

21

dossier tècnic de seguretat viària



Senyalització i regulació amb semàfors de cruïlles urbanes



servei català de

Trànsit



Generalitat de Catalunya
Departament d'Interior,
Relacions Institucionals i Participació

senyalització i regulació amb semàfors de cruïlles urbanes

Propòsit

El Servei Català de Trànsit manté des de fa temps el propòsit de donar suport als responsables de la gestió del trànsit en l'àmbit municipal, amb la publicació d'un seguit de dossiers que ajudin a comprendre'n els conceptes més complexos i serveixin per prendre decisions.

Dins d'aquest marc es publica el Manual de semàfors, pensat especialment per a persones que no han tingut l'oportunitat d'especialitzar-se en temes d'enginyeria del trànsit.

L'experiència demostra, quan s'imparteixen cursos de gestió del trànsit, que un dels temes que normalment costa més d'entendre als assistents és la regulació del trànsit amb semàfors. Això es deu, probablement, al fet que és la part de l'enginyeria del trànsit que utilitza conceptes més difícils i tècniques més sofisticades.

Aquest dossier intenta, doncs, explicar els conceptes principals de la regulació semafòrica, sense entrar en desenvolupaments matemàtics complexos. Els aspectes que s'han considerat més complicats es presenten en un apèndix, com és el cas del càlcul dels temps de verd i dels cicles d'una intersecció.

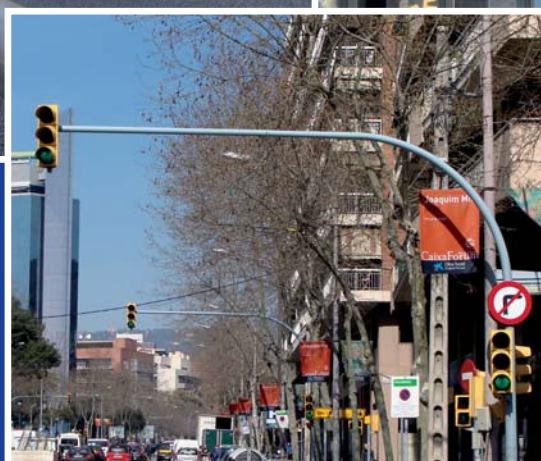
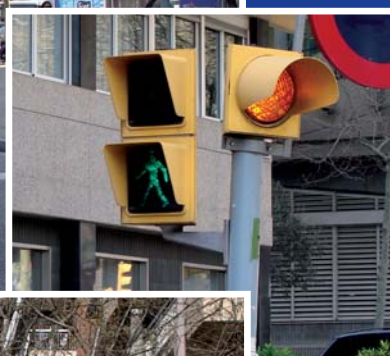
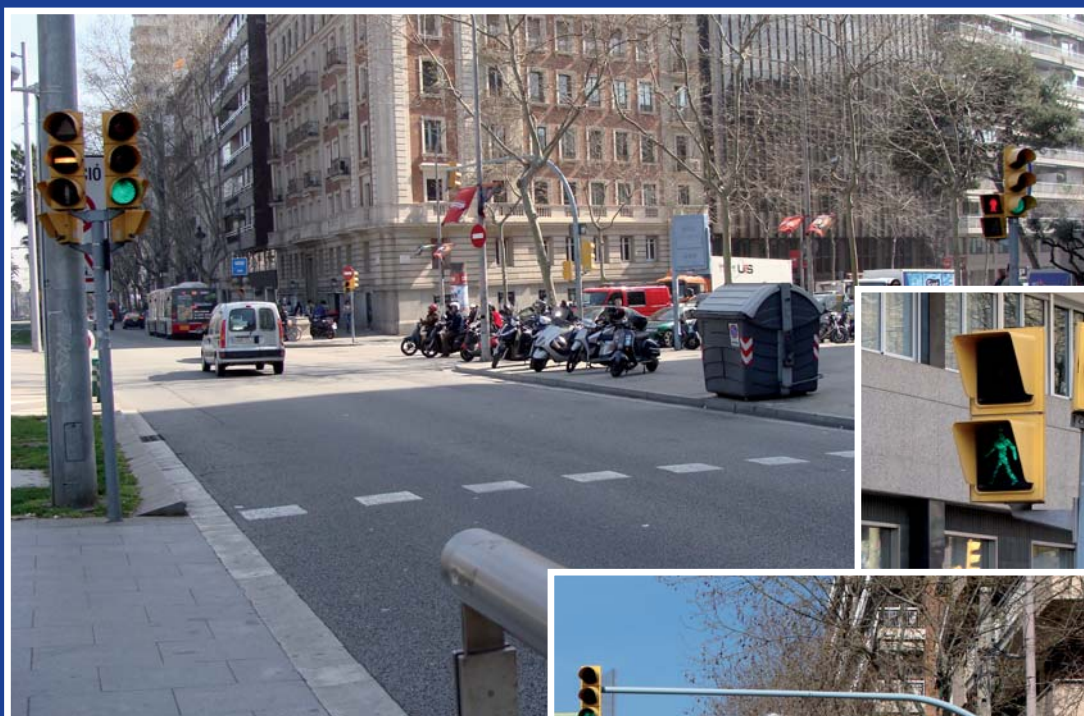
El treball s'ha dividit en quatre grans apartats: instal·lació de semàfors, regulació d'una intersecció, coordinació d'interseccions, i centralització d'instal·lacions i centres de control.

Els dos primers conceptes es refereixen a una intersecció aïllada, mentre que els dos últims fan referència a un conjunt d'instal·lacions relacionades entre elles, a causa fonamentalment de la seva proximitat.

En la instal·lació de semàfors s'estableixen criteris per decidir si és convenient o no instal·lar-ne i es donen directius sobre la situació, el nombre i el tipus de semàfors. Sobre la regulació, s'indiquen mètodes de càlcul dels temps de verd, temps de protecció i durada del cicle. Pel que fa a la coordinació, s'expliquen els diferents sistemes existents i les possibilitats de realitzar bones coordinacions. Finalment, respecte a la centralització d'instal·lacions, es parla de l'arquitectura dels sistemes i de les possibilitats d'actuació des d'un centre de control.

L'objectiu principal d'aquest dossier és que el tècnic o tècnica que l'hagi llegit adquireixi prou coneixements per tractar amb un especialista en el tema amb coneixement de causa. Esperem, doncs, que aquest sigui realment el resultat d'aquest treball.

Josep Pérez Moya
Director del Servei Català de Trànsit



1	Instal·lació de semàfors	6
1.1	Introducció	6
1.2	Formes de regulació	7
1.3	Criteris d'elecció	8
1.4	Elements d'una instal·lació de semàfors	10
1.5	Significat dels colors	11
1.6	Situació i nombre de semàfors	14
1.7	Reguladors	16
2	Regulació d'interseccions	18
2.1	Introducció	18
2.2	Variables de regulació	19
2.3	Mètodes de control	22
2.4	Càlcul de les fases principals amb temps predeterminats	23
2.5	Índex de saturació	25
2.6	Demores	25
2.7	Cicle	26
2.8	Sistemes accionats	27
2.9	Detectors	28
2.10	Tipus de sistemes accionats	29
2.11	Situació dels detectors	31
2.12	Annex	32

3	Coordinació d'interseccions	38
	3.1 Conceptes generals	38
	3.2 Artèria de sentit únic de circulació	40
	3.3 Artèria de doble sentit de circulació	41
	3.4 Xarxes d'interseccions	48
	3.5 Programa TRANSYT	50
	3.6 Programa SYNCHRO	55
4	Plans de regulació d'una zona	60
	4.1 Concepte de pla de regulació	60
	4.2 Intervals horaris de plans de regulació	61
	4.3 Intensitats de referència per al càlcul dels plans	63
5	Centralització de la regulació de semàfors	64
6	Estratègies de regulació de semàfors	66
7	Centre de gestió del trànsit	68

1

Instal·lació de semàfors

1.1 Introducció

Generalment, les interseccions són els punts singulars d'una via de circulació. El fet que totes les vies que conflueixen en una intersecció que no pot ser utilitzada alhora per tots els corrents de trànsit que hi afluïxen tingui una superfície comuna origina una reducció de la capacitat global d'aquestes vies.

Suposem una intersecció formada per la confluència de dos carrers A i B , amb capacitats a i b respectivament. La capacitat total de tots dos carrers, si no existís la intersecció, seria naturalment $a + b$, però pel fet que la intersecció existeix, queda reduïda a $(a+b)/2$ perquè, en conjunt, només durant el 50% del temps hi pot circular un dels dos corrents de trànsit. Si en comptes de dos carrers confluents, fossin $A+B+C$, seguint el mateix raonament veuríem com la capacitat total de la intersecció quedaria reduïda a $(a+b+c)/3$.

Una altra de les característiques importants de la intersecció són les maniobres que s'hi fan, és a dir, qualsevol canvi de trajectòria que realitzen els vehicles amb la finalitat d'incorporar-se a una trajectòria diferent de la primera.

Les maniobres es caracteritzen principalment per una reducció de velocitat dels vehicles que l'efectuen en relació amb la que portaven quan eren a la trajectòria original.

El conjunt de maniobres i la reducció de capacitat ocasiona, en el moment en què el trànsit de les vies confluents comença a ser important, un augment considerable en els retards¹ dels temps de recorregut i en els accidents (especialment entre vehicles, i entre vehicles i vianants).

En zones urbanes, on la distància entre interseccions acostuma a ser força reduïda (oscila habitualment entre 100 i 300 m), els efectes esmentats són molt més acusats que a les zones rurals, on la distància entre interseccions sol ser molt més gran (generalment, diversos quilòmetres).

Així s'arriba al punt en què la capacitat de les vies urbanes es deu, majoritàriament, a les interseccions existents i al percentatge més elevat dels retards a les interseccions.

Tots aquests raonaments ens obliguen a pensar en la importància d'aconseguir la regulació més adequada possible i alhora més eficient per tal de resoldre tots els inconvenients que la intersecció porta associats intrínsecament.

¹ Es considera *retard* el temps addicional que s'empra quan s'efectua un recorregut en relació amb el que s'empraria a una velocitat desitjada prudencial.

instal·lació de semàfors

1.2 Formes de regulació

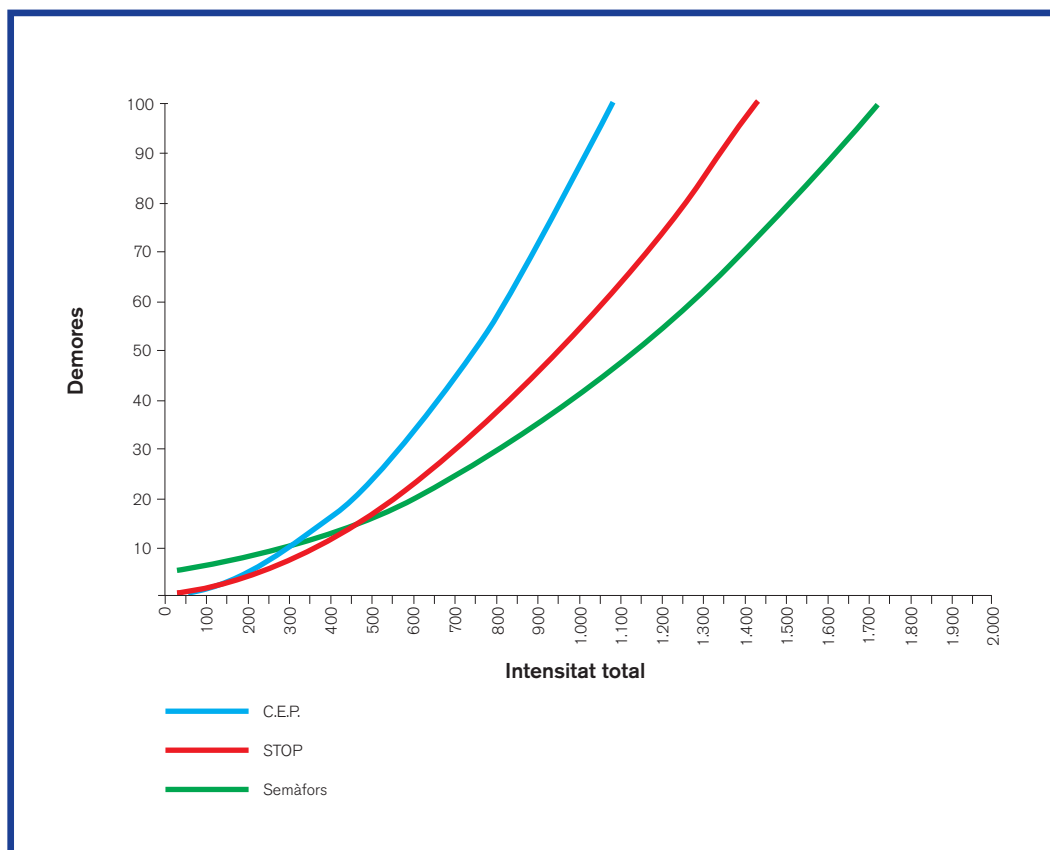
Bàsicament hi ha tres maneres de regular les interseccions:

- Interseccions incontrolades: interseccions entre vies de la mateixa importància i amb baixa intensitat de trànsit, on preval únicament la regla de prioritat a la dreta.
- Interseccions regulades amb senyals de prioritat del tipus Cedi el pas o Stop.
- Interseccions regulades amb semàfors.

Cadascuna d'aquestes formes de regulació es pot subdividir en dos grups tenint en compte si la intersecció està canalitzada per vies definides mitjançant illetes, tant si són físiques com amb marques viàries, o no ho està.

L'elecció entre la forma de regulació *b* i *c* generalment és complexa, ja que si els retards són inferiors en les cruïlles regulades amb senyals de prioritat, la capacitat per a les mateixes condicions de trànsit és inferior (veg. fig. 1).

Figura 1: Demores segons tipus



1.3 Criteris d'elecció

Un dels procediments que es poden utilitzar a l'hora d'escollir la manera de regular una intersecció és el que es basa en l'interval crític.

S'anomena *interval crític* d'un corrent de vehicles el temps que transcorre entre l'arribada d'un vehicle a un lloc determinat i l'arribada al mateix lloc del vehicle següent. Una altra acceptació del terme *interval* és el temps que hi ha entre l'arribada a una intersecció d'un vehicle que circula per la via secundària fins que hi arriba el següent, que circula per la via principal. Encara que tots dos conceptes incloguin la mateixa paraula, el significat és ben diferent. En aquest estudi es farà servir la segona definició.

En aquestes condicions, es diu que un interval és acceptat pel conductor del vehicle de la via secundària quan entra en la intersecció abans que arribi el vehicle de la via principal; en cas contrari, es diu que l'interval és *rebutjat*.

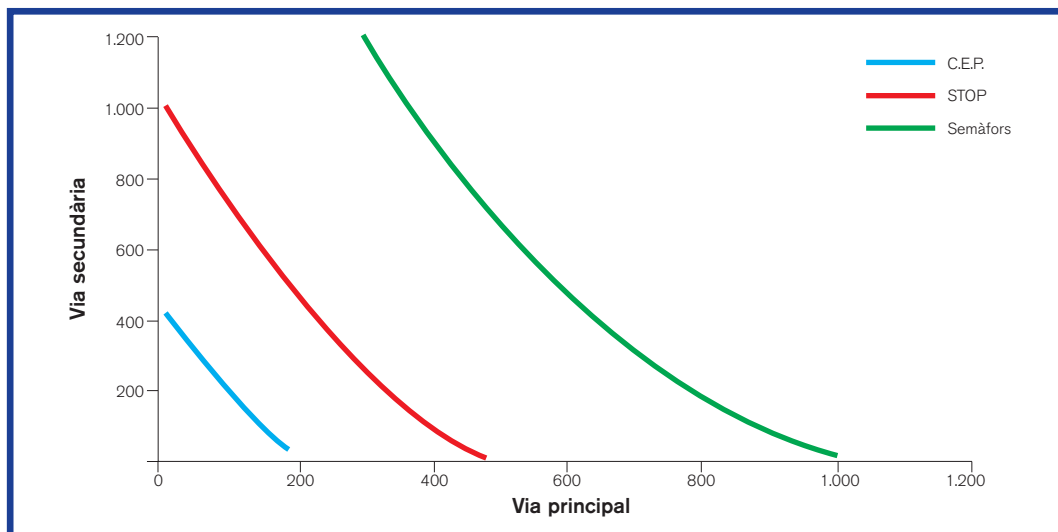
L'*interval crític*, doncs, és aquell per al qual el nombre d'intervals acceptats més breus que ell és igual al nombre d'intervals rebutjats més grans que ell. Calculant aquest valor sobre la base que l'arribada de vehicles a la intersecció segueix les lleis de l'atzar (concretament, la llei de Poisson), es pot calcular el percentatge de vehicles retardats en la via secundària:

$$p = 100 \left(1 - \frac{e^{-2.5I_s} x e^{-2I_p t}}{1 - e^{-2.5I_s} x (1 - e^{-I_p t})} \right)$$

P = percentatge de vehicles retardats en la via secundària
 I_p = intensitat de la via principal (veh./s)
 I_s = intensitat de la via secundària (veh./s)
 t = interval crític en segons

Amb aquesta fórmula s'ha confeccionat un gràfic (veg. fig. 2) en què per a cada t hi ha una família de corbes que delimiten les intensitats per les quals el 25%, 50% i 75% dels vehicles de la via secundària sofreixen un retard.

Figura 2: Tipus de control



instal·lació de semàfors

La gran utilitat d'aquest gràfic és que els valors de t oscil·len entre 4,5 i 6 segons, amb la qual cosa es poden establir unes zones ben determinades (el gràfic correspon a $t = 5,2$ s). Es considera que fins al 50% de retard no cal regular la intersecció; entre el 50% i el 75%, cal col·locar-hi senyals de Cedi el pas o Stop i per a valors superiors al 75%, cal instal·lar-hi semàfors.

Un altre criteri que es pot utilitzar és el de les normes americanes, que es componen de sis condicions que són suficients, però no necessàries:

Intensitats mínimes

Els valors mínims els dona la taula següent:

Nombre de carrils		Intensitat (veh./h)	
Via principal	Via secundària	I_p (total tots dos sentits)	I_s (un sentit)
1	1	500	150
≥ 2	1	600	150
≥ 2	≥ 2	600	200
1	≥ 2	500	200

Les intensitats han de ser, com a mínim, igual que les indicades durant vuit hores. L'accés a la via secundària pot ser diferent entre unes hores i altres.

Interrupció del moviment de vehicles

Especifica en quines condicions no és convenient interrompre el moviment de la via principal i convé regular la intersecció amb semàfors. Les dades són les de la taula següent:

Nombre de carrils		Intensitat (veh./h)	
Via principal	Via secundària	I_p (total tots dos sentits)	I_s (un sentit)
1	1	750	75
≥ 2	1	900	75
≥ 2	≥ 2	900	100
1	≥ 2	750	100

En les mateixes condicions que la taula 1a.

Volums mínims de vianants

Si durant vuit hores s'acompleix, com a mínim:

- Al carrer principal $I = 600$ veh./h (en tots dos sentits) o bé $I = 1.000$ veh./h (per sentit) i no hi ha refugis per als vianants enmig de la calçada.
- Si en les condicions del punt a 150 vianants/hora travessen pel mateix pas.

Moviment progressiu

Quan diverses interseccions d'una via es coordinen amb semàfors, a vegades cal instal·lar semàfors en una intersecció on no ho justifiquen altres motius.

Nombre d'accidents

Quan durant un any hi han tingut lloc cinc accidents o més del tipus susceptible de corregir amb semàfors i en tots han resultat persones lesionades o danys de valor significatiu (30 vegades el salari mínim vigent).

Combinació de condicions

Quan no s'arriba a complir cap condició, però s'aconsegueixen valors del 80% en dues condicions o més.

1.4 Elements d'una instal·lació de semàfors

Els elements principals d'una instal·lació són els semàfors i el regulador.

S'anomena *semàfor* un senyal de regulació proveït d'un o diversos llums de colors, cadascun d'ells amb un significat propi i inconfusible. Els colors dels llums utilitzats universalment són tres: verd, groc i vermell.

La part del semàfor on se situen els llums s'anomena *cara*. Poden existir semàfors amb una, dues, tres i fins a quatre cares.

Cada llum constitueix una *unitat òptica* que consta d'una *lent* de color la finalitat de la qual, a més de donar el color corresponent, és recollir el màxim flux de llum i garantir una intensitat uniforme en la direcció oportuna; de llum, la potència de la qual oscil·la entre 60 i 100 w; d'un *reflector* de forma cònca per tal de concentrar el feix de llum en la direcció proposada, i d'una *visera*, amb l'objectiu principal d'evitar que els raigs de sol incideixin directament sobre el lent i pugui donar la impressió que està il·luminat, produint confusió entre els conductors.

Generalment la lent és circular i té un diàmetre de 8", que corresponen a 20 cm aproximadament en el semàfor de tipus corrent per a vehicles, encara que també s'utilitzen les de 12", és a dir, de 30 cm, en casos especials i les de 4", de 10 cm, en els semàfors repetidors o en els de vianants. També s'utilitzen per a vianants semàfors amb unitats òptiques rectangulars de només dos focus: verd i vermell, amb siluetes de vianants en marxa (llum verd) i vianant immòbil (llum vermell), totes dues de color negre incorporades al vidre corresponent.

instal·lació de semàfors

Actualment, pels seus avantatges, s'utilitza cada vegada més el semàfor de LED. Un LED (*Light Emitting Diode*, 'díode electroluminiscent') és un semiconductor que emet llum al pas d'un corrent elèctric de baixa intensitat, sense utilitzar cap filament ni gas, i que té la propietat de produir la mateixa quantitat de llum que una bombeta incandescent tradicional, però utilitzant un 90% menys d'energia.

La importància que tenen avui dia les qüestions ambientals fa que el semàfor de LED s'estigui imposant. Entre els avantatges importants hi ha una major durada (vida útil de 10 anys), l'alt contrast amb la llum solar (i, per tant, la desaparició de l'efecte fantasma), llum uniforme a tot el focus i millor visibilitat a gran distància. Però, possiblement, l'avantatge més important és que s'alimenta a molt baixa tensió (24 V - 40 V), la qual cosa permet afegir al sistema de control un sistema de bateries (SAI) que permet a la cruïlla continuar funcionant durant 2 o 3 hores quan desapareix l'energia elèctrica d'alimentació.

1.5 Significat dels colors

A l'Estat espanyol la normativa vigent és la Llei de seguretat viària i el Reglament general de circulació. Les principals normes són al capítol VI del Reglament, als articles següents:

Article 145. Semàfors reservats per a vianants

El significat dels llums d'aquests semàfors és el següent:

- Un llum vermell no intermitent en forma de vianant immòbil indica als vianants que no poden travessar la calçada.
- Un llum verd no intermitent en forma de vianant en marxa indica als vianants que poden començar a travessar la calçada. Quan aquest llum passa a intermitent significa que el temps de què disposen per acabar de travessar la calçada és a punt de finalitzar i que aviat s'encendrà el llum vermell.

Article 146. Semàfors per a vehicles

El significat dels llums i fletxes és el següent:

- Un llum vermell no intermitent prohibeix el pas. Mentre és encès, els vehicles no han d'ultrapassar el semàfor ni, si existeix, la línia de parada anterior més propera al semàfor. Si el semàfor és dins o al costat oposat d'una intersecció, els vehicles no han d'ultrapassar el semàfor ni, si existeix, la línia de parada situada abans de la intersecció.

- Un llum vermell intermitent o dos llums vermells intermitents alternativament prohibeixen temporalment el pas als vehicles abans d'un pas a nivell, a l'entrada a un pont mòbil o a un pontó transbordador, a les proximitats d'una sortida de vehicles d'extinció d'incendis o amb motiu d'una aeronau a baixa alçada.
- Un llum groc no intermitent significa que els vehicles s'han d'aturar en les mateixes condicions que si es tractés d'un llum vermell fix, llevat que quan s'encengui el vehicle estigui tan proper al lloc de parada que no pugui aturar-se abans del semàfor en condicions de prou seguretat.
- Un llum groc intermitent o dos llums grocs intermitents alternativament obliguen els conductors a extreure la precaució i, si escau, a cedir el pas. A més, no exigeix del compliment d'altres senyals que obliguin a aturar-se.
- Un llum verd no intermitent significa que és permès el pas amb prioritat, excepte en els casos que s'esmenten a l'article 59.1.
- Una fletxa negra sobre un llum vermell no intermitent o sobre un llum groc no canvia el significat d'aquests llums, però el limita exclusivament al moviment que indica la fletxa.
- Una fletxa verda que s'il·lumina sobre un fons circular negre significa que els vehicles poden prendre la direcció i el sentit que indica la fletxa, sigui quin sigui el llum que està simultàniament encès en el mateix semàfor o en un d'*ad hoc*.

Article 148. Semàfors reservats a determinats vehicles

- Quan els llums dels semàfors presenten la silueta il·luminada d'una bicicleta, les indicacions es refereixen exclusivament a les bicicletes i ciclomotors.
- Quan, excepcionalment, el semàfor presenta una franja blanca il·luminada sobre un fons negre, les indicacions es refereixen exclusivament als tranvies i autobusos de línia regular, tret que hi hagi un carril reservat als autobusos, taxis o altres vehicles; en aquest cas, només es refereix als que hi circulen. El significat d'aquests semàfors és el següent:
 - Una franja blanca horitzontal il·luminada prohibeix el pas en les mateixes condicions que el llum vermell no intermitent.
 - Una franja blanca vertical il·luminada permet el pas cap endavant.
 - Una franja blanca obliqua il·luminada, cap a l'esquerra o cap a la dreta, indica que es permet el pas cap a l'esquerra o cap a la dreta, respectivament.
 - Una franja blanca, vertical o obliqua, il·luminada intermitentment indica que els vehicles s'han d'aturar en les mateixes condicions que si es tractés d'un llum groc fix.

instal·lació de semàfors

L'article 55 de la Llei de seguretat viària diu el següent:

- Reglamentàriament, el catàleg oficial de senyals de circulació i marques viàries s'ha d'establir d'acord amb les reglamentacions i recomanacions internacionals en la matèria.
- El catàleg de senyals ha d'especificar, necessàriament, la forma, el color, el disseny i el significat dels senyals, així com les dimensions en funció de cada tipus de via.

Com que aquest articulat no defineix res amb prou detall, sovint s'aplica el significat que utilitzen els americans, que és el següent:

- El llum verd indica que els vehicles que estan al davant poden continuar avançant en línia recta o girar cap a la dreta o l'esquerra, si aquestes maniobres no es prohibeixen específicament.
- El llum groc indica precaució i anuncia als conductors que a continuació s'encendrà el llum vermell.
- El llum vermell indica que tots els vehicles situats al davant s'han d'aturar sense entrar a la intersecció i romandre aturats fins que s'encengui el llum verd.

A més d'aquests tres llums –continuen les normes americanes–, se solen utilitzar:

- La fletxa verda cap amunt, per indicar als vehicles que poden seguir endavant, però sense efectuar cap gir, i les fletxes cap a l'esquerra o dreta, acompanyades o no dels llums vermell i groc, que autoritzen els girs en les direccions indicades, però no el moviment cap endavant. Si aquestes fletxes tenen el llum verd intermitent, indiquen que el moviment corresponent s'ha de fer amb precaució.
- El llum groc intermitent indica que cal observar una precaució especial.

Per la seva rellevància, a continuació s'exposen els acords sobre els senyals lluminosos que inclou la Convenció sobre senyals de circulació de Ginebra.

L'article 20 estableix que els únics llums que es poden utilitzar com a semàfors per dirigir la circulació són, amb els seus significats, els següents:

- Llum verd, que significa que es permet el pas (això no obstant, un llum verd destinat als vehicles i col·locat a l'entrada d'una intersecció no autoritza el pas si en la direcció que ha de seguir la circulació està detinguda, de manera que probablement els vehicles que entrin a la intersecció no podran sortir-ne en canviar el llum del semàfor.

- Llum vermell, que significa prohibit el pas.
- Llum groc, que significa canvi imminent de la indicació donada amb anterioritat, però sense que aquesta indicació hagi canviat encara.

Els senyals del sistema tricolor consten de tres llums no intermitents: vermell, groc i verd. El llum groc s'encén després del verd i indica als usuaris de la ruta als quals es dirigeix que no poden travessar el pla vertical del senyal, llevat del cas en què els vehicles es trobin tan a prop quan el llum s'encén que no puguin detenir-se amb prou seguretat abans d'haver-lo ultrapassat. El llum groc no s'ha d'encendre juntament amb el vermell ni després.

Els senyals destinats exclusivament als vianants han de ser obligatòriament bicolors: llums verd i vermell.

Es pot instal·lar un llum groc intermitent sol; aquest llum també pot substituir, en hores de circulació escassa, els llums del sistema tricolor. Aquest llum es pot incorporar a la successió de fases del sistema tricolor bé substituint totalment o parcialment la fase verda, bé conjuntament amb el llum verd.

Quan el llum verd d'un sistema tricolor destinat als vehicles té forma d'una o diverses fletxes, en encendre's només autoritza els vehicles a prendre la direcció que indiquin les fletxes. Aquests llums verds addicionals s'han de col·locar, si és possible, al mateix nivell que el llum verd principal.

L'article 21 estableix que els llums del sistema tricolor i bicolor s'han de posar els uns sota els altres; el llum vermell s'ha de posar a dalt i, en el sistema tricolor, el llum groc entre el vermell i el verd.

1.6 Situació i nombre de semàfors

La situació dels semàfors està condicionada principalment per la configuració geomètrica de la intersecció i la situació dels passos de vianants.

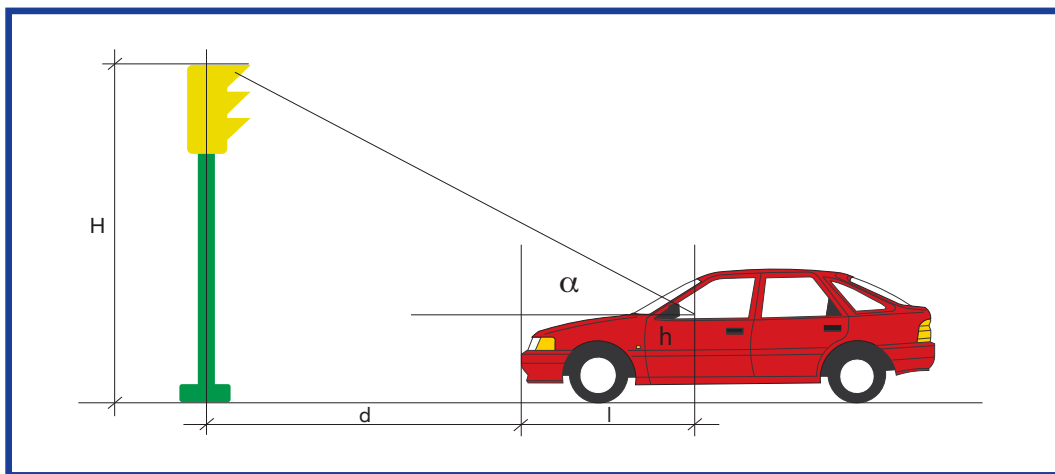
Generalment, es recolza en una columna d'entre 2,3 i 3 m d'alçada (veg. figura 3), encara que també es pot recolzar en qualsevol altre element de suport com ara pals d'enllumenat, o bé pot estar penjat d'un bàcul o mitjançant cables estirats; en aquests dos últims casos, han de situar-se en una alçada superior.

instal·lació de semàfors

L'article 312.3 del Reglament general de circulació estableix el següent:

- Els usuaris han d'obeir les indicacions dels semàfors i dels senyals de circulació situats immediatament a la seva dreta, al damunt de la calçada o damunt del seu carril, i si no n'hi ha cap en els llocs esmentats i pretenen girar a l'esquerra o continuar recte, els situats immediatament a l'esquerra.
- La premissa fonamental per situar un semàfor és aconseguir-ne una bona visibilitat, per això no és convenient col·locar-lo gaire a prop de la línia de detenció, perquè aleshores els vehicles que estan aturats sobre la línia no el poden veure bé.
- La distància mínima a la qual s'ha de trobar de la línia de detenció ve donada per la fórmula següent (veg. figura 3):

Figura 3



$$D = \frac{H - h}{\operatorname{tg} \alpha} - l$$

D = distància entre la línia de detenció i el semàfor
 l = distància entre la línia de detenció i el conductor
 H = alçada del foc vermell del semàfor
 h = alçada dels ulls del conductor
 α = angle de visibilitat

que, per als valors més freqüents:

$$H = 3,20 \text{ m} \quad h = 1,15 \text{ m} \quad \operatorname{tg} \alpha = 1/2 \quad l = 1,10 \text{ m}$$

resulta:

$$D = \frac{3,20 - 1,15}{1/2} - 1,10 = 3 \text{ m}$$

Com que, generalment, el semàfor està situat al punt mig entre el pas de vianants i el final, la distància és superior a 3 m i, per tant, és la correcta.

Quan no hi ha cap pas de vianants, és convenient retardar una mica la línia de detenció o bé utilitzar un semàfor repetidor de diàmetre menor i a una alçada inferior.

Als llocs on el percentatge de vehicles pesants és elevat, és molt convenient penjar els semàfors, generalment d'un bàcul.

El nombre de semàfors que es col·loquen en un accés depèn bàsicament de l'amplada. Com a orientació, tenim la taula següent:

Amplada accés	Semàfors en columnes	Semàfors en bàculs
amplada < 10 m	2	0
10 m ≤ amplada < 18 m	2	1
18 m ≤ amplada	2	2

Pel que fa a la manera en què s'han de pintar els semàfors, no hi ha unanimitat i les opinions són diverses. Així, les columnes, a molts llocs, estan pintades a franges, o bé vermelles i blanques, o bé negres i blanques; en canvi, a altres llocs es pinten d'un sol color, verd pàl·lid, gris o marró; també poden tenir franges blanques i negres. La tendència actual sembla que és pintar-los d'un sol color.

1.7 Reguladors

El regulador és l'equip electrònic que governa els canvis de llums dels semàfors en una intersecció. El regulador disposa, per tant, dels elements de control de l'encesa i apagada dels llums, la lògica d'actuació (programari) i els elements de comunicació amb el nivell superior de control (central de regulació o ordinador del centre de control) i de recepció de senyals dels detectors de vehicles i polsadors de vianants.

Els reguladors antics, basats en tecnologies electromecàniques i sortides de tensió per contactors, persisteixen en algunes interseccions. Actualment els reguladors són equips d'estat sòlid, amb una unitat central de procés amb un o dos microprocessadors i sortides de tensió per triacs.

El regulador es connecta amb els llums dels semàfors mitjançant conductors de coure d'1,5 o 2,5 mm² de secció. Normalment s'utilitza un cable de quatre conductors per connectar el regulador amb cada grup semafòric independent, tres cables per a les tensions dels llums vermell, groc i verd, i el quart conductor per al retorn. Els cables s'instal·len a l'anell de canalitzacions que connecten els semàfors amb el regulador. També s'instal·la un cable de terra connectat als punts metàl·lics de la instal·lació i a una o dues piques de presa de terra.

instal·lació de semàfors

Els components bàsics d'un regulador són els següents:

- Font d'alimentació.
- Unitat central amb els microprocessadors i la lògica de control.
- Mòdul de sortides de tensió als semàfors.
- Mòdul d'entrades de detectors i polsadors.
- Mòdul de comunicacions.
- Bastidor amb guies (*rack*) i armari.

El conjunt de funcions que realitzen els reguladors és molt extens, i amb particularitats que depenen de la tipologia o la marca del regulador i de les adaptacions a situacions especials previstes.

Exposem a continuació un conjunt de funcions bàsiques que incorporen tots els reguladors:

- Recepció i emmagatzematge de les dades i paràmetres necessaris per al funcionament de la intersecció.
- Gestió dels llums i control de les situacions d'incompatibilitat.
- Gestió de les comunicacions amb l'equip de nivell superior (centre de control o central de regulació).
- Recepció i anàlisi dels senyals dels detectors i els polsadors de vianants.
- Recepció d'informació i ordres d'actuació del centre de control, i gestió de les actuacions.
- Enviament d'informació de l'estat de funcionament i d'averies al centre de control.

2

Regulació d'interseccions

2.1 Introducció

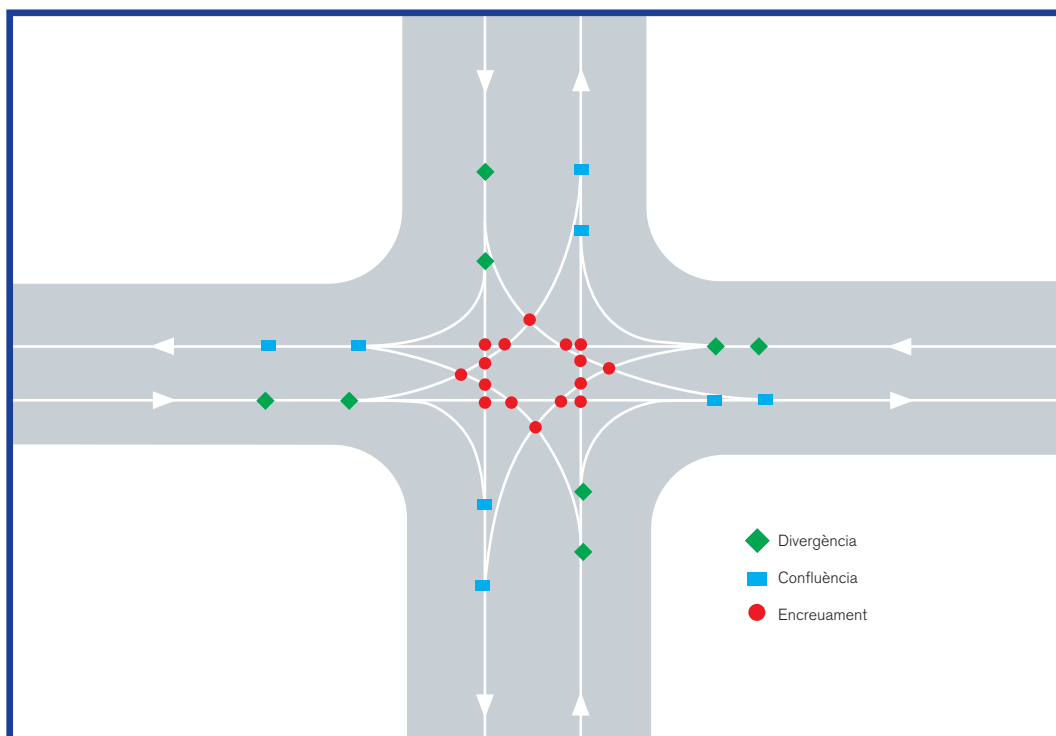
El punt de partida de l'estudi d'una intersecció amb semàfors és determinar els punts de conflicte que es produeixen entre els moviments possibles d'una intersecció.

Hi ha punts de conflicte en aquells llocs de la intersecció en què es troben o se separen les trajectòries de dos moviments. Si suposem una intersecció com la de la fig. 4, en què tots els moviments són permesos, podem veure que hi ha 32 punts de conflicte. Aquests punts es poden classificar en tres tipus diferents, tenint en compte les seves característiques:

- **Confluència**, si es troben dues trajectòries que tenien direccions diferents i continuen en el mateix sentit.
- **Divergència**, en aquells punts en què se separen dues trajectòries que fins al moment anaven en el mateix sentit.
- **Encreuament**, quan s'interfereixen dues trajectòries que portaven direccions diferents i que després de la intersecció segueixen direccions distintes entre elles.

La idea fonamental que presideix la regulació amb semàfors és eliminar tots aquests punts de conflicte o, si més no, el nombre màxim.

Figura 4: Tipus de conflicte



regulació d'interseccions

Sense haver d'aprofundir gaire en les característiques dels punts de conflicte, es comprèn fàcilment que no tots tenen la mateixa importància pel que fa a la perillositat. Aquesta perillositat està en funció, d'una banda, del tipus de conflicte i, de l'altra, de les intensitats de trànsit de cada un dels moviments.

Els conflictes del tipus **encreuament** són els més perillosos, seguits pels de **confluència**, i els que ho són menys són els de **divergència**. Al mateix temps, a mesura que augmenten les intensitats de trànsit dels moviments, creix la importància del punt de conflicte.

L'objectiu d'instal·lar semàfors és separar en el temps el dret de pas dels moviments que són incompatibles entre ells. S'entén que dos moviments són incompatibles quan hi ha entre ells algun punt de conflicte. Amb tot, és pràcticament impossible eliminar tots els conflictes, donat el seu nombre elevat; així, per exemple, en el cas descrit no s'han tingut en compte els moviments dels vianants, que originen un nombre molt més elevat d'interferències.

En l'estudi de la intersecció intervenen, a més, una altra sèrie de factors, com ara la capacitat d'emmagatzematge de vehicles, la col·locació, etc. que el fan realment complex. Així, per exemple, els conflictes de divergència no només no s'acostumen a tenir en compte, sinó que s'aconsella que existeixin, perquè en el cas contrari s'obliga a donar pas als vehicles d'un accés en diferents moments, amb la qual cosa en la majoria dels casos es produeixen distorsions que es tradueixen en la impossibilitat d'aprofitar al màxim les ocasions de pas de cada moviment. Per tant, sempre que sigui possible, és convenient donar el pas alhora a tots els vehicles d'un accés.

Per tot el que s'ha exposat, s'entén la dificultat de resumir la manera com s'efectua un estudi de regulació amb semàfors. Tot i això, a continuació es tractarem de donar-ne unes idees generals.

2.2 Variables de regulació

Les principals variables que intervenen són les següents:

- **Indicació d'un semàfor:** el llum que mostra en un determinat moment.
- **Fase:** cadascun dels conjunts d'indicacions mostrats per tots els semàfors de la intersecció, és a dir, cadascun dels moments en què un o diversos moviments tenen dret de pas.
- **Interval:** temps en què un semàfor determinat mostra un senyal; així doncs, hi ha intervals de verd, groc i vermell.
- **Cicle:** és el temps necessari perquè es doni una seqüència completa d'indicacions en tots els semàfors d'una intersecció. Durant aquest temps, almenys s'ha d'haver atorgat un cop el dret de pas a cada moviment possible.

El primer que s'ha de fer és confeccionar un sistema de fases que permeti el pas dels moviments congruents entre ells i elimini els punts de conflicte més perillosos.

Un cop determinat l'esquema de fases, cal assignar un temps de pas a cada moviment i determinar, d'aquesta manera, el cicle.

Per raons que es veuran més endavant, generalment el cicle acostuma a estar fixat, per això el problema d'assignar un temps a cada fase es redueix a repartir el temps del cicle entre les diferents fases. Fins i tot en els casos en què el cicle no està condicionat, també es determina prèviament.

Figura 5

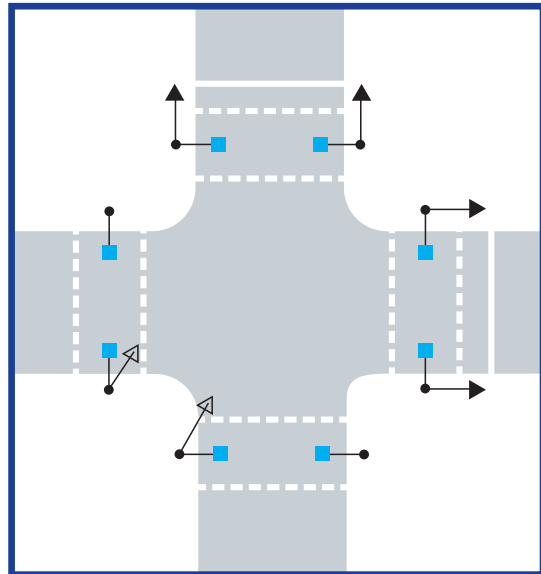
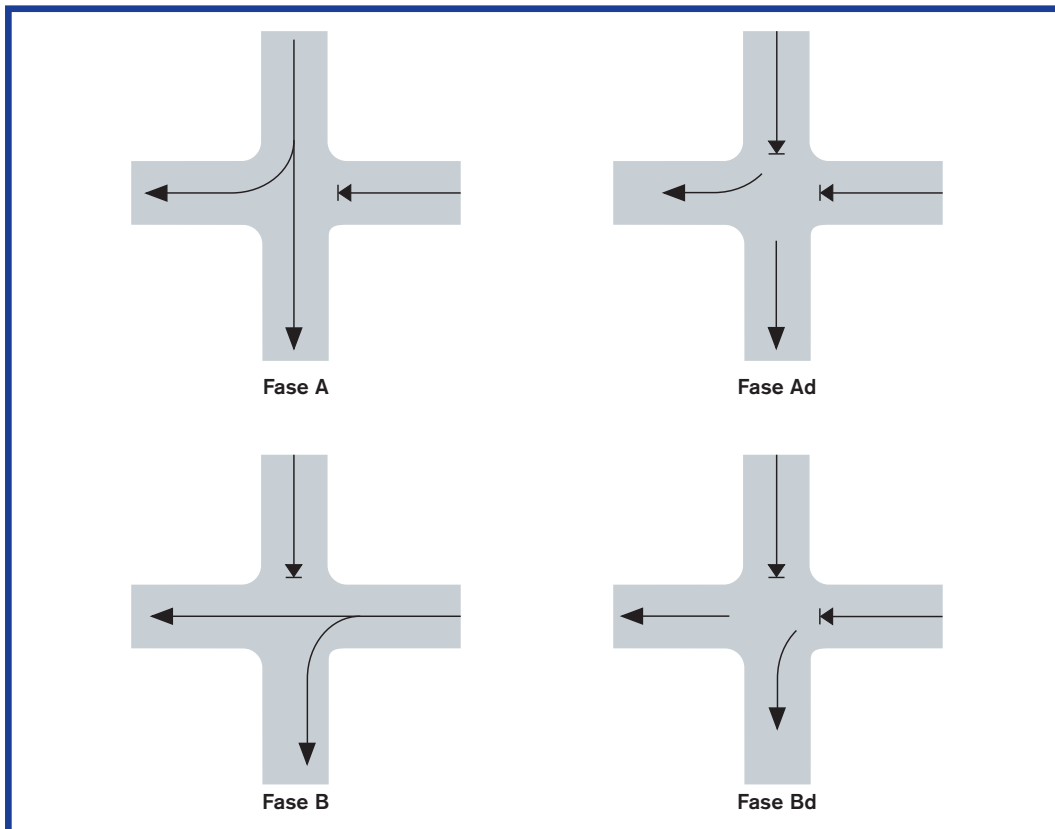


Figura 6: Esquema de fases

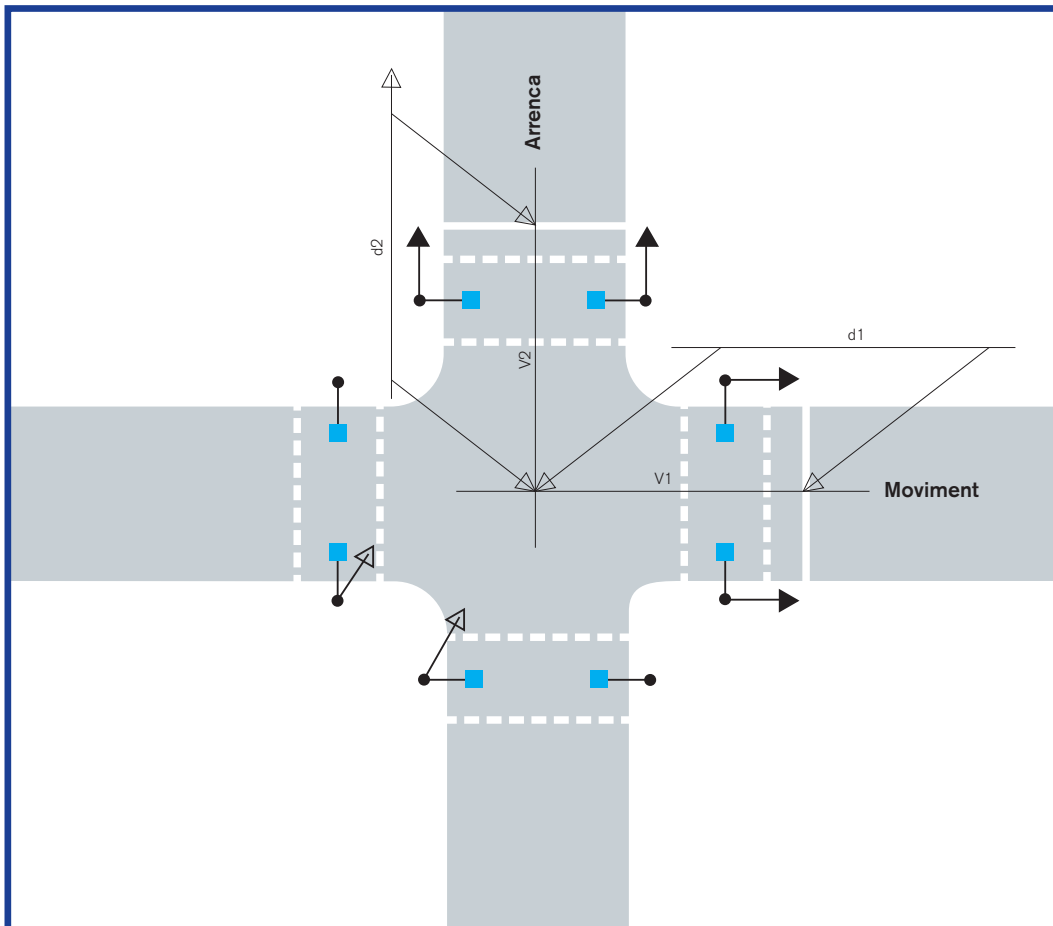


regulació d'interseccions

Per comprendre millor com s'estableix un esquema de fases, s'exposa un exemple sobre una intersecció de la qual es presenta la senyalització i les fases (veg. fig. 6 i 7). A les figures es pot veure que hi ha un seguit de fases principals i altres de secundàries determinades per les condicions geomètriques de la intersecció i que serveixen per donar més seguretat; es coneixen amb el nom genèric, sovint mal aplicat, d'*aclarides*.

Els temps de les fases secundàries es calculen considerant la configuració geomètrica i la velocitat mitjana a què poden circular els vehicles de cada moviment. Un exemple és el millor per comprendre aquest càlcul.

Figura 7



Si d_1 és la distància entre el punt de conflicte i la línia de detenció del moviment que està circulant i v_1 la velocitat mitjana d'aquest, i si d_2 és la distància entre la línia de detenció i el punt de conflicte del moviment que circularà a continuació, i v_2 la velocitat mitjana en què es recorre aquesta distància, el temps d'aclarida el dona l'expressió:

on t_r = temps de reacció del moviment 2 i t_p = temps de protecció (depenent del percentatge de vehicles pesants, del pendent, del tipus de paviment, etc.).

El temps de reacció sol valer $t_r = 2 \div 4$ s. El temps de protecció, $t_p = 0 \div 2$ s.

$$t_d = \frac{d_1}{v_1} - \frac{d_2}{v_2} - t_r + t_p$$

Per calcular la durada del groc, considerant que actualment aquest senyal únicament serveix per avisar del canvi imminent del llum verd al vermell, les normes americanes aconsellen utilitzar la fórmula següent:

$$t_a = t_{rc} + \frac{1}{2} \frac{v}{a}$$

t_a = interval de groc en segons

t_{rc} = temps de reacció del conductor, en segons

v = velocitat en m/s

a = desceleració en m/s^2

Normalment, $t_{rc} = 1$ s i $a = 2 \div 6$ m/s.

En el cas de la velocitat a què normalment es condueix a les nostres ciutats, 12 m/s, el resultat és una $t_a = 3$ s.

Hi ha tendència a estandarditzar la durada del groc a les ciutats per tal d'evitar confusions entre els conductors. Com a interval òptim s'han triat 3 segons.

2.3 Mètodes de control

Hi ha dos mètodes fonamentals de regulació anomenats *temps predeterminat* i *temps accionat pel trànsit mateix*.

El *temps predeterminat* proporciona un programa únic o un seguit de programes de valor constant (la durada del verd per a un determinat accés en cada seqüència, que sempre és el mateix).

El *temps accionat pel trànsit mateix* permet variar els temps d'acord amb les alteracions de la demanda de trànsit (la durada del verd d'un accés varia en funció de les fluctuacions de la intensitat del trànsit d'aquest accés).

En primer lloc, veurem com es calculen els temps de les fases principals en el sistema de temps predeterminats i, posteriorment, alguns aspectes generals dels sistemes accionats.

regulació d'interseccions

2.4 Càlcul de les fases principals amb temps predeterminats

Les dades necessàries per assignar els temps de cada fase principal són les següents:

- Dimensions de cadascun dels accessos.
- Aparcament prop de la vorada dels accessos.
- Aforament de tots els moviments durant, almenys, les 16 hores més importants d'un dia de l'any que es consideri mitjà.
- Percentatge de vehicles pesants i transport públic.
- Pendent de cada accés en percentatge.
- Cicle de treball.

Si els carrils no estan marcats, el nombre de carrils útils es calcula a partir de les dimensions de cada accés, l'aparcament prop de la vorada i el percentatge de vehicles pesants i transport públic, considerant que:

- Amplada del carril = $2,5 \div 3,5$ m
- Amplada de la banda d'aparcament = $2 \div 2,20$ m

Si el percentatge de vehicles pesants i transport públic és important, cal triar els valors més alts de l'amplada del carril.

Amb els aforaments es calcula la intensitat mitjana i la màxima per carril de cada moviment, un cop reduïts tots els vehicles a **u.v.p.**² d'acord amb una taula d'equivalències com la següent:

Amplada accés	Semàfors en bàculs
Vehicle comercial pesant o mitjà	1,75
Autobús	2,25
Tramvia	2,50
Vehicle comercial lleuger	1,00
Motocicleta	0,33
Bicicleta	0,20
Gir a la dreta	1,25
Gir a l'esquerra	1,75

² Unitats de vehicles particulars.

Un cop conegudes les intensitats mitjanes per carril, es busca el moviment crític de cada fase, que és el representatiu de cadascuna. S'anomena *intensitat crítica d'una fase* la més gran de totes les intensitats dels moviments que tenen dret de pas durant aquesta fase.

Amb les intensitats crítiques es calculen els temps de la forma següent, anomenant $A, B \dots N$ les diferents fases principals i $A_d, B_d \dots N_d$ les fases secundàries que les segueixen:

$$\frac{t_A}{v_A \cdot x \cdot h_A} = \frac{t_B}{v_B \cdot x \cdot h_B} = \dots = \frac{t_N}{v_N \cdot x \cdot h_N}$$

tenin en compte que:

$$t_A + t_{A_d} + t_B + t_{B_d} + \dots + t_N + t_{N_d} = C$$

on:

v_l = intensitat crítica de la fase l

h_l = interval de sortida del moviment crític de la fase l

L'*interval de sortida* es defineix com el temps que transcorre des que la part davantera d'un vehicle passa per la línia de detenció fins que hi passa la part davantera del vehicle següent. Normalment, $h = 2 \div 3$ s.

Convé no oblidar que aquest valor h es refereix a la unitat u.v.p. a què s'han reduït tots els vehicles.

Efectuant operacions entre (3) i (4) s'obté:

$$t_l = \frac{C - \sum_{l=1}^{l=N} t_{ld}}{\sum_{l=1}^{l=N} v_l \cdot x \cdot h_l}$$

que és el temps en segons de la fase l .

En general, el valor h s'incrementa lleugerament per considerar el temps de reacció, a causa del retard amb què els vehicles es posen en marxa després que s'encén el llum verd.

L'expressió (5) no és, en tot cas, exacta, però dona una aproximació més que suficient per als casos més freqüents.

regulació d'interseccions

2.5 Índex de saturació

Un dels valors més característics per ponderar les possibilitats de congestió és l'índex de saturació. Es defineix com la relació que existeix entre el volum que realment té un moviment i el volum que en determina la capacitat en unes condicions determinades. En el nostre cas, en què els càlculs s'han fet partint de la base que l'índex de saturació és el mateix per a tots els moviments crítics de cada fase, aquest val:

$$s = \frac{\sum_{I=1}^{I=N} V_I x h_I}{C - \sum_{I=1}^{I=N} t_{Id}} \frac{C}{3600}$$

que normalment ha d'acomplir $s < 1$, ja que, en cas contrari, indicaria que la instal·lació, en les condicions estudiades, no pot funcionar i, per tant, caldria buscar noves solucions.

Abans de donar per enllestits els temps de les fases principals, cal fer una comprovació que consisteix a calcular el valor s per a l'hora punta de cada moviment crític. Aquest valor es troba mitjançant l'expressió:

$$s_{I_{\max}} = \frac{V_p x h_I}{t_I} \frac{C}{3600}$$

I si aquest valor supera la unitat en algun cas, això indica que, si es vol evitar grans congestions en el moviment del qual $s > 1$, cal fer una altra distribució dels temps durant les hores en què $s > 1$.

2.6 Demores

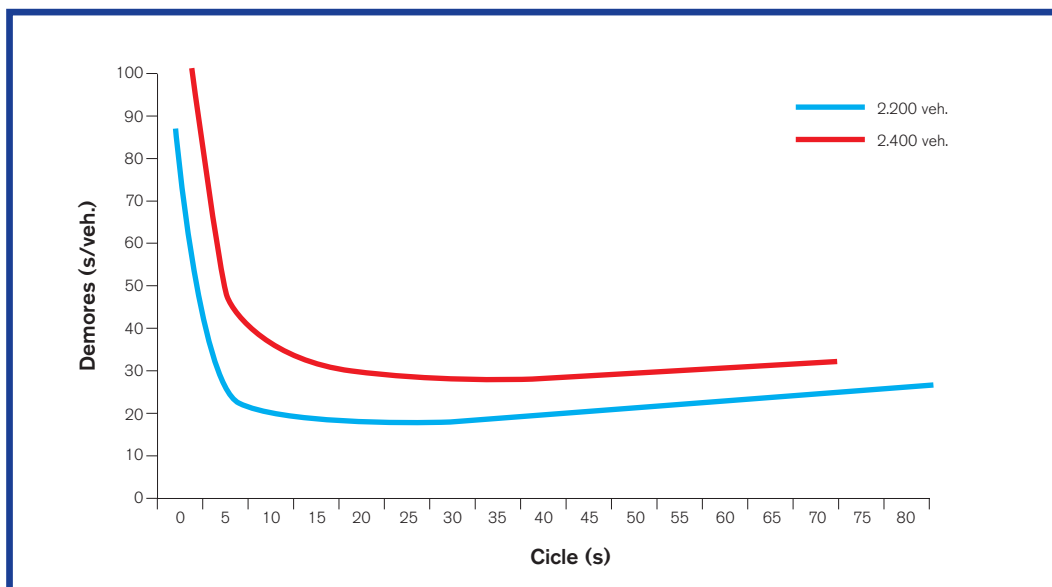
Després de diversos estudis estadístics, s'ha determinat una fórmula empírica que ens dona la demora per vehicle en un accés, en unes condicions determinades dels senyals:

$$d = \frac{9}{10} \left(\frac{C(1-p)^2}{2(1-ps)} + \frac{s^2}{2I(1-s)} \right)$$

d = demora mitjana per vehicle
 c = cicle
 p = proporció del cicle de verd efectiu
 s = índex de saturació
 I = intensitat de trànsit

La figura 8 representa la demora per vehicles, en funció del cicle, per a determinats valors d'intensitat de trànsit. S'hi aprecia que hi ha un cicle que dona la demora mínima, a partir de la qual, si el cicle augmenta, també s'incrementa la demora. No es considera la part esquerra de la corba (a partir de la demora mínima) perquè el ràpid increment que pateix és degut a la manca de capacitat.

Figura 8: Demores en funció del cicle



2.7 Cicle

Es pot escollir el cicle des de dos punts de vista:

Si es considera que l'objectiu principal és aconseguir una bona coordinació, l'elecció del cicle es fa amb aquest criteri. Si, en canvi, el que es pretén és que la intersecció treballi en condicions òptimes d'eficiència, el criteri és diferent.

A continuació s'estudia únicament l'elecció del cicle des del segon punt de vista, deixant el primer per al proper capítol, quan s'estudiarà la coordinació. Cal, però, tenir en compte que, generalment, l'elecció es fa considerant tots dos criteris, procurant arribar a una solució de compromís.

Des del punt de vista de la intersecció, es tracta d'aconseguir la major capacitat amb la mínima demora possible. Ja s'ha vist com, en augmentar el cicle per a unes determinades intensitats de trànsit, les demores augmenten.

D'altra banda, en augmentar el cicle augmenta la capacitat, però contràriament al que pot semblar a primer cop d'ull, amb l'augment del cicle i, per consegüent, amb l'increment de la durada del verd de cada senyal, la capacitat no augmenta en la mateixa proporció. La variació es pot apreciar a la figura 8.

La pràctica ensenya que els cicles no poden ser inferiors a un valor determinat, ni superiors a un màxim. Convencionalment, s'admet que els cicles màxims i mínims utilitzables són de 120 i 45 segons respectivament.

regulació d'interseccions

Això no obstant, el cicle mínim està condicionat a l'hora, a la durada mínima del verd d'una fase. Es considera que el verd mínim per als vehicles no ha de ser inferior a 12 + 15 s. Si es tracta d'una fase amb vianants, les normes americanes assenyalen que el verd mínim l'estableix la fórmula següent:

$$G_{\min} = 5 + \frac{D}{1,2} - t_a$$

G_{\min} = durada mínima del verd

D = longitud del pas de vianants

t_a = durada del groc per als vianants

En tot cas, la determinació del cicle òptim és força complexa i només s'hi pot arribar després d'haver tingut en compte totes les consideracions especificades.

2.8 Sistemes accionats

Amb la finalitat d'aconseguir una flexibilitat més gran en el repartiment dels temps, s'han desenvolupat diversos mètodes de control que s'engloben sota el nom genèric de sistemes accionats. En aquests tipus de control és el trànsit mateix el que determina els intervals de verd, d'acord amb les variacions de la demanda.

Encara que inicialment sembla que aquest sistema presenta innombrables avantatges respecte del de temps predeterminats, no sempre és així i per això, a l'hora d'adoptar aquest sistema, a més de les condicions generals que s'han vist a la primera part, cal considerar les condicions addicionals següents:

- **Intensitats de trànsit:** en interseccions on les intensitats no arriben al mínim que es requereix per a la primera condició, es pot instal·lar un sistema accionat si el cost ho justifica.
- **Trànsit transversal:** quan la intensitat de la via principal és tan gran que pertorba enormement el moviment ocasional dels vehicles o vianants que desitgen travessar aquesta via.
- **Intensitats en hora punta:** quan el control amb semàfors en una intersecció només és necessari durant algunes hores, com ara l'hora punta.
- **Trànsit de vianants:** quan només es compleix la tercera condició, que fa referència a la intensitat mínima de vianants.
- **Accidents:** quan només es compleix la cinquena condició, que fa referència al nombre mínim d'accidents.
- **Fluctuacions del trànsit entre accessos:** si la proporció del trànsit entre els diversos accessos varia considerablement al llarg del dia.

- **Interseccions complexes:** en interseccions amb moltes fases, amb alguna de poc important, perquè, a més dels avantatges usuals d'ajust dels temps de verd, s'hi uneix el fet de poder-se-les saltar.
- **Interseccions coordinades:** quan la situació de la intersecció perjudica notablement la bona coordinació.

2.9 Detectors

Són els encarregats de recollir i subministrar la informació del trànsit als reguladors d'un sistema accionat.

Hi ha una gran varietat de tipus de detectors, encara que els més utilitzats són cinc:

- Detectors de pressió
- Detectors de llaç magnètic
- Detectors de radar
- Detectors ultrasònics
- Detectors de visió artificial

Els *detectors de pressió* s'instal·len a la calçada i el seu funcionament es deu a la pressió de les rodes dels vehicles que hi passen pel damunt; es comporta com un interruptor elèctric que es tanca per la pressió de les rodes. Tenen el greu inconvenient que són pràcticament inoperants quan un vehicle s'hi atura al damunt.

Els *detectors de llaç magnètic* consten d'un cable en forma de bucle allotjat sobre unes esclatxes efectuades al paviment i són accionats per les variacions d'inductància que es produeixen en passar cossos metàl·lics (per exemple, els vehicles) pel seu radi d'acció. Responen, en general, als vehicles en moviment i no són accionats pels cotxes aparcats o altres objectes metàl·lics en posició estàtica que es troben en la seva zona d'influència. Fins ara, aquest tipus de detectors és el que posseeix una fiabilitat més gran i, per consegüent, són els que han tingut més acceptació.

Els *detectors de radar* estan dissenyats per muntar-los sobre la calçada, sostinguts en pals, i s'accionen pel pas de vehicles a través del camp d'emissió d'energia en forma de microones. Per efecte Doppler pot determinar-se el pas d'un vehicle i conèixer-ne, amb força precisió, la velocitat. Tenen l'inconvenient que els canvis de les condicions atmosfèriques els afecten molt.

regulació d'interseccions

Els *detectors ultrasònics* obeeixen al mateix principi de funcionament que els de radar, amb la diferència essencial que estan en la freqüència de les ones d'emissió.

Finalment, hi ha els *detectors de visió artificial*, amb els quals, mitjançant una càmera de TV i amb els sistemes de processament d'imatge actuals, es pot obtenir una informació molt completa de l'estat del trànsit. A la pantalla del receptor de la imatge de la càmera es defineix una zona (normalment un carril de 30 a 40 m de longitud), on s'analitzen els píxels lluminosos, cosa que permet obtenir el comptatge de vehicles, la intensitat, la densitat i la velocitat. És, per tant, un sistema molt potent.

L'inconvenient més gran és que resulta molt vulnerable a les situacions climatològiques adverses (pluja, boira, etc.) i que és molt sensible al lloc on s'ha emplaçat. A més, si hi ha un nombre important de camions, es poden produir problemes d'opacitat.

Encara que lentament, sembla que aquest tipus de detector, que inicialment era poc usat a causa del seu cost, s'utilitza cada vegada més.

2.10 Tipus de sistemes accionats

Es poden distingir tres formes fonamentals d'accionament:

- Control semiaccionat
- Control totalment accionat
- Control per volum-densitat

El *control de trànsit semiaccionat* s'aplica primordialment a una intersecció amb una gran intensitat de trànsit, en la qual conflueix un carrer principal i un altre transversal amb un trànsit relativament lleuger. Els detectors es col·loquen únicament al carrer transversal. Els semàfors donen el verd generalment al carrer principal i canvien a l'altre només com a resultat d'una demanda de trànsit. En alguns tipus de control, la durada del verd per al carrer secundari es fixa prèviament; aquest sistema, però, no és el més adequat.

En els tipus més flexibles, la durada de l'interval de verd del carrer secundari és proporcional a la demanda de trànsit, amb una previsió per a un límit màxim, a partir del qual el llum verd ja no pot ser retingut en aquesta direcció, encara que la demanda de trànsit així ho indiqui. Cada vegada que un vehicle passa per sobre del detector, produeix una extensió del llum verd.

En el moment en què el temps de llum verd requerit o el màxim temps de verd per al carrer transversal expira, el verd reverteix sobre el carrer principal, on ha de romandre, almenys, durant un temps mínim predeterminat. Un cop exhaurit aquest temps mínim, el control està una altra vegada lliure per respondre a la demanda del carrer secundari.

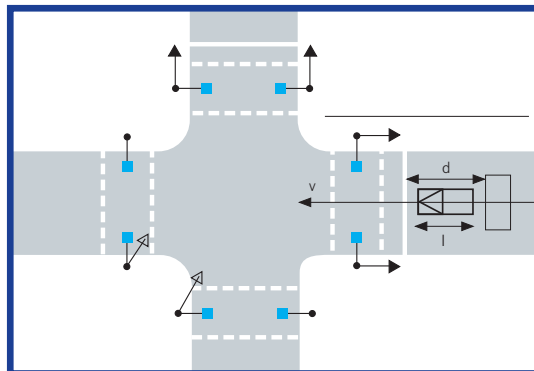
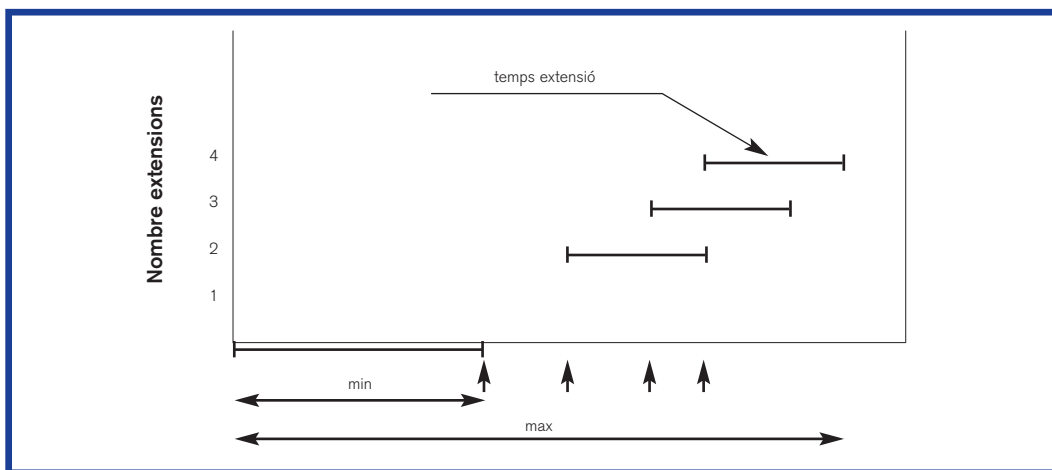


Figura 9



El temps mínim que es requereix normalment depèn del temps que necessiten els vianants per travessar. El valor de les extensions depèn de multitud de factors i acostuma a oscil·lar entre 2 i 12 segons. Se'n pot apreciar la influència a la figura 9.

El temps màxim depèn fonamentalment de la longitud de la cua de vehicles que es pot produir davant del llum vermell, en la direcció que no té el dret de pas.

En síntesi, aquest sistema de control preestableix un interval mínim de verd per al carrer principal i un interval màxim per al secundari. Mentre la demanda de trànsit en el carrer transversal no sigui important, el verd del carrer augmenta; en el cas que la demanda sigui excessiva, actua com un senyal de temps predeterminat.

Ja s'ha vist que el control de trànsit semiaccionat no detecta ni mesura les demandes de trànsit de tots els carrers que conflueixen en una intersecció.

Hi ha, però, el *control de trànsit totalment accionat*, per al qual es requereix que hi hagi detectors a tots els carrers que s'acosten a la intersecció.

regulació d'interseccions

Amb la nova modalitat, el temps de llum verd d'un carrer s'assigna únicament com a resultat d'una actuació o més dels detectors situats en aquest carrer. Quan no hi ha trànsit en un carrer determinat, la indicació de pas lliure roman ordinàriament sobre l'últim carrer assignat, però en el moment en què es registra una demanda, encara que sigui petita, la indicació de verd canvia.

En el cas d'una actuació continuada per part dels detectors d'un carrer, el canvi de verd es fa després que hagi transcorregut un temps màxim predeterminat i aleshores, a la primera oportunitat, automàticament torna a canviar el verd al primer carrer. Aquesta oportunitat no es pot presentar fins que hagi transcorregut un període mínim de verd determinat prèviament per a aquest segon carrer.

La durada de les indicacions de pas lliure per a cada carrer amb trànsit normal fluctua entre valors màxims i mínims prèviament determinats per a cada carrer, de manera que l'interval de verd depèn en realitat de la demanda del trànsit.

En el tipus més comú, el pas lliure és transferit immediatament al carrer que travessa, en el moment en què l'interval entre dues actuacions sobre el detector del carrer que té el verd excedeix del valor de l'extensió i el període mínim de verd per a aquest carrer ha expirat. Així es veu com el canvi de pas lliure d'un carrer a un altre depèn dels intervals entre vehicles que depassen un valor determinat.

Amb grans volums de trànsit, aquestes diferències no són freqüents i els períodes de verd s'estenen als màxims. En aquestes condicions, aquest tipus de control actua com els controls de temps predeterminats.

El tercer tipus, anomenat *control per volum-densitat*, suposa que els intervals predeterminats anteriorment disminueixen a mesura que transcorre el temps de la fase. Així, la probabilitat que el període de verd s'acabi i sigui transferit a l'altre carrer s'incrementa per l'atenuació de la influència dels moviments del mateix carrer, així com pel temps durant el qual el trànsit ha estat esperant davant el senyal vermell i pel nombre de cotxes que esperen. Aquests i altres factors fan que els temps siguin altament sensibles als requeriments del trànsit sota gammes amples de volums.

2.11 Situació dels detectors

Les tres variables principals que cal determinar en un sistema accionat pel trànsit mateix són les següents:

- Temps mínim
- Extensions
- Temps màxim

La situació del detector està condicionada bàsicament al valor de les extensions i , en grau menor, al valor del temps mínim.

Generalment, per aconseguir una bona situació cal que s'acompleixin les condicions següents (veg. figura 9):

$$e \geq \frac{d}{v}$$

$$\frac{t_{\min}}{h} \times l \geq d$$

d = distància entre la línia de detenció i el detector
 e = temps de l'extensió
 v = velocitat mitjana d'aproximació a la intersecció
 t_{\min} = temps mínim
 h = interval de sortida de vehicles
 l = longitud mitjana d'un vehicle

Cal triar el valor de d que, complint totes dues condicions, s'aproximi més a la igualtat. Dit d'una altra manera, es mira quina de les dues equacions (6) o (7) proporciona el menor valor de d i aquest es tria com a l'òptim.

En la majoria de casos pràctics no es pot fer d'aquesta manera perquè hi ha una gran quantitat de factors que afecten la situació del detector; aleshores s'ha d'arribar a una solució de compromís entre els valors del temps mínim i de les extensions, i la distància del detector a la línia de detenció.

2.12 Annex

Càlcul més acurat de les fases principals amb temps predeterminats

Fins ara hem vist un mètode de càlcul aproximat que serveix per als casos més simples, però quan es tracta de calcular les fases en variació horària, com veurem més endavant, és millor utilitzar el mètode que es presenta a continuació.

El mètode es divideix en diverses etapes, que són les següents:

- Capacitat d'una via
- Càlcul dels paràmetres
- Cicle mínim
- Cicle òptim
- Cicle de funcionament

regulació d'interseccions

Capacitat d'una via

Per als càlculs que es faran a continuació, cal conèixer la capacitat de la via (o intensitat de saturació), que és precisament el flux màxim q_s que pot travessar un accés per unitat de temps.

En la intensitat de saturació influeixen factors geomètrics (característiques de la via) i factors de trànsit (composició i tipus de moviments).

Hi ha diversos mètodes de càlcul, però el més utilitzat a Europa és el que el Laboratori de Transports ha desenvolupat al Regne Unit i que seguirem aquí.

En aquest mètode es determina una capacitat ideal $q_s(w)$, que depèn de l'amplada w de la via (en la direcció del moviment). Se suposa que tenim les dades del nombre de carrils n i de l'amplada a_n (en metres) dels carrils; el valor de $q_s(w)$ es pot obtenir (en u.v.p./h) a partir de la fórmula:

$$q_s(w) = \frac{(1546 \cdot n + 59) \cdot a_n}{3}$$

Un cop trobada la capacitat ideal $q_s(w)$, s'hi han d'introduir un seguit de correccions degudes als factors geomètrics i de trànsit, que influeixen en la capacitat real de la via (en uns casos en el sentit de disminuir-la i en altres d'augmentar-la).

Així es determina la capacitat (real) de la via d'accés (q_s) mitjançant la fórmula següent:

$$q_s = \frac{q_s(w) \cdot F_{ce} \cdot F_{cs}}{F_{cp} \cdot F_{cc} \cdot F_{ca} \cdot F_{gd} \cdot F_{gi}}$$

F_{ce} és el factor de correcció degut a l'estacionament.
 F_{cs} és el factor de la situació geogràfica
 F_{cp} és el factor de correcció degut al pendent.
 F_{cc} és el factor de correcció degut a la presència de camions.
 F_{ca} és el factor de correcció degut a la presència d'autobusos.
 F_{gd} és el factor de correcció degut al gir a la dreta.
 F_{gi} és el factor de correcció degut al gir a l'esquerra.

F_{ce} , F_{cs} i F_{cp} són factors de correcció geomètrica, mentre que F_{cc} , F_{ca} , F_{gd} i F_{gi} són factors de composició i moviment del trànsit.

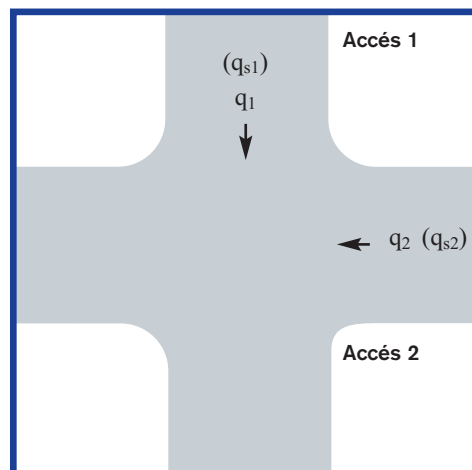
El càlcul d'aquests factors s'escapa de l'àmbit d'aquest manual; per tant, cal buscar en els llibres especialitzats la determinació dels seus valors, però és important conèixer quins són i com afecten.

Càlcul dels paràmetres de regulació d'una intersecció

Si una intersecció és com la de la figura següent:

Figura 10

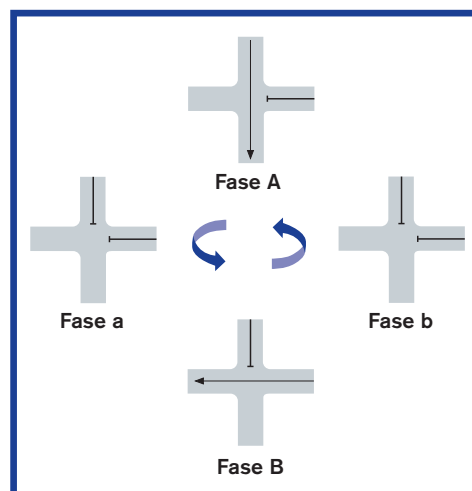
q_1 i q_2 les demandes de trànsit (intensitats) respectives i q_{s1} i q_{s2} les intensitats corresponents de saturació, si es pretén repartir els drets de pas instal·lant una regulació semafòrica, caldrà establir el cicle C adient i els temps de verds respectius (G_1, G_2).



Com que interessa donar pas a tots dos moviments alternativament, es pretendrà establir les fases següents (amb la hipòtesi que el groc equival al verd):

Figura 11: Fases de la cruïlla

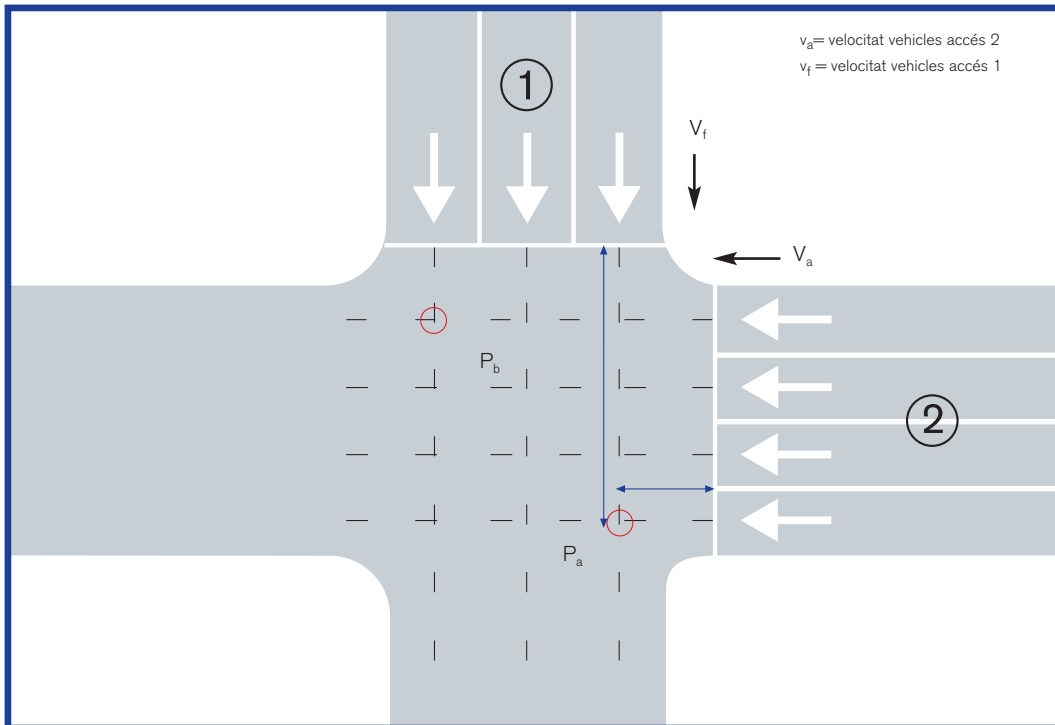
Les fases a i b (temps morts), com ja hem vist, s'estableixen com a temps intermedis de protecció, per evitar les col·lisions que es podrien produir si el pas d' A a B fos immediat. Es tracta, doncs, d'un problema de seguretat, que no depèn del trànsit sinó de les condicions topogràfiques de la intersecció.



Si volem precisar més, per determinar els temps morts s'han de buscar els possibles punts de conflicte més perillosos, en què es podria produir la col·lisió. Per a una cruïlla com la de la figura 12, en la fase a hi hauria el punt P_a i per a la fase b el P_b :

regulació d'interseccions

Figura 12: Càlcul dels temps morts



Així, en la fase a l'últim vehicle de l'accés 1 que circula pel carril més proper a l'accés 2 podria col·lidir amb el primer vehicle que arrenca de l'accés 2, pel carril del punt P_a (que és al qual més triga a arribar el vehicle de l'accés 1). El temps necessari per a la fase a d'acord amb l'expressió ja vista anteriorment és el següent:

$$t_{m\ 1-2} = \frac{d_f}{v_f} - \frac{d_a}{v_a} - t_r + t_p$$

Per tant, la suma de "temps morts" per a cada cicle és, en el cas de 2 accessos:

$$L = t_{m\ 1-2} + t_{m\ 1-2}$$

sent $t_{m\ 1-2}$ el temps mort del canvi de la fase A a la B (fase a) i $t_{m\ 2-1}$ el de la B a l' A (fase b).

Cicle mínim

El cicle mínim necessari, en una cruïlla amb 2 accessos, es calcula amb la fórmula següent:

$$y_1 \cdot C + y_2 \cdot C + L = C$$

amb L fix (en funció de les condicions topogràfiques de la cruïlla) i sent:

$$y_1 = \frac{q_1}{q_{s1}} \quad y_2 = \frac{q_2}{q_{s2}}$$

els índexs de càrregues de cada accés. Aquest indicador ens dóna la relació entre la demanda real en un accés i la demanda màxima possible o capacitat. Per tant, ens indica la proporció de temps necessari per passar:

sent:

$$y_1 + y_2 = Y$$

el cicle mínim serà:

$$C_{\min} = \frac{L}{(1-Y)}$$

Com es pot observar, sent L fix, si el cicle C es fa més llarg, la capacitat de la intersecció augmenta, perquè la proporció de "temps morts" L és més petita respecte de C . No obstant això, si C és molt gran, es produeixen altres efectes indesitjables (cues més llargues, temps d'aturada llargs, etc.), per la qual cosa cal buscar un valor de compromís.

Cicle òptim

Hi ha diverses expressions per calcular el cicle òptim C_{opt} d'una intersecció, en funció del criteri adoptat.

Seguint Webster tenim:

$$C_{\text{opt}} = \frac{1,5 \cdot L + 5}{1-Y} > C_{\min}$$

Aquest cicle és el que minimitza les demores.

Naturalment, s'ha de complir que $C_{\text{opt}} \geq C_{\min}$

regulació d'interseccions

Cicle de funcionament

Si la intersecció és aïllada, es pren el cicle òptim per funcionar.

Si, per contra, és propera a altres interseccions que també disposen de regulació semafòrica, cal prendre un cicle comú en tota la zona (no pot ser independent ja que els semàfors han d'estar coordinats).

Si el cicle (comú) és més petit que el cicle mínim d'alguna de les interseccions, aquestes no poden funcionar correctament (es produiran cues acumulatives). Per tant, el cicle de funcionament ha de tenir un valor superior (o igual) al del cicle mínim més grans de totes les interseccions (que seria la intersecció crítica del sistema).

L'expressió del cicle també es pot escriure com:

$$C-L = G_1 + G_2$$

Per a un C donat, en ser $C-L$ el temps fix que queda per al moviment dels vehicles, la suma $G_1 + G_2$ dels respectius temps de verd dels accessos no es pot modificar. Per tant, caldrà repartir-los en funció de les demandes existents.

D'acord amb un criteri d'equisaturació:

$$\frac{G_1}{y_1} = \frac{G_2}{y_2} = \frac{G_1 + G_2}{y_1 + y_2} = \frac{C-L}{y_1 + y_2} \Rightarrow \begin{cases} G_1 = \frac{(C-L) \cdot y_1}{Y} \\ G_2 = \frac{(C-L) \cdot y_2}{Y} \end{cases}$$

denotant:

$$g_i = \frac{G_i}{C} \quad \text{la proporció en el cicle de l'accés}$$
$$l = \frac{L}{C} \quad \text{la proporció de temps morts}$$

obtenim l'expressió següent:

$$g_1 = \frac{G_1}{C} = \frac{(1-l) \cdot y_1}{Y} \qquad g_2 = \frac{G_2}{C} = \frac{(1-l) \cdot y_2}{Y}$$

que és molt utilitzada en els càlculs de temps.

3

Coordinació d'interseccions

3.1 Conceptes generals

La densitat de semàfors en zones urbanes és elevada i els vehicles han de travessar les interseccions semaforitzades amb eficàcia, reduint al màxim les aturades i demores. La coordinació dels semàfors respon a la necessitat de mantenir les obertures dels semàfors al llarg d'una via, o en el conjunt d'una xarxa de carrers, amb uns temps fixos de desfasament per acomodar en la mesura del possible la progressió dels fluxos de trànsit.

Els semàfors d'una artèria urbana, o d'una zona urbana, han de funcionar, doncs, sincronitzats entre ells i amb un temps de cycle idèntic per a tots, per tal d'assegurar que utilitzen un instant comú que defineix l'inici del cycle general de la zona, amb relació al qual poden situar l'inici del verd de la via principal en el moment adequat, determinat pel temps de desfasament definit com a paràmetre en cada intersecció. D'aquesta forma es podrà establir i fixar la seqüència d'obertures de verd de tots els semàfors de la zona. El temps de desfasament es defineix com el temps que ha de transcórrer des de l'instant zero del cycle general fins a l'obertura del verd del semàfor de referència de la intersecció (normalment, el semàfor de vehicles de la via principal).

És important ressaltar la necessitat que tots els semàfors de la zona funcionin amb un temps de cycle únic perquè la situació d'inici del verd es pugui mantenir al llarg dels cycles. En condicions especials, es pot assumir que alguna de les interseccions, o un grup, funcionin amb un temps de cycle que sigui la meitat del cycle general.

El concepte *sincronització de semàfors* es refereix al mitjà físic que permet que totes les cruïlles reconeixin l'inici del cycle general en el mateix instant. I la coordinació de semàfors correspon al disseny dels desfasaments que ajuden a la progressió dels fluxos de trànsit. L'objectiu principal d'aquest manual és el disseny de la regulació; per tant, ens centrarem en la coordinació dels semàfors.

En termes molt generals, cal dir que hi ha dos procediments bàsics per mantenir la sincronització d'un grup de cruïlles semaforitzades:

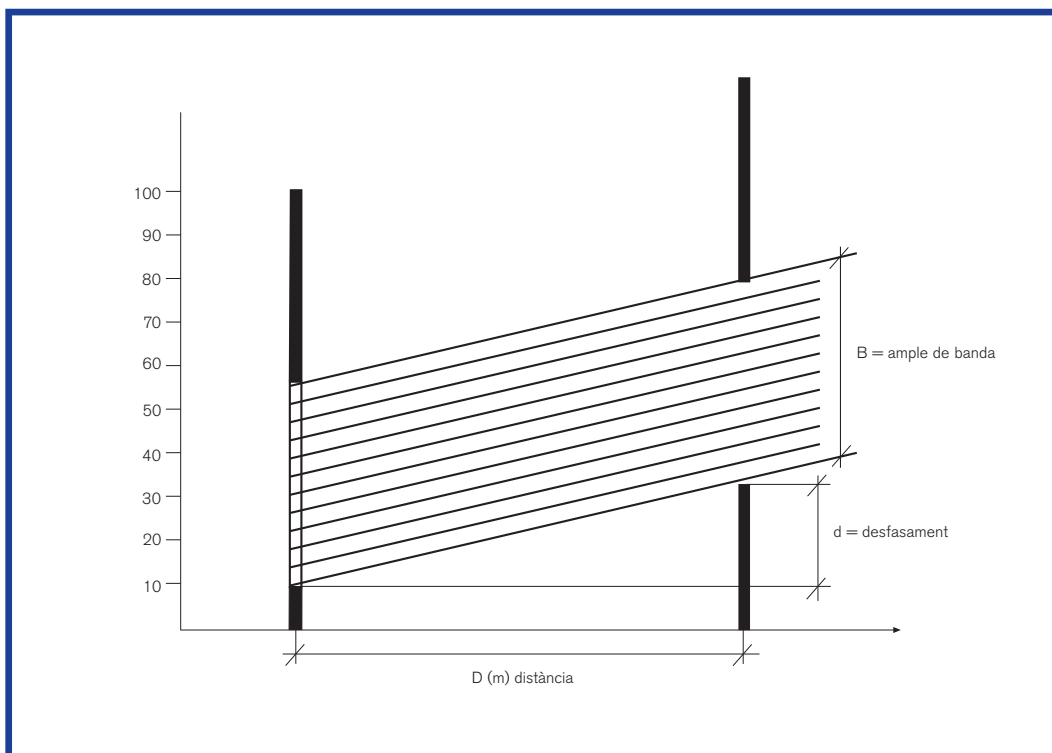
- Sincronització per senyals elèctrics (per exemple, un senyal que arriba a totes les interseccions en l'instant zero de cada cycle).
- Sincronització per hora del rellotge. Tots els reguladors tenen la mateixa hora i coneixen l'instant d'inici del cycle. Aquest procediment exigeix rellotges molt precisos o bé la capacitat d'ajustar l'hora per telecomandament.

coordinació d'interseccions

Els beneficis de la sincronització d'interseccions estan molt relacionats amb la distància entre elles i el volum de trànsit de l'artèria. El conjunt de vehicles que surt del verd d'un semàfor es dispersa al llarg del recorregut per la via a causa de les diferents velocitats, i si la distància és gran pot arribar a l'altra intersecció ocupant el doble del temps de pas per al semàfor de partida. La coordinació, aleshores, perd eficàcia. Aquesta dispersió té un efecte menys acusat amb volums de trànsit elevats, que limiten la llibertat de velocitat dels vehicles components del grup. Es considera que amb distàncies entre 750 i 1.000 metres o superiors no cal sincronitzar.

El disseny de la coordinació entre dos interseccions es representa en la figura 13. Sobre uns eixos espai-temps, es dibuixen les trajectòries dels vehicles que surten del verd d'una intersecció i circulen a velocitat constant fins al semàfor de la intersecció següent, que els rep també en verd (en una situació ideal de velocitats constants, separació també fixa entre vehicles i coordinació perfecta entre els dos semàfors). Els semàfors es situen sobre l'eix d'espai (eix x) i l'estat de verd o vermell del semàfor es representa a l'eix de temps al llarg del cicle de funcionament.

Figura 13

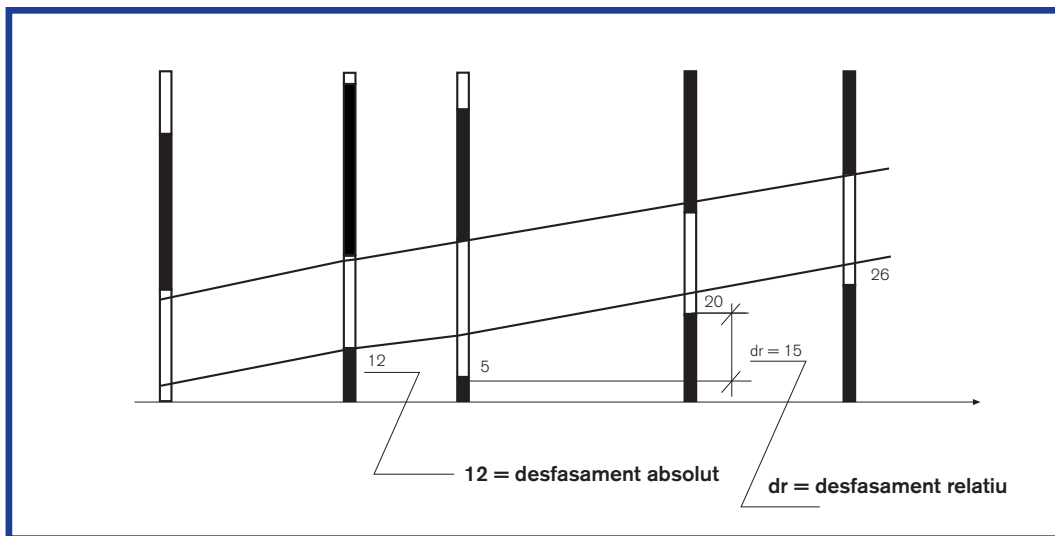


La velocitat (v) dels vehicles determina el temps de recorregut entre els dos semàfors ($d=D/v$), que coincideix en aquest cas amb el desfasament entre les dues interseccions. S'anomena *ample de banda* (B) el temps en segons entre el pas del primer i l'últim vehicle del grup de vehicles que es mouen en progressió entre els dos semàfors o a través d'un conjunt més extens de cruïlles.

3.2 Artèria de sentit únic de circulació

La coordinació de semàfors en un carrer de sentit únic la defineix gairebé del tot la velocitat dels vehicles en cada tram entre dues interseccions. Generalment, es defineix una velocitat per a tot el carrer, però poden existir trams amb velocitats diferents. Caldrà construir un diagrama espai-temps que representi la situació dels semàfors principals de cada intersecció sobre l'eix d'abscisses i la situació al llarg del temps de l'inici i final de verd de cada semàfor sobre l'eix d'ordenades. Després cal dibuixar el recorregut del primer i l'últim vehicle que surten del verd del semàfor inicial. El temps entre tots dos vehicles determina l'ample de banda total necessari. Els temps de verd dels altres semàfors s'hauran de situar de manera que permetin el pas d'aquest ample de banda. Si qualsevol semàfor té un temps de verd inferior a la banda, en limitarà o reduirà l'ample total. I en els semàfors amb temps de verd superior a la banda s'ha de decidir la seva col·locació en el temps amb relació a la banda, ja que hi ha un marge de variació del desfasament sense reduir l'ample de banda.

Figura 14: Coordinació en sentit únic



A la figura s'han situat tots els semàfors deixant el marge d'excés de verd per sota o en un temps anterior a l'arribada del front de la banda. Generalment, aquesta situació és útil perquè puguin arrancar i sortir els vehicles procedents del gir del carrer transversal en la intersecció anterior, que han quedat detinguts davant del semàfor. Si hi ha molt trànsit en aquest gir, convé calcular adequadament el temps de marge necessari perquè no es produeixi una aturada completa de tot el grup de vehicles.

Si considerem que l'inici de verd del primer semàfor defineix el punt zero del cicle general, que coincideix amb els zero segons de l'eix de temps, el desfasament de cada intersecció queda definit pel temps d'inici de verd de cada semàfor (aquest desfasament s'anomena també

coordinació d'interseccions

desfasament absolut). Són els valors 20, 28, 35 i 53 de la figura 14. El desfasament relatiu entre dues interseccions és el temps transcorregut entre les obertures de verd dels dos semàfors. En els reguladors es programen sempre els desfasaments absoluts.

Ja es veu que el paràmetre més determinant és la velocitat de circulació. Els carrers i artèries urbanes tenen la velocitat limitada a 50 km/h i, per tant, aquesta seria en principi la velocitat límit de disseny. En carrers amb una densitat de trànsit molt elevada i, per tant, amb velocitats lentes de circulació, s'utilitza una velocitat de disseny de 45 o 40 km/h, intentant forçar els semàfors a circular a la velocitat possible del flux de vehicles. Ara bé, les condicions d'una via saturada no milloren quan els semàfors produeixen retencions en el moviment dels vehicles, i és per això que en vies molt denses la velocitat de la banda no es pot reduir gaire.

Els semàfors poden ajudar a mantenir en els límits les velocitats de circulació d'una via, especialment als carrers de sentit únic, en què la velocitat de coordinació es pot ajustar totalment. No obstant això, aquest efecte perd eficàcia amb trànsit molt reduït i en condicions nocturnes, en què un vehicle que arriba al final del verd pot accelerar i situar-se en zones més centrals de l'ona verda en les interseccions següents.

En artèries de gran capacitat, amb una càrrega de trànsit molt important, es pot incrementar una mica la velocitat de coordinació, per sobre dels 50 km/h de límit, per mantenir la fluïdesa i la capacitat necessària a l'artèria.

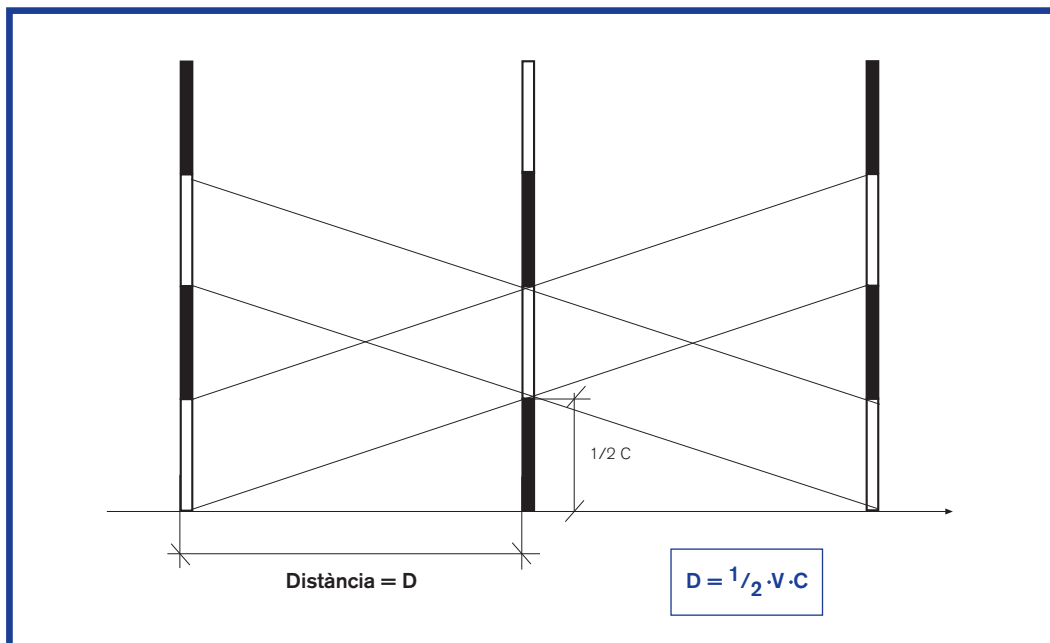
3.3 Artèria de doble sentit de circulació

La coordinació d'un carrer de doble sentit presenta més dificultats que en sentit únic, i moltes vegades no és possible dissenyar ones verdes en els dos sentits amb un ample de banda adequat. Per aconseguir ones verdes completes en tots dos sentits s'haurien d'encreuar els trajectes de totes dues bandes coincidint amb la situació de les interseccions (sistema alternat) o bé coincidint amb el punt mitjà entre cada dues interseccions (sistema simultani). En tot cas, això exigiria distàncies idèntiques entre interseccions, i un cicle i velocitat compatible amb aquesta distància. A continuació exposarem aquests casos ideals de coordinació en doble sentit i, després, l'enfocament de disseny per als casos generals.

Sistema alternat

Consisteix en la disposició dels semàfors en forma totalment alternada de verds i vermells al llarg del carrer. El vermell d'un semàfor es situa en la mateixa posició en el temps que el verd del semàfor anterior, i el següent semàfor té el verd en aquella posició (veg. figura 15). S'aconsegueix una ona verda d'ample de banda igual al temps de verd, al llarg de tot el carrer.

Figura 15: Sistema alternat simple



Aquest sistema exigeix que les variables de distància entre interseccions (D en metres), velocitat de coordinació (V en m/s) i cicle (C en s) estiguin relacionades per la igualtat:

$$D = \frac{1}{2} \cdot V \cdot C$$

Si considerem un carrer amb distàncies iguals entre interseccions es podrien seleccionar un parell de valors V - C que satisfessin aquesta igualtat. O, en cas de disseny d'una nova zona o carrer, es podria definir una distància entre interseccions adequada. Analitzem, però, unes condicions possibles:

$$V = 45 \text{ km/h (12,5 m/s); } C = 60 \text{ s; } D = \frac{1}{2} \cdot 12,5 \cdot 60 = 375 \text{ m}$$

$$V = 45 \text{ km/h (12,5 m/s); } C = 80 \text{ s; } D = \frac{1}{2} \cdot 12,5 \cdot 80 = 500 \text{ m}$$

Els 375 metres entre interseccions representen ja una distància molt elevada en segons quin disseny de ciutat (especialment considerant els passos de vianants). I si els nivells de trànsit són elevats i s'ha d'incrementar el cicle a 80 segons, es requereixen distàncies entre interseccions de 500 metres.

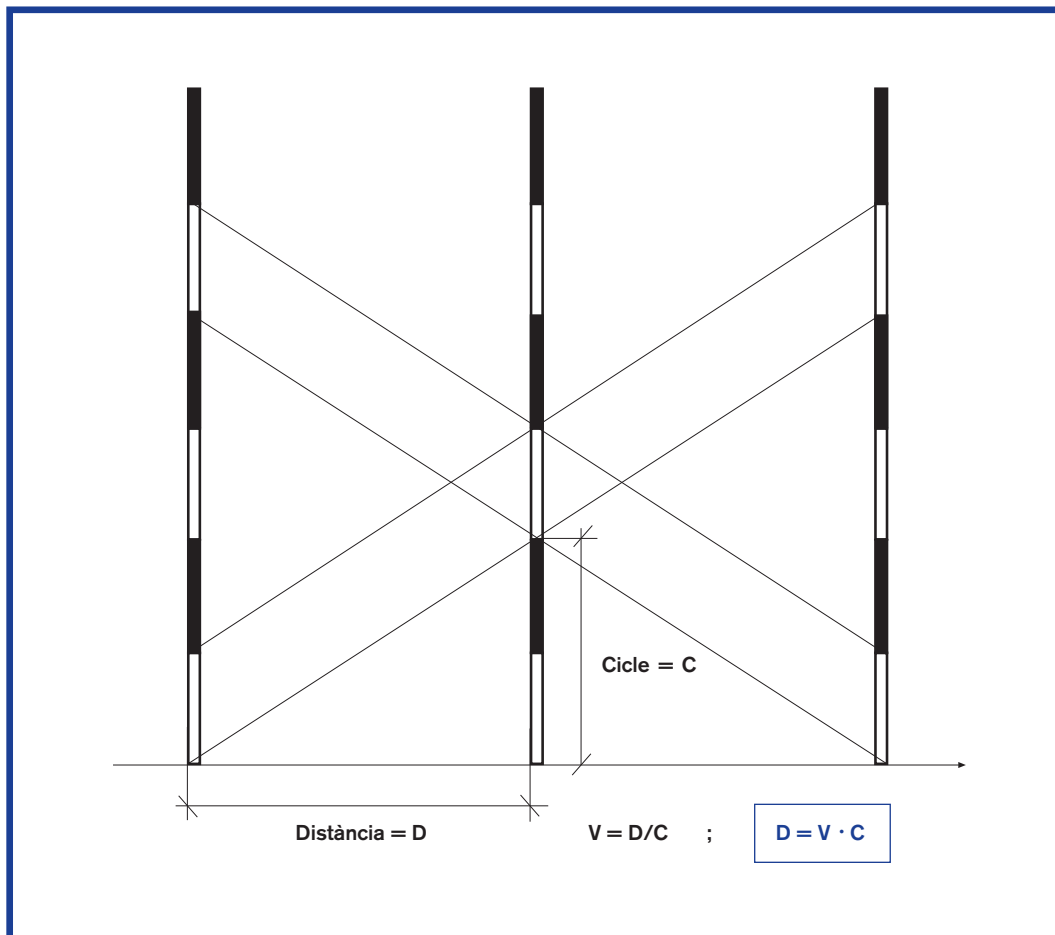
coordinació d'interseccions

Sistema simultani

Com el seu nom indica, en aquest sistema de coordinació tots els semàfors del carrer obren el verd simultàniament. El temps de recorregut d'un vehicle entre dues interseccions ha de ser igual al temps de cicle. Les variables es relacionen per la igualtat:

$$D = v \cdot C$$

Figura 16: Sistema simultani



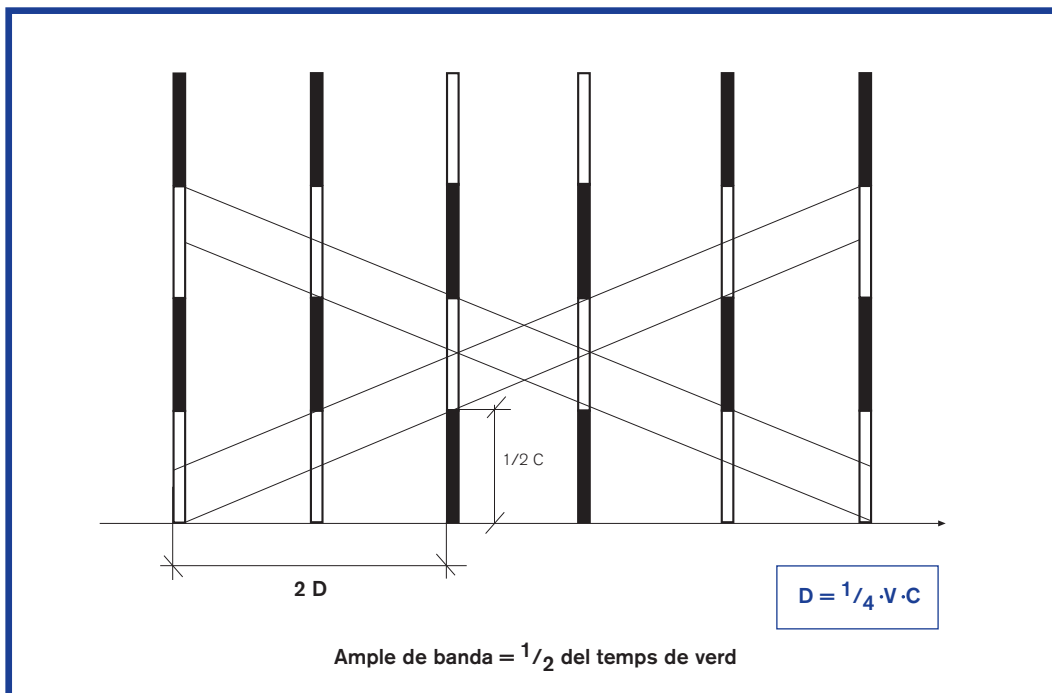
Les distàncies entre interseccions relatives a les condicions dels exemples anteriors serien el doble, 750 metres per al cicle de 60 segons i 1.000 metres per al cicle de 80. Veiem que es requereixen distàncies excessivament elevades.

A pesar d'això, el sistema simultani s'utilitza sovint per coordinar carrers de doble sentit, tal com veurem més endavant. Té, però, l'inconvenient que propicia l'increment de velocitats en condicions de trànsit fluid.

Sistema alternat doble

Aquest sistema de coordinació permet un ample de banda amb un valor que és la meitat del temps de verd, amb distàncies entre interseccions mes reduïdes. S'alternen dues cruïlles en verd i, a continuació, dues cruïlles en vermell. La distància és la meitat que en el sistema alternat, però l'ample de banda també es redueix a la meitat del temps de verd.

Figura 17: Sistema alternat doble



Les distàncies entre interseccions en els exemples anteriors serien de 187 metres per al cicle de 60 segons i de 250 metres per al cicle de 80 segons.

Sistema d'optimització geomètrica

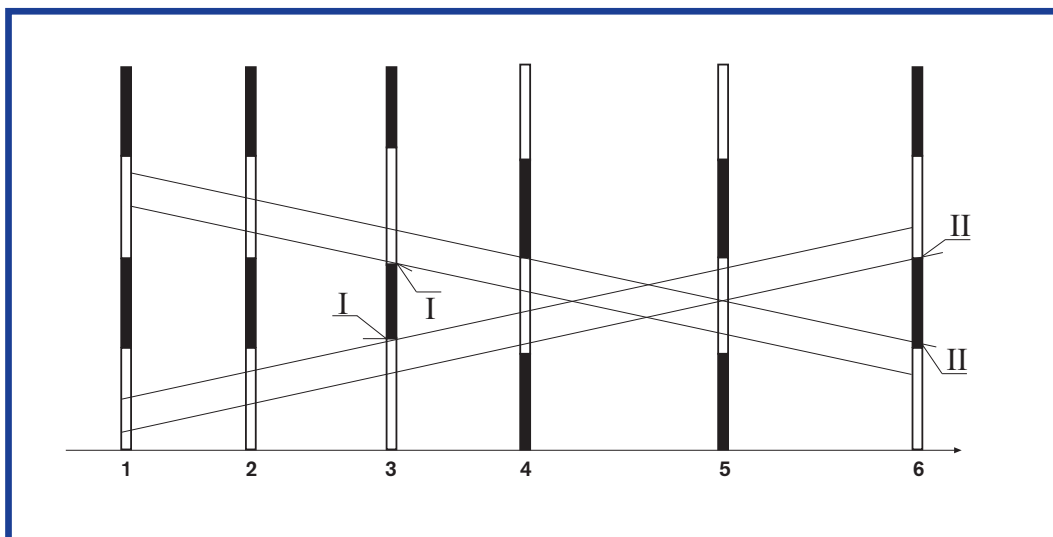
Es pot plantejar el problema genèric de disseny de coordinació d'un carrer de doble sentit en termes de maximització de l'ample de banda, cosa que implica un procediment de càlcul basat exclusivament en la situació geomètrica de les interseccions al llarg del carrer i en els temps de verd i el cicle dels semàfors. En aquests càlculs no es considera el nivell de trànsit i, per tant, les ones verdes obtingudes poden resultar insuficients per contenir el trànsit existent.

Malauradament, els amplex de banda que s'obtenen en les situacions normals són molt reduïts i la capacitat de l'ona és insuficient durant les hores de trànsit normal del dia. És per això que aquest procediment normalment només s'adequa a les condicions de trànsit nocturn.

coordinació d'interseccions

El mètode de càlcul el defineix l'article de D. C. Little i J. T. Morgan "Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth" (Ops. Res., 1964, 12(6), 896-912). Es tracta d'un procediment iteratiu en què per a cada parella possible de cruïlles es proven les dues situacions de desfasament corresponents a la simultaneïtat i alternança de verd-vermell, i es van seleccionant les que produeixen el màxim ample de banda. Per al càlcul amb ordinador es pot utilitzar el programa PASSER.

Figura 18: Ona verda en doble sentit



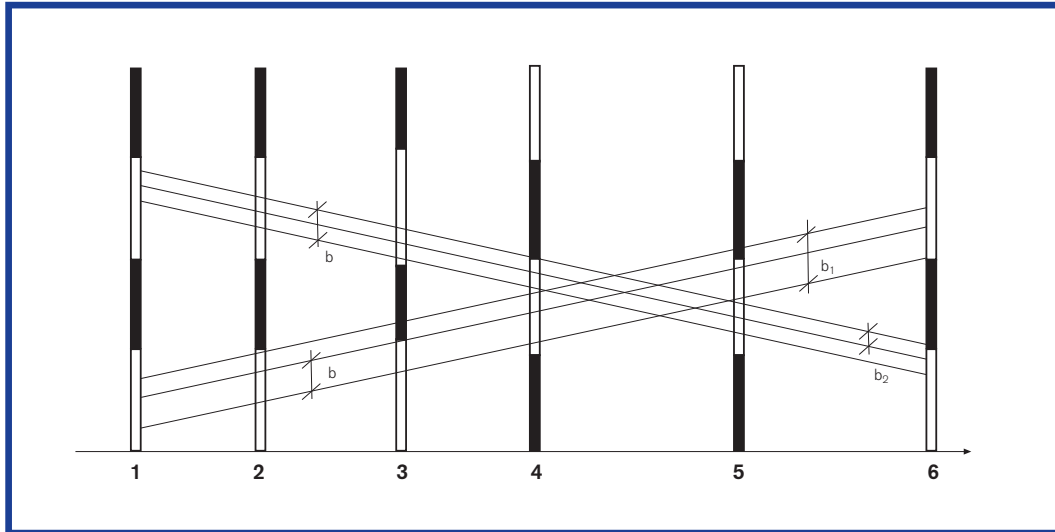
La figura presenta el resultat d'optimitzar l'ample de banda d'un carrer de doble sentit de circulació. Hi apareixen dues ones verdes simètriques, amb ample de banda idèntic. Els punts indicats per I en la figura són els que limiten les ones en el seu costat extern (punts crítics tipus 1) i els assenyalats per II limiten les ones en el seu costat intern (punts crítics tipus 2). Les interseccions que no contenen punts crítics disposen d'un marge per moure el desfasament cap amunt o cap avall, sense tallar l'ona, i la ubicació final del verd es decideix en funció de les condicions del seu entorn. Veiem ja en aquest dibuix que l'ample de banda de cada ona és aproximadament la tercera part del temps de verd.

Si anomenem b l'ample de cada banda, l'ample total és $B = b + b$. En el cas que sigui necessari millorar l'ona en un dels sentits, es pot incrementar l'ample en aquell sentit, disminuint la mateixa quantitat en el sentit contrari (mantenint el valor total de la suma d'amples de banda):

$$B = b + b = b1 + b2$$

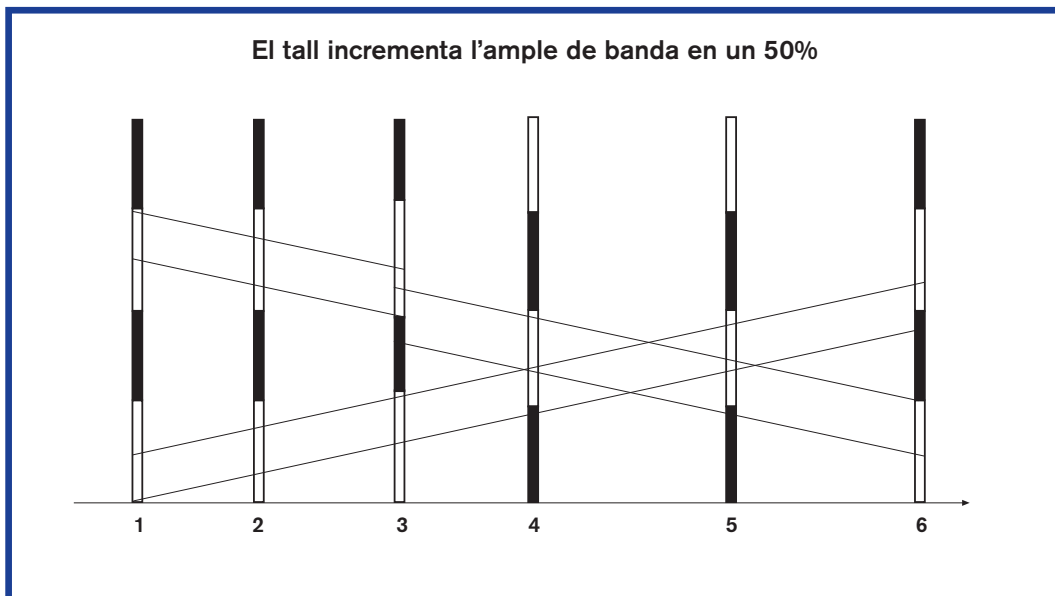
En la figura següent es presenten les ones verdes descompensades.

Figura 19: Bandes descompensades



Anteriorment hem indicat que, normalment, el flux de trànsit no es pot contenir en amplituds de banda tan reduïts, ja que en aquests casos cap vehicle arriba a utilitzar la progressió dissenyada al llarg del carrer. S'acostuma a millorar el disseny prenent la decisió de tallar l'ona verda en alguna de les interseccions del recorregut, per aconseguir amplituds factibles en els trams d'ona verda resultants. La figura següent presenta un possible disseny de talls sobre les ones verdes anteriors.

Figura 20: Ample de banda amb talls



coordinació d'interseccions

Les intensitats de trànsit en artèries de doble sentit acostumen a suportar moviments pendulars, canviant el sentit més carregat entre l'hora punta del matí i de la tarda, i en algun altre interval del dia. Convé adequar l'ample de banda a aquestes situacions.

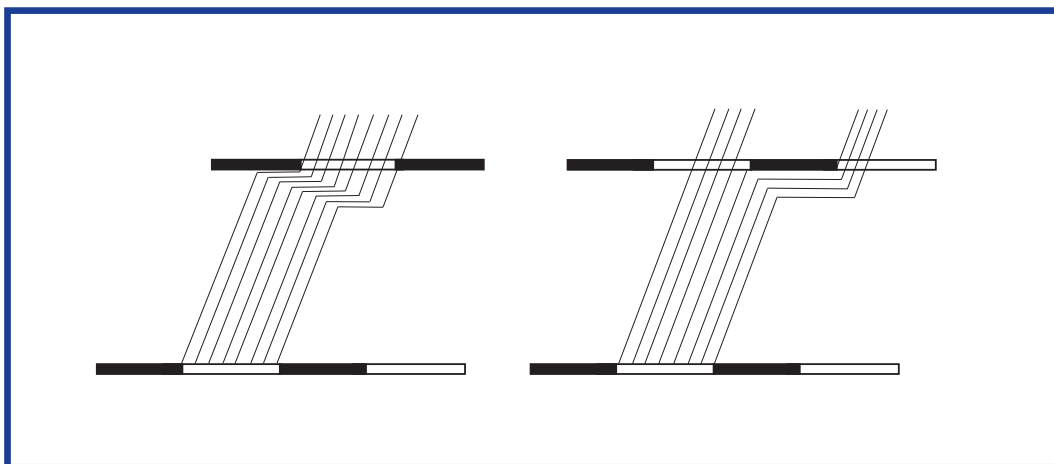
Disseny per a demores mínimes (sistemes analítics)

L'objectiu de la coordinació en ona verda és proporcionar una progressió de pas sense aturades al grup de vehicles que circula per un carrer, que perd tota l'eficàcia quan el volum de trànsit sobrepassa la capacitat de la banda de pas.

Els procediments analítics de disseny de la coordinació utilitzen directament una modelització del comportament del trànsit quan passa per un semàfor per calcular els temps de demora i el nombre d'aturades que es produeixen, i determinen la coordinació de l'artèria mitjançant un procés de minimització de les demores o fent intervenir també el nombre d'aturades en la fórmula que defineix el valor d'eficàcia que cal minimitzar. Són, per tant, procediments que reflecteixen directament el comportament dels grups de vehicles. La precisió i èxit del procés depèn de la fidelitat amb què es simulen les demores, aturades i cues que es produeixen davant una intersecció amb semàfors, així com del moviment dels grups de vehicles entre interseccions.

Si considerem velocitats iguals per a tots els vehicles i no representem les acceleracions i desacceleracions a les aturades, la figura següent presenta els models de comportament en les dues situacions típiques: la primera, arribada de vehicles en vermell i la segona, grup de vehicles que arriben els primers en verd i els últims que han d'aturar-se en el vermell. En la figura es pot visualitzar el temps de parada per vehicle, el nombre de vehicles que s'aturen i la longitud de la cua.

Figura 21



L'arribada d'un grup de vehicles a una intersecció depèn de l'instant de sortida de la intersecció anterior, que normalment coincideix amb l'inici de verd del semàfor i del temps de recorregut en el tram entre interseccions. I la situació del verd del semàfor d'arribada, definida pel desfasament relatiu en relació amb la intersecció anterior, determina les demores i aturades que es produeixen.

Així mateix, aquest desfasament defineix la sortida del trànsit en sentit contrari cap a la intersecció anterior i l'estat de llums a l'arribada a aquella intersecció determina les demores i aturades en l'altre sentit. Els desfasaments són, per tant, les variables que defineixen les demores, i la coordinació òptima queda definida pels desfasaments que produeixen demores mínimes a tota l'artèria (o minimitzen una altra funció d'eficàcia que integra demores i aturades).

Els procediments de càlcul utilitzats a les artèries són extensibles, o similars, als que s'utilitzen per al càlcul dels desfasaments en una xarxa de carrers, i, per tant, els presentarem a l'apartat següent relatiu a xarxes, indicant els programes més coneguts de disseny amb ordinador.

En el cas concret d'un tram de carrer en doble sentit de circulació, la funció que representa la suma de demores en els dos sentits en funció del desfasament té un valor mínim que coincideix amb la coordinació òptima en el sentit de més intensitat de trànsit. Es considera, per tant, que una gestió possible en artèries de doble sentit consisteix a instal·lar una coordinació adequada en el sentit més carregat, deixant l'altre sentit com quedi. Evidentment cal disposar de diferents plans de coordinació en les hores punta del matí i de la tarda, i possiblement altres plans per a hores intermèdies i hores nocturnes. La coordinació en sentit únic d'artèries de doble sentit és molt adequada quan les diferències d'intensitat entre els dos sentits són elevades. Si la diferència no és gaire gran produeix un efecte d'ineficàcia i mal funcionament als conductors del sentit penalitzat, i cal recórrer a algun compromís.

3.4 Xarxes d'interseccions

A les àrees urbanes extenses, i al centre de les ciutats més petites, les vies amb semàfors es creuen formant una xarxa de carrers equivalent a un graf pla en què els nusos són interseccions semaforitzades. En aquest apartat parlarem dels procediments i programes d'ordinador per dissenyar la coordinació d'aquestes xarxes.

La coordinació al llarg d'un carrer o d'un itinerari qualsevol de la xarxa es pot considerar lliure o independent i subjecta als criteris de càlcul d'artèries indicats fins al moment. D'aquesta forma es podria dissenyar la coordinació de carrers que es creuen únicament en una intersecció. El problema apareix quan es tanca un bucle en el graf representatiu de la xarxa, ja sigui per intentar coordinar una illa completa o per coordinar un conjunt de trams que formen un itinerari tancat dins del graf. De fet, en tancar un itinerari arribem a una intersecció que ja tenia el seu

coordinació d'interseccions

desfasament definit inicialment i no hi podem introduir el nou desfasament necessari per coordinar el carrer que arriba a aquesta intersecció tancant el bucle. El primer principi a l'hora de dissenyar la coordinació d'una xarxa és, per tant, que es poden coordinar lliurement tots aquells trams (o arcs del graf) que no tanquen un bucle.

La coordinació d'una xarxa es pot abordar d'una forma pràctica i immediata definint una jerarquia en les vies que la formen i coordinant aquests carrers per ordre d'importància, introduint talls de coordinació en punts adequats quan s'arriba a tancar un bucle. La jerarquia dels carrers la defineix, en principi, la densitat de trànsit, encara que es poden considerar també criteris de distància entre interseccions (les distàncies curtes exigeixen una bona coordinació), d'importància dels itineraris globals en què s'inclouen, d'utilitat per al transport públic o consideracions d'apreciació local.

En un segon nivell d'ajust o afinament de la coordinació, es pot repartir l'excés o dèficit de desfasament en un tall de coordinació entre diversos o tots els trams de l'itinerari o bucle afectat, empitjorant la coordinació d'aquests trams, amb l'objectiu de reduir la importància o els efectes del tall de coordinació inicial. En el límit, i si aquest tall es pot distribuir en un bucle amb molts trams, la incidència sobre cada tram seria molt petita.

En xarxes amb distàncies curtes entre interseccions la coordinació resulta molt crítica, ja que en els trams de tall es formen cues que en hores punta poden arribar a la intersecció d'entrada en el tram i bloquejar-la, afectant el pas del carrer transversal, amb el perill d'estendre la congestió a tota una zona. En aquests casos cal reajustar el conjunt per evitar aquests problemes. La longitud de les cues augmenta amb el cicle, de manera que en xarxes amb trams curts s'han d'evitar cicles llargs. La xarxa de carrers de l'Eixample de Barcelona té una distància entre interseccions de 130 metres i un cicle diürn de 90 segons, que es considera límit per a una correcta gestió d'aquesta xarxa.

Portant aquestes consideracions de coordinació de xarxes a una solució analítica, caldrà assignar una funció d'importància a cada tram, depenent de la intensitat de trànsit i altres variables, i llançar un procediment, normal en teoria de grafs, de càlcul de l'arbre de funcions màximes dins del graf. Una vegada reduït el graf a un arbre (sense bucles), s'han de coordinar en forma lliure els trams de l'arbre.

La complexitat d'aquestes xarxes, i el desig de trobar sistemes analítics de minimització de demores i aturades del trànsit, basats en models de comportament del trànsit i en el càlcul amb ordinador, ha portat a desenvolupar diversos models i programes. El sistema més reconegut per a aquests càlculs és TRANSYT. El programa SYNCHRO també resulta molt eficaç i fàcil de manejar. En els propers apartats comentarem tots dos sistemes. L'objectiu d'aquests programes informàtics és dissenyar completament els temps de funcionament dels semàfors d'una zona, per a unes condicions de trànsit donades. Efectuen, per tant, el disseny del **pla de temps de regulació** de la zona, que comprèn: el temps de cicle de funcionament (cicle comú o la meitat del cicle), el repartiment de temps de cada intersecció i el desfasament de cada intersecció. En interseccions de tres fases principals o més aquests programes seleccionen també la seqüència de fases òptima.

3.5 Programa TRANSYT

TRANSYT és un mètode de disseny de plans de temps de regulació de semàfors, amb l'objectiu d'habilitar el pas de fluxos de trànsit a través d'una xarxa d'interseccions amb la mínima impedància. El mètode està implementat en un programa informàtic. La impedància queda reflectida per les demores i aturades que es produeixen al pas dels vehicles. I aquesta definició genèrica correspon a qualsevol altre programa de càlcul de plans de regulació, com SYNCHRO.

El mètode TRANSYT el va desenvolupar el Road Research Laboratory d'Anglaterra, i es va presentar a l'article de D. I. Robertson: "Transyt: a traffic network study tool" (RRL Report LR 253, any 1969).

La primera versió del programa informàtic TRANSYT és de l'any 1967, a la qual van seguir diferents versions que hi incorporaven millores. En especial, el TRANSYT/5 (1972) va permetre modelar el comportament d'autobusos i tramvies, amb les seves parades dins de trams, i introduir aquests vehicles en l'optimització, permetent implementar criteris de prioritat del transport públic. Altres versions van millorar les interfases i les sortides d'informes, i van permetre obtenir dades del cost de les demores i aturades i del consum de combustible en les sortides d'informació.

Els components del model que interessa distingir són: la definició de la xarxa, el model de trànsit, l'índex d'eficàcia, el procediment d'optimització, la selecció de cicle i els informes de sortida.

La **xarxa de carrers** es representa mitjançant un graf format per nusos connectats per arcs. Cada intersecció semaforitzada es representa amb un nus i cada moviment de trànsit en un sentit entre dos nusos es representa amb un arc. L'arc conté la definició del nombre de carrils i les característiques geomètriques i de trànsit, i els paràmetres complementaris necessaris. En cada arc es defineix la distribució d'intensitats en la intersecció, indicant les intensitats del moviment recte i els moviments de gir, així com la intensitat de saturació de l'accés a la intersecció, la longitud de l'arc i la velocitat mitjana dels vehicles. Es poden definir diferents arcs entre dos nusos per diferenciar, per exemple, un moviment de gir amb semàfor independent i/o carril diferenciat, o un carril de transport públic.

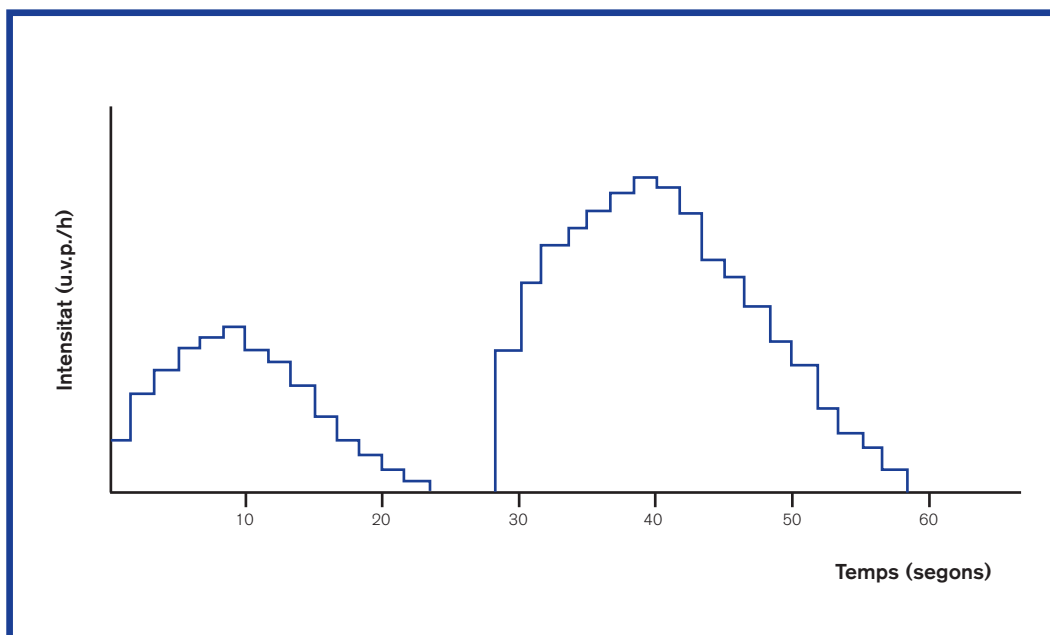
El **model de trànsit** de TRANSYT està dirigit a la representació dels moviments de trànsit a l'arribada i sortida de la intersecció, i afegeix un procediment per tenir en compte la dispersió que es produeix en els grups de vehicles en el trajecte entre dues interseccions.

El trànsit d'entrada o de sortida de la intersecció es representa amb un "perfil cíclic". El cicle es divideix en intervals de dos o tres segons i la intensitat es defineix en veh./s relatius a cada interval, formant una corba escalonada en un espai intensitat-temps (veg. figura 22). Es considera que aquesta distribució d'intensitats de trànsit es manté constant en tots els cicles, encara que s'agreguen càlculs o fórmules per tenir en compte la dispersió sobre el valor mitjà de les intensitats concretes que arribaran en cada cicle. En funció de la situació del temps de verd de l'accés dins

coordinació d'interseccions

del cicle, i de la intensitat de saturació, es determina el perfil cíclic de la sortida de la intersecció, que s'haurà de traslladar cap a les interseccions següents. I en aquest procés de conversió del perfil d'entrada a la intersecció en el perfil de sortida es determinen les demores, aturades i longituds de cua dels vehicles.

Figura 22: Perfil cíclic



El trasllat del perfil de sortida d'una intersecció a la següent, mitjançant el recorregut dels vehicles pel tram entre interseccions, s'efectua mitjançant una fórmula de dispersió de grups de vehicles aplicant al perfil un allisament exponencial en funció del temps mitjà de trajecte en l'arc. La fórmula de dispersió s'ha obtingut experimentalment i s'utilitza per simular l'efecte dels comportaments individuals dels vehicles, especialment quant a les diferències de velocitats.

El procés d'optimització consisteix en la minimització d'un índex d'eficàcia (IE), que es defineix mitjançant una fórmula de ponderació de la importància relativa de les demores i les aturades en el procés. La fórmula de càlcul de l'índex és la següent:

$$IE = \sum_{i=1}^N w_i d_i + K/100 \cdot k_i p_i$$

N = nombre d'arcs
 W = cost total per hora de demora
 K = cost total per 100 aturades de vehicles
 w_i = pes de les demores en l'arc

d_i = demores en l'arc
 k_i = pes de les aturades en l'arc
 p_i = nombre de aturades en l'arc

El sistema d'optimització de TRANSYT procura minimitzar aquesta funció de demores i aturades. En el límit, si la funció fos zero, el trànsit no s'aturaria mai i s'haurien aconseguit ones verdes en totes les direccions. Normalment és impossible arribar a aquesta perfecció, però el programa TRANSYT detecta el mínim valor possible de l'índex d'eficàcia.

Els valors de W i K s'han definit com a costos mitjans per donar una referència del seu significat i una ajuda per definir-los. Per consegüent, la funció d'eficàcia s'expressa també com el cost total produït per les demores i aturades en una hora. No obstant això, els valors absoluts d'aquests paràmetres no influeixen en el resultat de l'optimització de TRANSYT, que sols es veu afectat pels valors relatius de W i K . Donat que aquests valors s'han definit com a costos, també poden ajustar-se per minimitzar el consum global de combustible.

El **procediment d'optimització** de TRANSYT consisteix en la determinació del pla de temps de regulació que produeix un valor mínim de l'índex d'eficàcia. El procés calcula els desfasaments i repartiments de temps de les interseccions, però no calcula el cicle, que s'ha de definir prèviament, així com les interseccions que han de funcionar amb la meitat del cicle. Comentarem després l'ajuda que proporciona TRANSYT a l'hora de determinar el cicle òptim.

L'optimització de TRANSYT utilitza un procés iteratiu anomenat *hill climbing* ('ascens de muntanya'), encara que en aquest cas es tracta d'un descens fins a la vall, ja que l'objectiu és minimitzar. El procediment s'inicia amb el càlcul de l'índex d'eficàcia de tota la zona, considerant un pla de temps inicials de les interseccions, que es poden introduir en el programa o calcular-se automàticament amb criteris simples. Es defineix també un ordre o seqüència de procés de les interseccions. El tractament d'una intersecció s'efectua alterant-ne el desfasament en un valor fix de segons i calculant l'índex d'eficàcia (IE) de tota la xarxa obtingut amb aquest canvi. Si l'IE disminueix, es continuen efectuant canvis de desfasament en aquest sentit fins a arribar a un valor mínim d'IE. En el cas que l'IE del primer interval augmenti, cal procedir de la mateixa manera mitjançant intervals en sentit contrari. I una vegada definit el desfasament d'una intersecció, cal continuar amb la cruïlla següent en la seqüència, fins a calcular tota la xarxa.

L'ajust dels repartiments de temps de fases òptims s'efectua dins del mateix procediment, alterant els temps de les fases en petits intervals.

Aquest procés té l'inconvenient que l'òptim obtingut pot ser totalment local i existir un òptim de menor IE en un altre punt. Per evitar-lo, es llança l'algoritme de càlcul de tota la xarxa diverses vegades, amb diferents valors de l'interval de temps utilitzat per alterar els desfasaments, amb l'objectiu de provar diferents possibilitats de punts òptims (permetent al sistema la possibilitat d'investigar un IE mínim en valls diferents). Una organització típica d'etapes de càlcul és la següent:

coordinació d'interseccions

Etapa	Interval (1/50 cicles)	Tipus d'optimització
1	7	només desfasaments
2	20	"
3	1	repartiments de temps
4	7	només desfasaments
5	20	"
6	1	"
7	1	repartiments de temps
8	1	només desfasaments

El procés d'optimització de TRANSYT s'efectua sobre una xarxa amb tots els cicles de les interseccions que determinen, normalment, un cicle comú, encara que TRANSYT admeti també un cicle meitat, incloent-hi un terç del cicle principal. El **disseny del temps de cicle**, però, és un procés complex i amb una metodologia poc definida. Hi ha procediments de càlcul i optimització del cicle d'una intersecció aïllada, però quan s'estudia una xarxa d'interseccions apareixen múltiples possibilitats. En principi, cada intersecció exigeix un cicle diferent, amb una finestra àmplia de valors, i encara que amb aquests cicles aïlladament funcionarien de manera correcta, els beneficis afegits de la coordinació demanen utilitzar un cicle únic per a totes les interseccions. I, d'altra banda, l'enginyer pot considerar o estudiar la divisió de la zona total en subzones formades per grups d'interseccions que funcionen amb un cicle local i que, per tant, produeixen una descoordinació en les fronteres entre subzones. O pot intentar avaluar si, deixant amb un cicle meitat algunes interseccions i les que demanen un cicle baix funcionant com a aïllades, l'índex d'eficàcia resulta inferior al que correspon a un cicle comú. Aquestes consideracions poden produir moltes combinacions, que cal analitzar provant en TRANSYT les diferents opcions i/o utilitzant les ajudes de TRANSYT per seleccionar els cicles.

TRANSYT/13 incorpora un procediment molt avançat d'ajuda gràfica per seleccionar els cicles de funcionament. Presenta en abscesses els cicles en segons i en ordenades el valor de l'índex d'eficàcia total de la xarxa amb cada cicle, i altres valors complementaris per ampliar els criteris de decisió. Aquesta versió de TRANSYT, a més, és la primera en què el càlcul de l'índex d'eficàcia de la xarxa per a cada cicle s'efectua llançant el procés d'optimització complet per considerar la coordinació de les interseccions (en versions anteriors es consideraven les interseccions com a aïllades en el càlcul de l'índex d'eficàcia de cada cicle).

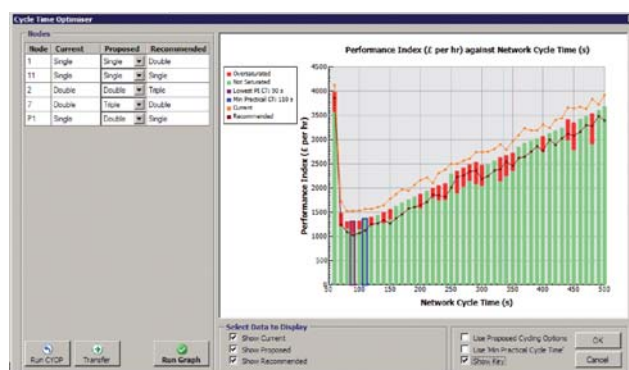


Figura 23

La informació de selecció de cicles presenta, al costat del gràfic indicat, una taula amb l'estat actual de cicle de cada intersecció (normal, meitat o un terç) i amb les solucions de cicle recomanades per TRANSYT, i en una altra columna la possibilitat de seleccionar el cicle proposat per l'enginyer. En la corba es presenten els índexs d'eficàcia corresponents a les tres possibilitats de cicle i es marca en vermell, sobre la corba de cicles proposats, el percentatge de trams sobresaturats.

TRANSYT produeix **informes de sortida** molt complets amb els resultats del procés d'optimització, en forma de llistes amb informació relativa a cada intersecció i cada arc entre interseccions, i també informes globals amb les variables resultants sobre tota la xarxa, subconjunts d'interseccions, o itineraris o eixos especificats.

Els informes detallats relatius a nusos (cruïlles) i arcs contenen tota la informació necessària per conèixer les dades inicials de definició de demandes, paràmetres, fases, característiques geomètriques, etc., i tots els resultats de temps de regulació i variables que defineixen el funcionament del trànsit en cada cruïlla, accés o arc: intensitat de trànsit, intensitat de saturació, grau de saturació, temps mitjà de recorregut, demora mitjana, cost de la demora, aturades, cost de les aturades, diferents valors i característiques de les cues, demora total, aturades totals, índex d'eficàcia i algunes altres.

Els informes globals ofereixen una informació més compacta que inclou els valors següents:

- Percentatge d'arcs sobresaturats, relatiu als arcs amb grau de saturació que excedeix un límit establert per l'usuari.
- Arc amb el màxim grau de saturació.
- Distància total que recorren els vehicles en una hora expressada en u.v.p.-km/h.
- Temps total utilitzat en els recorreguts dins de la xarxa durant una hora, expressat en u.v.p.-h/h.
- Velocitat mitjana de circulació a la xarxa (km/h).
- Consum de combustible (l/h). Es subdivideix en tres components: combustible utilitzat en marxa, durant les parades, i per les arrencades i aturades.

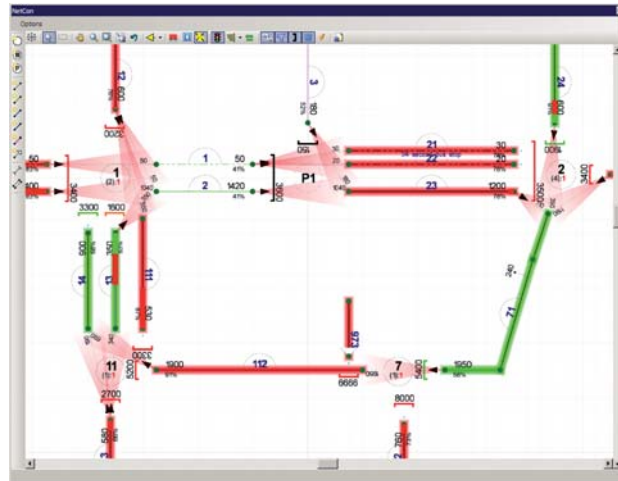
En aquests informes globals es llisten les variables indicades amb relació als conjunts d'arcs següents:

- Tots els arcs
- Arcs amb autobusos

coordinació d'interseccions

- Arcs amb tramvies
- Tots els arcs que no són d'autobús ni de tramvia

TRANSYT produeix, a més, sortides gràfiques amb informació detallada de l'evolució del moviment de vehicles en un arc i representacions de gairebé totes les variables en el graf-esquema de la xarxa.



3.6 Programa SYNCHRO

SYNCHRO és també un mètode de disseny de plans de temps de regulació de semàfors, amb l'objectiu d'habilitar el pas d'intensitats de trànsit a través d'una xarxa d'interseccions amb la mínima impedància. El mètode està desenvolupat en un programa informàtic. La impedància queda reflectida per les demores i aturades que es produeixen al pas dels vehicles.

El programa SYNCHRO l'ha desenvolupat l'empresa TRAFFICWARE d'Albany (EUA) (www.trafficware.com), que el comercialitza actualment. L'empresa va iniciar les seves activitats el 1994. El programa SYNCHRO de càlcul de plans de temps de semàfors i el programa SIM TRAFFIC de simulació microscòpica del pas de vehicles en una xarxa d'interseccions són els seus productes bàsics de programari de trànsit.

Aquests dos programes estan estretament vinculats per utilitzar una base de dades comuna i permetre a l'usuari passar d'un programa a l'altre amb gran facilitat, cosa que permet revisar com si fos una simulació (en SIM TRAFFIC) els resultats del càlcul de pla de temps realitzat amb SYNCHRO.

El programa SYNCHRO es va dissenyar des del seus inicis com a eina interactiva totalment gràfica i de fàcil utilització i en les diferents versions ha anat perfeccionant les capacitats de modelització i càlcul, i les capacitats gràfiques.

Una característica especial de SYNCHRO, que perfila la seva vocació gràfica, és la definició de l'organització de dades a partir de l'orientació geomètrica dels sentits dels moviments en el plànol, que queda reflectida en el dibuix del graf d'interseccions. Per tant, SYNCHRO s'inicia amb el dibuix de la xarxa sobre la base en format DXF del plànol de la ciutat o zona. Les interseccions dels arcs de la xarxa són les cruïlles i sobre cada cruïlla es defineixen de manera interactiva les característiques dels moviments. La base de dades resultant identifica cada element per la seva orientació en el plànol, encara que també assigna automàticament identificadors numèrics, que es poden modificar manualment.

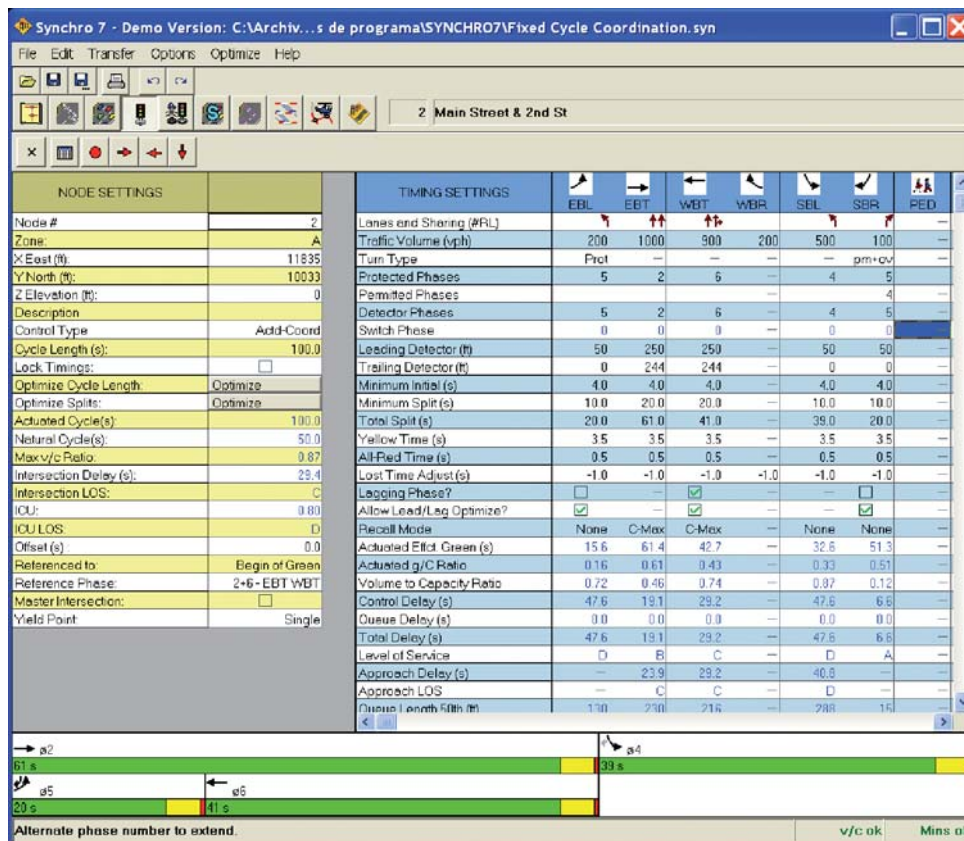


Figura 24

TRAFFICWARE inclou amb SYNCHRO la definició d'una base de dades dissenyada per transferir dades entre diferents utilitats de programari i, per tant, amb pretensió d'eina estàndard d'anàlisi de trànsit. Per això s'anomena UTDF (Universal Traffic Data Format). Les dades s'emmagatzemen en format text, fàcilment manejable amb Excel, i els programes s'inclouen per processar aquestes organitzacions de dades convertint-los d'un arxiu de SYNCHRO a UTDF, i viceversa. Un dels objectius d'UTDF és crear arxius amb totes les dades d'intensitats de trànsit d'una zona (sobre un dia, una setmana o un any) i els plans de temps dels diferents intervals horaris, dels quals es pot generar amb facilitat un arxiu de SYNCHRO per a un determinat pla amb les intensitats d'un interval horari obtinguts tots dos de la base de dades UTDF.

coordinació d'interseccions

El **model de trànsit** de SYNCHRO utilitza, en principi, un desplaçament simple de grups de vehicles entre dues interseccions a la velocitat de disseny, sense factor de dispersió. El procediment de determinació de les demores és molt elaborat i es basa en la variabilitat de les intensitats que arriben a la intersecció en cada cicle, durant els 15 minuts d'anàlisi, que es considera que es distribueixen segons una llei de Poisson. Els càlculs de les demores es fan separatament sobre cinc escenaris percentuals d'intensitats, corresponents als percentatges del 90%, 70%, 50%, 30% i 10% en la llei de distribució d'arribades. És a dir, la intensitat representativa de l'escenari 90% correspon a aquella superada només en el 10% (100 - 90) de les intensitats, i de la mateixa manera per a la resta dels escenaris. Per tant, en els càlculs es tenen en compte les situacions més crítiques (90%) i els cicles en què arriben intensitats més reduïdes (10%), i els altres valors intermedis de carrega en el cicle. Les demores es calculen per a les intensitats corresponents a cada escenari percentual i s'utilitza el valor mitjà com a demora en l'accés.

L'optimització dels desfasaments de coordinació s'efectua calculant les demores pel procediment d'escenaris percentuals indicat, analitzant separatament la demora que es produeix en la intensitat de trànsit corresponent a cada escenari, i es determinen els desfasaments que produeixen demores mínimes a la xarxa per un procediment iteratiu similar al de TRANSYT. El procediment inclou també diverses etapes programables, en què s'optimitzen desfasaments de cada intersecció en algunes etapes i en altres etapes es busquen de manera automàtica grups d'interseccions molt relacionades, i es fixen els seus desfasaments interns per integrar-los a l'anàlisi de desfasaments de la xarxa. SYNCHRO ofereix una representació gràfica molt detallada de l'esquema espai-temps de la situació dels verds dels semàfors d'una artèria i de la progressió dels fluxos de trànsit.

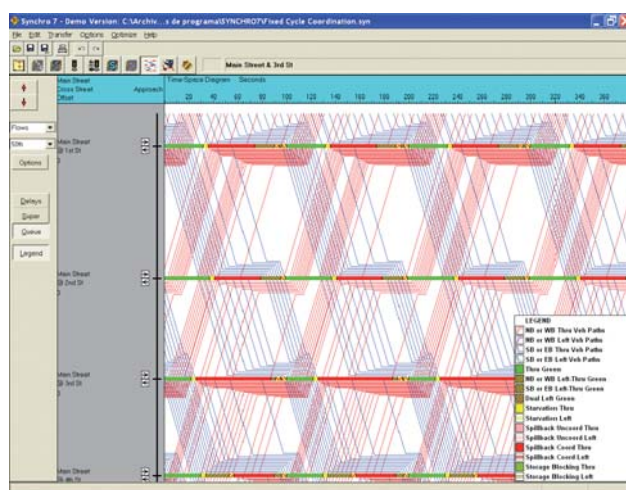


Figura 25

Abans de calcular els desfasaments, s'ha de determinar el cicle de funcionament de tota la zona o de cada subzona. SYNCHRO aporta una eina potent de selecció de cicles, que permet un càlcul automàtic seleccionant el cicle amb menor índex d'eficàcia o una determinació manual basada en la tabulació d'un conjunt de variables globals relatives a cada cicle provat, entre les quals s'inclou l'índex d'eficàcia (IE).

L'índex d'eficàcia es determina segons la fórmula següent:

$$IE = (D + St * 10 + QP * 100) / 3600$$

IE = Índex d'eficàcia
 D = Demora total (s)
 St = Parades de vehicles (vph)
 QP = Penalització de cues (nombre de vehicles afectats)

La penalització de cues té en compte els arcs en què la longitud de cua és superior a la distància entre les interseccions, produint-se situacions de bloqueig a la cruïlla de sortida. El valor de *QP* coincideix aproximadament amb el nombre de vehicles afectats pel bloqueig.

Com s'ha indicat anteriorment, el cicle òptim, quan es determina automàticament, correspon al valor mínim de l'IE entre tots els cicles provats. El sistema de selecció sol·licita primer un rang de cicles de prova i un valor d'increment de cicle en segons (per exemple, cicles entre 80 i 120 segons en intervals de 5).

Si es sol·licita selecció manual de cicle, el sistema calcula tots els cicles i presenta una taula de sortida amb un conjunt de variables que ajuden a l'enginyer a determinar el cicle: índex d'eficàcia, demores totals, demores per vehicle, aturades totals, aturades per vehicle, consum de combustible, penalització de cua, velocitat mitjana de circulació i d'altres.

Cycle Length	Perform Index	Queue Delay (s)	Total Delay (s)	Delay / Veh (s)	Total Stops	Stops / Veh	Fuel (g)	Unserv Vehicle	Dilemm Vehicle	% Dilem Vehicle	Average Spd (mg)
80	436	0	379	41	20592	0.62	697	975	1093	3%	11
85	413	0	355	38	20688	0.62	679	815	1030	3%	12
90	393	0	334	36	21016	0.63	667	626	934	3%	12
95	426	32	366	40	21583	0.65	699	565	786	2%	12
100	388	4	334	36	19621	0.59	650	471	885	3%	12
105	400	28	344	37	20166	0.60	664	342	775	2%	12
110	392	8	334	36	20788	0.62	662	281	755	2%	12
115	383	7	329	36	19265	0.58	643	222	853	3%	13
120	402	27	345	37	20530	0.62	670	213	797	2%	12

Zone: (all)

OK Cancel

Cycle Length: 115
 Number of intersections: 8
 Uncoordinated: 0
 Half Cycled: 0
 Locked Other: 0

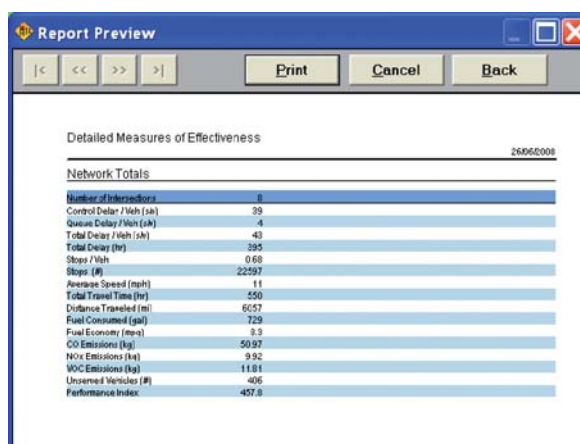
Figura 26

coordinació d'interseccions

Els informes de sortida de SYNCHRO corresponen, en principi, a totes les variables relatives a cada cruïlla, que es presenten en taules sobre les finestres gràfiques i que es poden llistar, així com els llistats gràfics dels esquemes de coordinació. A més, disposa d'una presentació gràfica de l'esquema de graf de tota la zona o de qualsevol part, en solitari o sobre la base cartogràfica de la ciutat, i sobre aquest esquema es pot seleccionar qualsevol de les variables més representatives del funcionament de la zona: temps de verd, inici de verd, demores i relació intensitat/capacitat en cada accés, cicle, nivell de servei i demores totals en cada intersecció.

SYNCHRO ofereix també informes relatius a valors globals o totals sobre una zona, una subzona o una artèria, amb les variables següents:

- Nombre d'interseccions
- Demora mitjana per vehicle, en segons/vehicle
- Demora total, corresponent a la suma de demores de tots els vehicles que circulen per la xarxa durant una hora (en hores de demora)
- Nombre d'aturades per vehicle
- Aturades totals dels vehicles en una hora
- Velocitat mitjana, en vehicles/hora. Correspon a la distància recorreguda dividit pel temps empleat, incloent-hi les demores
- Temps total utilitzat en els recorreguts dins de la xarxa durant una hora (en hores)
- Distància total recorreguda pels vehicles durant una hora (en quilòmetres)
- Consum de combustible de tots els vehicles durant una hora (en litres)
- Emissions de CO, NOx i VOC (en kg)
- Vehicles en excés. Es refereix als vehicles que excedeixen la capacitat
- Penalització per cues
- Índex d'eficàcia



Detailed Measures of Effectiveness		2606000
Network Totals		
Number of Intersections	8	
Control Delay / Veh (s/h)	39	
Queue Delay / Veh (s/h)	4	
Total Delay / Veh (s/h)	43	
Total Delay (hr)	395	
Stops / Veh	0.68	
Stops (#)	22597	
Average Speed (mph)	11	
Total Travel Time (hr)	550	
Distance Traveled (mi)	6557	
Fuel Consumed (gal)	729	
Fuel Economy (mpg)	9.3	
CO Emissions (kg)	5937	
NOx Emissions (kg)	9.92	
VOC Emissions (kg)	1181	
Unserviced Vehicles (#)	406	
Performance Index	-457.9	

Figura 27

4

Plans de regulació d'una zona

4.1 Concepte de pla de regulació

El **pla de regulació** d'una zona el defineix un conjunt de variables bàsiques que determinen els temps de funcionament dels semàfors en totes les interseccions pertanyents a la zona.

Aquestes variables són:

- **Estructura de fases**, que defineix l'organització relativa del funcionament dels semàfors prefixant els moviments permesos en cada fase, l'ordre de les fases i altres paràmetres necessaris per al funcionament segur de l'estructura (aclarides, verds mínims, etc.). Normalment l'estructura de fases d'una intersecció es manté invariable amb qualsevol pla de funcionament. No obstant això, en determinades condicions pot interessar canviar l'estructura per millorar la inserció en les ones verdes de coordinació o per adaptar-se a la capacitat necessària per a moviments amb intensitats que varien molt d'un interval horari a un altre. El canvi d'estructura sols té sentit en interseccions amb tres fases principals o més.
- **Cicle** de funcionament de les interseccions (o de cada intersecció). Recordem que el cicle ha de ser idèntic en totes les interseccions que han de funcionar coordinades, o bé es pot admetre un cicle meitat en part de les interseccions, encara que hi pot haver una divisió en subzones amb cicle diferent dins d'una zona.
- **Repartiment de temps** de cada intersecció, que determina l'assignació de temps a cada fase dins del cicle.
- **Desfasament** de cada intersecció, que determina l'instant d'obertura de verd d'un semàfor de referència de la intersecció, en relació amb l'instant zero de l'inici del cicle general de tota la zona. El conjunt de desfasaments de les interseccions determina la coordinació entre elles.

El pla de regulació conté, per tant, l'organització de temps de funcionament dels semàfors dissenyats per adaptar-se a unes condicions de trànsit, efectuant-se tot el càlcul i desenvolupament dels components del pla amb l'objectiu d'optimitzar la regulació per a aquelles condicions.

En la definició de *condicions de trànsit* poden intervenir diferents components, encara que la variable més determinant és gairebé sempre la intensitat de trànsit en cada accés a les interseccions i la distribució d'aquesta intensitat en moviments dins de la intersecció (percentatges de gir o origen-destinació entre entrades i sortides en interseccions molt complicades).

Les intensitats de trànsit defineixen la situació de trànsit i els càlculs dels temps del pla s'han de fer considerant unes intensitats de trànsit definides i fixes. No obstant això, aquestes intensitats varien fortament al llarg del dia en qualsevol secció de carrer i, fins i tot dins d'una hora, hi ha variacions importants. Cal, doncs, definir les intensitats de càlcul o intensitats de referència utilitzades per dissenyar cada pla.

plans de regularització d'una zona

4.2 Interval horari de plans de regulació

L'equipament de regulació d'una zona normalment està capacitat per funcionar amb diversos plans de regulació predefinits, dissenyats per ser implantats cadascun durant un o diversos intervals horaris del dia laborable o de cap de setmana. Aquest mode de funcionament s'anomena *control per selecció horària de plans de regulació* i és la forma més estesa de regular els semàfors de les àrees urbanes.

En situacions d'equipament de regulació antic o sense capacitat de plans horaris, un únic pla funciona durant tot el dia i en dissenyar-lo s'ha de buscar un equilibri perquè sigui útil en condicions de trànsit tan diferents.

Un sistema de control de semàfors per selecció horària de plans de regulació requereix, per tant:

- Definir els intervals horaris que limiten les situacions diferenciades de trànsit, candidates a ser regulades amb un pla de regulació independent.
- Els plans de regulació assignats a cada una de les situacions o intervals horaris.

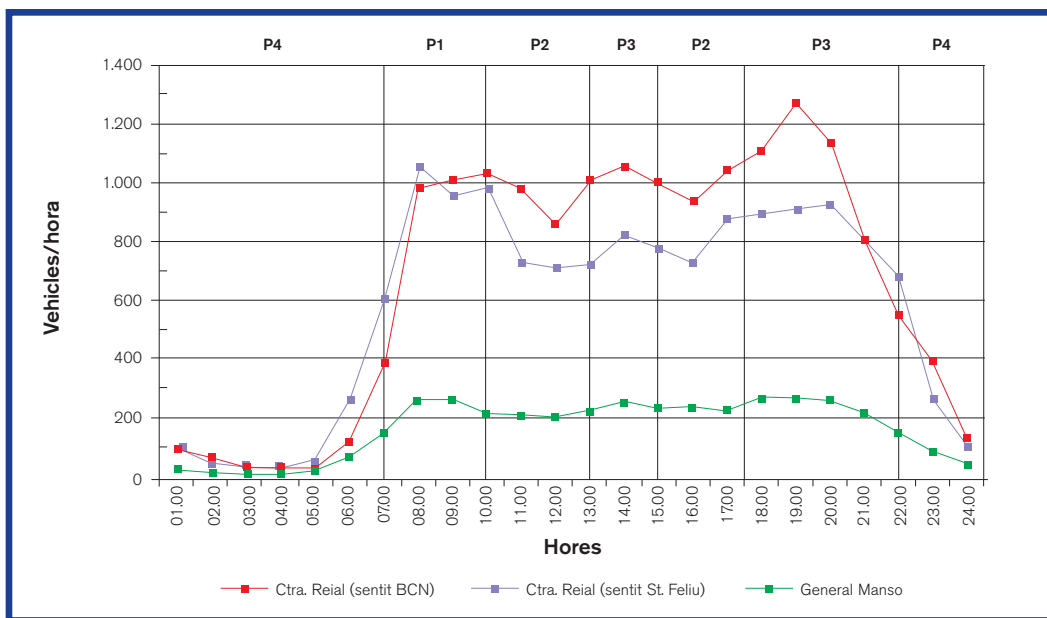
En aquest apartat estudiarem la sistemàtica de disseny dels intervals horaris i en el següent, la problemàtica que sorgeix a l'hora de definir les intensitats de càlcul de cada pla.

L'estudi d'intervals horaris es famitjançant l'anàlisi de les corbes de variació d'intensitat de trànsit al llarg del dia en seccions representatives de la xarxa de carrers. Normalment cal triar seccions dels itineraris principals i dels accessos a les interseccions més crítiques.

S'utilitzen corbes que reflecteixen la intensitat sobre cada hora al llarg d'un dia i convé disposar d'una corba representativa del dia laborable, una altra del dissabte i una altra del diumenge, per poder estudiar totes les condicions de variabilitat. És convenient que les corbes tinguin la màxima representativitat; en aquest sentit, es poden utilitzar corbes mitjanes de diversos dies.

Per determinar els intervals horaris s'utilitza un procediment d'anàlisi totalment gràfic i per això és convenient representar les corbes de diverses seccions en un únic gràfic. Es presenta un gràfic d'exemple.

Figura 28



En la figura els intervals horaris estan separats per línies verticals i sobre cada interval s'indica el nombre del pla que funcionarà. El P1 és el pla d'hora punta de matí, el P3 d'hora punta de tarda i també de migdia, el P2 d'hores no punta (de matí i de tarda) i el P4 de pla nocturn.

La separació d'intervals horaris correspon als punts en què es produeixen variacions fortes en les intensitats de trànsit, intentant aïllar situacions de trànsit estable. Es tenen en compte els criteris següents:

- La durada mínima d'un pla convé que sigui superior a una hora.
- La majoria de les estacions d'una zona han de tenir un comportament homogeni durant l'interval de manera individualitzada.
- Un punt de canvi no s'ha de situar en un entorn inferior a 30 minuts d'una punta acusada d'intensitat.
- Els plans corresponents a demanda alta (cicles llargs) no han d'actuar més de quatre hores seguides, excepte en el cas que aquesta demanda ho justifiqui clarament.

En principi, es podria considerar la hipòtesi que cada interval horari pot albergar un pla de regulació diferent, i estudiar després si alguns plans resulten gairebé idèntics. Tanmateix, per assegurar l'agilitat en l'explotació i el manteniment posterior del sistema, no és convenient augmentar innecessàriament el nombre de plans i resulta més eficaç fer una observació detallada de les corbes de trànsit dins de cada interval per detectar-hi similituds que permetin assignar un mateix pla a diversos intervals, tenint en compte que els plans d'hores punta s'han d'adaptar amb gran

plans de regularització d'una zona

precisió a les intensitats màximes i que en els plans d'hores vall, que no funcionen mai en condicions de saturació, es pot considerar que els marges de variació de les intensitats momentànies amb relació a les intensitats de referència de cada pla són superiors, de manera que es pot utilitzar un pla que presenta diverses condicions d'interval horaris.

A continuació de l'estudi dels intervals horaris i numeració dels plans per als dies laborables s'han d'analitzar les corbes de variació d'intensitats de dissabte i diumenge, amb l'objectiu de definir intervals i veure si és possible reutilitzar els plans ja definits per a dia laborable o bé cal definir algun pla nou per a puntes acusades de cap de setmana.

4.3 Intensitats de referència per al càlcul dels plans

Un cop definit el número de pla que funcionarà en cada interval horari es determinen les *intensitats de referència* o intensitats que s'utilitzaran per calcular cada pla en tots els punts de mesura.

Els programes de càlcul de plans de regulació com TRANSYT o SYNCHRO, així com els procediments manuals o heurístics, requereixen definir la intensitat de trànsit de cada accés a les interseccions. Dins de l'interval d'actuació de cada pla, i en cada punt de mesura, es produeix una variació important de la intensitat del trànsit, i cal seleccionar en cada cas una única intensitat.

Situant-nos sobre els intervals horaris corresponents a un pla de regulació, cal determinar, per a cada punt de mesura, una intensitat representativa per tal que els paràmetres del pla, calculats a partir d'aquestes intensitats, es corresponguin amb un funcionament adequat per a tot l'interval d'actuació.

En principi, pot semblar que la intensitat mitjana compliria aquesta funció, com a valor amb diferències mínimes en relació amb totes les intensitats de l'interval. Però la relació entre les càrregues de trànsit i les demores en els accessos no és lineal, sinó que tendeix en forma asimptòtica cap a les condicions de saturació total, augmentant el pendent de manera més acusada quan ens apropem a les intensitats màximes. En conseqüència, en els plans d'hora punta es selecciona la intensitat màxima com a intensitat per al pla. En els plans d'hores vall, en què no solen produir-se situacions de saturació, s'utilitzen intensitats més centrades.

Els criteris de definició de les intensitats de referència són, per tant, els següents:

- Intensitat màxima de l'interval horari en els plans d'hores punta.
- En els plans d'hores vall es pren la intensitat situada entre la intensitat mitjana i la intensitat màxima, avaluada gràficament sobre la forma de la corba de variació de trànsit, tot i que pot ser suficient agafar la intensitat mitjana de l'interval.

5

Centralització de la regulació de semàfors

Els semàfors de les zones urbanes funcionen normalment dins d'un *sistema de control centralitzat*, de manera que una gran part de les interseccions d'una ciutat queda connectada o en comunicació amb un ordinador o sistema d'ordinadors situats en un *centre de control de trànsit*, que disposa dels perifèrics necessaris per gestionar el sistema i altres elements per a la gestió integral del trànsit.

Els components d'un sistema centralitzat de regulació de semàfors són els següents:

- **Centre de control**, amb els ordinadors, pantalles gràfiques, impressores, equip de representació mural (opcional) i sistema de comunicacions amb els reguladors de semàfors.
- **Centrals de regulació**, situades al carrer, per concentrar i distribuir la comunicació entre el centre de control i els reguladors d'una zona. Les centrals de regulació permeten reduir el cable de comunicació i millorar la fiabilitat del sistema i aporten, a més, algunes funcions rutinàries de control dels reguladors. En tecnologies anteriors complien una funció de control en temps real dels canvis de fases dels reguladors i rebien de l'ordinador la informació de temps dels plans de regulació, o utilitzaven plans emmagatzemats en les seves memòries. Actualment s'utilitzen com a elements de comunicació transparent amb els reguladors, que reben directament les ordres i peticions de dades de l'ordinador central, i disposen, a més, de totes les dades de plans i paràmetres en les seves memòries. Les centrals de regulació es projecten per controlar entre 32 i 64 interseccions.
- **Reguladors locals** de les interseccions, amb la funció de controlar l'encesa dels semàfors a partir de les seves dades internes i comunicar-se amb l'ordinador central per enviar dades del seu estat i avaries i rebre ordres relatives a la regulació dels semàfors. Els reguladors reben també la informació dels detectors de la zona d'influència de la intersecció, preprocessen aquesta informació i l'envien a l'ordinador central, i en alguns casos utilitzen també aquesta informació per gestionar les actuacions directes de fases a escala local (interseccions actuades).
- **Semàfors** de cada intersecció connectats al regulador local.
- Opcionalment, **detectors** connectats al regulador local.

Tots aquests components estan evidentment relacionats a través dels sistemes de comunicació necessaris, que poden tenir tipologies distintes en els diferents nivells o, fins i tot, dins d'un mateix nivell per diverses causes.

centralització de la regulació de semàfors

Els sistemes físics de comunicacions que actualment s'utilitzen a Espanya per centralitzar el trànsit (ordinador - central de regulació - reguladors) són els següents:

- Cable de parells o de quadretes
- Fibra òptica
- Comunicació per ràdio digital

Els sistemes de centralització de semàfors han de fer les funcions de control i gestió del conjunt, entre les quals podem esmentar:

- Monitorització del funcionament de tots els elements del sistema
- Gestió del mode de funcionament dels semàfors
- Control de la regulació de trànsit de la zona
- Manteniment de l'hora en reguladors i centrals per garantir la coordinació (en sistemes de coordinació per hora del rellotge)
- Funcions de control dels temps o plans de regulació dels semàfors, en diferents nivells o tipologies d'actuació segons l'estratègia de regulació de cada sistema (veg. apartat 6. Estratègies de regulació de semàfors)
- Implantació de plans d'emergència, o de plans o temps de semàfors forçats directament per l'operador del sistema
- Manteniment centralitzat de les dades de programació de plans, fases i paràmetres de tots els reguladors
- Procediments de vigilància i actualització de les dades dels reguladors

6

Estratègies de regulació de semàfors

L'objectiu de regular el trànsit és, en principi, aconseguir una circulació de vehicles fluida i segura, i una circulació de vianants còmoda i segura. I, en alguns casos, es tracta de gestionar, en les mateixes condicions de seguretat, el funcionament de zones saturades i, fins i tot, d'introduir restriccions d'entrada en zones per evitar la congestió excessiva i el bloqueig d'interseccions. S'hi afegeixen, de vegades, funcions de control de vehicles de transport públic, com autobusos i tramvies, amb les seves necessitats de prioritat i les seves condicions particulars de segregació i control independent d'aclarides i de semàfors específics, com es el cas dels tramvies.

Es poden distingir dues estratègies de control molt diferenciades:

- Selecció horària de plans de regulació
- Control en funció de l'estat del trànsit (control en temps real)

La **selecció horària de plans** implica disposar d'una biblioteca de plans, que s'assigna als diferents intervals horaris en què es divideix la setmana. Els plans estan definits en els reguladors, que disposen també de les taules horàries per fer la selecció. Però en determinats sistemes la biblioteca de plans s'emmagatzema a l'ordinador central i el pla que ha de funcionar al carrer en cada interval s'implanta directament en els reguladors. La gestió directa dels plans des de l'ordinador central facilita l'actuació manual dels operadors del centre de control sobre els semàfors per implantar-hi plans o temps d'emergència en situacions especials (congestió, accidents, esdeveniments esportius, etc.).

Tot i que a continuació veurem que els detectors de vehicles són absolutament imprescindibles en els sistemes de control en funció del trànsit, els sistemes de plans horaris també solen incorporar detectors, que s'utilitzen per obtenir dades necessàries per al càlcul i l'actualització fora de línia dels plans de regulació, i per a altres actuacions generals del sistema de gestió del trànsit.

El **control en funció del trànsit** correspon genèricament a la situació en què el centre de control rep dades en temps real dels detectors de vehicles d'una zona, l'ordinador central elabora aquestes dades per decidir els canvis en els temps dels semàfors que poden millorar la regulació del trànsit i envia les ordres de canvi als semàfors. Es tracta, per tant, d'un procés de control en temps real del trànsit, amb una resposta directa, en intervals de temps breus, a les variacions del trànsit a la zona.

Les estratègies utilitzades per aquest tipus de control han estat variades i, en alguns casos, conceptualment molt diferents al llarg de la seva etapa de generació i implantació, des de l'any 1965. A continuació expliquem alguns dels sistemes que s'han mantingut en funcionament i que aporten informació sobre característiques diferenciades.

estratègies de regulació de semàfors

- SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimisation Technique) Desenvolupat pel Transport and Road Research Laboratory d'Anglaterra, i presentat en el TRRL Report 1014 (any 1981), es tracta d'un sistema de control amb actuacions en finalitzar cada fase, donat que el sistema ajusta en temps real l'instant de canvi de cada fase per aconseguir optimitzar l'índex d'eficàcia. El model de trànsit i sistemàtica de càlcul està totalment basat en les idees de TRANSYT, amb la diferència que els detectors aporten la informació real, en cada cicle, del grup de vehicles que surt de la intersecció anterior i pel procediment de dispersió de vehicles aquest grup es trasllada a la intersecció d'anàlisi. A continuació es proven petits canvis en l'instant que finalitza la fase per avaluar la situació que aporta un índex d'eficàcia (demores i aturades) menor. Sobre la base d'aquests petits canvis evolucionen, per adaptar-se al trànsit, el repartiment, el cicle i el desfasament. Té l'inconvenient de l'elevat nombre de detectors necessari, ja que per ser coherents amb la seva estratègia de càlcul calen detectors a cada tram entre interseccions i en cada sentit de circulació.
- A les ciutats espanyoles, i a partir dels sistemes de control implantats a Madrid i Barcelona l'any 1968, s'ha utilitzat una estratègia anomenada de *generació dinàmica de plans*, en què s'obtenen dades durant un període d'integració d'aproximadament 5 minuts, s'allisen i es llancen procediments de càlcul independent de les tres variables del pla, cicle, repartiment i desfasament, en aquest ordre, per conformar el pla de regulació òptim que s'implantarà en els reguladors locals per funcionar durant el període de cinc minuts següent. L'allisament de les variables de trànsit i altres elements de filtratge tenen cura que els canvis no siguin gaire bruscos, i els reguladors disposen d'un procediment per fer el canvi de desfasament amb la mínima distorsió del trànsit.
- El sistema SCAT desenvolupat a Austràlia es va iniciar també l'any 1974 i ha evolucionat a partir de les idees inicials. És un sistema molt enfocat a l'ajustament en línia dels repartiments de temps, vigilant amb detectors tant l'entrada de vehicles a la intersecció com l'aprofitament efectiu d'aquesta entrada, i mesurant les condicions instantànies de capacitat de l'accés. Disposa de grups de desfasaments predefinits per tractar interseccions molt relacionades. La informació disponible no permet conèixer amb exactitud els procediments reals de determinació de les variables de regulació.
- És convenient esmentar també un sistema que s'ha utilitzat a Espanya i en altres països i que dóna resultats molt eficaços en zones petites i en artèries. Es tracta de la selecció dinàmica de plans de regulació. S'obtenen dades durant un període d'integració d'entre 5 i 10 minuts, que serviran de base per seleccionar el pla per al proper període. S'elabora fora de línia una biblioteca de plans, cadascun vinculat amb els valors de les intensitats que s'han utilitzat per a calcular-los, sobre cada punt de mesura de la zona. El procés de selecció defineix per a cada pla un vector de components de les intensitats de referència del pla, i a partir del vector format per les intensitats mesurades en aquell període es determina el vector-pla que té una distància mínima en relació amb aquest vector d'intensitats actuals. Aquest és el pla que s'implanta per al proper període. S'hi afegixen procediments de filtratge per mantenir l'estabilitat en cas de variacions acusades de trànsit.

7

Centre de gestió del trànsit

Els primers centres de control del trànsit en zones urbanes van tenir com a objectiu bàsic la regulació centralitzada de semàfors, que eren els únics elements dinàmics que permetien actuar sobre la circulació millorant els fluxos de vehicles. A les carreteres interurbanes van aparèixer els sistemes d'informació a l'usuari mitjançant rètols variables i es van començar a utilitzar càmeres de TV per vigilar el trànsit tant a la carretera com a la ciutat. Finalment, les tecnologies de la informació i la comunicació i programari específic es van incorporar als centres de control, que es van convertir en centres de gestió de la mobilitat a les ciutats i carreteres.

Els centres de gestió del trànsit urbà incorporen tots o alguns dels subsistemes següents:

Sistemes d'informació i supervisió del trànsit

- Recepció d'informació de detectors de vehicles
- Sistema de supervisió de l'estat del trànsit amb càmeres de TV
- Recepció de variables de trànsit més elaborades mitjançant càmeres de TV que incorporen mètodes d'anàlisi de visió artificial
- Recepció d'informació de l'estat d'ocupació dels aparcaments
- Informació i peticions d'actuació provinents dels agents de policia, i informacions sobre obres i esdeveniments que puguin afectar la via pública o variacions puntuals de trànsit
- Dades de temps de recorregut obtinguts per vehicles que efectuen itineraris prefixats, amb equipament especial per obtenir aquestes dades

Sistemes d'actuació per a la gestió del trànsit

- Sistema de control de semàfors
- Sistema de gestió de senyals variables d'informació de trànsit (estat del trànsit en itineraris i recomanacions)
- Sistema de gestió de senyals variables d'informació d'aparcament
- Gestió de prioritat de vehicles de transport públic i vehicles d'emergència (bombers, policia)

centre de gestió del trànsit

Informació als usuaris

- Informació de la situació del trànsit, recomanacions i mesures especials, utilitzant panells de missatge variable
- Informació a Internet (mapa de trànsit, accés a la visió de les càmeres de TV, informació d'obres en la via pública, informació de temps de recorregut en itineraris, etc.)
- Cessió d'informació a ràdios, emissores de TV i altres mitjans de comunicació
- Atenció telefònica

Monitorització de tots els equips i elements de control i informació:

- Monitorització automàtica proporcionada pels subsistemes
- Recepció d'averies i incidències de les quals informa la policia o els ciutadans

Els centres de gestió del trànsit i la mobilitat han d'estar també integrats en la gestió del transport públic de superfície (autobusos i tramvies), ja sigui perquè la gestió d'aquests elements pertanyen al mateix centre o bé mitjançant la comunicació amb el centre de gestió d'autobusos i/o tramvies. A més, i sigui quina sigui la forma de control, el sistema de regulació de semàfors ha d'atendre les demandes de prioritat del transport públic, quan s'habiliten elements per accionar-les.

Notes

senyalització i regulació amb semàfors de cruïlles urbanes

Col·laboradors: Julio García Ramón - Doctor Enginyer Industrial
Antonio López Montejano - Enginyer Industrial

D.L.: B-24567-2009

Disseny i producció: Súbito & Cia, S.C.P.

Impressió: Gràfiques Contraste, S.L.

dossiers tècnics de seguretat viària

1. Moderació de la circulació a l'àmbit urbà
2. Carrers per viure
3. Les travesseres
4. Les rotondes
5. Els vianants: el problema
6. Els vianants: la solució
7. Els ciclistes
8. L'enllumenat públic
9. Les persones amb mobilitat reduïda
10. Elements reductors de velocitat
11. Parcs infantils de trànsit
12. Itineraris segurs per a escolars
13. Propostes per a la mobilitat segura en el lleure
14. Indisciplina viària i accidentalitat en els carrers: els vianants
15. Indisciplina viària i accidentalitat en els carrers: els conductors
16. La bicicleta: un vehicle segur?
17. La bicicleta en l'entorn urbà
18. La gent gran: vianants i mobilitat urbana segura
19. Millora de la seguretat de les rotondes
20. Senyalització vertical urbana

