amb molt de potencial per millorar les nostres vides si s'utilitza adequadament. Això fa pensar en el futur, en com canviaran les accions avui quotidianes de maneres, de ben segur, sorprenents.

4.1. Valoració del treball

El present treball ha estat un llarg camí que, com tots els projectes, ha presentat certs moments de gran dificultat en què pensàvem que no seríem capaços de dur-lo a terme fins al final. De fet, hem hagut de retallar les grans ambicions inicials; preteníem, per exemple, complementar el treball amb entrevistes a professionals i encarregats dels semàfors o presentar una proposta amb un pressupost a l'Ajuntament de Rubí. Malgrat això, el resultat ha estat força complet, i a la vegada que s'han retallat continguts per una banda, se n'han afegit per una altra.

Aquest treball, com tot durant el 2020, s'ha vist afectat per la pandèmia de coronavirus, fet que va impossibilitar la presa de dades durant el confinament general. Això va desquadrar una mica l'organització, ja que era essencial tenir l'estadística per poder extreure'n la fórmula i fer la simulació. És un progrés, sense una cosa no es pot tenir l'altra. També va modificar la recollida d'informació. Com que no podíem avançar en la pràctica durant el confinament, vam avançar en la teoria. Però no vam poder anar a les biblioteques a consultar llibres, i per això la informació està basada en articles digitals. A més a més, els semàfors intel·ligents són una tecnologia encara en desenvolupament i molt moderna, i és un tema del qual no hi ha gaires llibres. De tot això resulta que no hi hagi bibliografia pròpiament dita, sinó únicament bibliografia web.

El fet de treballar en parelles va ser mal rebut al principi en general, però com que el company era acordat, això va facilitar la cooperació. En el nostre cas, la comunicació i col·laboració va ser molt bona. Vam anar pactant l'organització de la feina, repartint-nos què fer l'un i l'altre segons els nostres gustos i habilitats. Un es va centrar més en el cas pràctic i l'altre en la teoria, tot i que ambdós hem treballat en totes les parts segons el que vam acordar.

La creació i desenvolupament de la recerca per a la resolució de la hipòtesi ha estat, sens dubte, una experiència enriquidora. Ha servit per aprofundir en una gran varietat de coses: organització, constància, treball en equip, millora en la recerca d'informació, en citar, en certs camps logicomatemàtics, de programació, logística... i, no cal dir-ho, hem après un munt de coses sobre els semàfors.

Les experiències són fragments de coneixement pràctic que no s'obliden, i durant el treball n'hem adquirit moltes. Certament ha estat un procés difícil, però la satisfacció final, la de la feina ben feta, fa que tot el progrés hagi valgut la pena.

Cal destacar que aquest treball no hauria estat possible sense el suport i ajut rebut de molta gent. Volem expressar el nostre agraïment a les nostres famílies perquè, encara que no ens ho sembli, sempre tenen un paper molt important en tot el que fem al llarg de la vida. I sempre és una bona oportunitat per donar-los les gràcies per la seva tasca.

També a tots els professors de l'institut que han atès els dubtes que ens han anat sorgint al llarg del treball en totes les assignatures, des de català fins a matemàtiques.

Finalment, especial menció i agraïments als tutors, que ens han assessorat en tot el que ha calgut. Primer, a Àngel Vidal, per l'ajuda en la creació de la idea d'aquest treball i com plantejar-la. Segon, però no menys important, a Enric Gimeno, que ha estat molt actiu i decisiu en tota la realització, tot i que no coneixia el treball quan va començar, cosa que dificultava la seva tasca (per la qual cosa li ho agraïm el doble).

Sense el suport de totes aquestes persones, el projecte no hauria estat possible.

5 TAULA DE FIGURES

Fig. 2.1. Representació del cap d'un semàfor. Font: M. (2020, 23 febrero). *Proponen en Holanda una reducción de antibióticos con un sistema semáforo*. Agrodigital. <https://www.agrodigital.com/2020/02/24/proponen-en-holanda-una-reduccion-de-antibioticos-con-un-sistema-semaforo/>

Fig. 2.2. Cara d'un semàfor. Font: <https://cablematic.com/ca/productes/semafor-per-a-interior-i-exterior-ip65-negre-de-2-x-200mm-de-12-24v-amb-verd-i-vermell-per-vianants-SM051/>

Fig. 2.3. Representació del suport d'un semàfor. Font: Prieto, J. (2017, 13 diciembre). ¿Quién inventó el semáforo? TopGear.es. <https://www.topgear.es/noticias/no-solo-ruedas/quien-invento-semaforo-179636>

Fig. 3.1. Sensor TrafiCam Narrow. Font: *TrafiCam de FLIR | FLIR Systems*. (2020). FLIR. <https://www.flir.es/products/traficam>

Fig. 3.2. Sensor Vitronic. Font: Maurer, M. (2019). *Automoción I VITRONIC*. Vitronic. <https://www.vitronic.es/automatizacion-industrial-y-logistica/sectores/automocion.html>

Fig. 3.3. Codi de semàfor amb sensor PIR per a vianants amb senyal sonor. Font: Project Hub per a lagvctc i mrsilver. (2019, 18 mayo). *Semáforos inteligentes*. Arduino Project Hub. <https://create.arduino.cc/projecthub/lagvctc/semaforos-inteligentes-c0a0ec>

Fig. 4.1. Nou model Audi. Font: Fuentes, V. (2019, 30 mayo). *Los nuevos coches de Audi hablarán con los semáforos a partir de julio para no tener que parar*. Motorpasion- Xataca. <https://www.motorpasion.com/audi/nuevos-coches-audi-hablaran-semaforos-para-no-tener-que-parar>

Fig. 5.1. Vista zenital i de satèl·lit de la cruïlla d'estudi. Font: Google Maps <https://www.google.com/maps/@41.489846,2.0362144,18z>

Fig. 5.2. Imatge del carrer de Calderón de la Barca: entrada i sortida de la cruïlla. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 5.3. Imatge del carrer de Magallanes: entrada de la cruïlla. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 5.4. Imatge del carrer de Magí Ramentol: entrada a la cruïlla. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 5.5. Imatge del carrer de Magallanes: sortida de la cruïlla. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 5.6. Imatge de les tres entrades a la cruïlla, amb els semàfors enquadrats. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 5.7. Vista zenital de la cruïlla d'estudi amb senyalitzacions de sentit. Font: Elaboració pròpia.

Taula 6.1. Mitjanes sobre vehicles lleugers. Font: Almonacid (2007).

Taula 6.2. Taula del document "Mesures treball de camp". Font: Elaboració pròpia.

Taula 6.3. Taula dels temps de funcionament dels semàfors d'estudi. Font: Elaboració pròpia

Fig. 7.1. Gràfic. Nombre de dades segons la posició del semàfor 1. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.2. Gràfic. Nombre de dades segons la posició del semàfor 2. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.3. Gràfic. Nombre de dades segons la posició del semàfor 3. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.4. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 1. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.5. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 2. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.6. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 3. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.7. Gràfic. Mitjanes del temps d'espera segons la posició del semàfor 1. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.8. Gràfic. Mitjanes del temps d'espera segons la posició del semàfor 2. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.9. Gràfic. Mitjanes del temps d'espera segons la posició del semàfor 3. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.10. Gràfic. Temps d'espera segons la posició del semàfor 1 amb el gràfic fet a partir del temps de la fórmula superposat. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.11. Gràfic. Temps d'espera segons la posició dels semàfors 1, 2 i 3 a partir de les funcions amb els temps dels semàfors actuals. Blau: semàfor 1; vermell: semàfor 2; ambre: semàfor 3. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.12. Gràfic. Temps d'espera segons la posició dels semàfors 1, 2 i 3 a partir de les funcions completes amb els temps dels semàfors actuals. Blau: semàfor 1; vermell: semàfor 2; ambre: semàfor 3. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 7.13. Bloc de la funció del semàfor 1 traduïda a llenguatge Scratch en la simulació del semàfor intel·ligent. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 8.1. Cicle dels semàfors convencionals fet amb SFC. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 8.2. Disseny en el programa Cx Designer dels tres semàfors d'estudi. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 8.3. Simulació en funcionament en el pas 3 dels semàfors de la cruïlla d'estudi. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 8.4. Simulació en funcionament en el pas 8 dels semàfors de la cruïlla d'estudi. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 8.5. Simulació intel·ligent, versió 1, feta amb Scratch, en funcionament en una rèplica de la cruïlla d'estudi. Font: Elaboració pròpia.

Fig. 8.6. Simulació intel·ligent versió 1 feta amb Scratch, abans d'iniciar-se en una rèplica de la cruïlla d'estudi. Font: Elaboració pròpia.

Taula 10.1. Percentatges totals de millores dels semàfors intel·ligents, versió 1. Font: Elaboració pròpia.

Taula 10.2. Percentatges totals de millores dels semàfors intel·ligents, versió 2. Font: Elaboració pròpia.

Taula 10.3. Percentatges totals de millores dels semàfors intel·ligents, versió 1. Font: Elaboració pròpia.

Taula 10.4. Percentatges totals de millores dels semàfors intel·ligents, versió 2. Font: Elaboració pròpia.

6 BIBLIOGRAFIA WEB

Ajuntament de Barcelona (2019, 15 de març) “Zona de Baixes Emissions permanent a partir de l’1 de gener de 2020”. https://ajuntament.barcelona.cat/bicicleta/ca/noticia/zona-de-baixes-emissions-permanent-a-partir-de-l1-de-gener-de-2020_785579

National Geographic en Español (2018, 9 d’agost) “Los semáforos inteligentes”. <https://www.ngenespanol.com/el-mundo/los-semaforos-inteligentes>

El Espectador (2020, 7 de gener) “Frente al Museo Nacional se instala el primer ‘semáforo inteligente’ de Bogotá. Redacción Bogotá. <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/frente-al-museo-nacional-se-instala-el-primero-semaforo-inteligente-de-bogota>

Noticias Caracol (2018, 24 de maig) “¿Qué ventajas traerán los semáforos inteligentes a Bogotá?”. YouTube [vídeo]. <https://www.youtube.com/watch?v=wY0lzOnQqIU>

GobCDMX (2019, 6 de juny) “Semáforos inteligentes” [vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=oUPRoC6xZn4>

Fernández, José (2018, 24 d’octubre) “Semáforos inteligentes, los semáforos del futuro”. Tecnología del Futuro. <https://tecnologiadel futuro.es/smart-city/semaforos-inteligentes-los-semaforos-del-futuro>

Tena de la Nuez, Julia (2018, 12 d’octubre) “Qué son los ‘botones placebo’ y por qué estamos rodeados por ellos sin que lo sepamos”. BBC News. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45802023>

El Confidencial (2019, 15 de novembre) “Viena instala semáforos inteligentes que se activan cuando deseas cruzar”. https://www.elconfidencial.com/multimedia/video/mundo/2019-11-15/viena-semaforos-inteligentes_2337319

Señales de Tráfico (2020, 21 de juliol) “Tipos de semáforos”. <https://xn--sealesdetrafico-zqb.com/semaforos>

Ektwr1982 (2015, 26 d’agost) “Semáforos” [presentació de diapositives]. SlideShare. <https://es.slideshare.net/Ektwr1982/semaforos-52111487>

Otto, C. (2016, 25 de gener) “Tecnología placebo: ¿funciona de verdad el botón de los semáforos para cruzar?”. El Confidencial. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-01-25/tecnologia-placebo-funciona-de-verdad-el-boton-de-los-semaforos-para-cruzar_1140017

Mediatrader (2019, 21 de juliol) “Semáforos sonoros para personas ciegas”. Consumer. <https://www.consumer.es/motor/semaforos-sonoros-para-personas-ciegas.html>

Álvarez, Raúl (2016, 27 d’abril) “¿Semáforos especiales en aceras para los adictos al móvil? Sí, hemos llegado demasiado lejos”. Xataka. <https://www.xataka.com/moviles/semaforos-especiales-en-aceras-para-los-adictos-al-movil-si-hemos-llegado-demasiado-lejos>

Todotest (2000) “Manual del conductor”, apartado 6, “Semáforos”. https://www.todotest.com/manual_autoescuela.asp?t=9&p=4

Wikipedia (2013, 10 de març) “Semáforo (comunicación)”. [https://es.wikipedia.org/wiki/Sem%C3%A1foro_\(comunicaci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Sem%C3%A1foro_(comunicaci%C3%B3n))

Fonseca Guilarte, Orlando; Pujol Fariña, Gabriel Santiago; Allende Alonso, Sira; Bouza Allende, Gemayqzel (2014) “Una herramienta para simular y analizar el flujo de tráfico en un cruce regulado por semáforos con tiempos de ciclos variables”. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, vol. 8, supl. 1, pàg. 29-40. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992014000500003&lng=es&tling=es

Merino, Nicolás (2020, 13 d'octubre) “Restricciones y prohibición de coches en Barcelona en 2020”. Autofácil (Luike Motion). <https://www.autofacil.es/movilidad/restricciones-barcelona/restricciones-prohibicion-coches-barcelona/185305.html>

Javier (2017, 25 de juliol) “Los semáforos inteligentes y las bicis”. En Bici por Madrid. <https://www.enbicipormadrid.es/2017/09/los-semaforos-inteligentes-y-las-bicis.html>

Vitronic (2019, 8 d'octubre) “Control de semáforo en rojo”. <https://www.vitronic.es/tecnologia-de-traffic/aplicaciones/control-del-traffic/control-de-semaforo-en-rojo.html>

Viquipèdia (2020, 26 de desembre) “LIDAR”. <https://ca.wikipedia.org/wiki/LIDAR>
lagvctc, mrsilver (2019, 18 de maig) “Semáforos inteligentes” [projecte]. Arduino Project Hub. <https://create.arduino.cc/projecthub/lagvctc/semaforos-inteligentes-c0a0ec>

Fuentes, Victoria (2019, 30 de maig) “Los nuevos coches de Audi hablarán con los semáforos a partir de julio para no tener que parar”. Motorpasion. <https://www.motorpasion.com/audi/nuevos-coches-audi-hablaran-semaforos-para-no-tener-que-parar>

Vázquez, Raúl (2020, 30 d'octubre) “Simulador de semáforo” [presentació de diapositives]. Prezi. <https://prezi.com/2d11sptnfmf8/simulador-de-semaforo/>

Almonacid Mansilla, Óscar Manuel (2007, setembre). *Simulación digital de tráfico para intersecciones señalizadas con semáforos, bajo ambiente tridimensional*. Universidad del Bío-Bío (Concepción, Chile). http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2286/1/Almonacid_Mansilla_Oscar_Manuel.pdf

Peralta Fuentes, José Antonio; Mendieta Zavala, Julio César (2017) Semáforo inteligente para regular el tránsito vehicular basado en open hardware. Universidad Católica de Santa María (Arequipa, Perú).

Jacobo, Armando (2015, juny) “Sistema de semáforos inteligentes utilizando sensores de presencia”. Aplicaciones de la Ingeniería, vol. 2, núm. 3, pàg. 147-152. http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones_de_la_Ingenieria/vol2num3/Aplicaciones_de_la_Ingenieria_Vol2_Num3_3.pdf

Smart (2014, 14 d'agost) “The Dancing Traffic Light Manikin” [vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=SB_0vRnkeOk

Hinojosa, César (2011, 21 de novembre) “Los semáforos en el futuro (3/3)”. Tecnocarreteras. <https://tecnocarreteras.es/2011/11/21/los-semaforos-en-el-futuro-33>



Fig. 5.2. Imatge del carrer de Calderón de la Barca: entrada i sortida de la cruïlla.



Fig. 5.3. Imatge del carrer de Magallanes: entrada de la cruïlla.



Fig. 5.4. Imatge del carrer de Magí Ramentol: entrada a la cruïlla.



Fig. 5.5. Imatge del carrer de Magallanes: sortida de la cruïlla.

8 ANNEX 2

Enllaç figura A, “Mesures treball de camp”:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Akh7n-p-G1uIII5yLsOnMk_N7sdICLRRvp-wO4WeL1M/edit?usp=sharing

Enllaç figura B, “Processament de dades”:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1aT55NL2_jhPzNgCD_4ohPUDKwYoifAX4Lg79nlvuazY/edit?usp=sharing

Enllaç figura C, “Conclusions simulació”:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ljvq5eUlsy7tmKt4MUtAg1baXraGsqAQ0idd2Jxyr6E/edit?usp=sharing>

21

PREMI DE RECERCA
MIQUEL SEGURA



Ajuntament
de Rubí