



Projecte “Retbus”: el bus del futur a Barcelona



Dr. Miquel Àngel Estrada Romeu
Centre d'Innovació del Transport
Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona TECH



IX Assemblea Anual i Conferència de la Federació Europea de Passatgers
IX Asamblea Anual y Conferencia de la Federación Europea de Pasajeros
IX European Passenger Federation Annual Assembly and Conference

Equip de treball

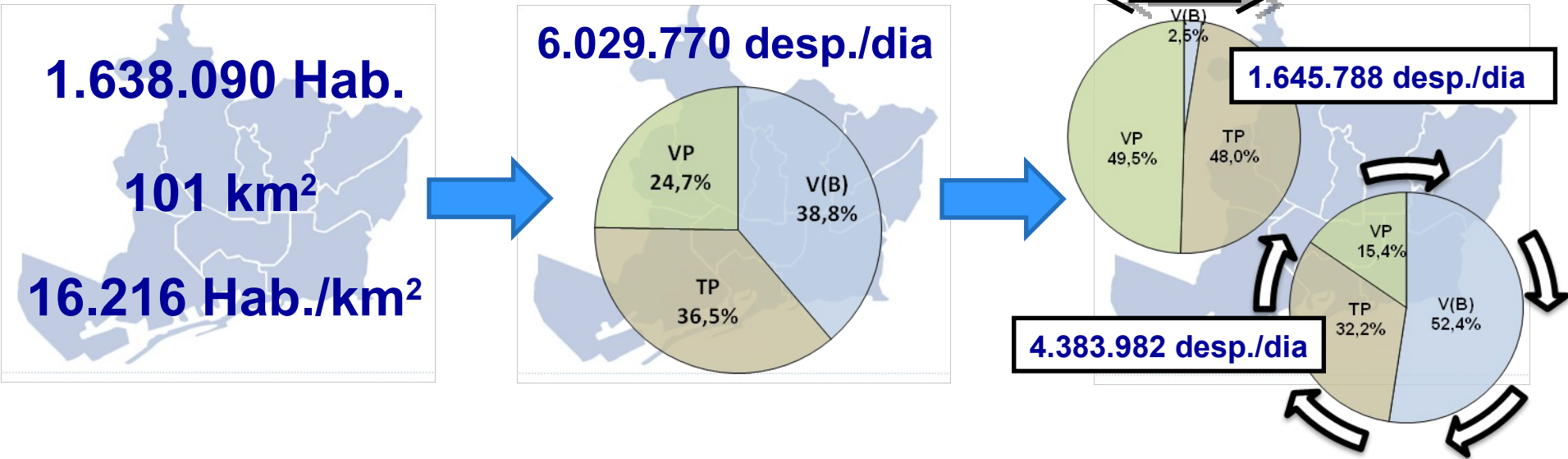


Ajuntament de Barcelona



UC Berkeley Center for Future Urban Transport
A VOLVO Center of Excellence

La mobilitat a Barcelona (2009)

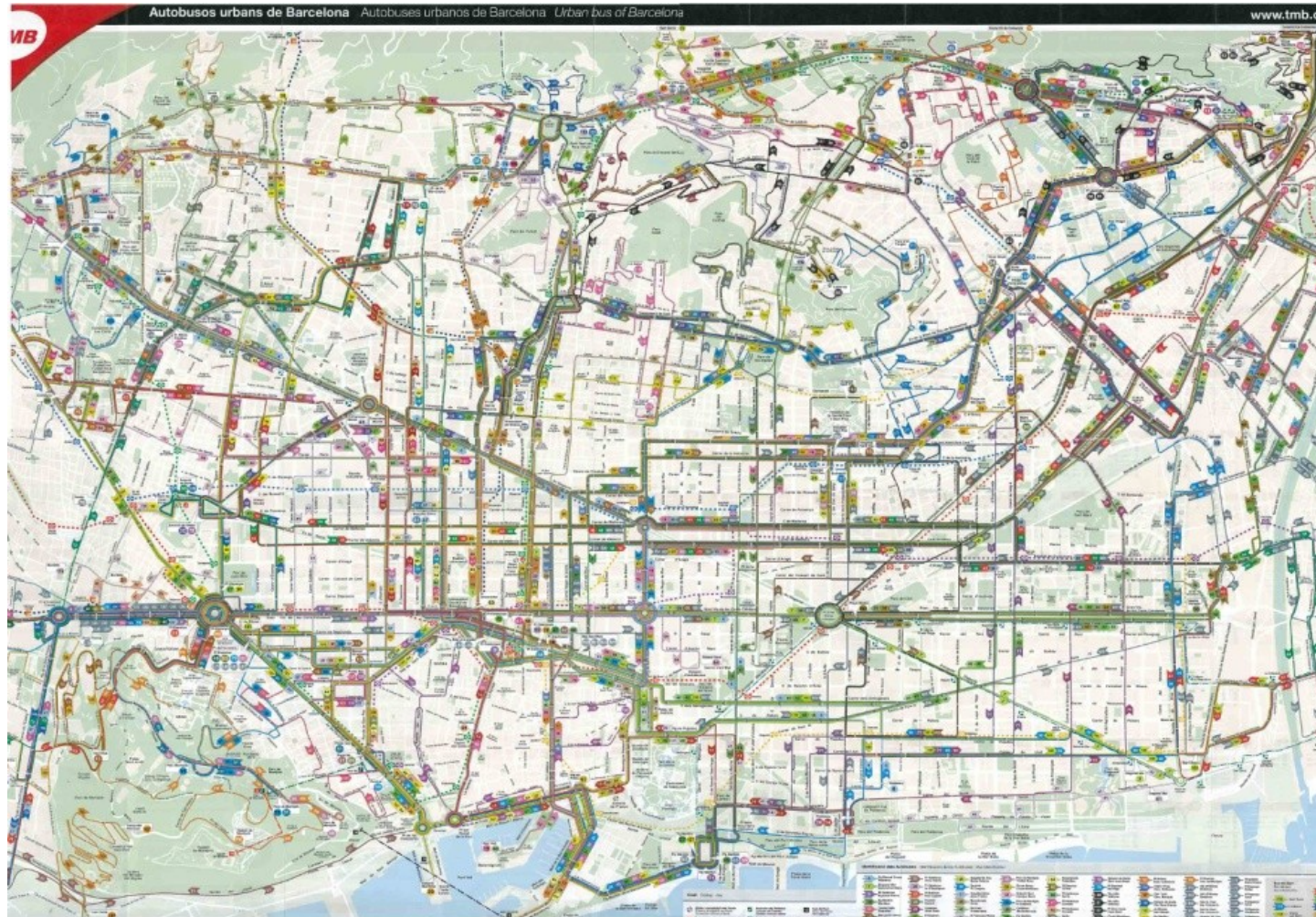


TRANSPORT PÚBLIC – Milions de Viatges/any

Mode de Transport	Milions de Viatges/any	Porcentatge
Autobús TMB	196,0	21,4%
Metro	361,6	39,6%
FGC	79,8	8,7%
Tram	23,9	2,6%
RENFE	110,1	12,1%
Altres busos	142,6	15,6%
TP total	914,0	100,0%

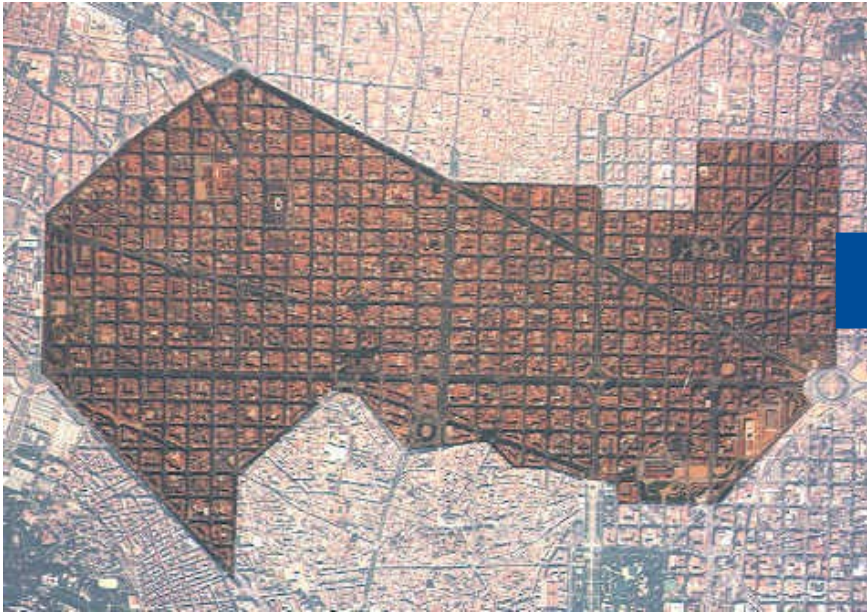
Un 37% dels usuaris del TP utilitzen el bus pels seus desplaçaments (Bus TMB + Altres Busos)

Xarxa actual d'autobús a Barcelona

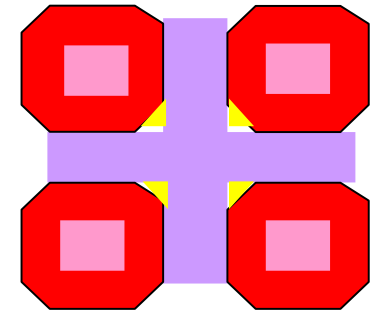


- Suma de línies heretades del tramvia
- Xarxa de molts-a-molts punts, sense jerarquia, redundant al centre
- Reducció progressiva de la **velocitat comercial**

Concepció de la xarxa viària



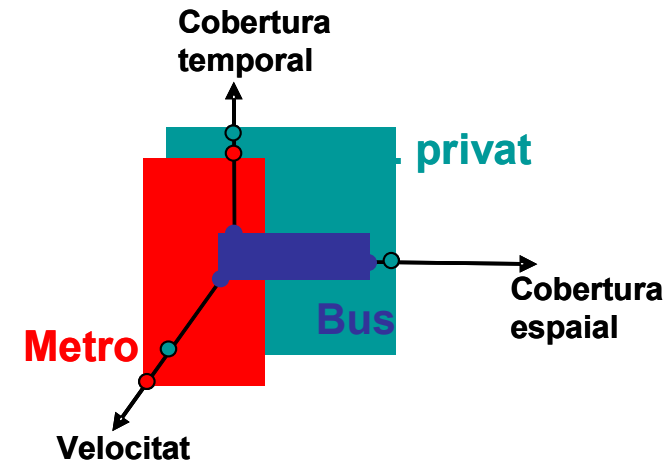
- Ildefons Cerdà (1857), *“Urbanisme de les xarxes”*
- L'Eixample: estructura mallada (30% de l'àrea de Barcelona)
- Xamfrà en interseccions



←→
120 metres

Visió del sistema: Model de Transport en Superfície a BCN

- **“Quan vols, A on vols i Ràpid”**
 - Intervals temporals de pas de 3 minuts (hora punta)
 - Tot ciutadà a menys de 300 metres d'una parada d'altres prestacions
 - Velocitat comercial superior a 15 km/h
 - Distància de transferència a menys de 100 metres
 - El 90% dels viatges són directes o bé fan 1 transferència
 - Temps porta a porta comparable amb l'automòbil
- **“Barat, còmode i fàcil”**
 - Tarifa integrada i econòmica
 - Construïda sense afegir autobusos a la flota existent de TMB (l'eficiència en el disseny de la xarxa i en la seva gestió produirà estalvis de recursos).
 - Reorganització dels serveis existents
 - Autobusos articulats no molt plens
 - Llegibilitat (per a viatgers no habituals)

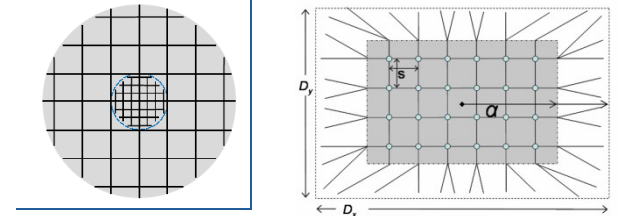


DISSENY

Mètode de disseny

1. **Proposar un esquema simple de la xarxa**
2. **Caracteritzar les prestacions i costos mitjançant poques variables de decisió:** Interval, separació entre línies i parades, grandària de la xarxa
3. **Adaptar la solució òptima a la xarxa vial i comprovar resultats**

MODEL ANALÍTIC

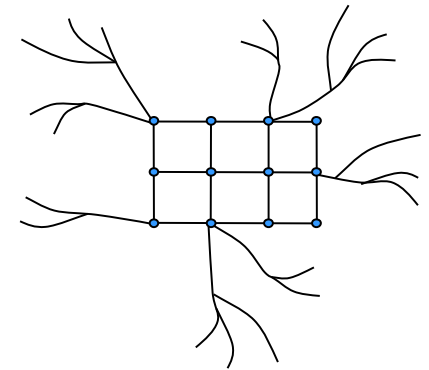
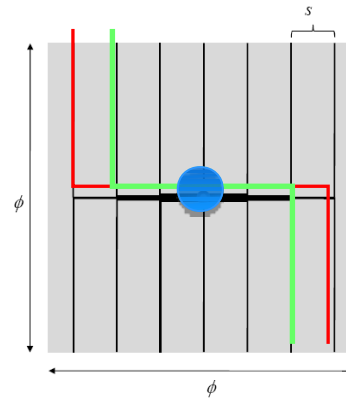
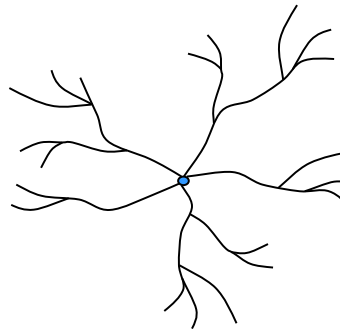
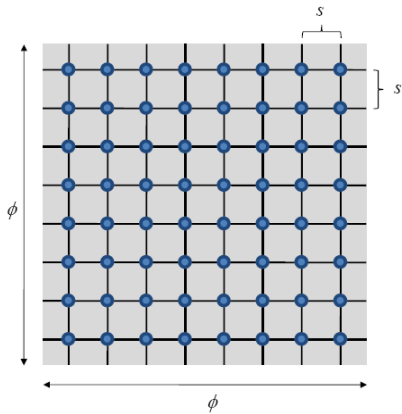


Valors òptims



SOLUCIÓ REAL

Quina és l'estructura òptima de xarxes d'autobús?

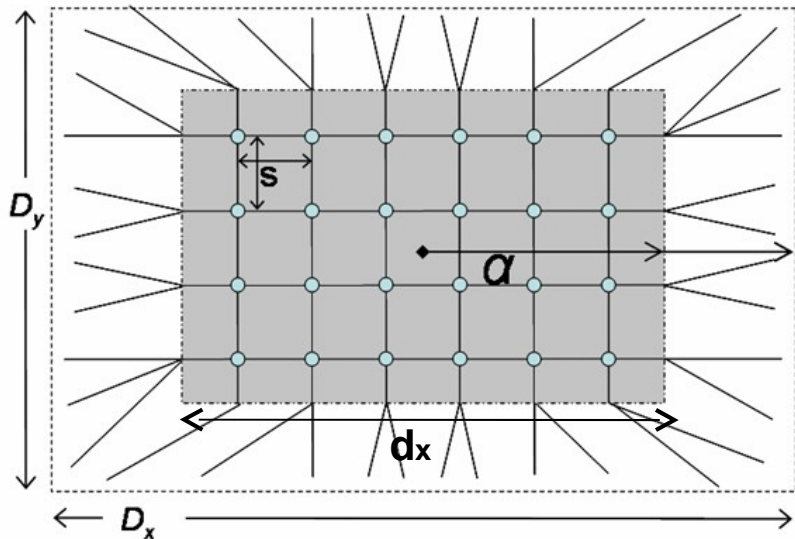


Malla o grid
(Holroyd, 1965)

Radial o hub-and-spoke
(Transport aeri 1980's,
Newell, 1979)

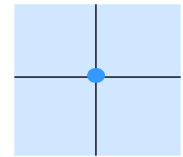
Híbrida
(Daganzo i CENIT,
2009)

Esquema simple: Concepte híbrid bàsic



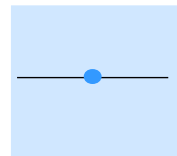
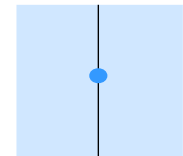
Zona central

Doble cobertura per parada



Zona exterior

Simple cobertura per parada

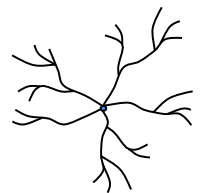


N/S

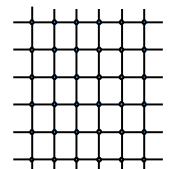
E/O

La xarxa híbrida pot representar tots els esquemes existents d'estructures de transport públic

Si $\alpha=0$, xarxa radial o hub-and-spoke



Si $\alpha=1$, xarxa ortogonal



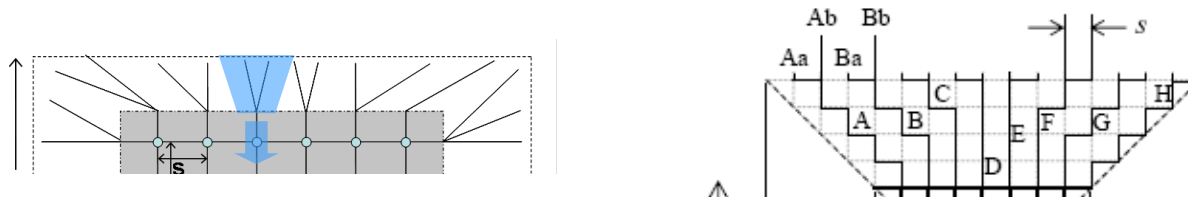
Interval de pas (H)

Distància entre parades (s)

Grandària malla zona central, $\alpha=(d_x/D_x)$

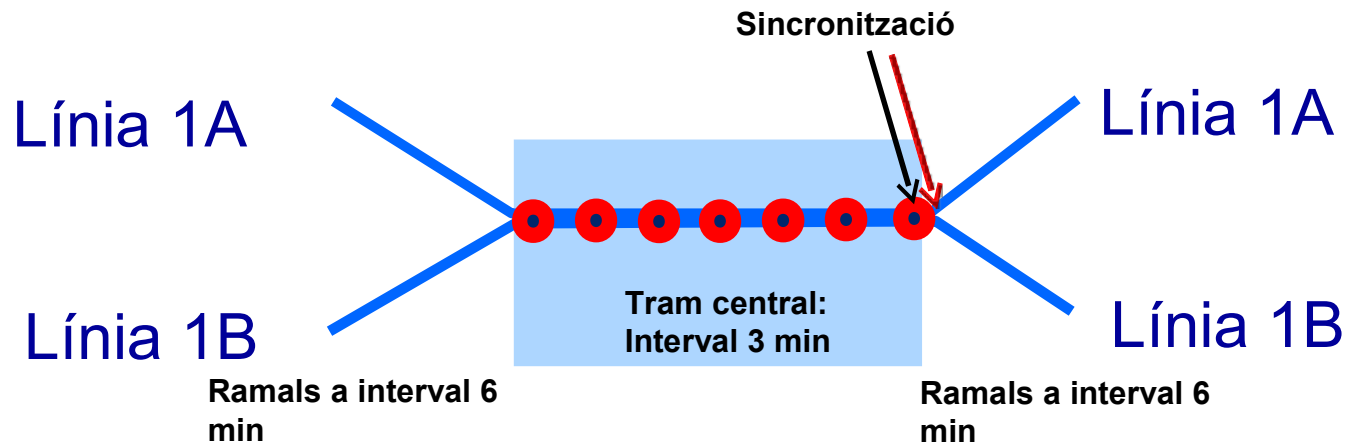
Concepte híbrid bàsic: Servei en els extrems

Estructura en els extrems



Els ramals cobreixen els extrems amb una accessibilitat constant, però reduint la freqüència en les bifurcacions

Exemple d'una línia completa



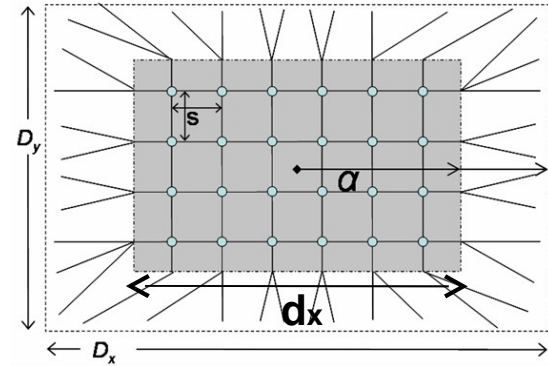
Definició general

Variables que no canvien:

Grandària malla zona central , $\alpha=(d_x/D_x)$

Distància entre parades (s)

Interval (H)



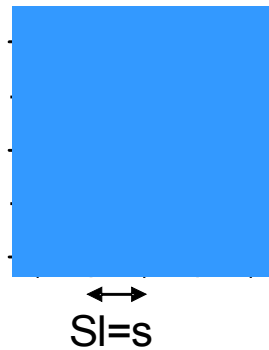
HÍBRIDA RECTANGULAR

Variables que canvien:

Distància entre línies (SI)

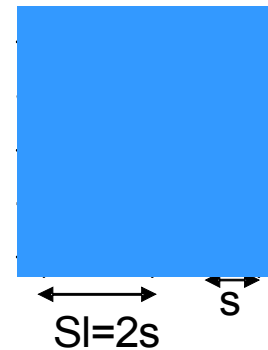
- Parada sense transferència
- Parada amb transferència

Completa



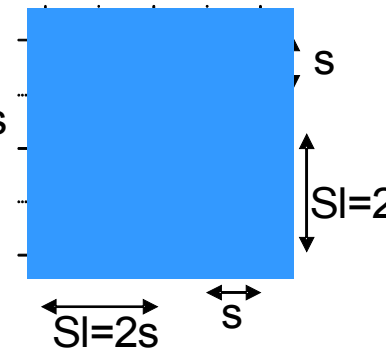
$$L_i = 2 \left(\frac{D_x D_y}{s} \right)$$

Semialternada



$$L_i = \frac{3}{2} \left(\frac{D_x D_y}{s} \right)$$

Alternada



$$L_i = \left(\frac{D_x D_y}{s} \right)$$

Formulació matemàtica: variables dependents

Cost operador

Cost usuari

$$\min \left\{ Z = [\pi_V V + \pi_M M + \pi_L L] + [A + W + T + (\delta / v_w) e_T] : s \geq 0, H \geq 0, 0 \leq \alpha \leq 1, O \leq C \right\}$$

Termes de l'Operador (depenen d' α , s, H)

V	[veh-km/h]	Distància recorreguda pels vehicles per hora
M	[veh-h/h]	Nombre d'autobusos i conductors
L	[km]	Longitud carril (doble direcció)
O	[pax/veh]	Grandària vehicular necessària

Termes de l'Usuari (depenen d' α , s, H)

A	[h]	Temps mitjà d'accés a peu
W	[h]	Temps mitjà d'espera
T	[h]	Temps mitjà de trajecte dins el vehicle
e_T	[-]	Nombre mitjà de transferències
v_c	[km/h]	Velocitat comercial del vehicle

Formulació matemàtica: variables dependents

Cost operador

Cost usuari

$$\min \left\{ Z = [\pi_V V + \pi_M M + \pi_L L] + [A + W + T + (\delta / v_w) e_T] : s \geq 0, H \geq 0, 0 \leq \alpha \leq 1, O \leq C \right\}$$

Termes de l'Operador (depenen d' α , s, H)

V	[veh-km/h]	vehicles per hora
M	[veh-h/h]	tors
L	[km])
O	[pax/veh]	a

Termes de l'Usuari

A	[h]	
W	[h]	
T	[h]	vehicle
e_T	[-]	s
v_c	[km/h]	

**Balanç òptim
entre prestacions
i costos?**

Formulació matemàtica (2): Paràmetres

Paràmetres input

λ	[pax/h]	Demanda horària del mitjà de transport
v	[km/h]	Velocitat creuer del vehicle
v_w	[km/h]	Velocitat a peu
C	[pax]	Capacitat del vehicle
δ	[km]	Penalització en distància per transferència

Pesos

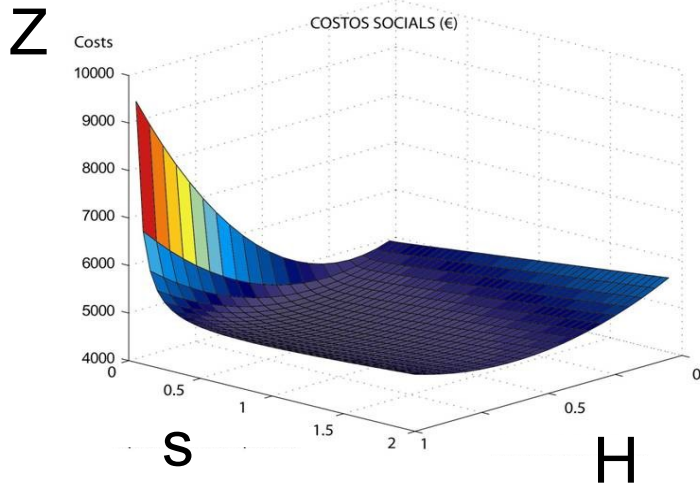
en euros: $\$M$ (€/veh-hr), $\$L$ (€/km-hr) i $\$V$ (€/veh-km)

son costos unitaris coneguts de M, L i V.

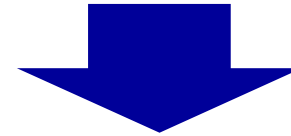
en hores (cost social): $\pi_L = \$L / (\lambda\mu)$, $\pi_V = \$V / (\lambda\mu)$, $\pi_M = \$M / (\lambda\mu)$

Els pesos en euros es conveixen en hores de passatger transportat dividint-los per un factor $(\lambda\mu)$, on μ és el valor del temps de l'usuari [$\$/pax$] i λ la demanda horària [pax/h]

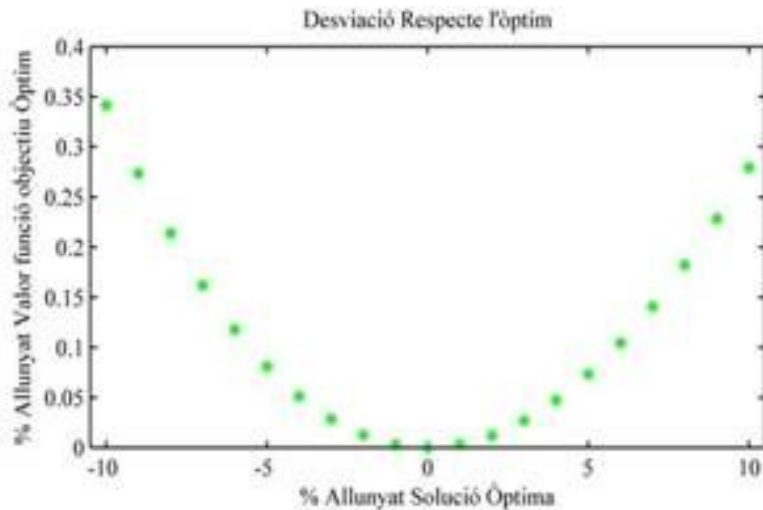
Optimització



Cost Social Total, Z: Suma dels costos de l'usuari i de l'operador en funció de la separació de parades, línies, interval i grandària zona central



Paràmetres òptims: α^* , s^* , H^*



Model robust: Variació suau de la funció objectiu quan s'allunya del domini òptim

$$s/s^* = 1 \pm 5\% \rightarrow Z = 1,01 Z^*$$

Xarxes de TCU al món

Costos i prestacions

	C (p)	v (km/h)	π_L (€/km-h)	π_V (€/veh-km)	π_M (€/veh-h)
Bus	120	25	9	3-5	35-50
BRT	150	40	90	5	40-50
Metro	900	50	900	10	40-60

Chicago $\lambda=70,000$ pax/h; $D_x=30$ km, $D_y=15$ km

Chicago	α	s (km)	H (min)	O (pax)	M (veh)	vc (km/h)	Z_U (min)
Bus	1	0.63/1.26	8.4	117	906	16.88	85
BRT	0.95	0.99/1.98	5.4	149	703	20.96	67
Metro	0.66	1.88/3.76	3	399	342	30.17	64



Bon ajust entre xarxa existent i xarxa òptima



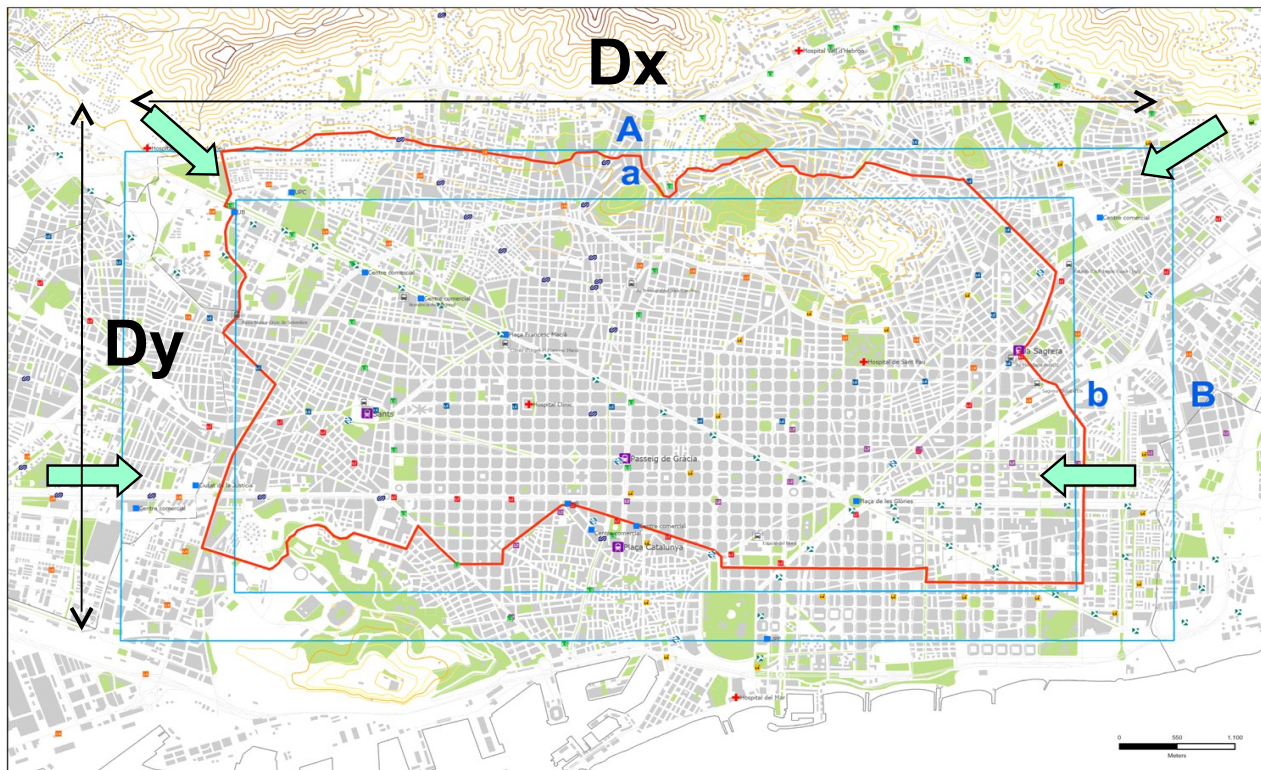
London	α	s (km)	H (min)	O (pax)	M (veh)	vc (km/h)	Z_U (min)
Bus	0.92	0.56	3.5	110	2627	17.8	71
BRT	0.83	0.61	3	150*	1882	25.1	62
Metro	0.57	1.05	2.5	396	724	35	88

Londres $\lambda=80,000$ pax/h; $D=20$ km

RESULTATS a BARCELONA

Disseny xarxa d'autobusos a Barcelona

- Àrea Rectangular de Cobertura $Dx=10$ km i $Dy=5$ km
- Connexions metropolitanes amb carril bus-VAO



Variables de decisió

$s^*=$	650	[m]
$sl^*=$	1300	[m]
$\alpha=$	0,85	[-]
$H^*=$	3	[min]

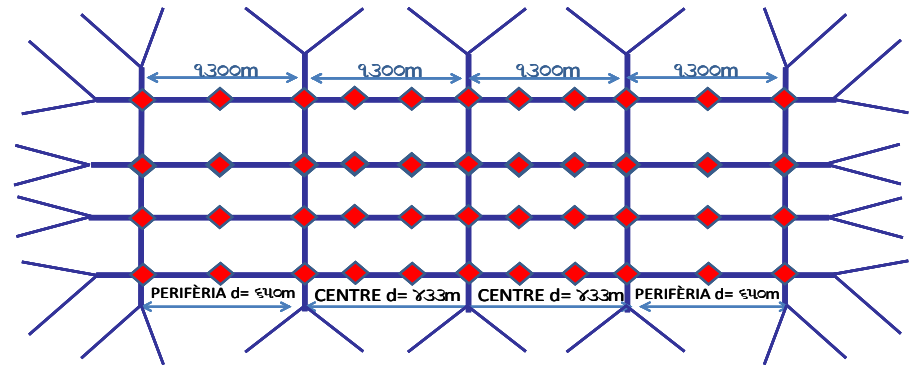
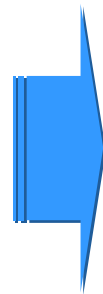
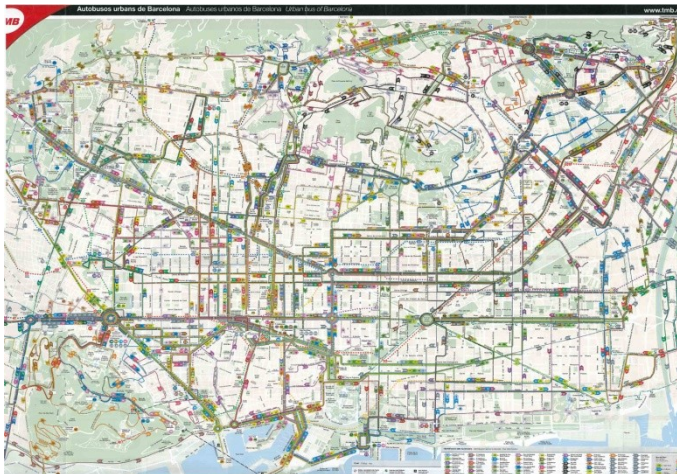
COSTOS

$L=$	90,98 (x2)	[km]
$V=$	3860	[veh-km/h]
$M=$	250	[veh-h/h]
$v_c=$	15,46	[km/h]

Z=42.508 € /h

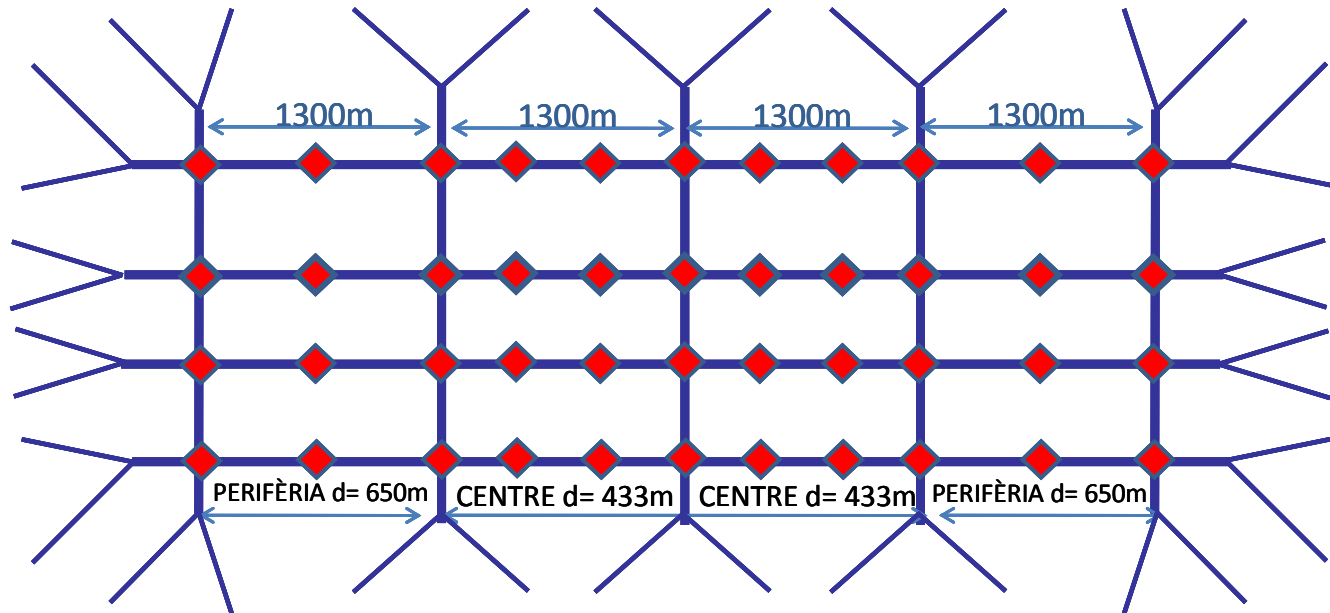
Resultats numèrics de llargues distàncies

	X. Convencional actual	Semialternada a implementar
Temps mig porta a porta (min)	57,9	50,3
Vel. Comercial (km/h)	11,9	15
# Recursos (veh)	890	266
Distància parades (m)	300	650 (430 en zona central)
$a/A = b/B$	N.A.	0,85
Interval (min)	13	3



Model a aconseguir a Barcelona

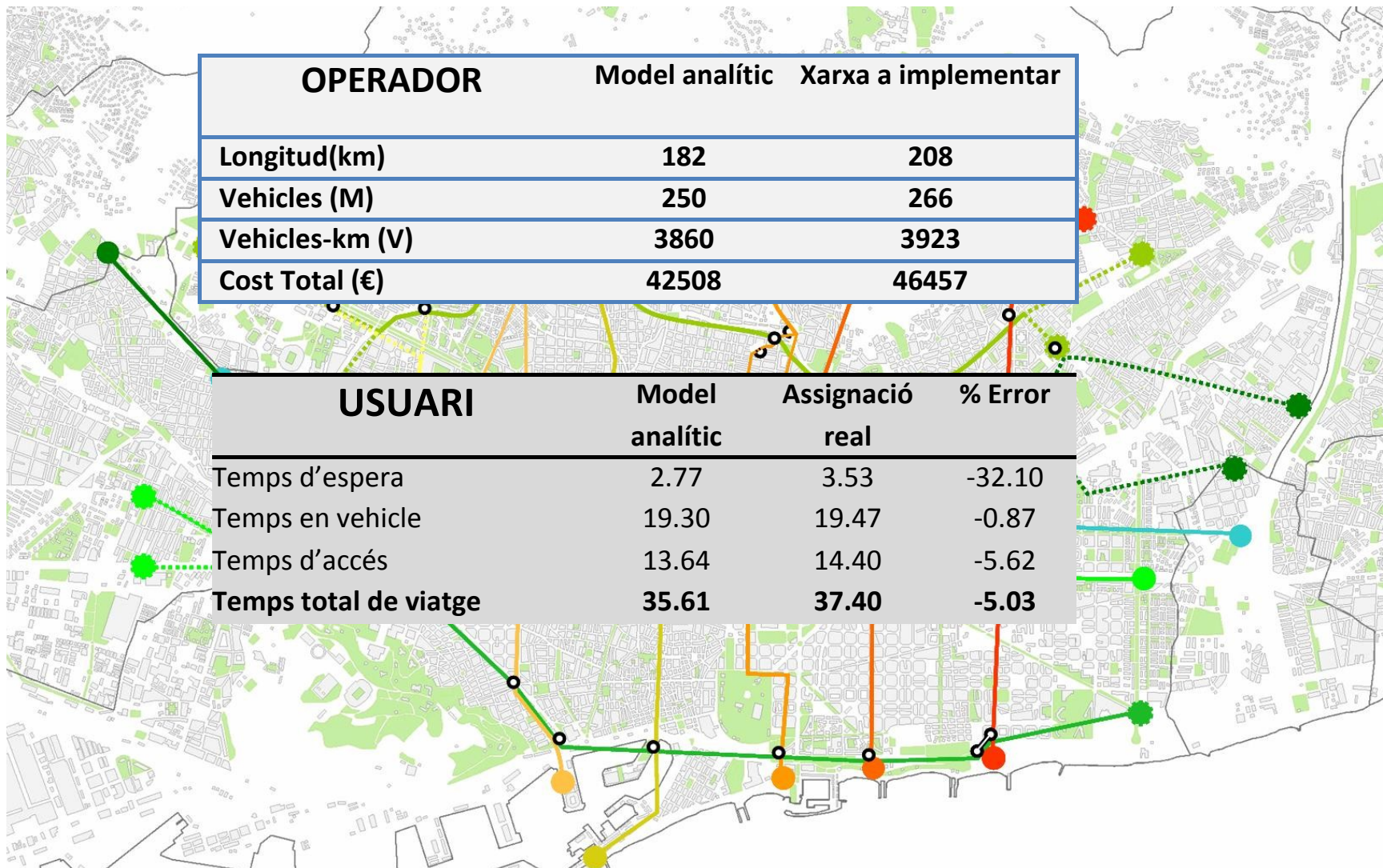
Disseny: Dels números al plànol



Esquema teòric d'espaiament entre corredors

Disseny: Dels números al plànol

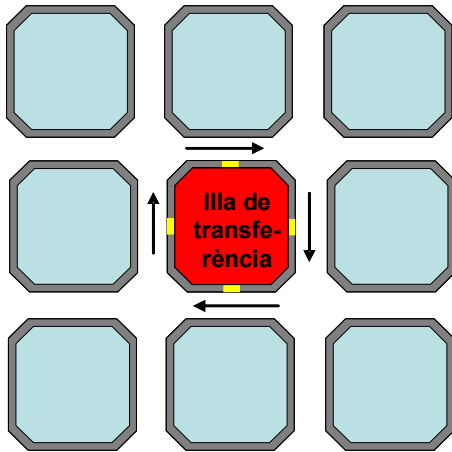
Disseny real i òptim presenten un 5% de diferència en prestacions



Plànol de línies de servei

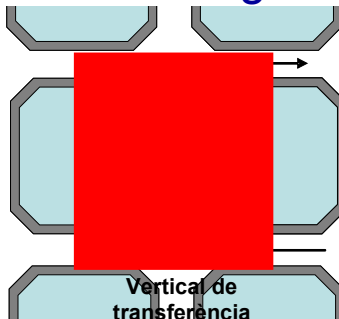
Disseny proposat: Transferències

- Les transferències es poden realitzar a menys de 100 metres a tota la ciutat.
- En l'Eixample es realitzen en una **mateixa illa** en sentit dextrògir. Aquest esquema s'adaptarà a totes les parades de la ciutat



Illa “dextrògira”

- En carrers en doble sentit, es minimitzaran els creuaments de carrers i la distància recorreguda pels usuaris

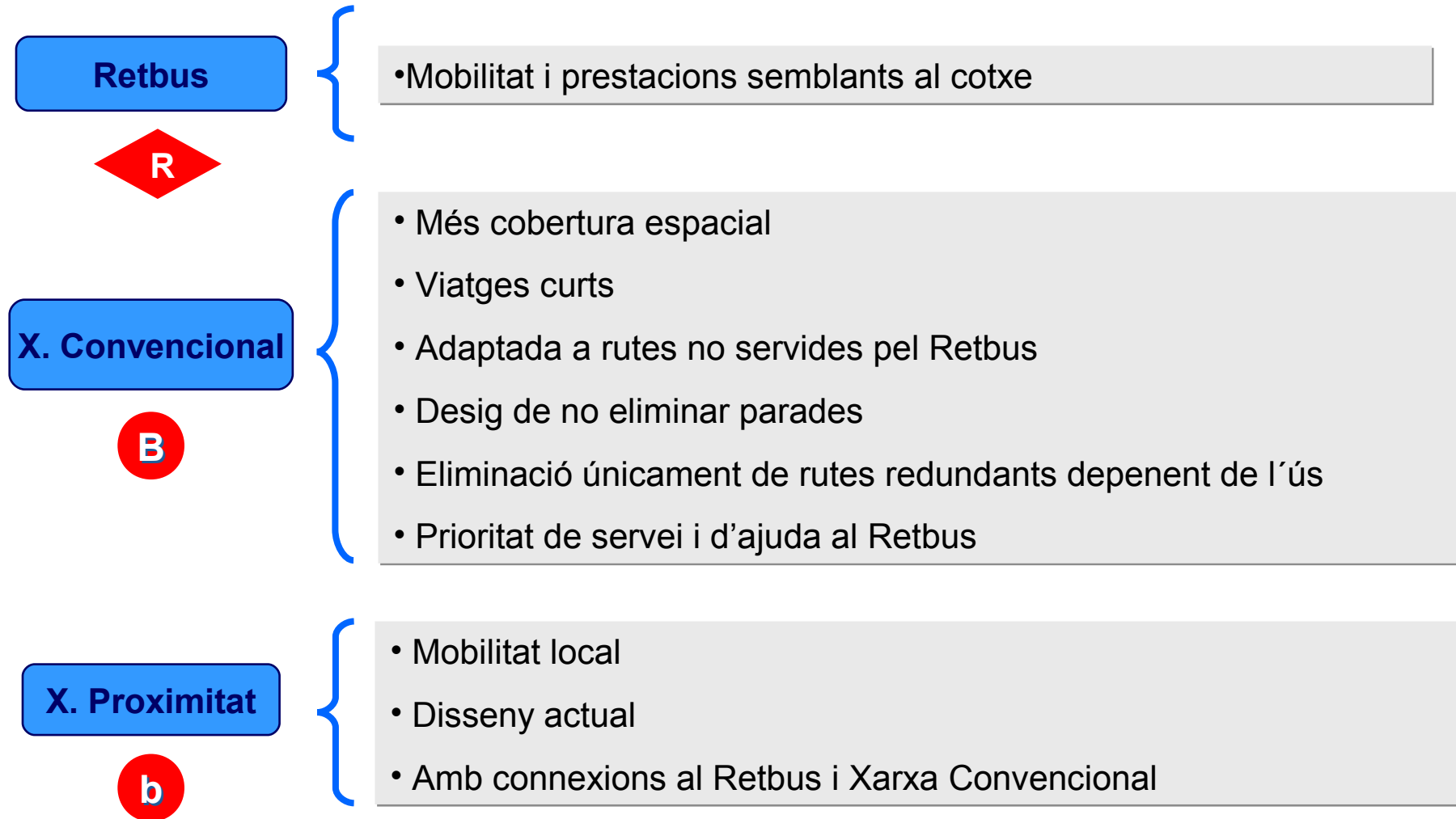


Carrers amb doble sentit de circulació

Disseny proposat: Característiques del RETBUS

- 11 eixos amb xarxa híbrida semialternada
 - 6 eixos Mar-Muntanya (verticals)
 - 5 eixos Besòs-Llobregat (horitzontals)
 - 5 eixos amb bifurcacions
- Espaiament de parades = **650 km (perifèria) i 430 m (centre)**
- Interval de pas = **3 min**
- Relació $\alpha = a/A = 0,85$
- Longitud de la xarxa: **210 km**
- Nombre de vehicles necessaris <RETBUS>: **266 autobusos**
- Velocitat comercial mínima: **15 km/h**
- Capacitat màxima de la xarxa: **60.000 pax/h**

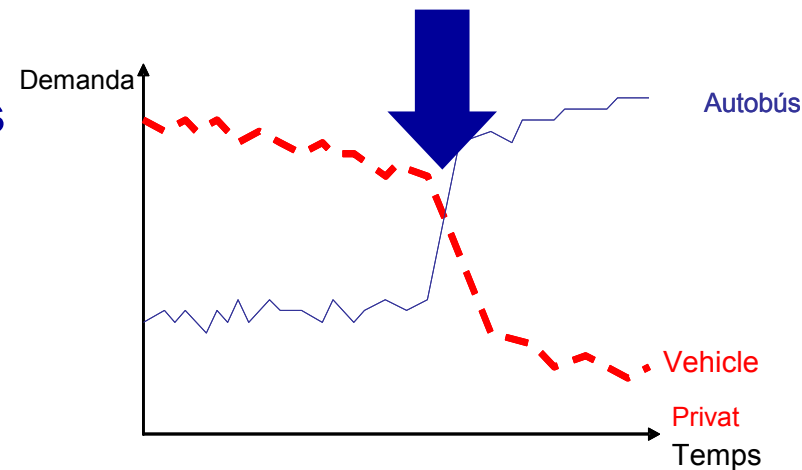
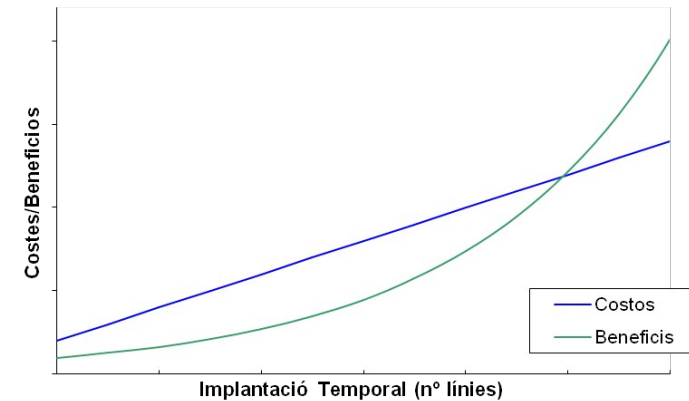
- Percentatge de demanda amb 0 transferències: 20%
- Percentatge de demanda amb 1 transferència: 74 %
- Percentatge de demanda amb 2 transferències: 6%



Desenvolupament

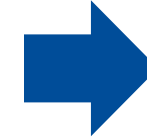
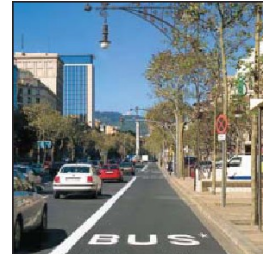
- Línies introduïdes progressivament, (igual que els costos d'operació)
- Els beneficis d'una línia són proporcionals al nombre de línies que connecta: **beneficis** i demanda es materialitzen després de l'**horitzó de posada en servei**.
- Implementació en **corredors amb més demanda i millor connectats**.
- Evolució de la demanda inicial: **TIPPING POINT**.

Costes y Beneficios vs Tiempos de Implantación

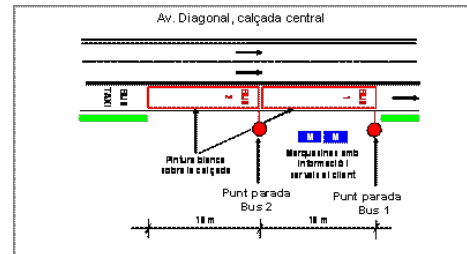


Operació: Mesures prioritàries

❑ Carril bus exclusiu amb color diferencial en trams comuns

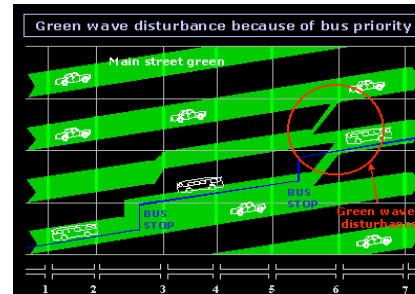


❑ Parades dobles en corredors operats amb línies convencionals o de transferència entre línies Retbus

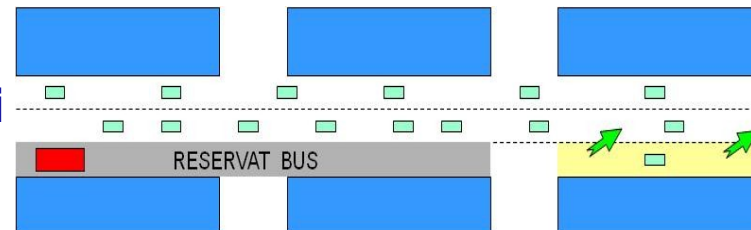


❑ Semàfors amb prioritat per al Retbus

De prioritat passiva a activats



❑ Carrils BLIP (allà on no es pugui construir carril bus permanent)



Conclusions

- ❑ Davant una **re-enginyeria del TCU en Superfície**: disseny, gestió, operacions i ITS

- ❑ Línies **d'autobús** d'altres prestacions com una **alternativa real**, eficaç i eficient al LRT. El **RETBUS** podria cobrir tota la ciutat amb:
 - el 30 % dels recursos mòbils actuals
 - 210 km d'infraestructura
 - augment de la velocitat comercial en un 40%
 - reducció de 7 minuts en el temps mig de viatge

- ❑ Les TIC poden incrementar la velocitat comercial **fins un altre 30%** addicional si s'incrementa la velocitat de creuer (sense parades)

- ❑ Incorporació de la R+D+i, quantificació, know how i mètode científic en totes les fases de planificació i operació.

- ❑ Conscienciació ciutadana, de mitjans i d'usuaris

barcelona

EPF CONFERENCE 2011



Moltes gràcies per la vostra atenció



Dr. Miquel Àngel Estrada Romeu

miquel.estrada@upc.edu

Universitat Politècnica de Catalunya

Centre d'Innovació del Transport

www.cenit.cat