3. METODOLOGIA

En aquest apartat es descriu la metodologia duta a terme pel desenvolupament d'un model de priorització semafòrica per tal de millorar la velocitat comercial dels autobusos. Es descriuen els fonaments del problema que porten a determinar les millors eines pel problema a tractar.

3.1. Fonaments del problema

Per dissenyar un sistema de priorització semafòrica per l'autobús és necessari conèixer els temps associats a cadascuna de les fases semafòriques per tal de determinar el patró de servei que opera la línia d'autobús. L'anàlisi que es presenta permet identificar les variables sobre les que es pot actuar per millorar la operativa, especialment aspectes que intervenen sobre l'operació del semàfors.

A continuació es desenvolupa la formulació bàsica d'una línia en un corredor, a partir de la qual s'obté el temps associat a cada punt del recorregut.

Donat un corredor pel que circula una línia d'autobús. El corredor es caracteritza per un conjunt d'interseccions $SetI = \{ I_i \mid i = 1...m \}$, un conjunt de parades $SetP = \{ P_j \mid j = 1...n \}$, un conjunt d'arcs que estableixen un vincle entre els nodes del sistema (interseccions i parades) $SetA = \{A_k \mid k = 1...s\}$ i per últim uns nodes d'entrada i sortida de corredor $SetE = \{E_l \mid l = 1, 2\}$. Per tant el recorregut de l'autobús es pot reconstruir mitjançant una seqüència d'arcs i nodes.

Cadascun d'aquests elements pot tenir associat un temps d'aturada en ell que en cap dels casos serà fix, sinó que té associat una component estadística.

Sigui el temps d'aturada en una intersecció donat per la següent expressió:

$$t_i^I = \tilde{t}_i^I \pm \Delta t_i^I \tag{3.1}$$

On,

t_i^I , temps en què un autobús es troba aturat a la intersecció i-èssima.

$\tilde{t}_i^I$, temps promig d'aturades a la intersecció i-èssima.

Δt_i^I , increment de temps respecte el promig.

El temps de servei en una parada donat per:

$$t_j^P = \tilde{t}_j^P \pm \Delta t_j^P \tag{3.2}$$

On,

t_j^P , temps en què un autobús es troba a la parada i-èssima.

$\tilde{t}_j^P$, temps promig de servei a la parada i-èssima.

Δt_j^P , increment de temps respecte el promig.

Pel temps de recorregut als arcs també és possible definir un temps compost pel promig i pel terme associat a les possibles variacions de temps que es poden produir degut a obstacles al carril bus.

$$t_k^A = \tilde{t}_k^A \pm \Delta t_k^A \tag{3.3}$$

On,

t_k^A , temps en què un autobús recorre l'arc k-èssim.

$\tilde{t}_k^A$, temps promig de recorregut de l'arc k-èssim.

Δt_k^A , increment de temps respecte el promig.

Per últim cal considerar els nodes d'entada i de sortida. Aquests, donat que serveixen únicament per definir els punts d'entrada i sortida del corredor, es considera que l'autobús no consumeix cap temps aturat en aquest tipus de node.

$$t_l^E = 0 \tag{3.4}$$

L'objectiu és arribar a minimitzar el temps dels usuaris al sistema, minimitzant el temps a les aturades de les interseccions. Sempre tenint present que existeixen certes restriccions imposades per la percepció del servei per part del usuaris. Les variables sobre les que es pot actuar per ajustar els temps d'aturades en les interseccions al patró de recorregut de l'autobús són: temps de cicle, repartiment verd - vermell i els desfasaments entre semàfors.

El temps aturat a les interseccions serà avaluat mitjançant una implementació matemàtica que integra totes les variables del sistema, al igual que el temps total de recorregut al corredor. Aquest és la suma dels temps als tres nodes i als arcs per tots els elements que componen cada grup.

$$t_{TOTAL} = \sum_{l=1}^{r} t_l^E + \sum_{k=1}^{s} t_k^A + \sum_{j=1}^{n} t_j^P + \sum_{i=1}^{m} t_i^I \tag{3.5}$$

Desagregant el temps promig i la part variable tenim:

$$t_{TOTAL} = \tilde{t}_{TOTAL} + t_{\Delta TOTAL} = \left[\sum_{l=1}^{2} \tilde{t}_l^{\,E} + \sum_{k=1}^{s} \tilde{t}_k^{\,A} + \sum_{j=1}^{n} \tilde{t}_j^{\,P} + \sum_{i=1}^{m} \tilde{t}_i^{\,I} \right] + \left[\sum_{l=1}^{2} \Delta t_l^E + \sum_{k=1}^{s} \Delta t_k^A + \sum_{j=1}^{n} \Delta t_j^P + \sum_{i=1}^{m} \Delta t_i^I \right] \tag{3.6}$$

On,

$\tilde{t}_{TOTAL}$, suma de temps promitjos

$t_{\Delta TOTAL}$, variabilitat del sistema

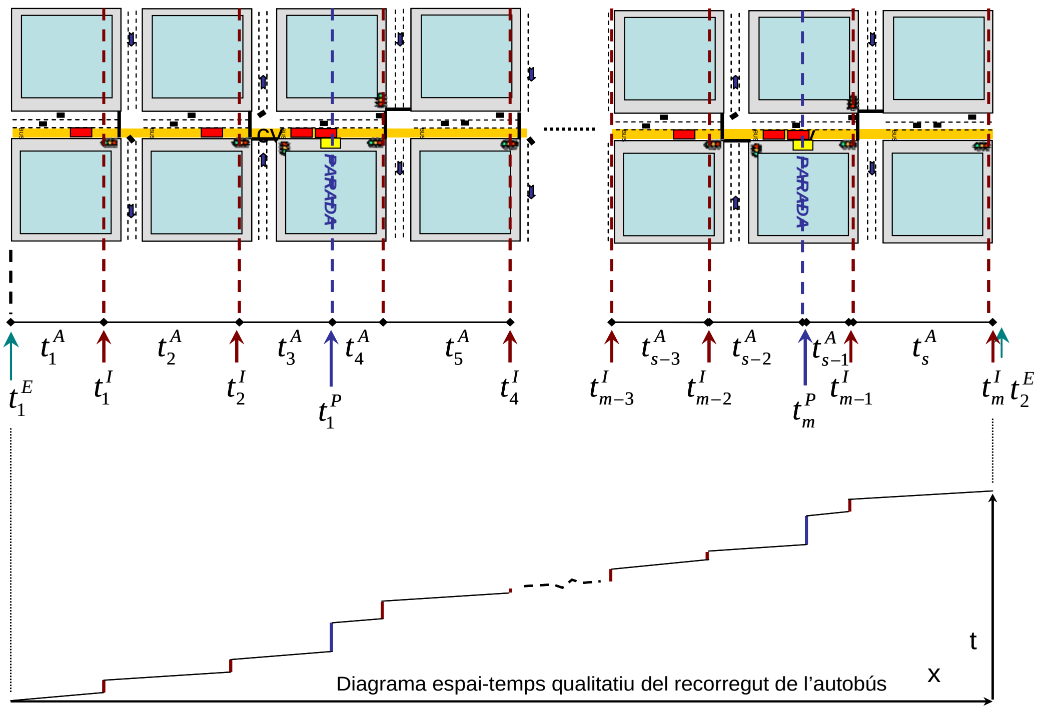

Figura 3.1. Esquema conceptual del problema. (Font: CENIT 2008)

El primer dels termes de l'equació anterior queda representat en una poligonal en els diagrames espai temps, en canvi, el segon representa la franja de factibilitat amb un límit superior i un límit inferior. Aquest últim concepte queda representat en la Figura 3.2. La citada figura és la representació d'una trajectòria d'un autobús, que passa primer per una parada i posteriorment per una intersecció semaforitzada. En aquesta última es pot observar en quin instant el semàfor es troba en verd o en vermell, a més, es representen les distribucions de les arribades de l'autobús en una intersecció, i la probabilitat que l'autobús arribi a la intersecció amb el semàfor amb verd. A més, conceptualment il·lustra com l'addició de variabilitat al recorregut redueix la probabilitat d'arribar dins una finestra de verd. L'ample de la franja en arribar a la intersecció determina la possibilitats d'aturada. En augmentar la variabilitat, les possibilitats augmenten.

La variabilitat porta a considerar un tractament probabilístic amb simulació en comptes de fer un tractament analític tal i com es plantejava anteriorment. El temps en verd ha de permetre el pas d'aquella part de la corba amb una major densitat de probabilitat, és a dir, la que tanca més àrea. Donat el desconeixement de la distribució de probabilitat a l'arribada del semàfor, caldrà realitzar un anàlisi acurat que no ha de comportar associar el desfasament als valors promitjos.

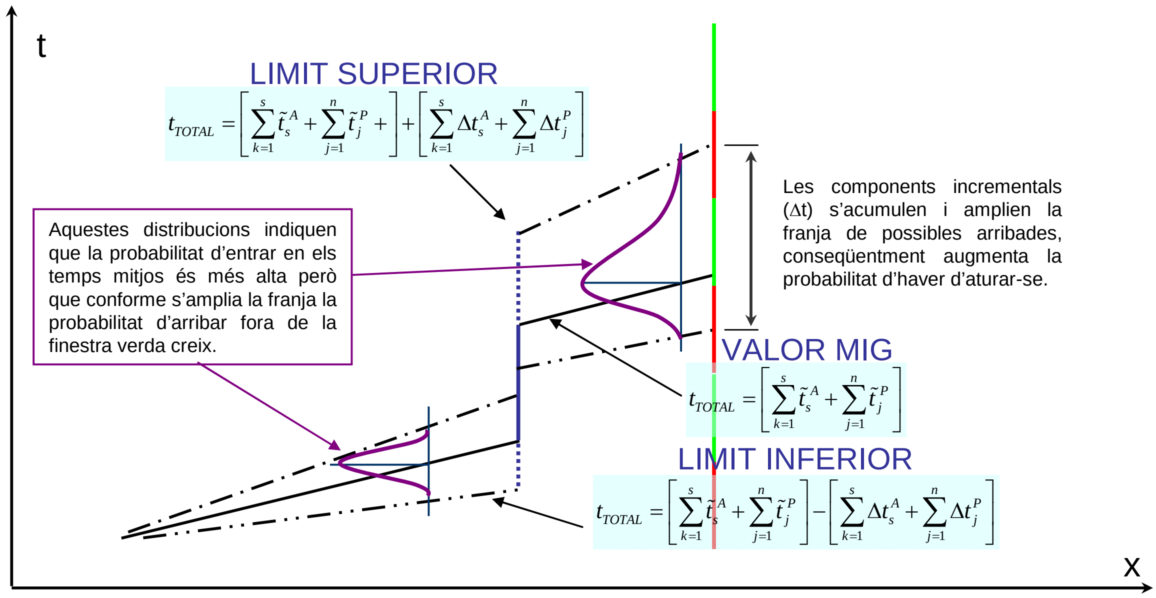

Figura 3.2. Esquema conceptual de variabilitat. (Font: CENIT 2008)

L'instant en què els autobusos entren el corredor d'estudi és una variable fonamental per obtenir una bona coordinació semafòrica. En aquest sentir, la teoria de la investigació operativa sosté que les arribades entre dos vehicles consecutius és modelable mitjançant una distribució exponencial si les arribades són independents. Es pot comprovar que les arribades en el cas d'expedicions d'autobusos que s'ajusten als horaris d'explotació per interval, els temps entre dos arribades consecutives són ajustables a una distribució normal (Salicrú, 2006).

3.2. Formulació del problema

La formulació del problema respon a l'objectiu de minimitzar el temps de viatge dels usuaris de l'autobús. No es té en compte així el temps que un autobús es troba al sistema, sinó que es necessari conèixer quina és la demanda del transport per tal de ponderar així els temps de viatge de cada usuari. En fer això, el que s'aconsegueix és valorar el temps de recorregut de cada viatger, donant més prioritat a aquells vehicles que tenen una ocupació major.

D'aquesta forma el temps ponderat de la demanda és:

$$t_{pd} = \sum_{i=1}^{n} t_r^i \cdot o_i \qquad (3.7)$$

On,

t_{pd}, temps ponderat de la demanda
t_r, temps de recoregut
n , número d'autobusos

El temps ponderat per la demanda serà la variable a minimitzar per obtenir una millora del global del sistema.

Per aconseguir això és necessari canviar alguns dels paràmetres bàsics de les interseccions semaforitzades per tal de disminuir el temps dels autobusos en aquestes, i per tant disminuir el temps per fer un trajecte determinat.

Per obtenir un escenari desitjable de temps de cicle, temps en verd, i desfasaments dels semàfors de la zona d'estudi, és necessari desenvolupar una metodologia que ens permeti determinar quines són les millores que es poden assolir en els diferents escenaris que es proposen. La primera intuïció és analitzar manualment quina és l'afectació de cada intersecció en cada autobús o en cada grup d'autobusos. El problema es complica en el moment que augmentem considerablement el número d'interseccions del corredor d'estudi.

Una de les metodologies que es poden dur a terme per determinar quin és el desfasament i el temps de verd òptim per una intersecció semaforitzada és agrupar els autobusos que passen per la intersecció de tal manera que les pèrdues de temps globals que es produeixen siguin mínimes. A més, el fet de tenir diferents grups d'autobusos que surten d'una intersecció junts, genera que en la següent intersecció, teòricament haurien de trobar-se agrupats, i per tant hauria de ser relativament senzill obtenir els desfasaments i els temps de verd idonis per aquesta intersecció i grup d'autobusos.

Però en la realitat els autobusos es separen al llarg del recorregut entre dos interseccions, ja sigui degut a les parades que han de realitzar, o degut a pertorbacions. La dispersió que es genera del grup d'autobusos es veu agreujada per les continues interseccions que provoquen la reagrupació continuada dels vehicles en el corredor, es perden els grups inicials. Per tant a cadascuna de les interseccions seria necessari definir un nou grup de d'autobusos, i per tant fer un problema nou cada vegada.

El problema és senzill per una intersecció i es pot arribar a aplicar a diverses interseccions d'un corredor, però es complica seriosament en el moment en què es comença a tenir corredors que es creuen entre ells. En aquests casos el problema que es podria fer manualment per una intersecció s'arriba a complicar fins al punt que es considera inviable realitzar el càlcul manualment i és necessari passar a realitzar un model que permeti determinar els temps que els autobusos necessiten emprar en cadascuna de les interseccions i en les parades (Veure 3.1 Fonaments del problema).

Degut a la complexitat del problema, en el present estudi s'ha desenvolupat un model capaç de determinar els temps dels autobusos a les interseccions, parades, i arcs del sistema. Amb l'ajuda d'aquesta eina és possible determinar quina és la millora que es produeix a cadascun dels nous escenaris proposats ja que en el model és possible avaluar cada autobús individualment al llarg de tot el seu recorregut.

3.3. Problema d'optimització

3.3.1. Funció objectiu

La funció objectiu es formula en base al temps total recorregut pels usuaris de l'autobús de totes les línies que circulen pels corredors definits. La part que es minimitza de la funció és la relativa a les demores en semàfors, directament perquè és la part sobre la que actuen les variables de decisió.

$$F_0 = \left[\sum_{\forall C} \sum_{\forall L | l \subset c} \sum_{\forall B | b \subset l} o_b \cdot t_{rb,l,c} + o_{VP} \cdot \omega \cdot T_{rVP} \right]_{ITE} \tag{3.8}$$

On,

ITE, interval temporal d'estudi.
B, conjunt d'autobusos que operen les diferents línies en l'interval temporal d'estudi.
L, conjunt de línies que operen als diferents corredors de l'àmbit d'estudi.
C, conjunt de corredors de l'àmbit d'estudi.
o_b, ocupació de l'autobús b-èssim tal que $b \in B$.
$t_{r\,b,l,c}$, temps de recorregut de l'autobús b-èssim de la línia l-èssima i corredor c-èssim.
ω, coeficient per tenir en compte en el model l'efecte al vehicle privat, $\omega \in \{0,1\}$
o_{VP}, ocupació del vehicle privat.

T_{rVP}, quantificació del temps de recorregut dels usuaris del vehicle privat al sistema.

En particular, el temps de recorregut d'un autobús $t_{r\,b,l,c}$ és funció d'un conjunt de factors diversos com ara la velocitat lliure en el corredor, temps de parada, tipus de parada (simple o doble), temps d'aturada a semàfors, pertorbacions a la circulació normal al corredor, etc. Molts d'aquests paràmetres variables tenen una component estocàstica o probabilista i acaba sent necessari construir un model del problema que simuli la circulació de l'autobús.

3.3.2. Variables de decisió

Com ja s'ha comentat anteriorment, en el problema intervenen diverses variables que ens determinen quin és el temps que un usuari de l'autobús romandrà al sistema. Algunes d'aquestes variables es poden alterar per tal de minimitzar els temps dels usuaris.

Es poden dur a terme diverses estratègies per tal de minimitzar els temps, però en el cas que es tracta únicament tindrem en compte un escenari de variació:

- Es mantindran els temps de cicle (T_C) i el repartiment ($r_{G/C}$) fixes. Únicament es varia el desfasament (D) de les interseccions semaforitzades.

3.3.3. Restriccions

Desfasament del cicle semafòric (D). Es considera que es pot variar tant com sigui necessari per obtenir la millora desitjada. Però tot i així el desfasament haurà de complir sempre:

$$0 \leq D < Tc \tag{3.9}$$

On,

T_C, temps del cicle semafòric

Temps de verd (T_G). En el cas que es tracta no es permet la variació d'aquest respecte la situació de partida.

Però el temps en verd dels cicles semafòrics és una variable possible de variar per tal d'obtenir millores de la situació actual. Es considera que en aquests casos la variació que es pot establir podria estar al voltant del $\pm 10\%$. A més, el temps de verd, hauria de complir uns mínims imposats bàsicament pels temps mínims que es considera que els vianants necessiten per tal de creuar una intersecció. Es podrien considerar temps en verd compresos entre:

$$20 \leq Tg \leq Tc \tag{3.10}$$

No s'ha d'oblidar que en minimitzar els temps dels usuaris del transport públic donant prioritat als autobusos, el que s'està produït és un augment dels temps dels usuaris de transport privat. Aquest augment ha d'estar acotat per tal de no arribar a penalitzar excessivament al vehicle privat. En aquest aspecte s'ha de tenir present que en tot cas els temps que es volen disminuir són els dels usuaris, i no els dels vehicle, és a dir, un vehicle privat aturat en una intersecció es trobarà menys penalitzat que un vehicle públic, ja que l'ocupació del primer serà menor. Però tot i així no podem menysprear els temps dels vehicles privats i caldrà fer una comprovació de l'afectació de la solució.