

# DISSENY EFICIENT DE XARXES DE TRANSPORT PÚBLIC COL·LECTIU EN ZONES URBANES

M. Estrada.<sup>1</sup>, F. Robusté<sup>2</sup>, H. Badia<sup>3</sup>

Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori

<sup>1</sup>Catedràtic de Transport, e-mail: f.robuste@upc.edu, <sup>2</sup>Professor Lector, e-mail: miquel.estrada@upc.edu, <sup>3</sup>Estudiant de doctorat, e-mail:hugo.badia@upc.edu

**Paraules Clau:** Transport Públic, Disseny xarxes, optimització.

**Resum:** *Aquest treball presenta i valida un mètode de disseny de xarxes de transport públic d'altres prestacions. El mètode proposa diferents esquemes conceptuals de xarxes per idealitzacions geomètriques d'una ciutat particular, que després són adaptades a les condicions reals. Aquests esquemes conceptuals són caracteritzats per mitjà de quatre variables de decisió: la separació de línies, separació de parades, interval de pas i la grandària d'una zona central amb millor cobertura espacial. El millor esquema per a una aplicació específica es tria a través de l'optimització. La funció objectiu es compon de fórmules analítiques per al cost de l'operador i les prestacions als usuaris. El disseny òptim proposat per a la ciutat de Barcelona planteja la utilització d'un terç dels recursos per a oferir un menor temps de viatge en relació a la xarxa actual d'autobusos.*

## 1. INTRODUCCIÓ

La població mundial presenta un fenomen de concentració en ciutats, fet que provoca una demanda de mobilitat creixent en quantitat i qualitat. Malgrat que la innovació en l'eficiència energètica dels vehicles millorarà la sostenibilitat ambiental del sistema de transport, els mitjans de transport individuals (cotxe, taxi, vehicles a lloguer) no podran combatre la sostenibilitat econòmica i social del sistema ni respondre a les necessitats de mobilitat de la societat pels problemes derivats de congestió i seguretat. Davant d'això es fa necessària l'aposta per modes de transport col·lectiu que representin un menor cost social i economies d'escala amb la consolidació de viatges.

Aquest treball desenvolupa un model matemàtic de disseny de xarxes de transport públic col·lectiu en base a aproximacions contínues dels costos d'operació i les prestacions dels usuaris del sistema. Amb aquest model es busca superar els esquemes de disseny actuals que conformen sistemes compostos per un gran nombre de línies, sense visió sistèmica, dispersos en el territori i de complexa llegibilitat. El model continu elaborat es desenvolupa en Estrada et al. (2011). Permet representar diferents tipologies d'estructures de xarxes de transport i és fàcilment transferible a qualsevol ciutat. El model es fonamenta en un esquema híbrid on es diferencien dues zones, la part central on l'estructura de la xarxa és una malla ortogonal (Holroyd, 1965), i la zona perifèrica amb un esquema ramificat o hub-and-spoke (Newell, 1979) on els corredors es ramifiquen progressivament. La xarxa dissenyada ha de servir un territori amb una forma ideal rectangular amb una demanda determinista i uniformement distribuïda.

Els atributs que caracteritzen la xarxa són: una cobertura temporal constant a la malla central sobrejuda de la Figura 1, decreixent a mesura que les línies es ramifiquen en l'àmbit perifèric i una cobertura espacial constant a tot el territori. Cal notar que els usuaris de la perifèria reben cobertura a partir d'una sola línia mentre que al centre es pot tenir accés a les

línies en dues direccions perpendiculars. Això succeeix perquè el rectangle central inclou el doble de quilòmetres d'infraestructura per unitat de superfície en relació a la perifèria.

Les parades a l'àrea central es situen en les interseccions dels corredors garantint així la possibilitat de realitzar viatges a tota l'àrea d'estudi mitjançant desplaçaments horitzontals i verticals amb zero, una o dos transferències.

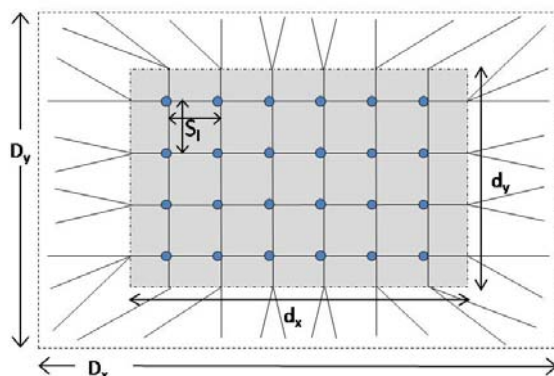


Fig. 1 – Esquemes de Xarxa Híbrida en zones rectangulars.

L'esquema proposat permet una fàcil comprensió per part de l'usuari i l'aplicació de mesures de prioritització en els corredors per a millorar la velocitat comercial i regularitat del servei.

## 2. FORMULACIÓ BÀSICA

La metodologia desenvolupada defineix la xarxa de transport col·lectiu a partir de quatre variables de disseny:  $\alpha$  (percentatge de territori corresponent a la malla central),  $H$  (interval de pas a la malla central),  $s$  (espaiament de parades) i  $s_l$  (espaiament entre línies). A partir d'aquestes variables es determinen els costos del sistema i les seves prestacions a partir dels quals es defineix la funció objectiu (1) a minimitzar del model.

Els costos operatius consideren la longitud d'infraestructura necessària ( $L$ ), la longitud promig recorreguda pels vehicle per hora d'operació ( $V$ ) i els vehicles-hora en hora punta ( $M$ ). Per altra banda, els usuaris han d'invertir un temps en cada una de les diferents etapes de la cadena de transport col·lectiu, accés ( $A$ ), espera en parada ( $W$ ), trajecte en vehicle ( $T$ ) i processos de transferència ( $R$ ). La determinació de les variables anteriors es pot realitzar a partir de les quatre variables de decisió aplicant conceptes de probabilitat geomètrica (veure Estrada et al., 2011).

Així mateix, el model permet estimar la velocitat comercial de circulació de l'autobús ( $v_c$ ) mitjançant l'equació (2) a partir de les característiques de l'estructura de disseny de xarxa. L'estimació de les variables anteriors es realitza a partir del coneixement de les característiques de la grandària del territori rectangular a servir (representat per la longitud dels costats  $D_x$  i  $D_y$ ), la demanda del sistema en hora punta  $A$ , la velocitat de circulació  $v$ , el temps perdut per realitzar la parada  $\tau$ , el temps que un usuari consumeix en pujar al vehicle  $\tau'$  i la velocitat dels vianants  $w$  per accedir al sistema.

$$Z = [\pi_v V + \pi_M M + \pi_L L] + [A + W + T + R] \quad (1)$$

$$1/v_c = [1/v + \tau/S_l] + (1 + e_T) \left[ \frac{1}{2} \tau' \Lambda S_l H / D^2 \right] / [3\alpha - \alpha^2] \quad (2)$$

El model permet la introducció de restriccions que condicionen el disseny de la xarxa, és el cas de l'ocupació del sistema en el punt de màxima càrrega que no pot superar la capacitat

dels vehicles C, un nombre màxim de corredors a implantar o un pressupost màxim per a desenvolupar la xarxa.

El desenvolupament de les fórmules estimatives del model permet un procés d'optimització molt senzill per enumeració (quatre variables). La solució d'aquest problema per a una aplicació específica en una ciutat determina disseny o esquema idealitzat. A partir d'aquest esquema, l'analista ha de construir una xarxa de trànsit detallada que utilitzi els carrers disponibles, arribi als pols generadors i atractors de major demanda però que encara s'ajusti a l'esquema ideal tant com sigui possible. Aquest segon pas és un art més que una ciència, però el procés es pot dur a terme amb força facilitat. Per regla general, la xarxa final ha de presentar menor distància a peu que l'ideal, ja que s'ha adaptat a la demanda real (no homogènia).

D'aquesta forma, el planificador pot estimar el cost de diferents combinacions d'estructura de xarxa per analitzar quina proporciona el menor cost social per a la seva ciutat sense haver de recórrer a sistemes de simulació de la demanda. Per tant, en qüestió de segons es pot avaluar les prestacions d'un esquema específic de xarxa independentment de la modelització de la xarxa de carrers existents per on poder circular.

### 3. VALIDACIÓ DEL MODEL A BARCELONA

El model ha estat aplicat a la ciutat de Barcelona amb l'objectiu de definir una xarxa de bus d'altres prestacions com a nou servei que complementi l'actual. La nova xarxa busca ser una alternativa a la resta de modes de transport ja siguin públics o privats per aquells viatges de determinades longituds, que actualment impliquin uns costos temporals de temps de viatge en bus molt elevats per la baixa velocitat del servei convencional, 11km/h.

El resultat òptim del model en el cas de Barcelona ha definit una xarxa conformada per 12 corredors capaç de transportar fins a 60.000 usuaris en hora punta. La seva àrea central ocupa un 72% del territori, amb una distància entre línies entre els 650 i 1300 metres, un espaïament de parades de 430 m (zona central) i 650 m (perifèria) i un interval de pas de 3 minuts. La xarxa resultant implica una longitud d'infraestructura de només 227 km i operada amb 282 vehicles, assolint una velocitat comercial de 15 km/h. Els recursos necessaris d'aquest esquema únicament representa un 31% dels recursos utilitzats en la xarxa actual. Amb una bona gestió del trànsit, el sistema proposat per Barcelona permetria augmentar la velocitat mitjana de l'usuari porta-a-porta al voltant d'un 37% i reduir el cost total de l'operador de l'autobús per un percentatge encara més gran.

El resultat és un servei d'altres freqüències, ràpid i fàcil d'explotar, encara que implica un cert descens de l'accessibilitat que ha estat acotat amb la introducció de més parades en aquells indrets on la demanda ho ha justificat. La simulació dels costos operacionals i prestacions a l'usuari de la implantació detallada de la xarxa difereixen de les del model idealitzat (esquema conceptual) en menys del 10%. Aquest fet permet assegurar la correcta validació de l'estimació dels costos i prestacions del model conceptual. Així mateix, les solucions òptimes del model teòric en ciutats com Londres, Chicago o Stockholm presenta esquemes molt pròxims a les xarxes reals existents.

### REFERÈNCIES

Estrada, M., et al. (2011) Design and implementation of efficient transit networks: Procedure, case study and validity test. *Transport. Res. Part A*, doi:10.1016/j.tra.2011.04.006

Holroyd, E.M. (1965). The optimum bus service: a theoretical model for a large uniform urban area. In L. C. Edie, R. Herman, and R. Rothery (Eds.), *Vehicular Traffic Science, Proceedings of the 3rd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*. New York: Elsevier.

Newell, G.F. (1979). Some issues relating to the optimal design of bus routes. *Transportation Science* 13(1), 20–35.