

**POLITECNICO DI MILANO**

**Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale**

**Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Orientamento Infrastrutture di Trasporto**



**ANALISI COMPARATA DI METODI DI  
SIMULAZIONE DEI TRASPORTI PUBBLICI  
LOCALI**

**Relatore: Chiar.mo Prof. Ing. Roberto Maja**

**Correlatore: Arch. Paola Villani**

**Tesi di Laurea di**

**Monica Marconi**

**Matr. 736509**

**Anno Accademico 2009-2010**



# INDICE

---

<b>1. LE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE RETI DI TRASPORTO PUBBLICO URBANO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. IL RUOLO DEL TRASPORTO NELLO SVILUPPO DELLE CITTÀ</b>	<b>2</b>
1.1.1. LA LOCALIZZAZIONE DELLE CITTÀ	2
1.1.2. LA DIMENSIONE DELLE CITTÀ	4
1.1.3. FORMA E STRUTTURA DELLE CITTÀ	5
<b>1.2. L'EVOLUZIONE DI UN SISTEMA TPL</b>	<b>12</b>
1.2.1. SPECIFICITÀ DEI TPL	12
1.2.2. DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONE DEI TPL	14
1.2.2.1. MODALITÀ DI PRODUZIONE DEL SERVIZIO .....	15
1.2.2.2. TIPOLOGIA DELLA SEDE VIARIA .....	18
1.2.2.3. TECNOLOGIA UTILIZZATA .....	21
1.2.2.4. CARATTERISTICHE DEL SERVIZIO .....	22
1.2.2.5. CLASSI DI ALTERNATIVE MODALI .....	23
1.2.3. EVOLUZIONE DEI TPL IN UN'AREA URBANA MODELLO	24
1.2.3.1. INSEDIAMENTO (FASE 1) .....	26
1.2.3.2. CITTADINA (FASE 2) .....	28
1.2.3.3. CITTÀ (FASE 3) .....	29
1.2.3.4. METROPOLI (FASE 4) .....	29
1.2.3.5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	30
<b>1.3. CARATTERISTICHE DELLE PRINCIPALI ALTERNATIVE MODALI</b>	<b>33</b>
1.3.1. MODALITÀ CONVENZIONALI (BUSWAYS)	33
1.3.2. MODALITÀ SEMIRAPIDE	36
1.3.3. MODALITÀ RAPIDE	39
1.3.4. CONFRONTO TRA LE ALTERNATIVE	41
<b>1.4. CARATTERISTICHE DELLE FERMATE</b>	<b>44</b>
1.4.1. FERMATE DI TIPO 1	45
1.4.1.1. FERMATE 1-A .....	45
1.4.1.2. FERMATE 1-B E 1-C .....	47
1.4.2. FERMATE DI TIPO 2	48
1.4.2.1. FERMATE 2-A .....	48
1.4.2.2. FERMATE 2-B E 2-C .....	49
1.4.3. FERMATE DI TIPO 3	50
1.4.3.1. FERMATE A+B E A+C .....	50
1.4.3.2. FERMATE B+C .....	50

1.4.3.3.	FERMATE A E/O B E/O C + D .....	51
----------	---------------------------------	----

## **2. I MODELLI PER LA SIMULAZIONE DELLE RETI TPL**

**54**

### **2.1. CRITERI GENERALI PER LA MODELLIZZAZIONE DEI SISTEMI 55**

2.1.1.	IL PROCESSO DI MODELLIZZAZIONE .....	55
2.1.1.1.	IDENTIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE TEMPORALI RILEVANTI .....	57
2.1.1.2.	IDENTIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE SPAZIALI RILEVANTI .....	61
2.1.1.3.	DEFINIZIONE DELLE COMPONENTI DI DOMANDA RILEVANTI .....	62
2.1.1.4.	OFFERTA DI TRASPORTO .....	63
2.1.1.5.	DOMANDA DI TRASPORTO .....	78
2.1.1.6.	INTERAZIONE DOMANDA/OFFERTA (ASSEGNAZIONE) .....	87
2.1.2.	ERRORI DI MODELLIZZAZIONE .....	90
2.1.2.1.	ERRORI DI SPECIFICAZIONE .....	91
2.1.2.2.	ERRORI NELLA RACCOLTA DEI DATI .....	93
2.1.2.3.	ERRORI COMPUTAZIONALI .....	96

### **2.2. I MODELLI DI SIMULAZIONE DISPONIBILI 97**

2.2.1.	MODELLI STATICI .....	98
2.2.1.1.	MODELLO DI OFFERTA .....	98
2.2.1.2.	MODELLO DI DOMANDA .....	100
2.2.1.3.	MODELLO DI ASSEGNAZIONE .....	106
2.2.2.	MODELLI CON DINAMICA INTERPERIODALE .....	108
2.2.2.1.	MODELLO DI OFFERTA .....	108
2.2.2.2.	MODELLO DI DOMANDA .....	109
2.2.2.3.	MODELLO DI ASSEGNAZIONE .....	112
2.2.3.	MODELLI CON DINAMICA INTRAPERIODALE .....	116
2.2.3.1.	MODELLO DI OFFERTA .....	117
2.2.3.2.	MODELLO DI DOMANDA .....	119
2.2.3.3.	MODELLO DI ASSEGNAZIONE .....	123
2.2.4.	MODELLI DOPPIAMENTE DINAMICI .....	124
2.2.5.	ESPERIENZE E CONSIDERAZIONI .....	125

## **3. APPLICAZIONE DI MODELLI DI SCELTA DEL PERCORSO ALLA RETE TPL MILANESE**

**128**

### **3.1. IMPOSTAZIONE DI UNA SIMULAZIONE 129**

3.1.1.	PIANIFICAZIONE DEL LAVORO .....	129
3.1.2.	DATI DISPONIBILI .....	132
3.1.3.	APPROCCIO AL PROGRAMMA CUBE .....	141
3.1.4.	PREPARAZIONE DELLA RETE .....	143
3.1.5.	COSTRUZIONE E ENUMERAZIONE DEI PERCORSI .....	146
3.1.6.	VALUTAZIONE DEI PERCORSI .....	155
3.1.7.	ASSEGNAZIONE .....	163

### **3.2. ANALISI DEI RISULTATI (CASO STATICO) 169**

<b>3.2.1.</b>	<b>VALUTAZIONE QUALITATIVA DEI FLUSSI</b>	<b>169</b>
3.2.1.1.	TEMPO MASSIMO DI ACCESSO/EGRESSO .....	170
3.2.1.2.	TEMPO MASSIMO DI TRASBORDO .....	172
3.2.1.3.	NUMERO MASSIMO DI TRASBORDI.....	175
3.2.1.4.	TEMPO MASSIMO DI ATTESA.....	177
3.2.1.5.	ALTRI PARAMETRI.....	179
<b>3.2.2.</b>	<b>CONFRONTO DEI FLUSSI</b>	<b>179</b>
3.2.2.1.	TEMPO MASSIMO DI TRASBORDO .....	181
3.2.2.2.	NUMERO MASSIMO DI TRASBORDI.....	183
3.2.2.3.	TEMPO MASSIMO DI ATTESA.....	185
3.2.2.4.	DIFFERENZA DI COSTO.....	187
3.2.2.5.	COEFFICIENTE DEL MODELLO LOGIT .....	189
3.2.2.6.	PERCENTUALE DI SCELTE TRASCURATE .....	191
3.2.2.7.	NUMERO DI ITERAZIONI.....	193
3.2.2.8.	ALTRI PARAMETRI.....	194
<b>3.2.3.</b>	<b>CONFRONTO DELLE MATRICI DI SKIM</b>	<b>195</b>
3.2.3.1.	PENALITÀ DI SALITA .....	195
3.2.3.2.	PENALITÀ DI TRASBORDO .....	200
<b>3.2.4.</b>	<b>FACTORS FILES (CASO STATICO)</b>	<b>204</b>
<b>3.3.</b>	<b>ANALISI DEI RISULTATI (CASO DINAMICO)</b>	<b>206</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>CONFRONTO DEI FLUSSI</b>	<b>207</b>
3.3.1.1.	ORARIO DI PARTENZA DALL'ORIGINE .....	207
3.3.1.2.	COEFFICIENTE DELLA DISTRIBUZIONE DI KIRCHOFF .....	208
3.3.1.3.	PERCENTUALE DI SCELTE TRASCURATE .....	210
3.3.1.4.	ALTRI PARAMETRI.....	211
<b>3.3.2.</b>	<b>FACTORS FILES (CASO DINAMICO SENZA RITARDI)</b>	<b>213</b>
<b>3.3.3.</b>	<b>FACTORS FILES (CASO DINAMICO CON RITARDI)</b>	<b>214</b>
<b>4.</b>	<b>RISULTATI E CONCLUSIONI</b>	<b>216</b>
<b>4.1.1.</b>	<b>RISULTATI DELLE SIMULAZIONI</b>	<b>216</b>
<b>4.1.2.</b>	<b>CONSIDERAZIONI FINALI</b>	<b>221</b>



# ABSTRACT

---

Il trasporto è una delle funzioni principali delle aree urbanizzate. I sistemi di trasporto urbani si configurano come opportunità per soddisfare l'esigenza di mobilità locale, ma producono poi una serie di altri effetti:

- incidono sulla dimensione e sulla forma delle città;
- influenzano la localizzazione, la diffusione e la circoscrizione delle attività e delle densità abitative;
- hanno un ruolo essenziale nello svolgimento della vita quotidiana, per cui contribuiscono a determinare la qualità della vita degli abitanti;
- modificano la qualità dei luoghi urbani, in termini di accessibilità, spazi utilizzati, inquinamento acustico e atmosferico.

Da queste considerazioni, emerge la necessità di dedicare particolare attenzione all'organizzazione dei trasporti in ambito urbano, cercando di:

- gestire in maniera opportuna la configurazione articolata della rete e la presenza di numerose alternative modali;
- ottenere sistemi integrati dal punto di vista infrastrutturale, gestionale e tariffario;
- massimizzare l'accessibilità delle singole zone;
- minimizzare gli impatti interni ed esterni negativi.

Per conseguire tali risultati, è necessario avere a disposizione strumenti modellistici che consentano di simulare il funzionamento dei sistemi e fungano da supporto a pianificazione e programmazione dei trasporti pubblici locali. La mia tesi è partita

proprio da questa considerazione; ho cominciato con l'approfondire la conoscenza dei sistemi, cercando di derivarne le caratteristiche rilevanti ai fini modellistici; in seconda battuta, ho condotto una ricerca bibliografica sulla teoria alla base del processo di simulazione e ho selezionato, tra i numerosi modelli presenti in letteratura, quelli più idonei ad essere applicati all'ambito urbano, concentrandomi in maniera particolare sulla fase di scelta del percorso; infine, ho cercato di applicare i concetti appresi, effettuando una serie di simulazioni sulla rete di trasporto collettivo della città di Milano. Con queste applicazioni, ho voluto dimostrare che i modelli di tipo dinamico si avvicinano maggiormente ai flussi reali rispetto a quelli di tipo statico e che hanno notevoli potenzialità di sviluppo futuro.





# 1. LE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE RETI DI TRASPORTO PUBBLICO URBANO

---

I trasporti pubblici in ambito urbano costituiscono un settore del tutto particolare nell'ambito dello studio dei sistemi di trasporto. Presentano infatti dei requisiti specifici e strettamente correlati alle tipologie dei centri urbani nei quali sono localizzati; da un lato, hanno un ruolo essenziale per favorire lo sviluppo delle attività, in termini di collegamento tra le aree residenziali e quelle produttive, terziarie e di svago, dall'altro hanno conseguenze dirette sulla qualità stessa dei luoghi urbani, in termini di accessibilità, spazi utilizzati, inquinamento acustico e atmosferico.

Per questi motivi, le reti di trasporto pubblico in ambito urbano presentano configurazioni molto complesse e articolate, sia da un punto di vista fisico sia funzionale, in particolare nelle grandi città; tale complessità rende necessaria la formulazione di modelli appositi e la specializzazione dei modelli esistenti per una loro corretta simulazione. In questo capitolo introduttivo vengono presi in considerazione i principali aspetti tecnici, organizzativi ed economici dei sistemi in esame, in modo da approfondirne la conoscenza e derivarne le caratteristiche rilevanti ai fini modellistici; si parte da un'analisi del ruolo dei sistemi di trasporto nello sviluppo delle città, si

prosegue con il processo evolutivo in un'area urbana modello, per poi arrivare a definirne le componenti principali e i loro attributi.

## **1.1. IL RUOLO DEL TRASPORTO NELLO SVILUPPO DELLE CITTÀ**

La presenza e la diversificazione dei sistemi di trasporto hanno mostrato, fin dalle origini, una chiara influenza sulla nascita e sulla crescita dei centri urbani. In particolare:

- i trasporti a lunga distanza hanno contribuito alla *localizzazione* delle città;
- i trasporti a lunga distanza e locali hanno influenzato la loro *dimensione*;
- i trasporti locali hanno influito sulla loro *forma e struttura*.

Nei successivi paragrafi vengono descritti in maniera più dettagliata questi effetti, con particolare attenzione agli aspetti relativi ai trasporti locali, che sono l'oggetto della tesi. I concetti sono riconducibili agli studi di A. F. Weber sullo sviluppo degli agglomerati urbani e all'esperienza di V. Vuchic in merito ai sistemi di trasporto urbani.

### **1.1.1. LA LOCALIZZAZIONE DELLE CITTÀ**

I primi effetti del trasporto sul posizionamento degli agglomerati urbani sono riconducibili ai primi scambi commerciali, che risalgono al periodo arcaico, quando vennero realizzate le prime strade, con pietre e ciottoli, ad opera di alcune popolazioni indoeuropee. Prima di quest'epoca neolitica, gli spostamenti di uomini e merci non seguivano itinerari materializzati e precisi, poiché si basavano sugli itinerari di caccia e sulla localizzazione dei rifugi primitivi. Con la nascita dell'agricoltura e la successiva specializzazione della produzione dei beni, gli scambi commerciali si intensificarono sempre più e si formarono quindi i mercati e le vie commerciali in grado di collegarli.

Le vie commerciali si snodavano su corridoi preferenziali, dove il passaggio dei mezzi di trasporto dell'epoca risultava più facile: sentieri con scarsa vegetazione e privi di ostacoli naturali come colline e montagne, fiumi e vie d'acqua secondarie, e poi rotte marittime di facile percorrenza. Lungo le vie commerciali, vennero posizionati una serie di punti di appoggio, che solitamente erano punti in cui avveniva un passaggio significativo per le merci in viaggio; si poteva trattare dell'intersezione di più vie commerciali, e quindi c'era la possibilità di passare da una all'altra, oppure era un punto comune a due diverse modalità di trasporto, per cui si rendeva necessario il trasferimento delle merci su altri tipi di mezzi, come i porti marittimi e fluviali.

Le prime città si posizionarono quindi in corrispondenza del punto estremo di una via commerciale, oppure in un suo punto intermedio, o, meglio ancora, in punti comuni a più vie commerciali; esse si configuravano, nei primi due casi, come centri di produzione o di scambio di beni, mentre, nel terzo caso, come centri di passaggio dei beni. Tale posizionamento strategico è ancora oggi visibile in molti casi, sia a livello nazionale che internazionale: basti pensare alla distribuzione degli agglomerati lungo le principali vie d'acqua come il Danubio, il Nilo, il Mississippi; ai grandi centri sulle coste del Mediterraneo, dell'Atlantico, del Pacifico; alle metropoli sviluppatesi in pianura lungo grandi arterie di traffico, e così via.

Il trasporto ha un ruolo significativo se si prova a pensare anche ad altri fattori che potrebbero aver condizionato lo sviluppo delle città. Se venivano fatte considerazioni di tipo strategico, infatti, si rendeva necessario il posizionamento in una zona difficilmente accessibile da uno o più lati; in questo caso, venivano tipicamente scelte zone vicine a ostacoli naturali, che rendevano difficile o impossibile la costruzione di vie di trasporto, come montagne o vie d'acqua dove la navigazione era rischiosa. Se invece il fattore determinante era lo sfruttamento di una risorsa naturale, come per esempio una miniera

o un giacimento, i tempi di trasporto ai più vicini centri di trasformazione o di vendita assumevano una discreta importanza.

I trasporti di cui si è parlato in questo paragrafo, cioè in grado di sostenere vie commerciali, dare accessibilità alle zone o alimentare i centri di produzione sono tipicamente trasporti a medio-lunga distanza, ovvero trasporti che collegano le città tra di loro. Nei successivi paragrafi si restringe la visuale ai trasporti nei pressi delle città, o al loro interno, e si descrive in che modo essi influenzano la loro configurazione.

### **1.1.2. LA DIMENSIONE DELLE CITTÀ**

La crescita degli agglomerati urbani, nel corso dei secoli, è stata influenzata sia dai sistemi di trasporto a lunga distanza, che da quelli a breve distanza o locali. Il primo caso è, tipicamente, quello dei centri localizzati presso le intersezioni di numerose vie di comunicazione, preferibilmente con differenti alternative modali e con buone caratteristiche funzionali, in grado di garantire un accesso rapido e sicuro alle zone circostanti; se la presenza di sistemi di trasporto a lunga distanza determina quindi la localizzazione delle città, la loro quantità e qualità indice sulla loro estensione. Il secondo caso è quello degli agglomerati ben connessi al loro interno, in particolare quelli in cui basta la costruzione di un singolo collegamento, come un ponte o un tunnel, per accedere ad altre aree, già sedi di attività socio-economiche, per cui questo semplice collegamento dà la possibilità di costituire un unico agglomerato con dimensione e popolazione maggiori dei due originari.

Un'altra considerazione rilevante da fare riguardo alla crescita di una città è che essa è limitata dalla possibilità di rifornimento di beni di prima necessità per la popolazione che vi risiede; se i volumi necessari per la sopravvivenza dell'intera popolazione non possono arrivare entro un certo tempo massimo, cioè se non è consentito un certo

flusso minimo di generi alimentari, la crescita della città si arresta, finché non vengono potenziata le vie di comunicazione esistenti o ne vengono costruite di nuove.

Un'ultima riflessione importante è che, a questo livello, cominciano ad assumere una certa consistenza le preferenze individuali; infatti, molti individui scelgono di insediarsi in un'area dove è largamente disponibile un'alternativa modale a loro particolarmente congeniale, come per esempio i percorsi a piedi, o automobilistici, o ciclabili, oltre che una gamma di attività socio-economiche di loro gradimento.

### **1.1.3. FORMA E STRUTTURA DELLE CITTÀ**

Dal paragrafo precedente, risulta chiaro che le reti dei trasporti hanno influenzato in maniera decisiva le direzioni di sviluppo urbano, ossia le zone verso cui una città esistente si può espandere; questo processo conduce alla determinazione della forma della città, nelle varie fasi della sua esistenza.

La forma può essere definita come la configurazione del perimetro dell'area urbana e del sua rete di trasporti; essa si è evoluta in tipologie diverse a seconda del ruolo assegnato ai trasporti e dello sviluppo tecnologico dei mezzi nei vari periodi storici. Mentre lo sviluppo tecnologico è un processo a sé stante, che si svolge nell'ambito della ricerca scientifica e non è quindi dipendente o controllabile dall'evoluzione dei centri urbani, il ruolo è strettamente legato a un'altra caratteristica importante delle città, ovvero la loro struttura. Il concetto di struttura fa riferimento alla distribuzione delle densità abitative e degli usi del suolo sul territorio urbano; il trasporto locale è la funzione attraverso la quale tali elementi possono essere collegati in maniera efficiente e duratura, per cui il loro numero, la loro dispersione all'interno dell'area urbana e la loro gerarchia incidono sul ruolo e sull'assetto della rete locale stessa.

In sostanza, quindi, si sono venute a creare forme significativamente diverse tra loro, in funzione della struttura urbana presente e del sistema di trasporti costruito per servirla.

Tali forme sono riconducibili, per la quasi totalità, a quattro categorie principali:

- griglia;
- radiale;
- mista;
- irregolare.

Il caso della griglia quadrata è tipico delle città costruite in epoca romana. L'Impero Romano, nella sua fase di massimo splendore, inglobava tutti i paesi del sud-est europeo, oltre ad alcune zone dell'Europa centrale e ai territori nordafricani e mediorientali affacciati sul Mediterraneo; all'interno di quest'ampia area, si possono trovare tutt'oggi numerosi esempi di città a griglia quadrata. Uno schema analogo si può riscontrare anche in alcune città nordamericane, costruite in epoca moderna. La forma quadrata (figura 1.1.1) è basata su due assi principali, ortogonali tra loro, e su una serie di assi secondari paralleli a questi due, che suddividono la città in tante zone di forma quadrata o rettangolare; esistono anche delle varianti a maglie triangolari o esagonali, il cui funzionamento è del tutto analogo al caso classico. Si tratta di una configurazione regolare e ordinata, nata per servire una struttura urbana ben distribuita con un servizio di trasporto capillare e omogeneo da un punto di vista funzionale. Questa possibilità era adeguata alla tecnologia dell'epoca, che offriva pochissime alternative modali (piedi, cavalli, carrozze); la stessa disposizione crea invece qualche difficoltà nelle città moderne, dove le alternative modali sono decisamente più numerose (piedi, bus, tram, metropolitane, ecc.), le loro caratteristiche funzionali sono molto diverse e quindi si rende necessaria una loro gerarchizzazione e regolazione.



Figura 1.1.1 Il centro di New York, un esempio di griglia quadrata.

La forma radiale è tipica delle città costruite all'epoca delle grandi monarchie, come quelle francese, tedesca, austriaca, russa tra la fine del Rinascimento e l'inizio dell'era contemporanea. Questa tipologia (figura 1.1.2) è costituita da un centro, in cui venivano collocati gli edifici rappresentativi del potere politico, da una serie di assi radiali che si dipartono da esso verso le zone esterne e da alcuni cerchi concentrici che fungono da collegamenti trasversali; una simile configurazione ha, chiaramente, l'intento di favorire il traffico lungo alcune direzioni principali, per servire una struttura urbana fortemente accentrata, mentre la circolazione tra le zone interne della città viene trascurata. Una simile disposizione, nelle città moderne, è aperta al passaggio delle alternative modali



con prestazioni più elevate, in grado di trasportare un numero elevato di passeggeri in breve tempo; risulta però difficile convogliare gli utenti dalle diverse zone verso queste alternative, dato che le modalità più lente, che potrebbero servirle, non sono tenute in grande considerazione e finiscono per condizionare, con la loro inefficienza, l'intero sistema locale.



Figura 1.1.2 La città di Milano, basata su uno schema radiale.

La forma mista (figura 1.1.3) è una combinazione delle due soluzioni appena viste; essa è costituita da una griglia regolare, a cui vengono sovrapposte alcune arterie diagonali.

Si tratta di una configurazione di concezione relativamente recente e il suo intento è quello di sfruttare contemporaneamente i vantaggi offerti dalle due soluzioni separate: il servizio capillare sulla griglia e il transito veloce sui raggi. La sovrapposizione dei due schemi genera però un problema, che è la presenza di intersezioni molto complesse nei punti dove gli assi paralleli incontrano i diagonali o i cerchi concentrici; se questi punti critici sono regolati in maniera efficiente, consentendo ai mezzi un transito fluente e sicuro, allora il disegno misto può servire bene la struttura fortemente decentrata delle città moderne, nate o trasformate dalla rivoluzione industriale. Un ulteriore aspetto a favore di questa configurazione è la possibilità di trasformare i punti critici, dove confluiscono un elevato numero di utenti e una serie di alternative modali differenti, in punti di interscambio, in grado di ripartire velocemente gli utenti tra le alternative stesse; un sistema di trasporti basato su una rete di questo tipo è solitamente molto efficiente.

La forma irregolare fa riferimento a tutti i disegni che non sono riconducibili a una delle tre categorie precedenti, e che in generale non corrispondono ad uno schema ben preciso; è il caso tipico delle città europee nate in epoca medievale e delle città mediorientali. Tale forma (figura 1.1.4) si appoggia su una struttura urbana tendente all'accentramento, in cui gli elementi più importanti sono la chiesa, il mercato e il palazzo del governo, normalmente localizzati nella stessa zona; spesso essi si trovano in un'unica piazza, dalla quale si diparte un reticolo casuale di assi dalle caratteristiche molto varie, che può svilupparsi prevalentemente in una direzione (caso lineare) oppure in più direzioni (caso multidirezionale). Il ruolo del trasporto, in questo caso, non è definito in base alle sole esigenze di mobilità, ma anche in base ad altre esigenze più specifiche, come le particolari condizioni climatiche o la necessità di difendere il perimetro delle città. I collegamenti tra le zone sono disordinati e discontinui e le alternative modali che possono fruirne sono in numero esiguo. Alcune città moderne si

sono sviluppate attorno a un centro storico con queste caratteristiche; nella maggior parte dei casi, la circolazione dei mezzi al loro interno è limitata o ristretta al solo traffico pedonale.

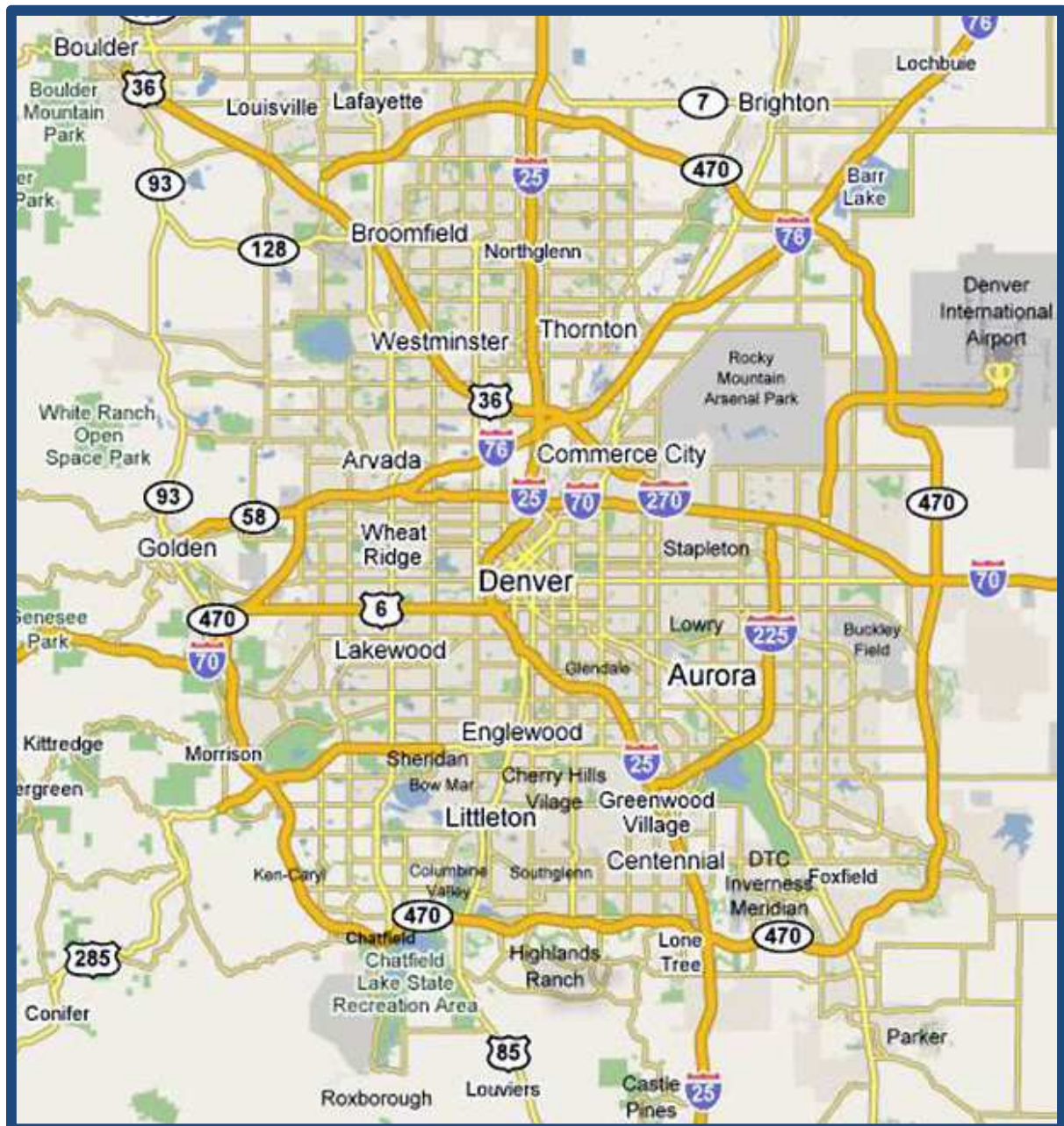


Figura 1.1.3 La città di Denver, un esempio di modello misto grigliato-radiale.



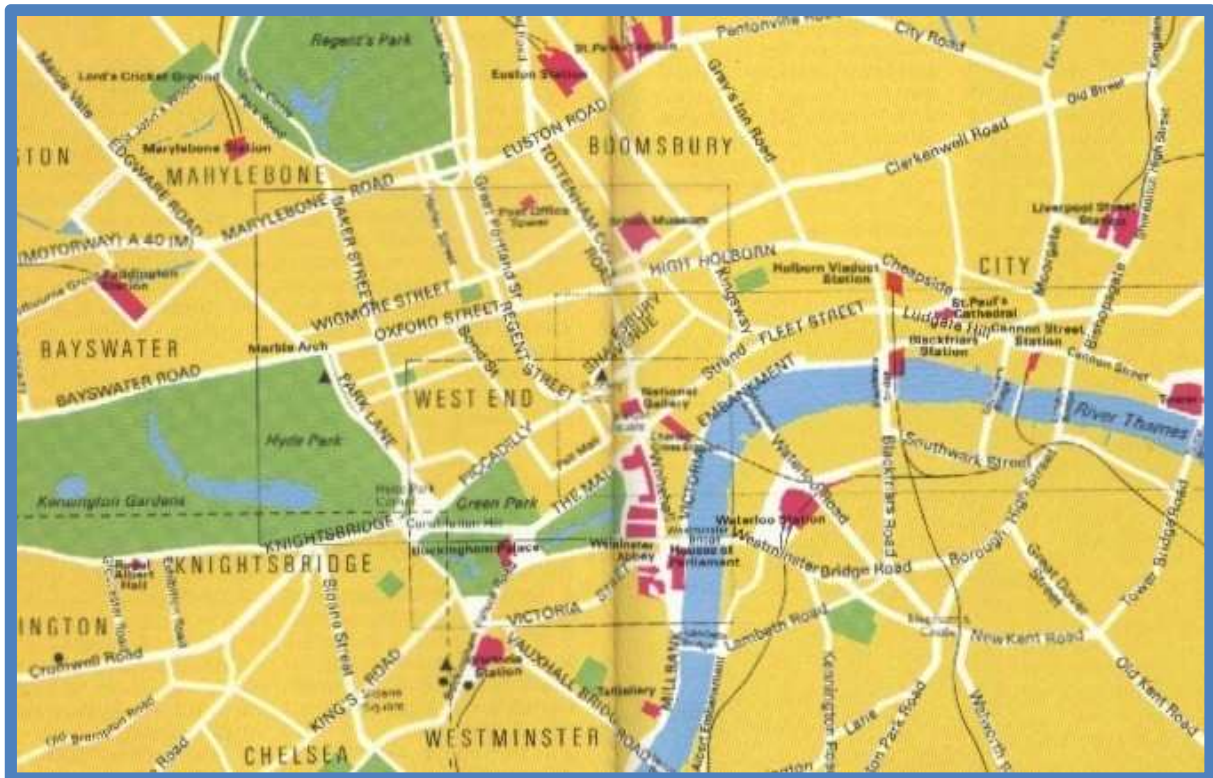


Figura 1.1.4 La città di Londra, un caso di forma irregolare con sviluppo multi direzionale.

Di seguito riporto una tabella contenente alcuni esempi di città che fanno parte delle categorie descritte; è interessante vedere che Milano rientra nella tipologia radiale.

GRIGLIA	RADIALE	MISTA	IRREGOLARE
Barcellona	Amsterdam	Città del Messico	Abu Dhabi
Chicago	Bordeaux	Denver	Acquisgrana
New York	Colonia	Parigi	Francoforte
Roma	Copenaghen	San Pietroburgo	Gerusalemme
San Francisco	Milano	Vienna	Londra
Sidney	Mosca	Washington	Manchester

Tabella 1.1.a Alcuni esempi di città che presentano le forme descritte.

## **1.2. L'EVOLUZIONE DI UN SISTEMA TPL**

Dopo aver analizzato il ruolo dei trasporti locali all'interno degli agglomerati urbani, è possibile studiare l'evoluzione di un sistema TPL (trasporti pubblici locali) nelle diverse fasi che contraddistinguono la crescita di un'area urbana modello e confrontare le caratteristiche delle alternative modali che vengono via via introdotte; la descrizione proposta è concettuale, ma è applicabile a un elevato numero di casi concreti, in quanto i vari stadi del modello sono rappresentativi delle realtà attuali di molte città di dimensioni e forma diverse. Prima, però, è il caso di delineare alcuni aspetti significativi dei TPL, che permettono di comprenderne meglio la complessità e il funzionamento.

### **1.2.1. SPECIFICITÀ DEI TPL**

I trasporti pubblici locali presentano delle caratteristiche distintive che sono dovute essenzialmente all'influenza della struttura urbana, in particolare a due elementi:

- la localizzazione degli insediamenti e delle attività socio-economiche;
- il differente contesto temporale nel quale le attività richiedono lo spostamento delle persone chiamate a svolgerle.

Il primo elemento è una sorta di variabilità nello spazio della struttura urbana; esso tiene conto del numero e della posizione di insediamenti e attività presenti in ciascun centro urbano. Il secondo elemento rappresenta la variabilità temporale degli spostamenti all'interno della struttura urbana; esso dipende principalmente dalla distribuzione e tipologia delle attività socio-economiche. In linea generale, entrambi i parametri diventano tanto più significativi quanto più aumentano le dimensioni di una città: è infatti comune che in una città più grande siano presenti un maggior numero di insediamenti e attività, che queste siano maggiormente ripartite sul territorio e soprattutto che

presentino una varietà maggiore rispetto a una città più piccola. Esistono poi dei casi particolari (si pensi ad esempio alla città di Hong Kong), agglomerati urbani che presentano densità abitative molto elevate e una significativa presenza di attività su superficie ristretta.

Il sistema TPL, per potersi adattare coerentemente a questi elementi, deve senz'altro avere alcune peculiarità. Innanzitutto, deve essere *diffuso* sul territorio per garantire spostamenti di diversa lunghezza, che possono spaziare da poche centinaia di metri fino a una ventina di chilometri nelle grandi metropoli; in secondo luogo, deve essere *capillare* nelle zone che presentano una elevata concentrazione di insediamenti o attività; deve mantenersi *rapido*, *confortevole* e *sicuro*, nonostante l'esigenza di capillarità e le frequenti interferenze con altri mezzi in circolazione, in modo da offrire un servizio di qualità superiore ai mezzi individuali; deve essere il più possibile *flessibile* per adattarsi alla variabilità temporale degli spostamenti e *regolare* nella fornitura del servizio; infine, è buona cosa che sia anche *economico*, per aumentare la competitività rispetto al trasporto privato.

Oltre a queste caratteristiche positive, il sistema TPL deve confrontarsi con alcuni svantaggi: primo tra tutti, non può garantire una totale autonomia nella realizzazione dello spostamento, per cui gli utenti devono rinunciare al loro itinerario ideale e scegliere quello che corrisponde maggiormente alle loro esigenze, tra i vari offerti dal sistema. Inoltre, la privacy degli utenti è limitata e il posto a loro disposizione spesso è minore rispetto a quello che potrebbe offrire un mezzo individuale. Infine, le alternative modali del trasporto collettivo, in particolare quelle con prestazioni più elevate, richiedono l'utilizzo di spazi estesi, che vengono sottratti alla circolazione degli altri veicoli e all'uso per la sosta, oltre a generare impatti significativi sull'ambiente e sulla fruibilità del territorio.

## 1.2.2. DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONE DEI TPL

I trasporti pubblici urbani possono essere classificati secondo diversi criteri, per illustrare i quali è opportuno prima precisare la definizione di tre concetti importanti.

Il *trasporto* è il soddisfacimento della domanda di mobilità, intesa come configurazione spazio-temporale degli spostamenti richiesti da un certo uso del territorio.

Il *sistema di trasporto* è l'insieme degli elementi (infrastrutture, veicoli, sistemi di controllo) e delle loro interazioni fisiche e organizzative che permettono di realizzare il trasporto.

Il *servizio* di trasporto è l'insieme delle attività generate dalle interazioni degli elementi del sistema; è ciò che viene percepito dagli utenti del sistema stesso e viene espresso in termini di attributi di prestazione.

I criteri di classificazione più comuni e condivisi si appoggiano sul concetto di sistema o di servizio e sono:

- modalità di produzione del servizio;
- tipologia della sede viaria;
- tecnologia utilizzata;
- caratteristiche del servizio.

Tali criteri consentono di mettere a confronto i vantaggi e gli svantaggi delle componenti fondamentali dei sistemi (tecnologia, sede viaria) e delle attività risultanti (modalità di produzione, caratteristiche), ma bisogna tenere presente che essi non sono totalmente indipendenti; infatti, gli elementi di due classificazioni diverse possono mostrare un legame più o meno forte o anche sovrapporsi. Tale aspetto verrà messo in evidenza nella seguente trattazione dei vari criteri.

### 1.2.2.1. MODALITÀ DI PRODUZIONE DEL SERVIZIO

Per modalità di produzione si intende il dominio operativo di un servizio di trasporto e la sua disponibilità temporale all'interno del dominio. Questo criterio di classificazione comporta una suddivisione dei TPL in tre categorie fondamentali:

- servizi *personali* o autoprodotti;
- servizi *a domanda* o a chiamata;
- servizi *programmati* o di linea.

Ognuna di queste categorie può essere utilizzata sia dall'utenza individuale, che dall'utenza collettiva; ovviamente i diversi domini operativi si adattano in maniera diversa alle esigenze dell'utenza.

I servizi *personali* si avvalgono dell'uso di mezzi privati, quindi di appartenenza di un utente, per soddisfare una domanda di spostamento del solo utente oppure di un piccolo gruppo di utenti che la condivide. Nel primo caso si tratta di trasporto privato vero e proprio e perciò esula della trattazione dei trasporti pubblici; nel secondo caso, invece, la condivisione della domanda e del veicolo rende il servizio fornito pubblico a tutti gli effetti. Per mezzo di trasporto si intende in questo caso non soltanto l'automobile, ma anche l'alternativa pedonale; nonostante non comporti l'uso di alcun strumento meccanico, infatti, tale alternativa fornisce comunque una possibilità di spostamento e può quindi rientrare nei servizi autoprodotti. I servizi autoprodotti hanno un dominio operativo molto vasto, che comprende tutti gli assi e i nodi della rete percorribili col mezzo privato prescelto, e una disponibilità temporale pressoché continua; in altre parole, l'utente può decidere in totale autonomia il percorso da seguire e l'istante di partenza. Si tratta di una soluzione adottata per necessità, quando l'utente deve compiere uno spostamento che lo riguarda singolarmente e pertanto non può



contare su un servizio su larga scala, o per preferenza, quando l'utente ritiene il servizio autoprodotta più conveniente di quello fornito su larga scala.

I servizi *a domanda* utilizzano veicoli messi a disposizione da operatori specializzati, a tutti coloro disposti a rispettare i termini di un contratto di utilizzo o di noleggio. Tale contratto presuppone l'accettazione di un costo da parte degli utenti e la fornitura di un servizio, da parte dell'operatore, che sia adattabile alle loro esigenze. Per l'utenza individuale le alternative sono il taxi, l'autonoleggio tradizionale o condiviso (car sharing); nel primo caso la corrispondenza con le scelte personali è limitata, ma c'è il vantaggio del confort di viaggio, invece, nel secondo caso, la corrispondenza con le scelte personali è totale. Per l'utenza collettiva, le alternative sono il taxi collettivo, dal funzionamento analogo alla situazione precedente, e le autolinee a chiamata; esse si avvalgono di mezzi simili a quelli dei servizi programmati, ma hanno un funzionamento più flessibile in termini di percorsi e orari. I taxi e gli autonoleggi hanno un dominio operativo vasto e praticamente sovrapposto a quello dei servizi autoprodotti, mentre le autolinee a chiamata restringono il campo operativo a un albero di possibili percorsi; la disponibilità temporale, in tutti i casi, è variabile e comunque limitata. I servizi a domanda sono una soluzione intermedia tra il servizio personale e quello programmato, che viene di norma fornita nelle cosiddette aree a domanda debole, dove cioè si può trovare un discreto numero di utenti interessato a servizio pubblico, ma non tanto elevato da giustificare i costi di attivazione e esercizio di un servizio sistematico.

I servizi *programmati* costituiscono la modalità più rappresentativa dei servizi TPL. Essi si avvalgono di mezzi di grandi dimensioni rispetto ai casi precedenti, operano secondo percorsi e orari prefissati resi noti a priori e sono disponibili per tutti coloro disposti a pagare la tariffa stabilita. Le alternative più comuni sono l'autobus, il tram, il filobus, la metropolitana; le meno comuni, poiché si adattano a situazioni geografiche specifiche,

sono traghetti, sistemi a fune, sistemi ettometrici. I mezzi di trasporto collettivo sono offerti laddove la domanda sia tale da giustificare i costi di realizzazione e di gestione. Il loro dominio operativo è limitato ai percorsi prefissati, che quindi devono essere pianificati con cura, per incontrare le aspettative del maggior numero di utenti possibile senza penalizzarne eccessivamente le prestazioni; la loro disponibilità temporale è limitata agli orari prefissati. L'utenza che utilizza tali servizi lo fa solitamente per preferenza rispetto alle altre tipologie di servizio, per cui è fondamentale che questa categoria mantenga delle prestazioni elevate e dei costi contenuti, tali da motivarne la scelta; in alcuni casi, l'utilizzo è dettato da una necessità, quando le dotazioni per le altre tipologie di servizio non sono sufficienti o sono assenti (mancanza di patente per guidare un autoveicolo, mancanza di taxi, mancanza di parcheggi ecc.). Entrambe le possibilità concorrono a formare la domanda che giustifica la messa in esercizio di un sistema programmato.

Nella tabella seguente viene riassunta la classificazione appena descritta.

		ORGANIZZAZIONE OFFERTA		
TIPO DOMANDA	AUTOPRODUZIONE	A RICHIESTA	DI LINEA	
<b>INDIVIDUALE</b>	a piedi bici motocicletta auto privata	taxi individuale noleggio car sharing	-	
<b>COLLETTIVA</b>	car pooling	taxi collettivo autobus a domanda	autobus filobus tram metropolitana treno locale traghetto sistemi a fune sistemi ettometrici sistemi non convenz.	

Tabella 1.2.a Classificazione dei servizi per modalità di produzione.

### 1.2.2.2. TIPOLOGIA DELLA SEDE VIARIA

La tipologia della sede viaria fa riferimento alle caratteristiche della striscia di territorio sulla quale avviene il transito del veicolo, in particolare al grado di separazione dalle altre componenti di traffico in circolazione; per tale motivo, le categorie afferenti a questo criterio di valutazione vengono anche dette “diritti di precedenza”.

I tracciati *a traffico misto* (figura 1.2.1) si snodano su viabilità comune ad altre componenti di traffico. Il passaggio del veicolo avviene direttamente sulla superficie stradale (taxi, autonoleggi, autobus, filobus) oppure su supporti specifici (tram su rotaie), senza essere fisicamente separato dal passaggio di altri veicoli e pedoni; in alcuni casi, il mezzo di trasporto pubblico può avere dei trattamenti preferenziali, come corsie riservate delimitate con linee longitudinali, segnali speciali o una propria fase di verde in corrispondenza delle intersezioni, altrimenti è costretto a circolare all'interno del flusso veicolare. Questa tipologia di tracciato è quindi contraddistinta da un livello di separazione pressoché nullo dalle altre componenti traffico, con le quali il mezzo pubblico presenta numerose interferenze negative (congestione, rallentamenti, incidentalità, ecc.) che i trattamenti preferenziali possono mitigare, ma non eliminare.

I tracciati *con protezione longitudinale* (figura 1.2.2) sono fisicamente separati dalla viabilità ordinaria con siepi, barriere, marciapiedi o altri elementi infrastrutturali facilmente distinguibili e non oltrepassabili. In questo modo vengono eliminate le interferenze con il flusso veicolare lungo gli assi viari; permangono le interferenze in corrispondenza delle intersezioni, spesso regolate da semafori asserviti, e dei passaggi pedonali, particolarmente numerosi nelle zone a traffico limitato. Il livello di separazione dalle altre componenti di traffico è medio; il flusso del mezzo pubblico mantiene una certa indipendenza da quello degli altri mezzi circolanti, e per di più il sistema è associato a elementi facilmente riconoscibili, che ne aumentano l'impatto visivo.



Figura 1.2.1 Una sede viaria a traffico misto (Londra): l'autobus condivide la corsia con altri veicoli.



Figura 1.2.2 Un tracciato protetto (Milano): la corsia riservata al tram è separata tramite un cordolo rialzato dalle altre corsie, ma consente l'attraversamento pedonale.

I tracciati *completamente indipendenti* (figura 1.2.3) presentano una protezione fisica totale dalla viabilità ordinaria e dagli utenti che vi transitano; tale protezione può essere garantita dalla costruzione di tunnel, strutture aeree, oppure di sedi apposite e svincolate in corrispondenza delle intersezioni. Il livello di separazione dalle altre componenti di traffico è totale: nessun pedone e nessun veicolo, diverso da quelli previsti, può utilizzare questo tipo di tracciato. Vengono quindi eliminate tutte le interferenze con elementi esterni e ciò rende possibile il raggiungimento delle prestazioni massime del sistema; essendo però una soluzione molto costosa e di grande impatto sul territorio, viene solitamente adottata solo per le linee di forza. È evidente che la separazione della sede viaria costituisce un privilegio per un sistema TPL, di conseguenza è una scelta dipendente dal livello di prestazione del servizio, quindi, indirettamente, dal tipo di tecnologia utilizzata e dalle caratteristiche del servizio.



Figura 1.2.3 Una sede viaria indipendente (Bilbao): la corsia riservata al tram impedisce l'accesso a tutte le altre componenti di traffico.



### 1.2.2.3. TECNOLOGIA UTILIZZATA

Per tecnologia di un sistema TPL si intendono le caratteristiche meccaniche dei veicoli e le loro interazioni con i tracciati. È pratica comune suddividere tali caratteristiche in quattro gruppi, prima di operare il confronto tra sistemi diversi:

- *supporto*;
- *guida*;
- *propulsione*;
- *controllo*.

Il *supporto* è il contatto verticale tra veicolo e superficie viabile, che consente di trasferire dall'uno all'altra il peso del veicolo e la forza di trazione. I mezzi gommati (automobili, autobus, filobus) presentano un contatto pneumatico-asfalto o pneumatico-calcestruzzo, mentre i mezzi su rotaia (tram, metropolitane, treni) sono caratterizzati da un contatto acciaio-acciaio o magnetico; le città che dispongono di vie d'acqua transitabili (Venezia, Amsterdam, Parigi, ecc.) possono sfruttare anche natanti e battelli, con contatto scafo-acqua o cuscinetti d'aria-acqua. Il supporto può trovarsi completamente al di sotto del veicolo, essere circondato dal corpo del veicolo oppure trovarsi al di sopra; il caso più comune è il primo, mentre esempi degli altri due si trovano più raramente e comunque al di fuori dall'Italia.

La *guida* è la modalità che consente il mantenimento della traiettoria di un veicolo. I mezzi gommati sono manovrati dal guidatore, oppure da un sistema di pilotaggio automatico sfruttando l'aderenza dei pneumatici sulla pavimentazione, mentre i mezzi su rotaia sono direzionati correttamente grazie alla forma tronco-conica della superficie di contatto. Il tipo di supporto è quindi importante per garantire la guida opportuna ai veicoli; le due classificazioni sono senza dubbio interdipendenti.

La *propulsione* è l'insieme di elementi che consente il movimento di un veicolo; è composto da un'unità di propulsione, in grado di fornire energia al veicolo, e da un sistema di trasferimento della forza di trazione, basato su un certo tipo di supporto. Le unità più comuni sono motori diesel (autobus) ed elettrici (filobus, tram, metropolitane, ferrovie, che sfruttano entrambi un sistema di trasferimento basato sull'aderenza tra ruota e superficie viabile; la seconda tipologia è senza dubbio più adatta all'ambito urbano, dato che produce minori emissioni acustiche e inquinamento atmosferico, ma richiede la costruzione di linee elettriche apposite.

Il *controllo* è la regolazione degli spostamenti di uno o più veicoli facenti parte di un sistema di trasporto. Gli elementi fondamentali per la regolazione sono il distanziamento spaziale dei mezzi, l'apertura/chiusura delle porte, gli annunci ai passeggeri e la gestione degli imprevisti; essi possono essere controllati in modalità manuale/visiva dal conducente (autobus, filobus), in modalità manuale con l'aiuto di segnali (linee su rotaia), in modalità semiautomatica (personale con ruolo di supervisione) o automatica. È evidente che l'automazione consente di ridurre i perditempo e quindi di ottimizzare il servizio, ma sono ancora da perfezionare le reazioni nei confronti degli imprevisti; si tratta di una possibilità aperta a innumerevoli sviluppi futuri.

#### **1.2.2.4. CARATTERISTICHE DEL SERVIZIO**

I sistemi TPL sono in grado di fornire servizi estremamente diversificati. Le caratteristiche fondamentali che li contraddistinguono sono:

- ambito territoriale servito;
- tipo di esercizio svolto;
- intervallo di svolgimento del servizio.

L'*ambito territoriale* è la zona entro la quale si snodano i percorsi relativi a un sistema TPL; esso consente di suddividere i servizi in urbani (interni alla città), suburbani (interni

all'area urbana), extraurbani (uscenti dall'area urbana, sviluppati a livello provinciale o regionale), di breve/media distanza (collegano il centro città a particolari punti di interesse, interni o esterni, con un'elevata densità di attività socio-economiche, come aeroporti, centri commerciali, fiere, distretti affaristici, ecc.).

Il *tipo di esercizio* è il livello di capillarità del servizio, ossia il numero di fermate previste all'interno dell'ambito territoriale di riferimento. Se i mezzi effettuano tutte le fermate, obbligatoriamente o a chiamata, si parla di servizi locali o comprensoriali; se invece effettuano poche o nulle fermate nel tratto comprensoriale, ma tutte nelle località esterne si parla di servizi celeri o regionali; se un servizio celere viene ridotto a poche fermate nelle località più importanti, si parla di servizi espressi o interpolo.

L'*intervallo di svolgimento* è il livello di flessibilità del servizio e consiste nelle fasce temporali di esercizio. I servizi di base sono quelli regolari o quotidiani e scolastici, poi è possibile trovare una gamma molto ampia di servizi irregolari, tra cui quelli limitati alle ore di punta, quelli a chiamata, quelli periodici o speciali, quelli di emergenza, ecc.

#### **1.2.2.5. CLASSI DI ALTERNATIVE MODALI**

I criteri esposti in precedenza relativi al concetto di sistema (tecnologia e sede viaria) consentono di raggruppare le alternative modali in tre classi principali, a cui si farà riferimento nell'analisi dell'evoluzione di un sistema TPL in un'area urbana modello:

- convenzionali (busways);
- semirapide;
- rapide.

Le modalità convenzionali (autobus, filobus, tram tradizionali) operano in una sede viaria a traffico misto e sono controllate in modalità manuale; le modalità semirapide (autobus, filobus, tram potenziati) operano in una sede viaria protetta e possono



presentare diversi livelli di automazione; le modalità rapide (metropolitane, ferrovie) transitano in sede completamente separata e sono controllate con sistemi automatici.

I restanti criteri di classificazione, relativi al concetto di servizio (modalità di produzione e caratteristiche), verranno ripresi per valutazioni successive sulle singole modalità.

### **1.2.3. EVOLUZIONE DEI TPL IN UN'AREA URBANA MODELLO**

Per comprendere a fondo le possibilità di ciascuna alternativa modale, è necessario estraniarsi dalle esperienze fornite dal mondo reale, le quali sono quasi sempre influenzate da fattori che distorcono la visione tecnico-funzionale delle operazioni; tra questi possiamo senz'altro annoverare gli investimenti finanziari, la tariffazione, le preferenze dell'ente competente, i connotati delle singole città, e molto altro ancora.

Per questo motivo, è opportuno studiare l'evoluzione di un sistema TPL in un'area urbana modello, dove gli unici elementi presi in considerazione sono quelli rilevanti per definire i compiti del trasporto: la popolazione e le attività presenti. Il modello (figura 1.2.4), derivato dall'esperienza di V. Vuchic, rappresenta un agglomerato che si espande per fasi successive, a partire da un piccolo insediamento, fino ad arrivare a una metropoli. Le esigenze del trasporto e, di conseguenza, i requisiti del sistema TPL, cambiano in maniera sistematica nel corso di questa evoluzione, poiché devono adattarsi, di volta in volta, a differenti configurazioni di spostamenti richiesti; grazie al modello, è possibile determinare la sequenza ottima di alternative modali da introdurre, ovvero quelle che meglio si adattano, nelle varie fasi, alle configurazioni di spostamenti.

Le quattro macrofasi in cui si può suddividere il modello vengono così definite:

- insediamento (fase 1);
- cittadina (fase 2);

- città (fase 3);
- metropoli (fase 4).

Queste definizioni non corrispondono, nella realtà, ad agglomerati urbani con dimensioni precise e rigorose; si può però dimostrare che esiste un range all'interno del quale i fenomeni descritti sono verosimili. In un contesto mondiale, si possono adottare i seguenti range:

- popolazione < 100000 abitanti (fase 1);
- popolazione tra 100000 e 500000 abitanti (fase 2);
- popolazione tra 500000 e 2000000 abitanti (fase 3);
- popolazione > 2 milioni abitanti (fase 4).

L'analisi si potrebbe suddividere ulteriormente, per esempio considerando altre due fasi, una per popolazione < 50000 abitanti e una per popolazione > 4 milioni di abitanti; risulterebbe però una complessità maggiore, senza un sostanziale cambiamento dei risultati, in quanto le quattro fasi considerate in origine sono già sufficientemente rappresentative del processo evolutivo dei sistemi TPL. Ciò che è da verificare a seconda dell'ambito di analisi, invece, sono i confini dei range; infatti, è possibile che i valori siano diversi da quelli proposti. Considerando un contesto europeo o nazionale, infatti, è più opportuno adottare i seguenti range:

- popolazione < 10000 abitanti (fase 1);
- popolazione tra 10000 e 100000 abitanti (fase 2);
- popolazione tra 100000 e 800000 abitanti (fase 3);
- popolazione > 800000 abitanti (fase 4).

La variabilità dei range non è un limite per l'utilizzo del modello, che può essere sempre applicato, ma occorre di volta in volta ricercare le corrispondenze tra i contesti teorici

(fasi) e i contesti reali (centri urbani), per poter sfruttare correttamente i risultati dell'analisi.

#### **1.2.3.1. INSEDIAMENTO (FASE 1)**

Il primo stadio del modello di area urbana è rappresentato da un piccolo insediamento (figura 1.2.4a), costituito da un numero limitato di abitazioni ed edifici sede di attività socio-economiche, collegati da una elementare rete di strade.

In un situazione simile, gli utenti sfruttano innanzitutto la modalità pedonale; si tratta di un'alternativa sempre disponibile, che non comporta costi monetari e sufficientemente confortevole, entro una distanza di poche centinaia di metri. Man mano che il tratto da percorrere aumenta di lunghezza, diventano significativi gli svantaggi del transito pedonale, ovvero la bassa velocità, le limitazioni nel trasporto dei carichi e il disagio in presenza di maltempo.

Oltre una certa misura, gli spostamenti a piedi diventano sconvenienti per l'utente, che necessita quindi di un'altra scelta modale; il passo che compie è procurarsi un mezzo di trasporto individuale (bicicletta, moto, automobile). Questa tipologia di veicoli si adatta molto bene alle esigenze di mobilità dei piccoli centri: consente infatti di realizzare gli spostamenti sparsi e a basso volume di passeggeri in tempi brevi, strade strette e velocità elevate. L'unica limitazione è costituita dall'eventuale impossibilità fisica, per l'utente, di guidare un veicolo; per arginarla è sufficiente predisporre dei mezzi analoghi, guidati da altre persone, che operano su richiesta (taxi, autolinee a richiesta).

Il centro urbano si trova quindi nella condizione di soddisfare il proprio bisogno di mobilità con servizi autoprodotti e servizi a domanda. Tale condizione è stabile finché la popolazione, e di conseguenza il numero di veicoli circolanti, non cresce oltre una certa soglia, in corrispondenza della quale si ha la congestione della rete.

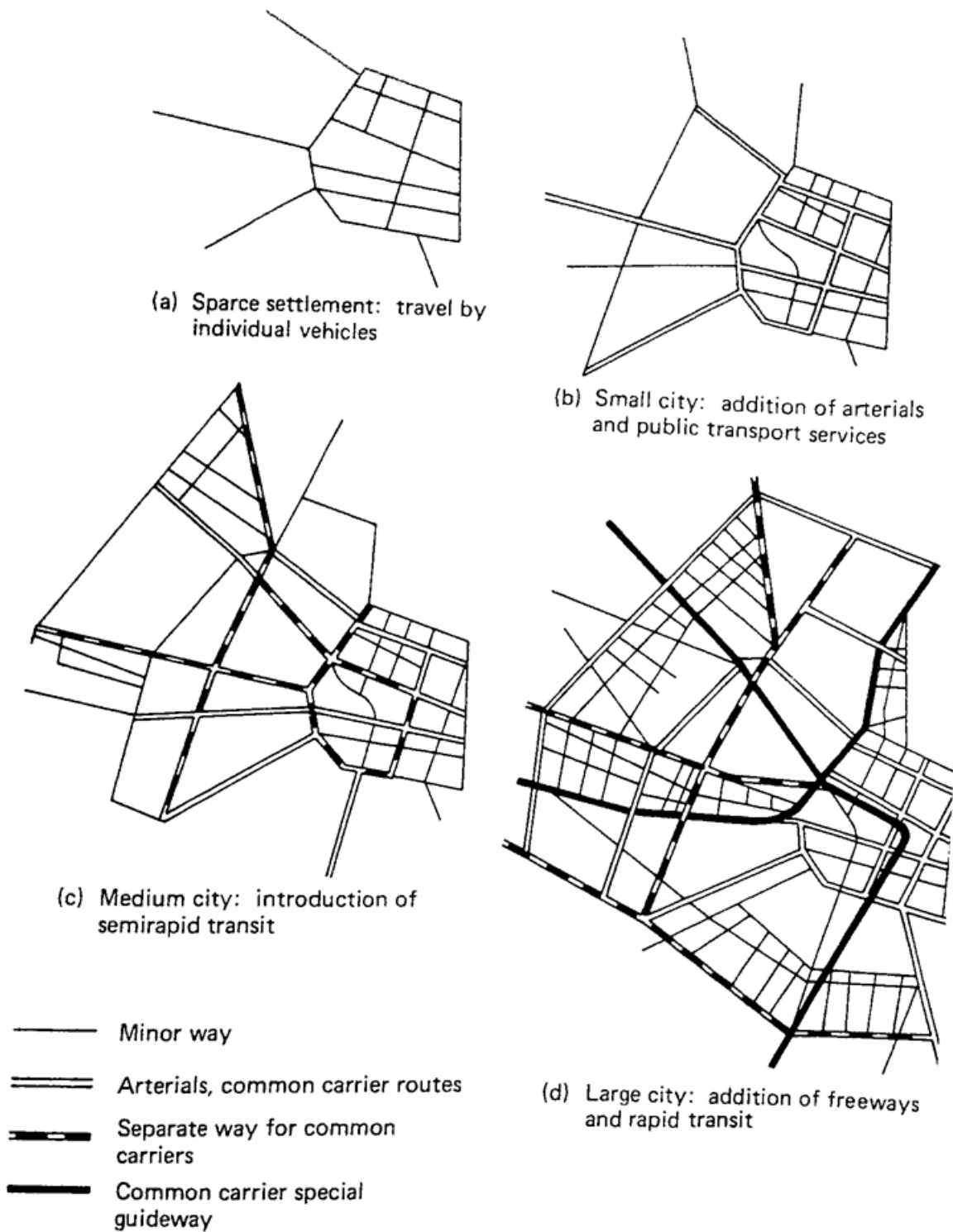


Figura 1.2.4 L'evoluzione di un sistema di trasporto in un'area urbana modello, contraddistinta da quattro fasi: (a) insediamento, (b) cittadina, (c) città, (d) metropoli.

### 1.2.3.2. CITTADINA (FASE 2)

Il manifestarsi della congestione segnala il raggiungimento della capacità della rete. Il sistema di trasporto deve quindi evolversi in una nuova configurazione, che garantisca una capacità maggiore; l'intervento più immediato sulla rete esistente è l'introduzione di veicoli più grandi e più capienti (autobus, filobus). Tali mezzi collettivi hanno dei costi complessivi maggiori rispetto a quelli individuali, ma essi vengono ripartiti su molte più persone, quindi il costo per passeggero o unità trasportata è considerevolmente minore. Inoltre, la loro presenza, seppur ingombrante, consente di ridurre notevolmente il numero di mezzi individuali in circolazione, riportando il traffico a un livello sostenibile, al di sotto della soglia di congestione. Essi costituiscono quindi un'alternativa modale conveniente, sia da un punto di vista monetario che ambientale e sociale, per le esigenze di una cittadina.

L'intervento descritto segna proprio il passaggio dalla prima fase del modello alla seconda. Il centro urbano a questo punto mostra un aspetto modificato (figura 1.2.4b): oltre ad essere più esteso, si può appoggiare su una rete più complessa. Il sistema dei trasporti ha aggiunto ai servizi autoprodotti e a domanda i servizi programmati: in prima istanza, si tratta di servizi regolari e capillari, in grado di realizzare spostamenti sparsi a volume di passeggeri crescente; si potranno poi aggiungere tipologie più diversificate con i successivi sviluppi del centro urbano, e delle attività su di esso presenti.

Man mano che la cittadina si estende e la popolazione cresce, il sistema dei trasporti deve garantire una capacità maggiore: si rende quindi necessaria l'introduzione di veicoli ancora più grandi e capienti. A un certo punto le loro dimensioni risultano eccessive per l'inserimento nella rete esistente; si impone quindi un suo potenziamento, che consiste nella costruzione di nuove strade più ampie, o nell'allargamento di quelle esistenti più trafficate.

### **1.2.3.3. CITTÀ (FASE 3)**

Quando il centro urbano cresce oltre una certa misura, la capacità garantita dagli interventi precedenti viene raggiunta e ci si trova ancora in condizioni di congestione.

Tali condizioni possono essere superate soltanto con l'attuazione di un nuovo intervento; il passo più logico è creare sedi viarie separate per le differenti tipologie di veicoli in circolazione, in modo da ottenere flussi uniformi. La separazione longitudinale consente di ridurre le interferenze tra i mezzi alle sole intersezioni, dove un'efficace controllo semaforico può assicurare il trattamento preferenziale ai mezzi collettivi e il transito sicuro dei pedoni; tale trattamento si rende necessario per arginare le debolezze delle due componenti di traffico, che sono rispettivamente l'ingombro per i mezzi collettivi e la vulnerabilità per i pedoni, ma allo stesso tempo mostra degli influssi positivi anche sul traffico individuale, che ritrova la propria omogeneità.

Le alternative modali presenti a questo punto sono sfruttate al massimo delle loro potenzialità; un successivo sviluppo del centro urbano può essere servito solo con l'introduzione di nuove alternative. La configurazione della rete attuale, basata su strade ampie e sedi viarie protette, può essere integrata con la realizzazione di rotaie e il successivo inserimento di mezzi su ferro (tram); essi sono in grado di offrire un notevole incremento di capacità e numerosi vantaggi in termini di costi monetari e ambientali.

Il centro urbano si trova ora nella condizione di città (figura 1.2.4c): gli insediamenti e le attività sono numerosi e diversificati, la rete dei trasporti è estesa e articolata in modalità di superficie e modalità semirapide.

### **1.2.3.4. METROPOLI (FASE 4)**

I successivi sviluppi dell'area urbana modificano nuovamente le esigenze di mobilità; in quest'ultima fase, gli spostamenti sono concentrati in numerosi punti, a distanze diverse

tra loro, e i volumi di passeggeri sono elevati; lungo i corridoi principali la distribuzione di utenti è quasi continua, dal momento che il flusso non è praticamente mai nullo durante l'intervallo di funzionamento del servizio pubblico.

Per soddisfare tali esigenze, occorre apportare delle modifiche alla rete. Vengono quindi costruite strade a carreggiate separate su alcuni itinerari, per aumentare la capacità e agevolare il flusso sia dei veicoli individuali, che dei veicoli collettivi; questi itinerari sono solitamente quelli tangenziali al perimetro della città, dal momento che consentono di accedere rapidamente a tutte le attività distribuite nelle zone esterne, contribuiscono a smistare il traffico verso le zone interne e hanno a disposizione spazi sufficienti per la loro realizzazione. Per l'accesso diretto al centro città, invece, viene aumentato il livello di separazione delle alternative modali su rotaia, in modo da annullare le interferenze residue con le altre componenti di traffico: si realizzano così modalità rapide, con sedi viarie completamente separate (metropolitane, ferrovie).

Il modello di area urbana, a questo punto, ha raggiunto l'ultimo stadio, ovvero la metropoli (figura 1.2.4d): insediamenti e attività presentano un'estensione notevole e una elevata densità, la rete è molto complessa e sono presenti tutte le modalità TPL.

L'ultimo intervento possibile sul sistema è l'automazione dei veicoli: esso risulta praticabile solo per le alternative rapide, le quali possono contare su elementi che ne facilitano il controllo (sedi viarie esclusive, guida su rotaia) e sono chiamate a trasportare i volumi più alti di passeggeri. L'automazione consente di ottimizzare le operazioni di transito dei veicoli e quindi sfruttarne al massimo le potenzialità.

#### **1.2.3.5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

L'analisi precedente mostra che esiste una forte interdipendenza tra la configurazione degli spostamenti, con i relativi volumi di passeggeri, e le caratteristiche del sistema di

trasporto; in particolare, esiste una sequenza ottima di alternative modali da introdurre, ovvero la sequenza di alternative che si sovrappongono meglio alle diverse configurazioni degli spostamenti.

I passi dell'evoluzione vengono riassunti in figura 1.2.5; i cambiamenti principali che si registrano tra un passo e quello precedente sono:

- prestazioni più elevate, in particolare capacità, velocità, regolarità;
- investimenti più elevati per la realizzazione;
- costi per unità trasportata minori;
- identità più forte del sistema e maggiore attrattività per gli utenti.

Quindi i bassi volumi di passeggeri vengono serviti meglio con modalità a basso investimento iniziale e bassa capacità, mentre per volumi crescenti le modalità a investimento elevato e alta capacità diventano superiori in termini di prestazioni e costi operativi unitari.

La sequenza ottima è applicabile alla quasi totalità dei centri urbani, tenendo conto dei fattori che influiscono sulla loro dimensione, forma e struttura. Se i passi vengono rispettati in maniera rigorosa, essi non rimangono eventi separati, ma diventano componenti costruttivi di un sistema di trasporto unico; questo significa che ci sono ampie possibilità di ottimizzare il funzionamento del sistema TPL completo, oltre al funzionamento delle singole alternative modali. Se invece i passi non vengono rispettati, le modalità di trasporto possono apparire malamente collegate o del tutto sconnesse, pur presentando singolarmente dei rendimenti ottimi; queste carenze impediscono di creare un sistema efficiente e integrato e quindi soddisfare le esigenze di mobilità dei cittadini nel loro complesso, perché si limitano a realizzare singoli spostamenti e non tengono conto della configurazione spazio-temporale degli spostamenti totali. Il rispetto



della sequenza ottima è quindi un punto di partenza fondamentale per poter costruire un sistema di trasporti pubblici locali coeso e funzionale.





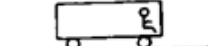


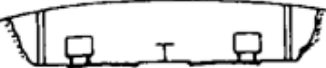
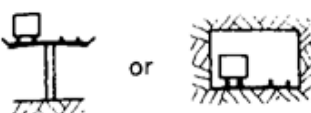
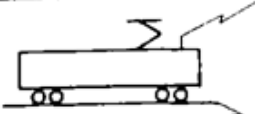
Step no.	Description	Sketch	Major improvements
1	Paths, walking		—
2	Private motorized vehicles		Speed Comfort Convenience
3	Common carrier (rental) vehicles		Service available to all people
4	Widening of the paths		Capacity LOS
5	Introduction of large vehicles		Capacity Cost Comfort
6	Separation of modes		Capacity Reliability Speed of transit
7	Guided technology		Capacity Electric traction Comfort Operating cost
8	Grade-separated paths		Capacity Speed Safety Convenience
9	Fully controlled common carrier ROW		Capacity Speed Reliability Area impact
10	Automated common carrier cabins		Frequency Operating cost Performance

Figura 1.2.5 I passi dell'evoluzione di un sistema di trasporto in un'area urbana di crescenti dimensioni.

## **1.3. CARATTERISTICHE DELLE PRINCIPALI ALTERNATIVE MODALI**

Utilizzando il processo evolutivo appena descritto, è possibile fare alcune valutazioni sulle alternative modali presenti in ambito urbano; a questo scopo, è opportuno riprendere la suddivisione in classi presentata in precedenza.

### **1.3.1. MODALITÀ CONVENZIONALI (BUSWAYS)**

Le modalità che operano in sedi a traffico misto sono la tipologia più comune; si possono infatti trovare in centri urbani di dimensioni molto varie (cittadine, città e metropoli), pur con funzioni diverse da un contesto all'altro. Mentre nei piccoli centri queste modalità di superficie producono un servizio di trasporto unico, nei centri medi e grandi vengono sfruttate anche per convogliare gli utenti verso altre alternative modali, a cui sono collegate nei punti di interscambio: si configurano quindi non solo come servizi a se stanti, ma come supporti ad altri servizi.

Le modalità che fanno parte di questa categoria sono essenzialmente autobus, filobus e tram in sede promiscua.

Gli autobus sono l'alternativa in assoluto più diffusa; sono alimentati da motori diesel e possono comprendere una gamma di veicoli di svariate proporzioni. In Italia, il Codice della Strada vigente impone il rispetto di una sagoma limite ben precisa, in termini di larghezza (art 61.1a: "Ogni veicolo compreso il suo carico deve avere una larghezza massima non eccedente 2,55 m"), altezza (art. 61.1b: "Ogni veicolo compreso il suo carico deve avere un'altezza massima non eccedente 4 m; per gli autobus e i filobus destinati a servizi pubblici di linea urbani e suburbani circolanti su itinerari prestabiliti è consentito che tale altezza sia di 4,30m") e lunghezza (art. 61.2: "Gli autosnodati e

filosnodati adibiti a servizio di linea per il trasporto di persone destinati a percorrere itinerari prestabiliti possono raggiungere la lunghezza massima di 18 m; gli autotreni e filotreni non devono eccedere la lunghezza massima di 18,75 m in conformità alle prescrizioni tecniche stabilite dal Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti”). Per quanto riguarda la città di Milano, gli autobus attualmente in esercizio sono di due tipi: i 12 metri, con capacità di 20 posti seduti e circa 110 in piedi, e i 18 metri, con capacità di 35 posti seduti e circa 150 in piedi. I mezzi di trasporto su gomma molto versatili, poiché possono operare sulla quasi totalità degli assi viari; sarà così possibile pianificare l’offerta di servizio in modo tale da soddisfare le esigenze della domanda<sup>1</sup> attuale e/o futura. Le fermate necessitano di poche infrastrutture e possono essere collocate in vari punti lungo il percorso. Per questi motivi, gli investimenti iniziali, rispetto alle linee a guida vincolata, sono piuttosto bassi, così come quelli per le eventuali modifiche o estensioni. Il sistema di trasporto su gomma si caratterizza poco all’interno del contesto urbano e, sovente, ha un’attrattività scarsa e capacità ridotta. Una corretta pianificazione consente di arginare gli effetti di tali svantaggi, facendo della versatilità il punto di forza del servizio; i mezzi devono quindi essere impiegati su percorsi capillari, con fermate ogni 300-500 metri, che non potrebbero essere gestite con modalità più complesse, e su itinerari che facilitino l’utilizzo di altri servizi con caratteristiche diverse. In questo modo, gli autobus diventano una componente importante del servizio di trasporto pubblico urbano, da una parte perché forniscono un servizio esclusivo, dall’altra perché costituiscono un collegamento solido tra le altre modalità presenti. Il loro ruolo acquista ulteriore importanza se vengono messi in atto dei provvedimenti per disincentivare l’uso dei veicoli privati, come la riduzione del numero di stalli per la sosta oppure l’applicazione di tariffe elevate per il parcheggio.

---

<sup>1</sup> Ciò è possibile se sono garantiti gli spazi minimi necessari per il passaggio della sagoma limite, e se non ci sono impedimenti legislativi di qualsiasi natura.

I filobus sono alternative con caratteristiche analoghe a quelle degli autobus, anche in termini di sagome limite; i servizi che possono offrire sono all'incirca gli stessi, però i filobus presentano un sistema di propulsione elettrico, che necessita di linee esterne e ne limita quindi l'utilizzo alle vie che ospitano tali linee. Queste prerogative riducono leggermente la versatilità dei mezzi, ma consentono di generare numerosi vantaggi, come il comfort di viaggio, le ridotte emissioni inquinanti e un'immagine facilmente riconoscibile; tali peculiarità si sfruttano al massimo su percorsi capillari e particolarmente lunghi, come quelli di attraversamento e tangenziali, mentre non sono la scelta migliore per l'asservimento di altre alternative modali. Per quanto riguarda la città di Milano, sono attualmente in esercizio due tipologie di filobus: la serie 711-735, di dimensioni e capacità analoghe agli autobus 12 metri, e la serie 581-635 (Viberti), di dimensioni e capacità analoghe agli autobus 18 metri.

I tram costituiscono un'altra alternativa largamente diffusa; hanno un sistema di propulsione elettrico, che, nella maggioranza dei casi, necessita di linee aeree, e un sistema a guida vincolata. Tali mezzi possono avere dimensioni molto variabili in funzione del numero di unità (casce) di cui sono composti. La normativa italiana in merito alla sagoma limite delle casce e agli ingombri massimi dei tram è contenuta nelle norme UNI 1736/74 e 8378/72; esse fissano una larghezza massima pari a 2,5 metri e un'altezza massima pari a 4 metri per tutti i mezzi, mentre la lunghezza massima è differente a seconda del numero di casce che compongono il mezzo. Per quanto riguarda la città di Milano, sono presenti numerose tipologie di tram: la serie 1500 (cosiddetti 1928), a una cassa, con capacità di 30 posti seduti e circa 130 in piedi, le serie Jumbo 4800 e 4900, a tre casce, con capacità di 50 posti seduti e circa 270 in piedi, la serie 7000 (cosiddetti Eurotram), a tre casce, con capacità di 70 posti seduti e circa 260 in piedi, e, infine, la serie 7100 (cosiddetti Sirio), a cinque o sette casce, con

capacità di circa 70 posti seduti e 285 in piedi<sup>2</sup>. Le fermate delle linee tranviarie sono distanziate di circa 300-500 metri, per cui consentono un servizio capillare, analogamente a un bus o un filobus. Anche in questo caso, la necessità di appoggiarsi a linee di alimentazione esterne riduce leggermente la versatilità dei mezzi, ma consente di migliorare il comfort di viaggio e ridurre le emissioni inquinanti, oltre che fornire un'immagine facilmente riconoscibile, per cui l'applicazione più idonea è su percorsi di attraversamento e tangenziali, piuttosto che per convogliare i flussi verso altre alternative modali.

### **1.3.2. MODALITÀ SEMIRAPIDE**

Le modalità semirapide si basano sugli stessi mezzi che fanno parte delle modalità convenzionali, con la sostanziale differenza che essi operano in sedi protette longitudinalmente e le fermate vengono posizionate a distanza maggiore (400-800 metri). Si possono trovare in centri urbani di dimensioni medio-grandi (città e metropoli), sia come servizi a se stanti, che come supporti ad altri servizi. Le linee tranviarie che operano in sede protetta vengono definite metropolitane leggere e sono spesso composte da due veicoli accoppiati, che quindi possono ospitare fino a 600 passeggeri.

Le prestazioni migliorate che tali modalità possono offrire dipendono dalla presenza e dalla qualità di una serie di elementi. Innanzitutto, i veicoli devono avere porte numerose e pavimenti ribassati, oppure pavimenti standard con piattaforme rialzate, in modo da garantire una rapida salita/discesa dei passeggeri alle fermate; devono inoltre avere un aspetto facilmente distinguibile nel contesto urbano e un buon comfort di viaggio. In secondo luogo, le fermate vengono poste a una distanza maggiore rispetto a quelle in sede promiscua e sono dotate di protezioni per i passeggeri, schermi con

---

<sup>2</sup> Le ultime due tipologie vengono utilizzate soltanto in sedi protette, quindi costituiscono, di fatto, modalità semirapide.

informazioni in tempo reale ed altri eventuali accessori. Il traffico lungo la linea viene controllato da sistemi semiautomatici, che si occupano anche della trasmissione delle informazioni alle fermate. In alcuni casi, vengono utilizzati come protezione longitudinale dei tratti di tunnel più o meno lunghi, al posto di barriere e siepi; questa scelta, che può essere dettata anche da problematiche che esulano da quelle del trasporto (es. necessità di interporre una barriera antirumore), rende la sede, di fatto, separata a tratti.

Un altro aspetto molto importante per il raggiungimento delle prestazioni massime è la collocazione della sede protetta rispetto alla sede ordinaria; essa può infatti essere posizionata centralmente (figura 1.3.1a), lateralmente in modo simmetrico (figura 1.3.1b) o lateralmente in modo asimmetrico (figura 1.3.1c). La scelta è sovente condizionata dalla disponibilità di spazio, ma da un punto di vista funzionale la soluzione migliore è la quella centrale, perché è più lontana dalle corsie a traffico lento e dagli attraversamenti pedonali, oltre ad avere a disposizione ampi raggi di manovra in corrispondenza delle intersezioni. Questa scelta implica però una divisione della carreggiata in due parti, inoltre la sede protetta deve essere affiancata dalle piattaforme pedonali, quindi richiede spazi maggiori rispetto alle altre due soluzioni, che vengono accostate a una sola carreggiata e possono sfruttare l'accesso direttamente dai marciapiedi; inoltre, spezza lo spazio libero per la rimanente circolazione in due tronconi, introducendo una rigidità nella regolazione delle intersezioni. Normalmente le corsie protette centrali sono a doppio senso di marcia e ciascun senso è concorde con quello delle corsie di traffico ad esso adiacenti, mentre le corsie laterali possono essere anche ad unico senso di marcia e discordi; la prima soluzione ha il vantaggio di avvicinare i percorsi di andata e ritorno di una linea e di avere a disposizione un'uscita laterale per eventuali emergenze.

Se tutti gli elementi menzionati sono correttamente posizionati, le modalità semirapide offrono velocità e capacità maggiori rispetto alle busways; inoltre, la regolarità di viaggio permette di aumentare il comfort e ridurre le emissioni acustiche e inquinanti. Quest'ultimo aspetto rende i mezzi semirapidi i più idonei ad attraversare zone a traffico limitato o aree prettamente pedonali, come i parchi.

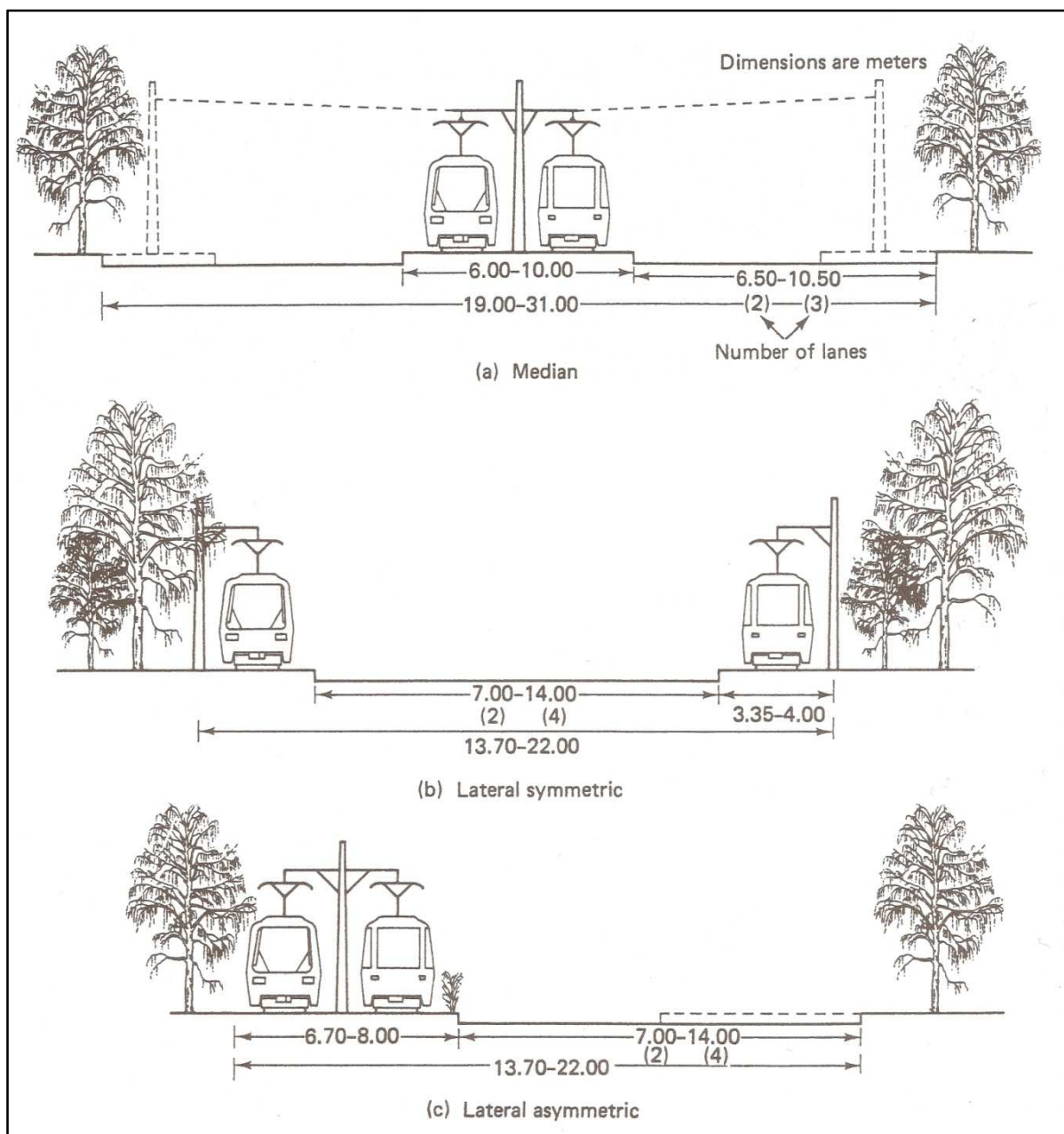


Figura 1.3.1 Collocazione della sede protetta rispetto alla sede ordinaria: (a) centrale, (b) laterale simmetrica, (c) laterale asimmetrica.

### **1.3.3. MODALITÀ RAPIDE**

Le modalità rapide presentano una sede con protezione fisica totale dalla viabilità ordinaria e dagli utenti che vi transitano, con fermate ogni 800-1200 metri; solitamente i mezzi utilizzati sono i treni (ferrovie e metropolitane), lunghi tra i 150 e i 250 metri, in grado di ospitare tra i 600 e i 2400 passeggeri, o le metropolitane leggere (definite in questo caso metropolitane leggere veloci), perché la loro tecnologia consente di sfruttare al meglio i vantaggi offerti dal tracciato privilegiato. In Italia, le vetture metropolitane devono rispettare la sagoma limite definita nella norma UNI 7247/73, che fissa una larghezza massima pari a 3,1 metri e un'altezza massima pari a 3,5 metri dal suolo. Le vetture ferroviarie, invece, devono rispettare gli standard UIC GA e GB, che fissano una larghezza massima pari a 3,29 metri e un'altezza massima pari a 4,35 metri dal suolo. In entrambi i casi, la lunghezza delle vetture può variare, anche a seconda del numero di vetture che compongono il convoglio, ma è generalmente compresa tra 22 e 26 metri. Mezzi di questo tipo necessitano di grandi spazi dedicati, che spesso non sono disponibili a piano campagna e quindi comportano la realizzazione di strutture apposite, sopraelevate o sotterranee.

Le soluzioni sotterranee comportano costi elevati, monetari e non, durante la costruzione; esse richiedono lo scavo di ingenti quantità di terreno, l'inserimento di infrastrutture costose e tempi lunghi, durante i quali il traffico di superficie nelle aree adiacenti deve essere ridirezionato e si generano emissioni (rumore e vibrazioni) di grande impatto ambientale. Un volta ultimate, però, le strutture proteggono i tracciati da tutte le possibili interferenze esterne, incluso il maltempo, li rendono sicuri e disponibili in maniera continua. I tunnel possono essere collocati a differenti profondità rispetto alla superficie stradale; chiaramente, raggiungere profondità maggiori comporta costi di scavo più elevati, ma è una soluzione che si rende necessaria quando le interferenze



con i sottoservizi superficiali già esistenti sono troppo numerose. I tunnel profondi hanno anche un grande svantaggio per il funzionamento dei sistemi TPL: l'accesso dalla superficie è piuttosto complesso, a causa della grande differenza in elevazione, perciò richiede la collocazione meticolosa delle stazioni e il disegno dei percorsi minimi per gli utenti, ma rimane comunque escluso dalla scelta modale per i percorsi brevi. Quando le caratteristiche del terreno e le condizioni locali lo consentono, quindi, è preferibile realizzare tunnel a profondità ridotta.

Le soluzioni sopraelevate sono anch'esse piuttosto costose, in termini monetari ma anche in termini di impatti visivi ed emissioni acustiche, sia in fase di costruzione che di esercizio; rappresentano una valida alternativa in aree urbane con edifici molto densi e un'ingente quantità di sottoservizi, spesso preferibile alla realizzazione di tunnel profondi molto lunghi. La loro diffusione è stata possibile grazie all'avvento del calcestruzzo armato precompresso, che permette di ottenere strutture resistenti, ma, allo stesso tempo, snelle ed esteticamente accettabili in un contesto urbano. Il disegno dei tracciati sopraelevati può seguire quello di altre sedi viarie adiacenti, oppure quello di ostacoli naturali come fiumi o linee costiere; un disegno del tutto indipendente dalle caratteristiche delle reti esistenti è teoricamente fattibile, ma richiede spazi molto più ampi. Nella realizzazione di questi tracciati deve essere particolarmente curato il posizionamento delle stazioni, che deve garantire accessi rapidi dalla rete superficiale in un numero ridotto di punti, per non estendere troppo le strutture e compromettere la vivibilità degli edifici; devono inoltre essere organizzati in maniera efficiente i sottopassi, affinché la struttura non diventi una barriera che divide le aree ai suoi lati.

Entrambe le soluzioni consentono di eliminare tutte le interferenze con elementi esterni e ciò rende possibile il raggiungimento delle prestazioni massime delle linee; vengono solitamente utilizzate lungo gli assi di accesso o attraversamento di un centro urbano,

per fornire agli utenti un servizio rapido e frequente con un numero limitato di fermate e un numero elevato di posti disponibili (150-2000 posti per veicolo).

### 1.3.4. CONFRONTO TRA LE ALTERNATIVE

Utilizzando tutte le considerazioni fatte finora, è possibile compilare delle tabelle riassuntive, che raccolgono e mettono a confronto le caratteristiche più rilevanti delle alternative modali urbane. Tali caratteristiche vengono suddivise in due gruppi: gli impatti positivi sull'accessibilità del territorio, gli impatti negativi sull'ambiente esterno.

ACCESSIBILITÀ – ASPETTI POSITIVI				
MODALITÀ	CAPILLARITÀ	FLESSIBILITÀ	CAPACITÀ	VISIBILITÀ
taxi	alta	media	bassa	bassa
mezzi in sede promiscua	media	media	media	media
mezzi in corsia riservata	media	bassa	media	alta
mezzi in sede protetta	bassa	bassa	alta	alta

Tabella 1.3.a Effetti delle principali alternative modali sull'accessibilità di una zona.

ESTERNALITÀ – EFFETTI NEGATIVI				
MODALITÀ	INQUINAMENTO	INQUINAMENTO	USO	COSTO
	ACUSTICO	ARIA	SPAZIO	OPERE
taxi	alto	alto	medio	basso
mezzi su gomma	alto	alto	medio	medio
mezzi su ferro	medio	basso	alto	alto

Tabella 1.3.b Effetti esterni delle principali alternative modali.

Dalle tabelle si comprende immediatamente che:

- le modalità autoprodotte non motorizzate garantiscono elevata capillarità e flessibilità, impatti esterni negativi trascurabili, ma raggiungono velocità e capacità molto basse, oltre ad avere un'immagine poco definita all'interno del sistema;
- le modalità autoprodotte motorizzate e quelle su domanda sono caratterizzate da capillarità e flessibilità medio-alte, ma producono impatti esterni negativi rilevanti, a fronte di basse velocità e capacità, soprattutto in caso di congestione; esse sono però avvantaggiate molto spesso dalle preferenze individuali, a prescindere dall'adattabilità effettiva al tipo di spostamento da realizzare;
- le modalità programmate in sede mista offrono capacità, velocità e riconoscibilità più elevate, ma capillarità e flessibilità non sono più totali: esse si configurano infatti come servizi discreti nello spazio e nel tempo; inoltre, i mezzi su gomma producono impatti ambientali molto ingenti, a differenza dei mezzi su ferro, che sono ecosostenibili, pur richiedendo spazi più ampi;
- le modalità programmate in sede protetta o propria forniscono le velocità e capacità più elevate, grazie alla loro indipendenza dai fenomeni di congestione, ma questo penalizza capillarità e flessibilità, che in questi casi sono ridotte; i mezzi generano emissioni acustiche e atmosferiche piuttosto basse, essendo per la maggior parte a trazione elettrica, inoltre presentano un'immagine forte all'interno del sistema, pur comportando una maggiore occupazione spaziale e fasi di realizzazione lunghe e onerose.

A questo punto si può definire, per ogni modalità, un certo range di spostamenti, che è quello più idoneo alle sue caratteristiche e rappresenta, in estrema sintesi, il suo ruolo all'interno dell'intero sistema TPL:

TIPOLOGIA DI SPOSTAMENTI			
MODALITÀ	INTRAZONALI	INTERZONALI - AREE DENSE	INTERZONALI - AREE DISPERSE
<b>a piedi/bicicletta</b>	brevi	-	-
<b>moto/auto/taxi</b>	medi	-	medi
<b>mezzi sede mista</b>	medi	-	medi
<b>mezzi sede protetta</b>	-	medi	medi
<b>mezzi sede propria</b>	-	lunghi	lunghi

Tabella 1.3.c Le tipologie di spostamenti più idonee a ciascuna alternativa modale.

- per gli spostamenti brevi, le modalità più idonee sono quelle autoprodotte non motorizzate;
- per gli spostamenti medi all'interno di una zona oppure da una zona dispersa a una linea portante del sistema di trasporto, i servizi più adatti sono quelli autoprodotti motorizzati, su domanda, programmati in sede mista o in sede protetta; le quattro classi di alternative sono spesso in opposizione, per cui la scelta tra loro è molto delicata e dipende sostanzialmente dal numero di spostamenti medi richiesti, ovvero dalla capacità che il servizio deve garantire;
- per gli spostamenti medi tra zone dense, le modalità programmate in sede protetta garantiscono il servizio migliore;
- per gli spostamenti lunghi, sia tra zone dense che da zone disperse a zone dense, il servizio più idoneo è quello offerto da linee portanti, ovvero linee programmate in sede propria.

## 1.4. CARATTERISTICHE DELLE FERMATE

Le considerazioni fatte nel paragrafo precedente mettono in evidenza differenze sostanziali, sia da un punto di vista fisico che funzionale, tra le alternative modali presenti in ambito urbano. Queste differenze possono andare a contrasto nei punti in cui più modalità devono coesistere, ossia nei nodi di interscambio. Risulta pertanto molto importante analizzare le differenti tipologie di nodi che si possono trovare e come devono essere organizzate; una corretta organizzazione consente infatti di avere una buona copertura areale per ciascun nodo, limitare i tempi di fermata per ciascuna linea, garantire il corretto scambio di traffico tra linee diverse. Occorre inoltre rimarcare che le fermate del trasporto pubblico locale rappresentano non solo il punto di congiunzione tra i diversi servizi offerti, ma anche il punto di congiunzione tra il sistema della viabilità pedonale e il sistema di trasporto stesso; è in questo spazio che l'utente verifica la qualità degli itinerari pedonali di accesso/egresso e valuta le prestazioni rese dal sistema di trasporto. È quindi importante che le fermate siano correttamente localizzate e dimensionate, oltre a comprendere tutte quelle attrezzature e dotazioni che garantiscono un'efficace informazione all'utenza e consentono di rendere più gradevole il tempo di attesa. In definitiva, quindi, la realizzazione di una fermata deve tenere conto delle esigenze congiunte del passeggero, del trasporto pubblico e delle altre componenti di traffico presenti.

Volendo definire dei criteri per la realizzazione delle fermate in ambito urbano, è opportuno individuare prima una classificazione funzionale. Un possibile criterio è quello proposto da R. Maja<sup>3</sup>, secondo il quale possono essere individuate le seguenti classi :

- fermate di linee di superficie di tipo automobilistico, filoviario o tranviario (A);

---

<sup>3</sup> Fonte: Dispense del corso di Tecnica ed Economia dei Trasporti, "Sistemi di trasporto collettivo locale – TPL", Politecnico di Milano, 2010.

- fermate di linee metropolitane o ferrovie passanti (B);
- fermate o stazioni di linee ferroviarie (C);
- parcheggi auto di corrispondenza (D).

Riferendosi alle classi introdotte, si possono definire le seguenti tipologie di fermata:

- fermata di una singola linea nell'ambito di una singola classe (tipo 1);
- fermata comune a più linee appartenenti ad una singola classe (tipo 2);
- fermata comune a più appartenenti a due o più classi. (tipo 3).

Ciascuna tipologia richiede la scelta appropriata di:

- distanziamento;
- posizionamento;
- dotazione infrastrutturale.

Le esigenze specifiche di ciascuna tipologia vengono descritte nei paragrafi seguenti. Si tratta di concetti molto importanti per la rappresentazione modellistica della rete, che, come vedremo nel terzo capitolo, ha una fase dedicata esclusivamente alla generazione delle connessioni pedonali zona/fermata e fermata/fermata.

## **1.4.1. FERMATE DI TIPO 1**

### **1.4.1.1. FERMATE 1-A**

Le fermate di tipo 1 per linee di superficie hanno un distanziamento compreso tra i 300 e gli 800 metri circa, a seconda della densità della zona servita. Il posizionamento lungo le vie urbane considera tre tipi di localizzazioni: prima di un'intersezione, dopo un'intersezione e lontano dalle intersezioni. La scelta tra i tre tipi deve ridurre al minimo le distanze da percorrere da parte degli utenti, per cui si devono privilegiare le collocazioni accanto agli edifici che generano o attraggono il maggior numero di

spostamenti e a percorsi pedonali protetti, inoltre deve tenere conto del coordinamento semaforico, presente ormai in buona parte delle grandi città. Quest'ultimo è spesso un fattore determinante per il funzionamento di una linea, e può essere favorito applicando la semplice regola nota come "regola di Von Stein per il posizionamento delle fermate"<sup>4</sup>: essa afferma che, lungo strade dove è presente il coordinamento semaforico, l'alternanza di una fermata prima e una dopo le intersezioni genera il minimo ritardo totale. Si tratta di una regola semplice da spiegare: il mezzo parte dalla fermata prima di un'intersezione durante la fase di verde e, per il coordinamento, arriva all'intersezione seguente durante la fase di verde; se la fermata successiva è posizionata dopo l'intersezione, il mezzo può sfruttare la fase di verde e compiere l'attraversamento; l'arresto alla fermata dopo l'intersezione provoca un arrivo durante la fase di rosso all'intersezione seguente, per cui è opportuno che la fermata sia prima dell'intersezione, in modo da far coincidere il tempo di arresto con il tempo di rosso; il mezzo riparte poi nella fase di verde ed il ciclo si ripete. La regola non tratta le fermate lontane dalle intersezioni, poiché è più difficile inserirle nel sistema di coordinamento semaforico; esse sono giustificabili in presenza di forti attrattori o generatori di spostamenti, o quando le condizioni geometriche non consentono localizzazioni di altro tipo. Inoltre, la regola non considera il posizionamento degli attraversamenti pedonali, che è un altro elemento importante della pianificazione delle fermate. È quindi opportuno prendere spunto dal metodo di Von Stein, ma occorre di volta in volta verificare che sia applicabile al contesto specifico.

Oltre a questa semplice regola funzionale, la realizzazione delle fermate deve tenere conto della normativa italiana vigente in materia, che è rappresentata, per la classe 1-A, dagli articoli 40 ("Segnali orizzontali"), 143 ("Posizione dei veicoli sulla carreggiata") ,

---

<sup>4</sup> Sviluppata e applicata per la prima volta al sistema TPL di Düsseldorf da W. Von Stein, nella metà degli anni '50, ripresa da V. Vuchic nel libro "Urban transit: systems and technology".

157 (“Arresto, fermata e sosta dei veicoli”) e 190 (“Comportamento dei pedoni”, comma 6) del nuovo Codice della Strada.

In parte dalla normativa, in parte dall’esperienza si possono dedurre gli elementi minimi di cui deve essere dotata una fermata di tipo 1-A:

- segnaletica orizzontale apposita;
- prossimità ad un attraversamento pedonale;
- palina indicante il percorso, la localizzazione della fermata, gli orari di transito dei mezzi e il tempo di attesa;
- protezione del marciapiede per evitare l’indebita presenza di veicoli in sosta, ma senza barriere architettoniche che impediscono il movimento delle carrozzine per disabili;
- tettoia con capienza di circa dieci persone ed eventuali sedili;
- impianto di illuminazione artificiale;
- cartografia della rete di trasporto collettivo;
- emettitrice di biglietti, telecamera a circuito chiuso.

#### **1.4.1.2. FERMATE 1-B E 1-C**

Le fermate di tipo 1 per linee metropolitane o ferroviarie suburbane hanno un distanziamento compreso tra gli 800 e i 1200 metri circa; essendo in sede riservata, il posizionamento delle fermate è indipendente dai condizionamenti del traffico veicolare e quindi viene deciso in base alla vicinanza di attrattori o generatori di spostamenti e alla disponibilità di spazi adeguati. Tutti i requisiti per la loro realizzazione sono contenuti nella normativa che regola la circolazione ferroviaria. Per quanto riguarda la dotazione infrastrutturale, essa è significativamente più consistente rispetto al caso precedente, a causa dell’accesso più difficoltoso alle fermate e della necessità di attrarre flussi maggiori di passeggeri, infatti prevede:



- pannello indicante il percorso, la localizzazione della fermata, gli orari di transito dei mezzi e il tempo di attesa;
- attrezzature per il superamento dei dislivelli, come ascensori, scale, scale mobili, tappeti mobili, rampe e carrelli elevatori per disabili;
- sedili e spazi per l'attesa;
- emettitrice di biglietti, telecamera a circuito chiuso, pulsante per chiamate di emergenza;
- distributrici automatiche di bibite e vivande, esercizi commerciali;
- pannello indicante il tempo di attesa in corrispondenza degli spazi accessori (mezzanino, esercizi commerciali).

## **1.4.2. FERMATE DI TIPO 2**

### **1.4.2.1. FERMATE 2-A**

Nel caso in cui le linee abbiano in comune lo stesso marciapiede, valgono le specifiche indicate per la categoria 1. Nel caso, invece, le linee abbiano una corrispondenza nello stesso ambito, ma le rispettive fermate siano localizzate in marciapiedi diversi, è necessario adottare provvedimenti finalizzati a facilitare gli spostamenti tra i marciapiedi; questo obiettivo si raggiunge tramite la realizzazione di passaggi quanto più possibile brevi e protetti e tramite un'efficace informazione all'utenza, che spieghi in maniera chiara e concisa quali mezzi sono a disposizione, i relativi tempi di attesa e i percorsi per raggiungerli. Pertanto, le fermate di tipo 2-A dovrebbero essere dotate, oltre agli elementi indicati per quelle di tipo 1-A, dei seguenti:

- pannelli a messaggio variabile o monitor indicanti, ai marciapiedi e negli spazi di attesa, le linee presenti agli altri marciapiedi, con i rispettivi orari effettivi di partenza o tempi di attesa;

- percorsi pedonali per il collegamento reciproco delle fermate facilmente riconoscibili e dotati di adeguata protezione dal traffico e dall'indebita presenza di veicoli in sosta;
- segnaletica indicante i vari percorsi e le direzioni per raggiungere i marciapiedi di tutti i servizi presenti nel nodo di interscambio.

La presenza e l'efficienza di ciascuno di questi elementi sono molto importanti per il corretto funzionamento di un nodo di interscambio; la mancanza di percorsi appositi e la carenza di informazioni rendono i trasferimenti stressanti e scoraggiano la volontà dell'utente di compierli. Gli interscambi sono favoriti, oltre che dall'integrazione infrastrutturale dei nodi, anche da una tariffazione integrata e da una traccia oraria integrata, che però sono provvedimenti sistemici e non riguardano i nodi soltanto.

#### **1.4.2.2. FERMATE 2-B E 2-C**

Valgono delle considerazioni analoghe al caso precedente. Nel caso in cui le linee abbiano in comune lo stesso marciapiede, valgono le specifiche indicate per la categoria 1. Nel caso, invece, le linee abbiano una corrispondenza nello stesso ambito, ma le rispettive fermate siano localizzate in marciapiedi diversi, è necessario adottare provvedimenti finalizzati a facilitare gli spostamenti tra i marciapiedi; occorre pertanto aggiungere alcuni requisiti minimi a quelli indicati per le categorie 1-B e 1-C:

- pannelli a messaggio variabile o monitor indicanti, ai marciapiedi e negli spazi di attesa, le linee presenti agli altri marciapiedi, con i rispettivi orari effettivi di partenza o tempi di attesa;
- sottopassi pedonali per il collegamento reciproco delle fermate facilmente riconoscibili e sufficientemente ampi;

- segnaletica indicante i vari percorsi e le direzioni per raggiungere i marciapiedi di tutti i servizi presenti nel nodo di interscambio.

Anche in questo caso è opportuno curare, oltre all'integrazione infrastrutturale dei nodi, anche la realizzazione di una tariffazione integrata e di una traccia oraria integrata, agevolano ulteriormente i trasbordi degli utenti.

### **1.4.3. FERMATE DI TIPO 3**

#### **1.4.3.1. FERMATE A+B E A+C**

Oltre a prevedere i requisiti indicati per la categoria 2, deve essere posta la massima cura nel rendere minime le distanze tra i marciapiedi delle linee di superficie e le banchine delle linee metropolitane o ferroviarie e nell'integrare le informazioni e i servizi gestiti da diversi esercenti. Pertanto le fermate di questo tipo dovranno possedere le seguenti dotazioni o requisiti:

- posizionamento delle fermate delle linee di superficie tale che i marciapiedi siano direttamente raggiungibili dai sottopassi di accesso alla fermata metropolitana e ferroviaria, evitando, per quanto possibile, gli attraversamenti stradali o altri possibili ostacoli al deflusso dei viaggiatori tra le fermate;
- pannelli a messaggio variabile o monitor indicanti, alle banchine e negli atrii di attesa, le linee presenti nelle altre banchine e nei marciapiedi delle linee di superficie e gli orari effettivi di partenza o il tempo di attesa;
- segnaletica indicante i vari percorsi e le direzioni per raggiungere i marciapiedi e le banchine di tutti i servizi presenti nella stazione di interscambio.

#### **1.4.3.2. FERMATE B+C**

Anche in questo caso deve essere posta la massima cura nel minimizzare le distanze tra le banchine e nell'integrare le informazioni e i servizi gestiti da diversi esercenti.

Pertanto, oltre ai requisiti indicati nei casi precedenti, le fermate di questo tipo dovranno possedere le seguenti dotazioni o requisiti:

- collegamento diretto tra le banchine della fermata metropolitana e quelle della fermata ferroviaria, interno al fabbricato della stazione di interscambio, in modo tale che, per quanto possibile, non sia necessario uscire dalla stazione e seguire percorsi esterni o attraversamenti stradali;
- pannelli a messaggio variabile o monitor indicanti, alle banchine e negli atri di attesa, le linee presenti alle altre banchine e gli orari effettivi di partenza o il tempo di attesa;
- segnaletica indicante i vari percorsi e le direzioni per raggiungere le banchine di tutti i servizi presenti nella stazione di interscambio.

#### **1.4.3.3. FERMATE A E/O B E/O C + D**

Valgono le stesse considerazioni fatte per gli altri casi della categoria 3, opportunamente estese alle esigenze dettate dalla presenza del parcheggio dei mezzi individuali.

L'interscambio tra una o più linee di trasporto collettivo e il trasporto individuale può avvenire in diversi modi:

- park-and-ride (accesso in auto);
- bike-and-ride (accesso in bicicletta);
- kiss-and ride (accompagnamento).

Le tre possibilità richiedono spazi diversi, molto estesi nel caso del park-and-ride, più contenuti negli altri due casi; hanno però il vantaggio di raddoppiare o anche triplicare la copertura areale dei nodi rispetto alla possibilità pedonale. Per questo motivo,

diventano vantaggiose in presenza di nodi con almeno una modalità rapida ad elevata capacità.

Le fermate di questo tipo devono essere posizionate in punti molto particolari della rete urbana, che, oltre a consentire l'accesso ai servizi collettivi, secondo i requisiti delle fermate di tipo 1 e 2, non penalizzino eccessivamente il deflusso veicolare. Inoltre, analogamente al caso precedente, devono essere organizzati i percorsi di interscambio e le relative informazioni all'utenza, secondo i seguenti requisiti:

- zona di sosta o transito riservata per il trasporto individuale che intende effettuare l'interscambio;
- collegamento agevolato tra la zona di sosta o transito e i marciapiedi o banchine dei mezzi collettivi, evitando, per quanto possibile, percorsi esterni e attraversamenti pedonali;
- pannelli a messaggio variabile o monitor indicanti, ai marciapiedi, alle banchine e nella zona di sosta, le linee presenti agli altri marciapiedi e banchine, con i rispettivi orari effettivi di partenza o tempi di attesa,
- segnaletica indicante i vari percorsi e le direzioni per raggiungere marciapiedi o le banchine di tutti i servizi presenti nel nodo di interscambio.

Chiaramente quest'ultima tipologia di fermata è la più complessa e la meno comune all'interno di una rete di trasporto; richiede un'organizzazione degli spazi molto accurata per gestire il grande flusso di passeggeri in transito e la presenza di modalità con funzionamenti totalmente diversi.

Tutte le considerazioni e i confronti riportati in questo primo capitolo, in particolare quelli in merito alle alternative modali e ai nodi di interscambio, hanno messo in evidenza la complessità dei sistemi di trasporto pubblici urbani, sia da un punto di vista fisico che

funzionale, e hanno evidenziato le caratteristiche più rilevanti ai fini modellistici. Nel capitolo successivo verrà trattata nel dettaglio la modellazione di tali sistemi.

# 2. I MODELLI PER LA SIMULAZIONE DELLE RETI TPL

---

Nel primo capitolo ho ricordato le caratteristiche salienti delle reti di trasporto pubblico e delle principali alternative modali in ambito urbano. Le informazioni raccolte sono utili per comprendere il funzionamento globale delle reti urbane ed avere una visione chiara dei principali parametri che lo influenzano; questo è il punto di partenza indispensabile per lo studio di modelli per la simulazione di tali reti.

La simulazione è uno strumento fondamentale dell'analisi dei sistemi di trasporto, perché permette di riprodurre i fenomeni reali attraverso una serie di relazioni matematiche (modelli) e quindi dà la possibilità di valutare a priori, sia qualitativamente che quantitativamente, gli effetti di un'ipotesi di intervento su un sistema. Questa possibilità è di cruciale importanza per la pianificazione dei trasporti a medio e lungo termine e per i programmi di gestione operativa dell'esercizio.

La rappresentazione delle reti attraverso modelli di simulazione è però tutt'altro che immediata, per due ragioni essenziali: la prima è l'intrinseca complessità dei sistemi di trasporto, che sono composti da numerosi elementi che si influenzano in modo diretto e indiretto, spesso non lineare e con effetti di segno diverso; la seconda è che sia il funzionamento del sistema, sia il suo utilizzo da parte degli utenti rispondono solo in parte a leggi fisiche e sono quindi misurabili in maniera esatta o approssimata, mentre

la restante parte dipende dalle scelte comportamentali degli individui che ne fanno parte ed è quindi di natura aleatoria. I due aspetti sono ancora più accentuati per il trasporto pubblico in ambito urbano, che è contraddistinto da reti molto articolate e presenta le esigenze particolari viste nel primo capitolo.

Per questi motivi ho ritenuto interessante approfondire lo studio dei modelli di simulazione proprio per i servizi di trasporto collettivo urbano. Nel presente capitolo riporto i criteri generali per la modellizzazione dei sistemi e i principali modelli presenti in letteratura; essi saranno oggetto di alcune applicazioni da parte mia, che verranno descritte nei capitoli seguenti.

## **2.1. CRITERI GENERALI PER LA MODELLIZZAZIONE DEI SISTEMI**

In questo paragrafo intendo delineare le fasi fondamentali per la rappresentazione modellistica di un sistema di trasporto, spiegare quali elementi reali devono essere rappresentati ed evidenziare gli errori di modellizzazione più frequenti, con particolare attenzione alla fase di scelta del percorso, sulla quale si concentreranno le mie applicazioni. I concetti sono ripresi dagli studi di E. Cascetta, A. Nuzzolo, F. Russo, D. Gattuso e R. Maja in merito ai sistemi di trasporto.

### **2.1.1. IL PROCESSO DI MODELLIZZAZIONE**

Nel capitolo precedente è stato definito un sistema di trasporto come l'insieme degli elementi (infrastrutture, veicoli, sistemi di controllo) e delle loro interazioni fisiche e organizzative che permettono di soddisfare una domanda di mobilità. Questi elementi e le loro interazioni sono molto numerosi ed estremamente complessi; risulta quindi necessario, ai fini modellistici, selezionare gli aspetti da riprodurre.



Tali aspetti si possono ricondurre a tre gruppi principali:

- identificazione delle caratteristiche temporali rilevanti;
- identificazione delle caratteristiche spaziali rilevanti;
- definizione delle componenti della domanda di mobilità rilevanti.

Una volta individuati i fattori che compongono i tre gruppi, occorre formulare un modello, ovvero una serie di relazioni matematiche in grado di legare reciprocamente questi fattori; tale modello viene suddiviso in tre parti (figura 2.1.1):

- offerta di trasporto;
- domanda di trasporto;
- interazione domanda/offerta.

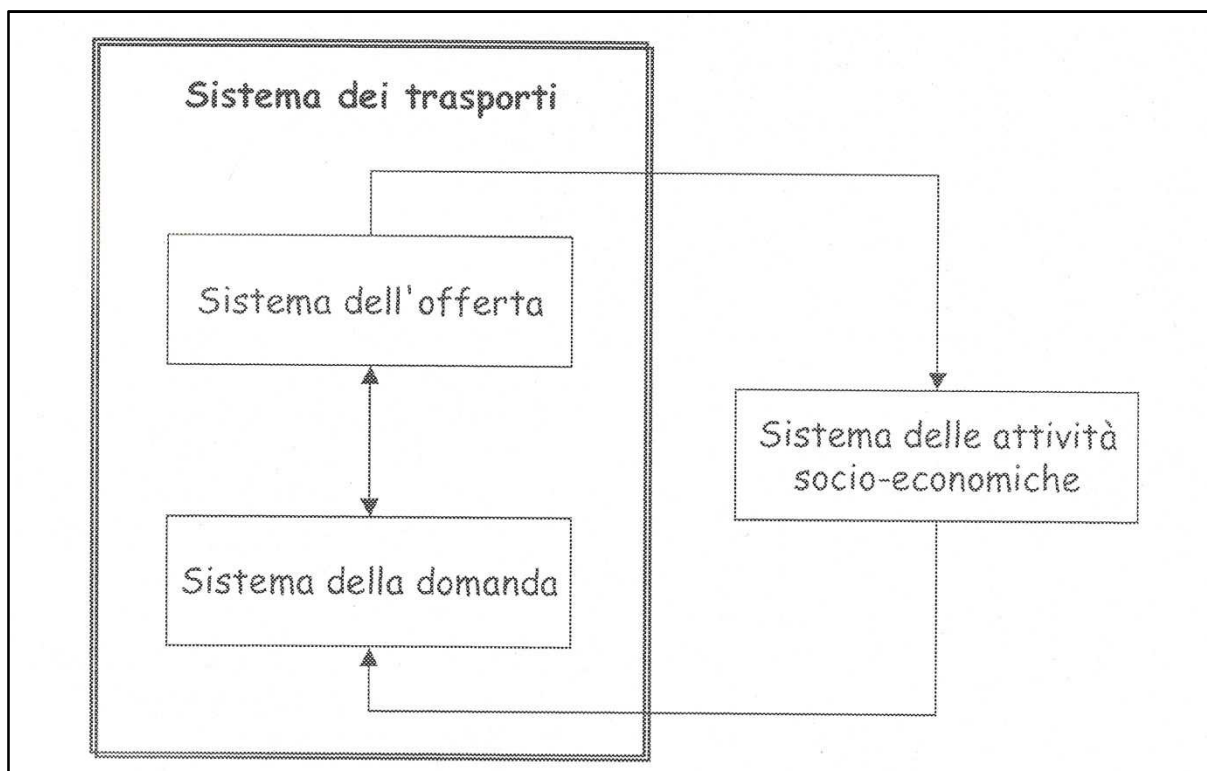


Figura 2.1.1 Rappresentazione schematica delle interazioni tra gli elementi interni al sistema di trasporto (domanda e offerta) e gli elementi esterni (sistema delle attività).

Ciascuna di queste sei fasi richiede lo svolgimento di operazioni ben precise, che verranno ora descritte. Il modello completo fornisce come risultati i flussi di traffico.

#### **2.1.1.1. IDENTIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE TEMPORALI RILEVANTI**

Un sistema di trasporto opera e si trasforma nel tempo, ossia le caratteristiche degli elementi che lo compongono e le loro reciproche interazioni variano su diverse scale temporali. La determinazione dell'intervallo temporale di riferimento dell'analisi e le ipotesi sulla variabilità del sistema entro questo intervallo sono quindi le prime decisioni da prendere in ottica modellistica.

L'intervallo temporale o periodo di riferimento dell'analisi è la durata temporale rilevante per lo studio di un dato sistema. Esso varia in base al tipo di applicazione che ha il modello; se viene utilizzato per la pianificazione a medio o lungo termine, l'orizzonte temporale da analizzare abbraccia da qualche anno a qualche decennio, ma il periodo di riferimento rilevante per l'analisi è solitamente il giorno medio; i risultati ottenuti per il periodo di riferimento vengono poi estesi all'intero periodo di analisi. Se invece il modello viene utilizzato per la pianificazione operativa, l'orizzonte temporale abbraccia da qualche giorno a qualche mese; in questo caso il periodo di riferimento è solitamente più piccolo del giorno medio, tipicamente la fascia oraria di punta o la fascia oraria di morbida, poiché l'assunzione di valori medi giornalieri in un periodo di analisi così ristretto potrebbe condurre a trascurare fenomeni di picco rilevanti, primo tra tutti la congestione: i fenomeni di picco diventano infatti tanto più significativi quanto più si restringe il periodo di analisi.

Per quanto riguarda la variabilità del sistema all'interno del periodo di riferimento, essa viene definita in base a due ipotesi fondamentali:

- ipotesi di *stazionarietà interperiodale*, che consiste nell'assumere nulle le variazioni del sistema tra intervalli con caratteristiche simili, ovvero che il sistema possa raggiungere una configurazione di equilibrio stabile nel tempo;
- ipotesi di *stazionarietà intraperiodale*, che consiste nell'assumere nulle le variazioni del sistema all'interno di un intervallo di riferimento sufficientemente ampio da consentire al sistema di raggiungere una condizione di stazionarietà.

I modelli che verificano entrambe le ipotesi sono detti modelli *statici* e sono stati formulati a partire dagli anni '50, per cui dispongono oggi di formulazioni matematiche complete e ampiamente utilizzate. I modelli che verificano solamente la seconda ipotesi sono detti *con dinamica interperiodale* e costituiscono un'estensione dei modelli statici, studiata a partire dalla metà degli anni '80; anch'essi dispongono di una discreta quantità di letteratura che li tratta. I modelli che verificano solamente la prima ipotesi sono invece detti *con dinamica intraperiodale*; essi costituiscono un'ulteriore estensione dei modelli statici e sono oggetto di studio da pochi anni, per cui le esperienze a riguardo sono poche e prevalentemente nell'ambito del trasporto privato. Infine, i modelli che non verificano entrambe le ipotesi sono detti *doppiamente dinamici* e costituiscono un'unione delle due tipologie precedenti. Si tratta dei modelli più completi sviluppati finora e sono stati introdotti soltanto da pochi anni, in parallelo ai modelli *within day*.

La suddivisione dei modelli in queste categorie non ha uno scopo meramente teorico, bensì trova un preciso riscontro nella tipologia di fenomeni reali che ciascuna categoria è in grado di rappresentare. I modelli statici, infatti, forniscono una descrizione di uno stato stazionario del sistema di trasporto, che è solitamente rappresentativa delle condizioni di funzionamento medie del sistema; in altre parole, forniscono la risposta del sistema allo stimolo della domanda in ingresso, senza considerare il funzionamento

interno e la storia precedente del sistema; per questo motivo, essi sono anche noti come modelli *senza memoria*. I modelli con dinamica interperiodale considerano una successione di stati di equilibrio, che possono cambiare giornalmente in relazione alle differenti scelte degli utenti; viene quindi considerata esplicitamente la dipendenza dal tempo dello stato del sistema e la storia temporale va di giorno in giorno, motivo per cui tali modelli vengono anche detti *day-to-day*; essi consentono di tenere conto di fenomeni come l'abitudine e la diffusione di informazioni, e di studiare le proprietà di uno stato di equilibrio, ma non permettono di rappresentare il funzionamento interno del sistema. I modelli con dinamica intraperiodale, invece, permettono di studiare le dinamiche interne all'intervallo temporale di riferimento, imponendo la dipendenza da una variabile temporale continua (per servizi continui) o discreta, ossia riferita a un certo numero di sottointervalli (per servizi discreti); essi hanno il vantaggio di considerare esplicitamente la congestione e i suoi effetti, ovvero la propagazione delle code (per servizi continui) e la propagazione dei ritardi (per servizi discreti); inoltre, consentono di includere tutte le strategie di controllo e informazione all'utenza attuate in tempo reale; per queste loro proprietà, tali modelli vengono anche detti *within-day* (per differenziarli dai *day-to-day*) e *con memoria* (per differenziarli da quelli senza) e costituiscono una generalizzazione del caso statico. Infine, i modelli doppiamente dinamici consentono di studiare sia le variazioni giornaliere, che le variazioni interne al periodo temporale di riferimento; in sostanza, si tratta della sovrapposizione di due modelli dinamici, uno di tipo *day-to-day* e uno di tipo *within-day*.

Nei grafici seguenti (2.1.i,ii,iii,iv) sono riportate differenti distribuzioni di servizio, che si possono rappresentare rispettivamente con un modello statico, con dinamica interperiodale, con dinamica intraperiodale e doppiamente dinamico. Le distribuzioni sono qualitative, ma consentono di intuire in maniera immediata le capacità dei modelli.

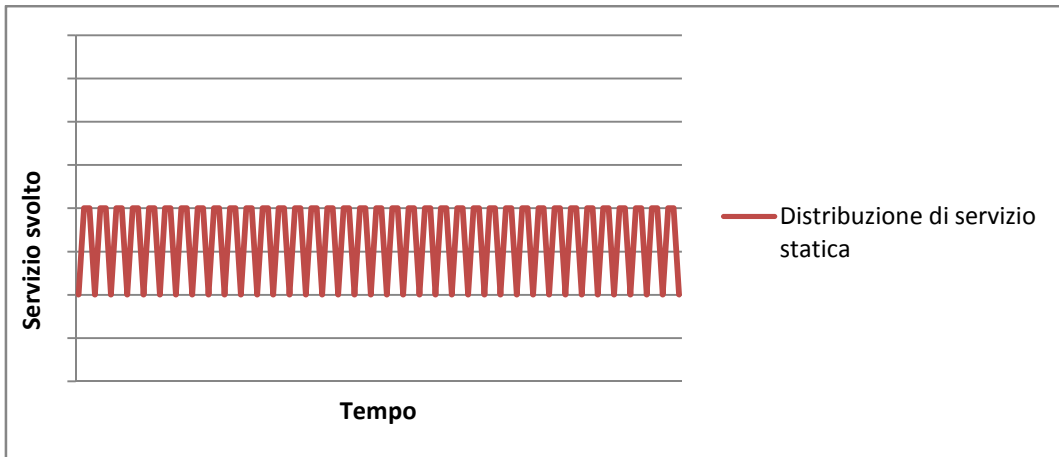


Grafico 2.1.i Distribuzione di servizio di un modello statico.

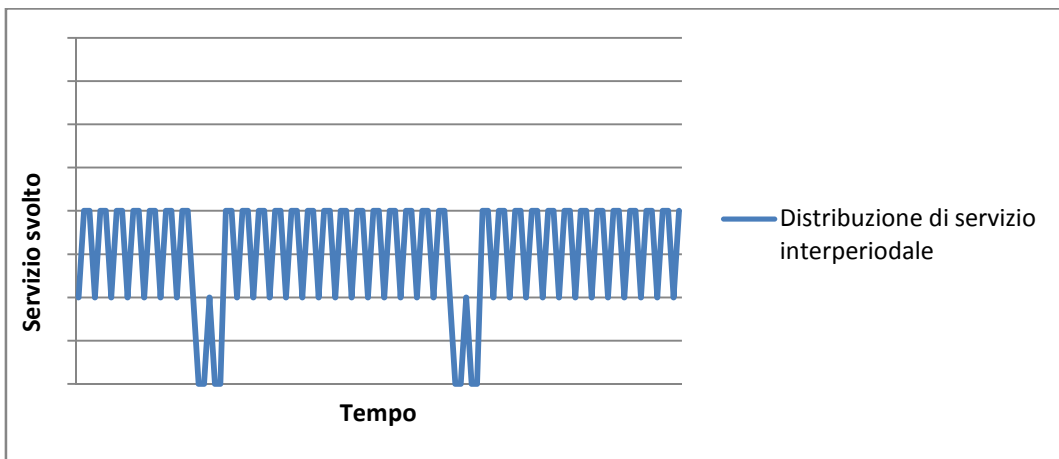


Grafico 2.1.ii Distribuzione di servizio di un modello con dinamica interperiodale.

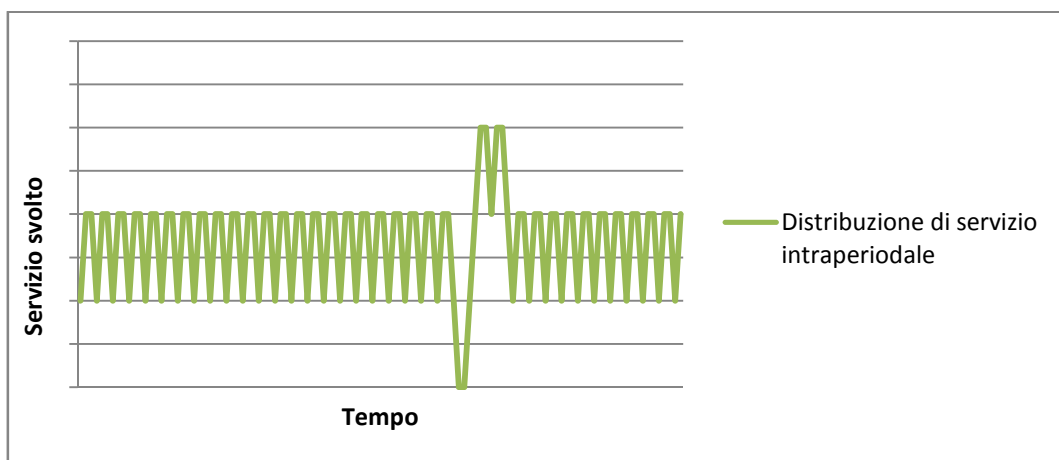


Grafico 2.1.iii Distribuzione di servizio di un modello con dinamica intraperiodale.

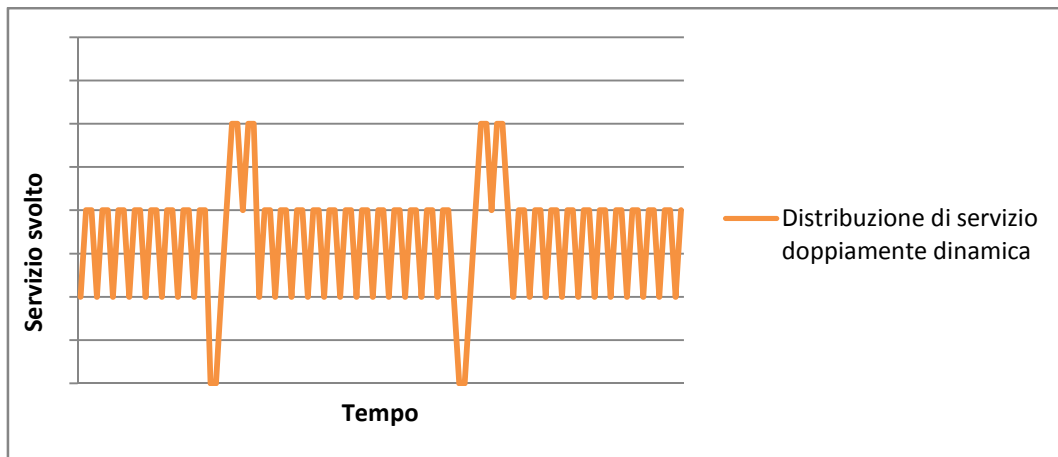


Grafico 2.1.iv Distribuzione di servizio di un modello doppiamente dinamico.

### 2.1.1.2. IDENTIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE SPAZIALI RILEVANTI

Questa fase mira a definire le caratteristiche fondamentali del territorio oggetto dell'analisi e della rete di trasporto presente su di esso, attraverso tre operazioni:

- delimitazione dell'area di studio;
- suddivisione dell'area in zone di traffico (zonizzazione);
- individuazione della rete di base.

L'area di studio deve comprendere il sistema di trasporto, o una sua parte, oggetto dell'analisi; tutto ciò che si trova al di fuori del suo confine, detto cordone, costituisce l'ambiente esterno e interessa soltanto per le interconnessioni col sistema in esame.

La zonizzazione suddivide l'area in un certo numero di zone origine-destinazione, tali per cui gli spostamenti all'interno di ciascuna zona sono riferiti unicamente al centroide di zona; in quest'ottica, vengono considerati solo gli spostamenti interzonal, mentre gli spostamenti intrazonali vengono trascurati. Il numero di zone può essere più o meno elevato a seconda del grado di dettaglio che si vuole raggiungere con l'analisi; esse

costituiscono infatti la discretizzazione di un sistema spaziale continuo, e tale discretizzazione può essere più o meno accurata.

L'individuazione degli elementi della rete di base avviene in base alla loro funzione di collegamento tra le zone di traffico definite prima. Gli archi e i nodi considerati devono essere allo stesso livello di dettaglio della zonizzazione, cioè non devono essere considerati elementi che collegano sottoinsiemi delle zone oppure elementi che collegano un insieme di zone. Per esempio, nelle aree urbane le strade locali sono solitamente escluse dalla rete di base dell'intera area, mentre vengono incluse nelle reti di base di sottoinsiemi più limitati, come un quartiere o una sua parte. Gli elementi fisici prescelti per la rete di base, unitamente alle loro caratteristiche funzionali, ovvero le funzioni di costo, concorrono a formare il modello di offerta del sistema di trasporto.

### **2.1.1.3. DEFINIZIONE DELLE COMPONENTI DI DOMANDA RILEVANTI**

La domanda di mobilità si può definire come il numero di utenti con determinate caratteristiche che consuma il servizio offerto da un sistema di trasporto in un periodo di tempo prefissato; viene anche detta flusso di spostamenti, perché risulta dall'aggregazione di singoli spostamenti.

Ai fini modellistici, è importante identificare quali caratteristiche dell'utenza vengono prese in considerazione, oltre alla caratterizzazione temporale descritta in precedenza.

Tali caratteristiche si definiscono propriamente *segmenti di domanda* e sono:

- origine dello spostamento;
- destinazione dello spostamento;
- categoria d'utente che compie lo spostamento (lavoratore, studente, turista ecc.);
- motivo dello spostamento (lavoro, studio, acquisti ecc.);
- modalità di trasporto utilizzata;

- fascia oraria dello spostamento (parte della giornata, orario desiderato di partenza, orario desiderato di arrivo ecc.);
- percorso seguito;
- ricorrenza dello spostamento (pendolare, occasionale ecc.);
- frequenza dello spostamento (più volte al giorno, una volta al giorno, una volta a settimana ecc.);
- attualità (attuale, potenziale, futuro).

Se si definiscono tutti i segmenti sopraindicati, l'analisi di domanda è detta generale, se invece ne vengono considerati solo alcuni è detta settoriale. È evidente che si tratta, in ogni caso, di una domanda *derivata*, risultato dell'azione congiunta del sistema di attività socio-economiche e del sistema di offerta, oltre che delle preferenze degli utenti.

Nei TPL gli spostamenti sono solitamente caratterizzati da un'andata e un ritorno che avvengono nello stesso giorno, rispettivamente nella fascia oraria di punta del mattino e nella fascia oraria di punta della sera, per cui origine e destinazione dell'andata si invertono nello spostamento di ritorno; spesso lo spostamento di ritorno è formato da una catena di singoli spostamenti svolti per motivi diversi, per esempio lavoro, acquisti, svago ecc; le categorie di utenti prese in considerazione comprendono senza dubbio lavoratori e studenti pendolari, mentre le altre vengono spesso trascurate per la loro inferiorità numerica.

#### **2.1.1.4. OFFERTA DI TRASPORTO**

Una volta definite le caratteristiche rilevanti del sistema di trasporto, occorre specificare il modello in grado di simularle. Esso consiste di tre parti fondamentali:

- offerta di trasporto, rappresentata dal grafo della rete di base con annesse funzioni di costo;



- domanda di trasporto, rappresentata dalla matrice o/d degli spostamenti con caratteristiche prefissate;
- interazione domanda/offerta o assegnazione dei flussi di domanda al grafo, che consente di determinare i flussi di traffico su ciascun arco del grafo.

Il modello di offerta è quindi la prima parte su cui si appoggia il modello completo. Si tratta di una relazione matematica che lega i flussi di percorso (variabile indipendente) ai costi di percorso, definiti da una funzione di costo composta da una serie di variabili indipendenti. Per poter scrivere questa relazione, occorre prima individuare il grafo della rete di base e la relativa funzione di costo.

Per i sistemi TPL, si adotta solitamente un *grafo* di tipo topologico, ossia un grafo composto da archi e nodi che corrispondono ad elementi spaziali e/o temporali del sistema reale. Tale grafo offre una rappresentazione dei servizi offerti, per cui le sequenze di archi corrispondono ai percorsi delle linee di trasporto collettivo, con i relativi nodi di linea, che permettono di collegare i servizi alla rete infrastrutturale di appoggio, di solito rappresentata in un grafo (stradale e/o ferroviario) separato. Ciascun arco del grafo ha una serie di informazioni (attributi) associate, tra le quali le più significative sono:

- numero identificativo univoco;
- nodo di inizio, con coordinate geografiche;
- nodo di fine, con coordinate geografiche;
- tipo;
- lunghezza;
- velocità di deflusso, con relativa curva di deflusso;
- capacità;

- direzionalità.

Oltre ai nodi di linea, vengono posizionati nodi in corrispondenza delle fermate dei mezzi; se vale l'ipotesi di stazionarietà intraperiodale, i nodi fermata non hanno una coordinata temporale associata, bensì lo stesso nodo rappresenta eventi che avvengono in istanti diversi e il grafo è detto *sincronico* o *delle linee*; se invece l'ipotesi di stazionarietà intraperiodale non vale, i nodi fermata sono individuati da una specifica coordinata temporale e rappresentano un evento che occorre in un preciso istante, per cui il grafo è detto *diacronico* o *delle corse* (le coordinate temporali individuano infatti gli orari di partenza e di arrivo delle singole corse). In pratica, nel grafo per linee l'elemento caratteristico dell'offerta è la linea di trasporto collettivo, intesa come un percorso prefissato all'interno dell'area di studio, lungo il quale circolano uno o più veicoli di capacità prefissata e con frequenza prestabilita; nel grafo per corse, l'elemento caratteristico è la corsa, intesa come una linea che opera in un istante temporale ben definito, all'interno del periodo di riferimento. La rappresentazione per corse costituisce, quindi, una disaggregazione di quella per linee, che è di tipo aggregato.

Al grafo di offerta si aggiunge il *sottografo di fermata*, che schematizza gli spostamenti che avvengono nei pressi dei nodi di linea; tali spostamenti non sono infatti rappresentabili nel grafo di offerta, perché cominciano e si concludono all'interno di uno stesso nodo, ma sono molto importanti per la determinazione della funzione di costo, per cui se ne tiene conto tramite una rappresentazione apposita. Come ho potuto constatare nelle mie applicazioni, la corretta modellizzazione degli spostamenti in corrispondenza dei nodi di linea influenza in maniera determinante la buona riuscita di una simulazione, per cui occorre prestare molta attenzione al sottografo di fermata. Il sottografo di fermata è stato oggetto di diverse modellizzazioni nel corso degli anni, riscontrabili in letteratura; qui riporto le più significative.

Nello schema di fermata di livello 1 o mononodo (figura 2.1.2), la fermata è rappresentata da un nodo di diversione, da cui si dipartono archi di salita/discesa verso i nodi di linea e un arco di accesso/egresso (solitamente pedonale) verso l'esterno. Usando questo schema, è possibile associare un tempo di salita agli archi di salita, ma non si può differenziare tra gli utenti provenienti dall'esterno e gli utenti che invece effettuano il trasbordo; inoltre, non si può evidenziare in modo esplicito la quota parte dei discesi che effettuano il trasbordo e nemmeno i tempi di attesa.

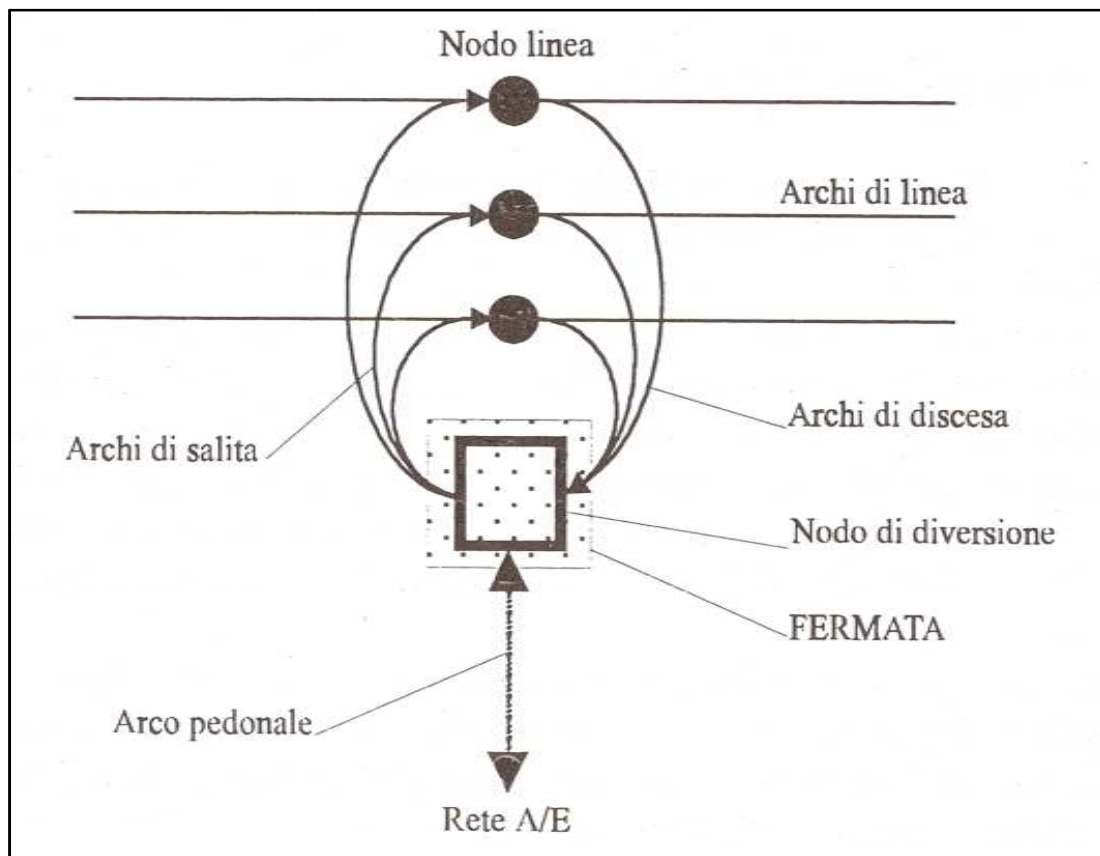


Figura 2.1.2 Schema di fermata di livello 1 (mononodo).

Lo schema di fermata di livello 2 o binodo (figura 2.1.3) aggiunge allo schema di livello 1 un nodo di ingresso/uscita, o accesso/egresso, collegato al nodo di diversione tramite un arco di attesa e verso l'esterno tramite un arco di accesso/egresso; dal nodo di

diversione si dipartono solo archi di salita, mentre gli archi di discesa vanno dal nodo di linea al nodo di accesso/egresso. In questo caso, è possibile associare un tempo di salita agli archi di salita e un tempo di attesa all'arco di attesa, ma non si è ancora in grado di differenziare questi tempi per gli utenti in arrivo dall'esterno e quelli che effettuano il trasbordo e nemmeno le due quote di flusso.

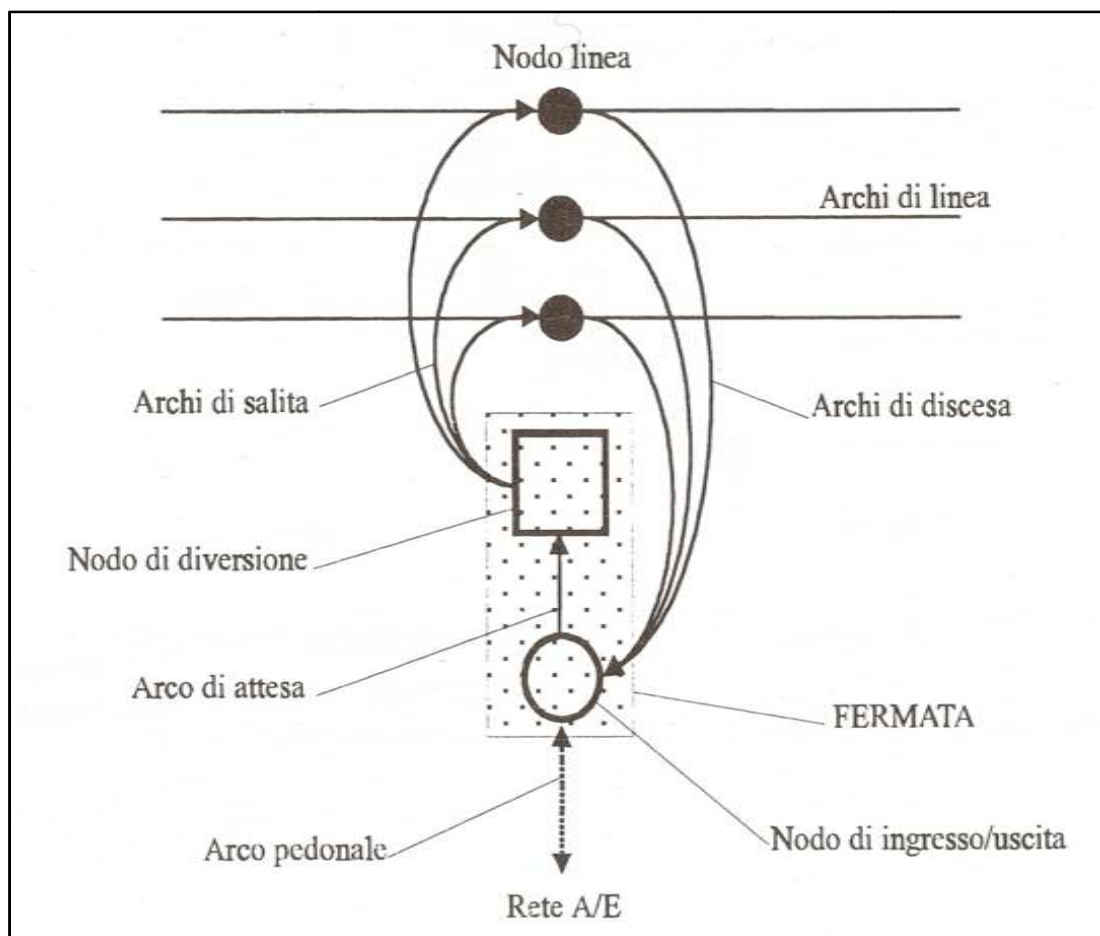


Figura 2.1.3 Schema di fermata di livello 2 (binodo).

Lo schema di fermata di livello 3 o trinodo (figura 2.1.4) aggiunge allo schema di livello 2 un nodo di attesa, posto tra il nodo di diversione e il nodo di accesso/egresso; dal nodo di diversione si dipartono solo archi di salita, mentre gli archi di discesa vanno dal nodo di linea al nodo di attesa; in corrispondenza del nodo di attesa, l'utente può

riportarsi nel nodo di diversione tramite l'arco di attesa, oppure dirigersi al nodo di accesso/egresso tramite l'arco di uscita; l'utente in accesso si porta dal nodo di accesso/egresso al nodo di attesa tramite l'arco di ingresso. Usando questo schema, è possibile definire un tempo di trasbordo; gli utenti che effettuano il trasbordo sopportano infatti il solo tempo associato all'arco di attesa, mentre gli altri sopportano anche il tempo associato all'arco di ingresso. Si può inoltre definire il flusso di trasbordo come differenza tra il flusso sull'arco di attesa, dove sono presenti entrambi i flussi di utenti, e il flusso sull'arco di ingresso, dove è presente soltanto il flusso di utenti provenienti dall'esterno.

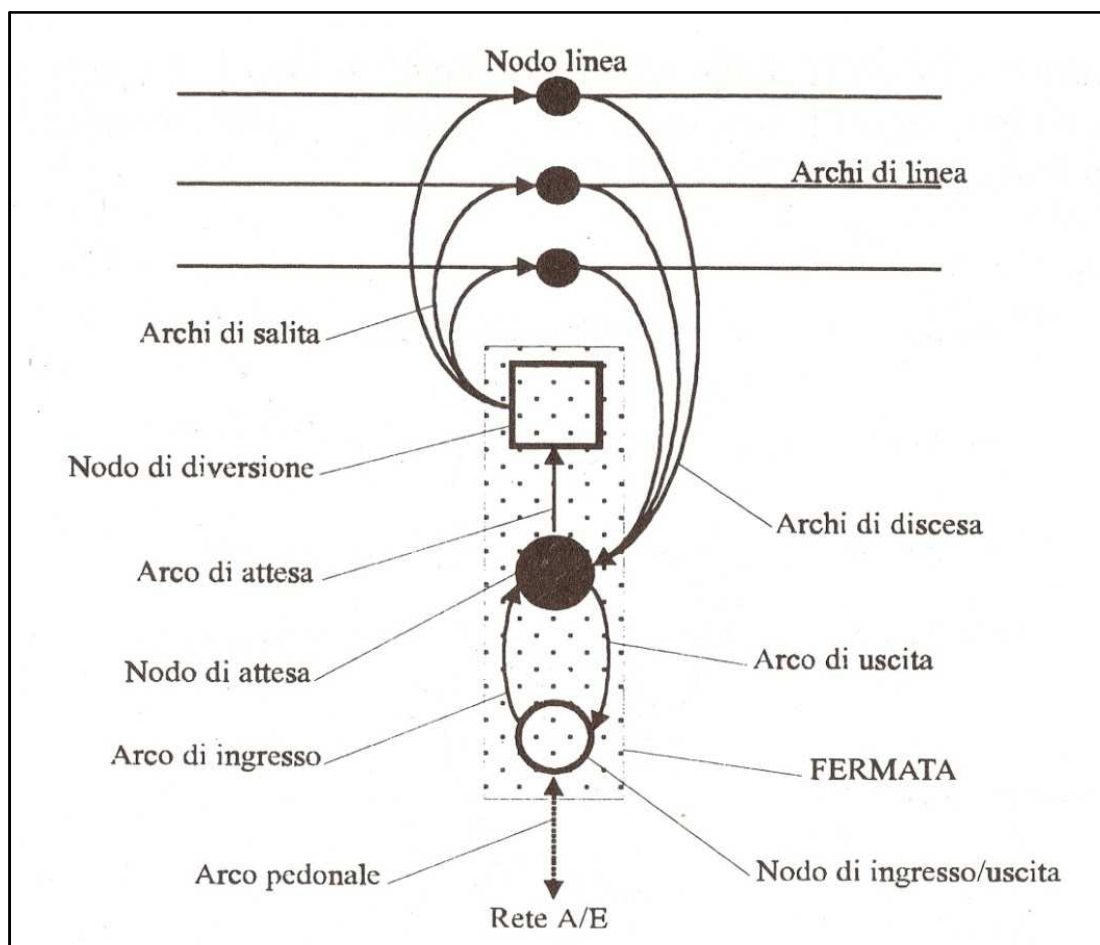


Figura 2.1.4 Schema di fermata di livello 3 (trinodo).

Lo schema di fermata di livello 4 o quadrinodo (figura 2.1.5) aggiunge allo schema di livello 3 un nodo di trasbordo, posto tra il nodo di attesa e il nodo di accesso/egresso; dal nodo di diversione si dipartono solo archi di salita, mentre gli archi di discesa vanno dal nodo di linea al nodo di trasbordo; in corrispondenza del nodo di trasbordo, l'utente può riportarsi nel nodo di attesa tramite l'arco di trasbordo, oppure dirigersi al nodo di accesso/egresso tramite l'arco di uscita. Questo schema permette di determinare tempi e flussi di trasbordo indipendentemente dagli altri tempi e flussi presenti, associandoli direttamente all'arco di trasbordo, superando i limiti degli schemi precedenti.

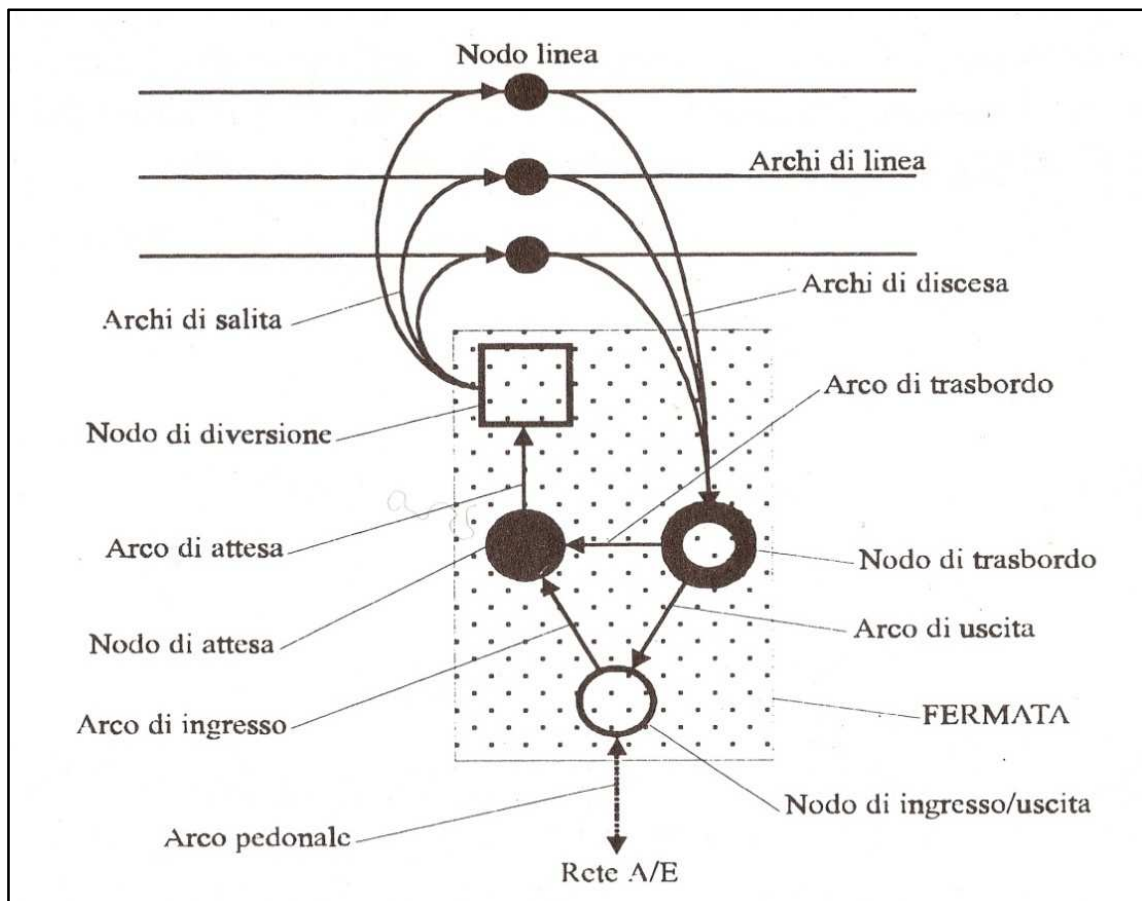


Figura 2.1.5 Schema di fermata di livello 4 (quadrinodo).

I sottografi di fermata presentati hanno evidentemente vantaggi e svantaggi diversi; salendo di livello, è possibile considerare un maggior numero di aspetti che caratterizzano il comportamento degli utenti alle fermate, ma questo implica una maggiore complessità del grafo e maggiori difficoltà dal punto di vista computazionale (basti pensare che lo schema di livello 2 aggiunge a quello di livello 1 un arco e un nodo, quello di livello 3 due nodi e tre archi, quello di livello 4 tre nodi e quattro archi). Nella pratica comune, si utilizza un solo schema per ciascuna rete oggetto di studio; le scelte più frequenti ricadono sugli schemi di livello 2 e 3, il primo per le reti con poche possibilità di trasbordo, il secondo per le reti con molte interconnessioni. Nelle mie applicazioni, utilizzerò un programma in grado di gestire uno schema di tipo 4, che fornirà una rappresentazione ben articolata delle fermate, ma richiederà una fase di calcolo appositamente dedicata. Gli schemi di fermata proposti si possono utilizzare sia per grafi sincronici che diacronici, ma nel secondo caso occorre integrarli con l'*orario* di servizio: ad ogni fermata viene associato un asse temporale, così gli istanti di arrivo e partenza di ogni singola corsa possono essere definiti tramite coordinate temporali.

Al sottografo di fermata si aggiunge poi il *sottografo di accesso/egresso*, che rappresenta compiutamente gli spostamenti che avvengono tra la fermata e l'esterno. Esso è costituito da una serie di nodi e di archi che consentono di connettere i centroidi ai terminali delle reti dei servizi; le caratteristiche dei nodi e degli archi sono riferite alla modalità, o alle modalità, che consentono di realizzare le operazioni di accesso/egresso, per cui il sottografo dipende dalla scala degli spostamenti (urbani piuttosto che metropolitani o regionali) e dalla struttura della domanda. Il sottografo di accesso/egresso consente di definire un parametro fondamentale per le funzioni di costo, cioè il tempo di accesso, oppure, in alternativa, la distanza di accesso, una volta definita la velocità media degli utenti. Per spostamenti a scala urbana, normalmente,

viene considerato soltanto un tempo di accesso pedonale; questa assunzione è senz'altro valida per le fermate di tipo 1 e 2, mentre per le fermate di tipo 3 dovrebbero essere rappresentati, a rigore, anche i percorsi di tipo park-and-ride, kiss-and-ride, bike-and-ride, che consentono velocità medie più elevate e quindi, a parità di tempo di accesso, distanze di accesso più elevate. Per spostamenti a scala metropolitana e regionale, invece, occorre considerare i tempi di accesso con modalità automobilistiche (private o collettive) e ferroviarie, se presenti; per tali tempi possono essere assunti dei valori medi, in base a una velocità di accesso media, oppure valori diversificati, a seconda della complessità della rappresentazione. Il sottografo di accesso/egresso deve essere integrato, nel caso di grafi diacronici, con l'orario di servizio, analogamente al sottografo di fermata. Supponendo che la domanda sia nota non soltanto in termini di origine e destinazione, ma anche di orario desiderato di partenza ODP oppure orario desiderato di arrivo ODA, si può associare a ogni centroide spaziale di origine un asse temporale in cui riportare gli ODP e a ogni centroide spaziale di destinazione un asse temporale in cui riportare gli ODA; in questo modo, l'operazione di accesso/egresso descritta prima può essere differenziata in base alla singola corsa.

Per tutte le considerazioni fatte finora, il grafo della rete di base risulta quindi composto da:

- grafo delle linee o grafo delle corse;
- sottografo di fermata;
- sottografo di accesso/egresso.

In figura 2.1.6 sono riportati due esempi di grafi, uno di tipo sincronico e uno di tipo diacronico; si può osservare una significativa differenza del secondo rispetto al primo, che consiste nella caratterizzazione temporale delle fermate e dei centri di origine-destinazione.



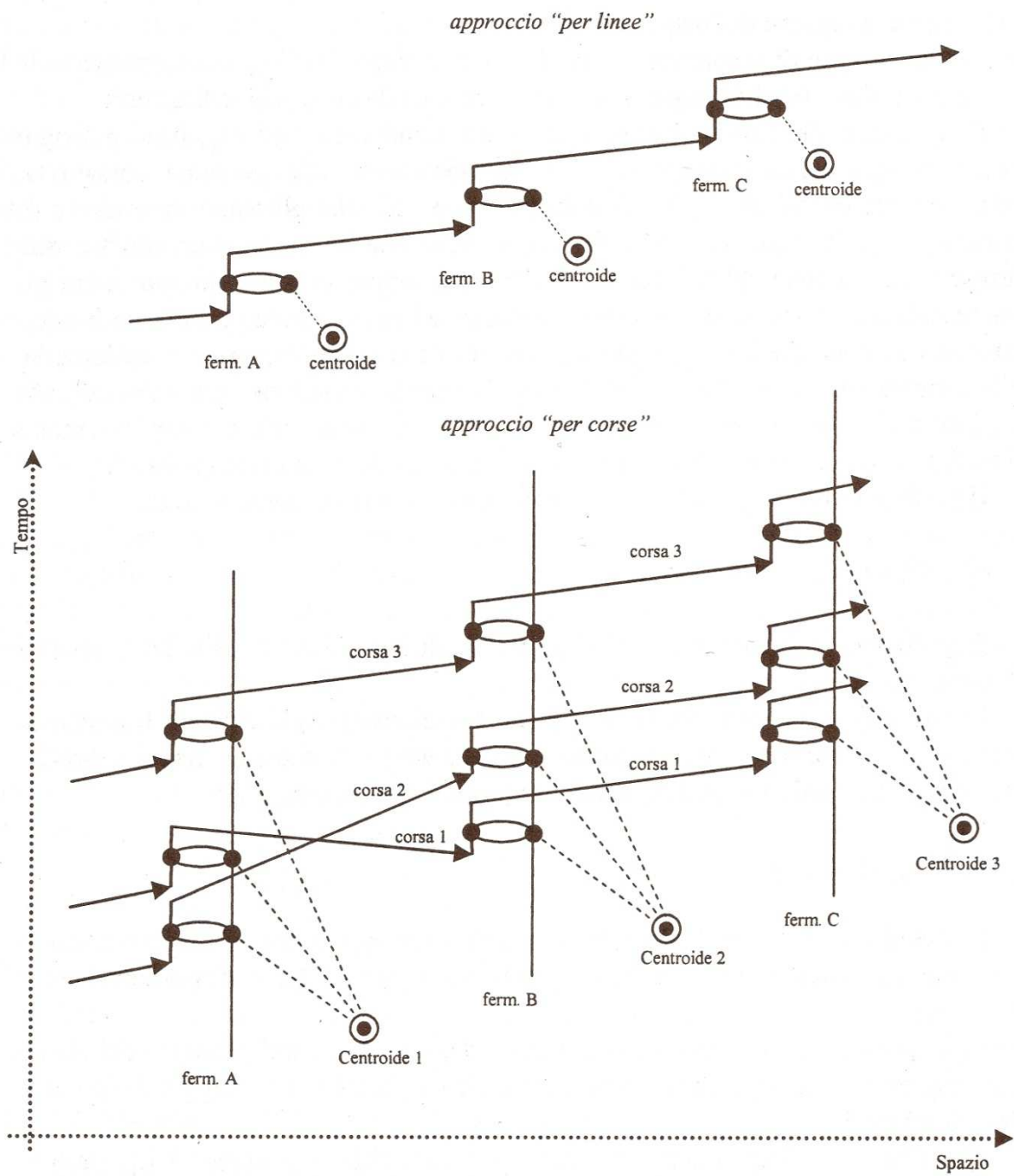


Figura 2.1.6 In alto, un esempio di grafo sincronico: grafo di una linea, compresa tra tre fermate A, B e C, con i relativi sottografi di fermata (mononodo). In basso, un esempio di grafo diacronico: grafo di tre corse, comprese tra tre fermate, con i relativi sottografi di fermata (mononodo).

Al grafo della rete di base occorre ora associare una *funzione di costo*, ovvero una relazione matematica che lega le disutilità percepite dagli utenti nelle varie fasi dello spostamento al costo dello spostamento. Il costo è generalizzato, perché comprende sia attributi monetari che non monetari, e interno, perché vengono considerate solo disutilità per elementi interni al sistema di trasporto; le disutilità per elementi esterni (es. ambiente, beni immobiliari) vengono qui trascurate in quanto non determinanti per la formazione dei flussi di traffico.

Per i sistemi TPL, le disutilità che concorrono a formare la funzione di costo sono i tempi connessi alle varie fasi dello spostamento e i costi monetari, ovvero:

- tempo a bordo del veicolo  $T_b$ ;
- tempo di attesa alla fermata  $T_w$ ;
- tempo di salita  $T_s$ ;
- tempo di discesa  $T_d$ ;
- tempo di accesso/egresso  $T_a$ ;
- tempo di trasbordo  $T_t$ ;
- tempo di anticipo  $T_{ant}$  (solo per grafi delle corse);
- tempo di ritardo  $T_{rit}$  (solo per grafi delle corse);
- costo del biglietto  $C$ .

Il tempo a bordo del veicolo è una variabile additiva, per cui il valore relativo allo spostamento completo si ottiene sommando i valori relativi ai singoli archi:

$$T_b = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_i}$$

$L$  rappresenta la lunghezza di ciascun arco,  $V$  la velocità media di percorrenza dell'arco,  $n$  il numero totale di archi che compongono lo spostamento.  $L$  e  $n$  si desumono dal

grafo, mentre la velocità media di percorrenza dipende da una serie di fattori, tra cui le caratteristiche del veicolo (peso, potenza ecc.), delle infrastrutture (sistema di guida, pendenza, raggio di curvatura ecc.), delle regolazioni di circolazione sul tratto e del tipo di servizio; inoltre, per i mezzi in sede promiscua, la velocità media dipende anche dall'influenza del flusso dei veicoli di altro tipo che utilizzano la stessa sede. Questo tipo di considerazioni si deduce dalla meccanica della locomozione ed esiste un'ampia letteratura in merito; indicativamente, si può assumere, per i mezzi in sede promiscua, una  $v$  media di 10-18 km/h, per i mezzi in sede protetta 15-25 km/h e per i mezzi in sede propria 25-40 km/h. Eventualmente, è possibile anteporre un coefficiente moltiplicativo al tempo a bordo, se risulta particolarmente sgradito (coefficiente  $>1$ ) all'utente che effettua lo spostamento; questa condizione si verifica solitamente quando il mezzo è poco confortevole, molto affollato e l'utente non ha la possibilità di sedersi.

Le altre variabili temporali elencate sopra, invece, non sono additive, per cui non sono correlabili al singolo arco e vengono quindi espresse per l'intero spostamento. I tempi di salita e discesa di possono quantificare in 3-5 secondi a persona per i mezzi di superficie tradizionali, che hanno solitamente un numero ridotto di porte e scalini rialzati, e in 1-3 secondi a persona per i mezzi innovativi, metropolitane e ferrovie, con un numero maggiore di porte e scalini ribassati; moltiplicando questi valori rispettivamente per i flussi in salita e discesa, si ottengono i valori totali. Solitamente i tempi di salita e discesa non vengono espressi in maniera esplicita, ma vengono tenuti in conto all'interno della velocità commerciale.

Il tempo medio di attesa alla fermata dipende dalla frequenza e regolarità dei passaggi dei veicoli, secondo la seguente relazione:

$$T_w = \frac{\theta}{\sum_{i=1}^m \varphi_m}$$

La sommatoria al denominatore rappresenta la frequenza cumulata di tutte le  $m$  linee che si arrestano alla fermata, mentre il coefficiente  $\theta$  è pari a 0,5 se la linea è completamente regolare, vale a dire se gli intervalli fra passaggi successivi sono costanti, mentre è pari a 1 se la linea è completamente irregolare, cioè se gli intervalli fra passaggi successivi assumono valori sensibilmente differenti. Questa relazione può essere riformulata per tenere conto dell'affollamento e quindi dell'impossibilità per l'utente di salire sulla prima corsa di una certa linea, dovendo così aspettare la corsa successiva:

$$T_{wm} = \frac{\theta}{\varphi_m} \left( \frac{F_b + F_w}{Q_m} \right)$$

Questa seconda formulazione dipende, oltre che dalla frequenza e dalla regolarità della linea, anche dal rapporto tra la domanda di posti (somma del flusso a bordo e del flusso in attesa) e la capacità della linea; per specificarla, è necessario utilizzare perlomeno una rappresentazione della fermata trinodo, che contiene un nodo di attesa. Si tratta di una formulazione più completa e sicuramente più adatta all'ambito urbano, dove non è raro trovare fermate sovraffollate, soprattutto all'ora di punta; la disutilità che viene attribuita all'attesa, in questo secondo caso, è spesso doppia o tripla rispetto al primo caso, e si avvicina di più alla percezione degli utenti, che effettivamente considerano la fase di attesa molto sgradevole e vi associano una componente di costo elevata.

Il tempo di accesso/egresso si può determinare dalla seguente relazione:

$$T_a = \frac{L_a}{V_a}$$

dove  $L_a$  è la lunghezza di ciascun arco di accesso/egresso, desumibile dal sottografo di accesso/egresso, mentre  $V_a$  è la velocità di percorrenza dell'arco da parte degli utenti; se gli archi di accesso/egresso sono pedonali, si può assumere una  $V_a$  pari a 5-6 km/h.

Analogamente, il tempo di trasbordo si può determinare dalla seguente relazione:

$$T_t = \frac{L_t}{V_t}$$

dove  $L_t$  è la lunghezza di ciascun arco di trasbordo, qualora presente nel sottografo di fermata, mentre  $V_t$  è la velocità di percorrenza dell'arco da parte degli utenti, assumibile pari 5-6 km/h, come  $V_a$ . Se il sottografo di fermata non contiene archi di trasbordo, ma contiene perlomeno archi di attesa, è possibile calcolare il tempo di trasbordo dalla differenza tra tempo di attesa e tempo di accesso.

I tempi di anticipo e ritardo, a differenza dei precedenti, non sono associabili ai grafi per linee, ma soltanto ai grafi per corse, in cui è definita una specifica coordinata temporale che permette di calcolarli. Essi si possono determinare in base all'orario di arrivo desiderato (ODA) a destinazione oppure in base all'orario di partenza desiderato (ODP) dall'origine, a seconda di quale dei due parametri entra nella costruzione della matrice O/D con dinamica intraperiodale. Il tempo di anticipo  $T_{ant}$  è la differenza di tempo tra l'orario di arrivo a destinazione, condizionato dal servizio, e l'orario desiderato di arrivo ODA, oppure tra l'orario di partenza desiderato ODP e l'orario di partenza condizionato dal servizio; il tempo di ritardo  $T_{rit}$  è invece la differenza di tempo tra ODA e l'orario di arrivo a destinazione, oppure tra l'orario di partenza dall'origine e ODP. Essi rappresentano la disutilità sopportata dall'utente nella scelta di una corsa, il cui orario non corrisponde perfettamente all'orario desiderato (di partenza o di arrivo); è chiaro che questi parametri diventano tanto più rilevanti quanto più sono basse frequenza e regolarità del servizio, quindi per i sistemi TPL è necessario considerarli non tanto per la frequenza, quanto per l'irregolarità. Si può assumere che esiste una fascia di indifferenza, ovvero un intervallo di tempo, compreso tra zero e il limite superiore della fascia, entro il quale le disutilità  $T_{ant}$  e  $T_{rit}$  sono nulle, dopodiché crescono linearmente

per un certo tratto, finché, per valori molto bassi di frequenza, diventano funzioni più che lineari; dato che i TPL hanno frequenze elevate, si può assumere di restare in campo lineare, a partire da un limite superiore della fascia di 10-15 minuti.

Il costo del biglietto  $C$  è una variabile additiva, poiché dipende dalla lunghezza del percorso seguito e quindi è costituito da una serie di componenti, ciascuna delle quali riferibile ad un singolo arco. Questo parametro ha un'unità di misura difforme dalle altre disutilità, che vengono conteggiate in minuti o secondi; occorre perciò convertire anch'esso in unità temporali, dividendolo per un apposito fattore di conversione, definito valore del tempo. Il valore del tempo (o VOT, Value Of Time) viene solitamente correlato al salario percepito, assumendo che gli utenti lavoratori diano al tempo un valore più elevato rispetto agli utenti non sistematici e siano quindi disposti a sopportare un costo del biglietto via via più elevato al crescere del salario; partendo da questa ipotesi, VOT si può ricavare da una relazione del seguente tipo:

$$VOT = \frac{w * \theta_t}{\theta_c}$$

dove  $w$  è il salario percepito,  $\theta_t$  è un coefficiente associabile al tempo di viaggio e  $\theta_c$  è il coefficiente del rapporto  $C/w$ ; in questo modo, VOT rappresenta una percentuale del salario, ovvero la percentuale che l'utente è disposto a dedicare a quel viaggio.

A questo punto si è in grado di individuare la funzione di costo da associare al grafo; essa somma tutte le componenti di tempo e i costi monetari pesati con opportuni coefficienti e dà come risultato il costo di un percorso:

$$c_i = \sum_k \beta_k * c_{ik}$$

Tale risultato viene poi utilizzato per formulare un legame con il flusso di percorso, che costituisce il modello finale di offerta ed è diverso a seconda della dimensione

temporale che si vuole utilizzare. Bisogna inoltre tenere presente che, in caso di rete congestionata, i costi dipendono anche dai flussi, per cui si sviluppa una dipendenza circolare all'interno della funzione. Nel paragrafo relativo alle tipologie di modelli presenti in letteratura si vedrà come questo legame può essere specificato nei vari casi.

#### **2.1.1.5. DOMANDA DI TRASPORTO**

Il modello di domanda è la seconda parte su cui si appoggia il modello completo. Esso si può definire come una relazione matematica che consente di associare a un dato sistema delle attività e al modello di offerta di trasporto il valore medio del flusso di domanda con le sue caratteristiche rilevanti nel periodo di riferimento preso in esame.

Il flusso di domanda, o flusso di spostamenti, è costituito da un'aggregazione di spostamenti individuali e ogni spostamento è il risultato di una serie di scelte compiute dall'utente del servizio di trasporto, che vanno sotto il nome di *comportamento di scelta del percorso* e sono legate in parte alle caratteristiche del sistema delle attività, in parte alle caratteristiche dell'offerta. Il modello di domanda è quindi incentrato sulla simulazione di tale comportamento, che consente di determinare il flusso di domanda.

Il comportamento di scelta del percorso viene rappresentato basandosi su un'ipotesi fondamentale, ossia che ogni utente che si deve spostare tra una zona O e una zona D si comporti razionalmente; questa assunzione ha le seguenti implicazioni:

- l'utente considera tutte le alternative all'interno di un insieme di scelta, non-vuoto e finito;
- associa ad ogni alternativa all'interno dell'insieme un'utilità percepita;
- sceglie l'alternativa che massimizza l'utilità percepita.

L'insieme di scelta, nella realtà, può essere diverso per ciascun decisore e le alternative prese in considerazione dipendono dalle caratteristiche dell'utente, del sistema delle

attività, dalle informazioni a disposizione sull'offerta; nel modello di domanda, l'insieme di scelta e le alternative che lo compongono vengono scelti dal modellista per ciascuna categoria di utenti, non per il singolo utente, assumendo che utenti con caratteristiche omogenee abbiano la stessa percezione della realtà.

L'utilità che l'utente associa a ciascuna alternativa dipende dalle caratteristiche, o *attributi*, propri dell'alternativa e non noti al modellista, per cui l'utilità percepita viene rappresentata con una variabile aleatoria, espressa dalla somma di due componenti: l'utilità sistematica, che rappresenta la media o valore atteso dell'utilità percepita da tutti gli utenti con lo stesso contesto di scelta, e il residuo aleatorio, che rappresenta lo scostamento dell'utilità percepita dall'utente da tale valore e racchiude tutti i fattori di incertezza nella modellizzazione. L'utilità sistematica si può esprimere in funzione degli attributi socio-economici dell'area di studio, delle caratteristiche degli utenti e del sistema dei trasporti (in quest'ultimo caso, basta invertire disutilità all'interno della funzione di costo); il residuo aleatorio viene tenuto in conto attraverso una legge di distribuzione probabilistica.

Sulla base delle implicazioni precedenti, non è possibile prevedere con certezza quale alternativa verrà scelta dal generico decisore; è invece possibile esprimere la probabilità che egli scelga un'alternativa come probabilità che questa alternativa abbia un'utilità percepita maggiore rispetto alle altre alternative disponibili; tale probabilità dipende dai valori delle utilità sistematiche di tutte le alternative concorrenti e dalla legge di distribuzione congiunta dei residui aleatori e viene riprodotta da un modello di utilità aleatoria, che è il cuore dell'intero modello di domanda. In letteratura sono presenti diversi modelli di utilità aleatoria per la simulazione del comportamento di scelta, tra cui il logit multinomiale, il logit gerarchico, il cross-nested logit, il probit; essi si differenziano per la scelta della funzione di distribuzione congiunta dei residui aleatori.



Il comportamento di scelta del percorso implica una serie di scelte successive, ognuna delle quali viene quindi espressa tramite una probabilità di scelta derivante da un modello di utilità aleatoria; la probabilità finale di scelta del percorso costituisce il modello di domanda ed è data dal prodotto delle probabilità di scelta nelle varie fasi. Ciò equivale a fattorizzare il modello di domanda nel prodotto di sottomodelli interconnessi; la sequenza più usata è il cosiddetto “modello a quattro stadi”, in cui i sottomodelli sono:

- generazione degli spostamenti, che fornisce il numero medio di utenti di una certa categoria che si spostano dalla zona O per un certo motivo in un certo intervallo temporale; dipende dagli attributi dell'area di studio e degli utenti;
- distribuzione degli spostamenti, che fornisce la percentuale di utenti di una certa categoria che, spostandosi da O per un certo motivo in un certo intervallo temporale, si recano nella zona D; dipende dagli attributi socio-economici, dalle caratteristiche degli utenti e da alcune caratteristiche del sistema dei trasporti;
- ripartizione modale degli spostamenti, che fornisce la percentuale di utenti di una certa categoria che, spostandosi tra O e D per un certo motivo in un certo intervallo di tempo, utilizzano un certo modo di trasporto; dipende dalle caratteristiche degli utenti e del sistema dei trasporti;
- scelta del percorso, che fornisce la percentuale di utenti di una certa categoria che, spostandosi tra O e D per un certo motivo in un certo intervallo di tempo con un certo modo, utilizzano un certo percorso; dipende dalle caratteristiche delle singole alternative modali e, in parte, dalle caratteristiche degli utenti.

Le prime tre parti del modello di domanda permettono di determinare i cosiddetti *flussi di percorso indefinito*, cioè i flussi di domanda esistenti tra ciascuna coppia O/D che dovranno necessariamente seguire almeno un percorso, ma tale percorso non è ancora noto. Queste tre parti non vengono qui trattate nel dettaglio, in quanto esulano dalle

specificità dei trasporti pubblici locali e non saranno oggetto di applicazioni da parte mia. Viene invece descritta la scelta del percorso vera e propria, che consente di attribuire un percorso *definito* ai flussi di domanda, in base alle caratteristiche delle alternative modali e al comportamento degli utenti; questi aspetti devono essere trattati in maniera specifica per i trasporti pubblici locali, che sono contraddistinti da reti molto articolate e presentano le esigenze particolari viste nel primo capitolo.

Mentre per i sistemi di trasporto individuali e i sistemi collettivi a lunga distanza è valida l'ipotesi di una scelta *preventiva*<sup>5</sup> del percorso, ossia di una scelta effettuata interamente prima di iniziare lo spostamento, nel caso dei trasporti collettivi locali questa ipotesi non è sufficiente per descrivere il comportamento dell'utenza. Le specificità dei servizi locali, in termini di frequenza, livello di regolarità, capillarità, flessibilità fanno sì che l'utenza scelga soltanto una parte della strategia di viaggio prima di iniziare lo spostamento, per definire poi la restante parte durante il viaggio, adattandosi alle circostanze che possono verificarsi; questo tipo di scelta è mista *preventiva/adattiva*. Nella fase preventiva, tipicamente, l'utente sceglie la fermata a cui recarsi; nella fase adattiva, l'utente sceglie quale linea utilizzare tra quelle passano alla fermata e, di conseguenza, gli eventuali interscambi. L'adattamento è una strategia da considerare per i TPL, che, essendo ad alta frequenza e spesso irregolari, lasciano spazio a numerose variazioni temporali dell'offerta di servizio, imprevedibili prima di iniziare lo spostamento; non si considera per i trasporti privati perché sono continui e per i trasporti collettivi a lunga distanza perché sono discreti ma con frequenze più basse e regolarità maggiore rispetto ai TPL, per cui in questi casi si può assumere che

---

<sup>5</sup> Il comportamento preventivo "puro" assume che l'utente non modifichi, durante il viaggio, il percorso scelto all'inizio dello stesso. In realtà esistono, anche nell'ambito dei trasporti individuali e dei trasporti collettivi a lunga distanza, situazioni in cui l'utente può o deve apportare variazioni al percorso, per esempio di fronte a incidenti, blocchi, sistemi di informazione all'utenza in tempo reale; tali situazioni non sono mai state tenute in conto nel processo di modellizzazione, fino a pochi anni fa, quando si è sviluppato un settore di ricerca dedicato al tema. Non ritengo opportuno trattare questi aspetti nella tesi, in quanto esulano dall'ambito dei trasporti pubblici locali, ma ho incluso la letteratura in merito nella bibliografia, per ampliare le mie conoscenze sui modelli di simulazione.

l'utente abbia una conoscenza completa dell'offerta prima di iniziare lo spostamento. Il fenomeno dell'adattamento deve quindi essere introdotto esplicitamente nella fase di scelta del percorso, affinché il modello sia in grado di simulare i sistemi TPL in maniera verosimile. Questa particolarità genera parecchie complicazioni: occorre, infatti, definire in maniera specifica l'insieme delle alternative di scelta e l'utilità che l'utente vi associa, oltre che riprodurre il fenomeno dell'adattamento stesso nel processo di scelta.

Per ottenere un insieme di scelta rappresentativo nell'ambito dei trasporti collettivi locali, risulta necessario definire, oltre ai percorsi elementari che contraddistinguono la scelta preventiva, ovvero le sequenze di archi consecutivi che collegano un'origine con una destinazione senza cicli, anche i percorsi complessi, ovvero insiemi di percorsi elementari che racchiudono una o più scelte adattive. I primi vengono chiamati *ipercammini semplici*, i secondi *ipercammini composti* e derivano dall'unione di più ipercammini semplici; dal momento che le scelte adattive si possono verificare solo nei nodi di diversione, l'unione degli ipercammini avviene proprio in corrispondenza di tali nodi. In termini specifici, si può definire un ipercammino (rif. Nuzzolo e Russo) come un sottografo parziale aciclico, con l'origine come unica sorgente e la destinazione come unica foce, i cui nodi di diversione, se ve ne sono, sono nodi fermata; ne consegue che un percorso è individuato univocamente da una sequenza di archi di salita, e che un percorso può appartenere a più di un ipercammino. Il concetto di ipercammino (introdotto da Nguyen e Pallottino) consente di descrivere topologicamente la strategia dell'utente.

Si riporta in seguito un esempio di quanto spiegato. In figura 2.1.7 è rappresentato il grafo di una rete di trasporto collettivo, che offre 6 linee in grado di collegare un centroide origine a un centroide destinazione; nella figure 2.1.8 e 2.1.9 sono rappresentati gli ipercammini semplici e gli ipercammini composti per questa rete.

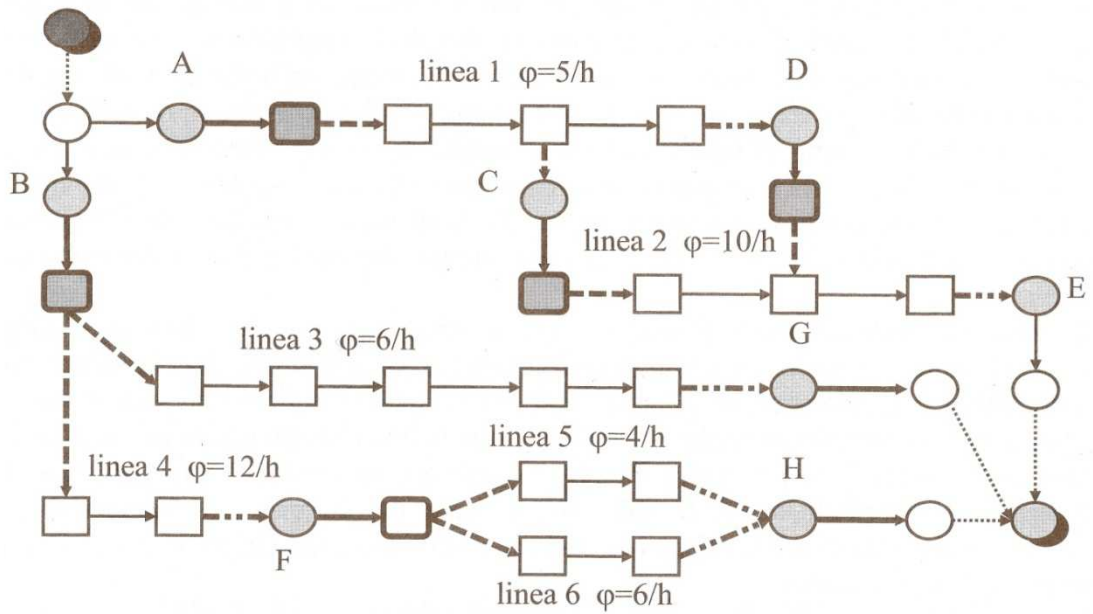


Figura 2.1.7 Esempio di una rete di linee di trasporto collettivo, con frequenza  $\varphi$ .

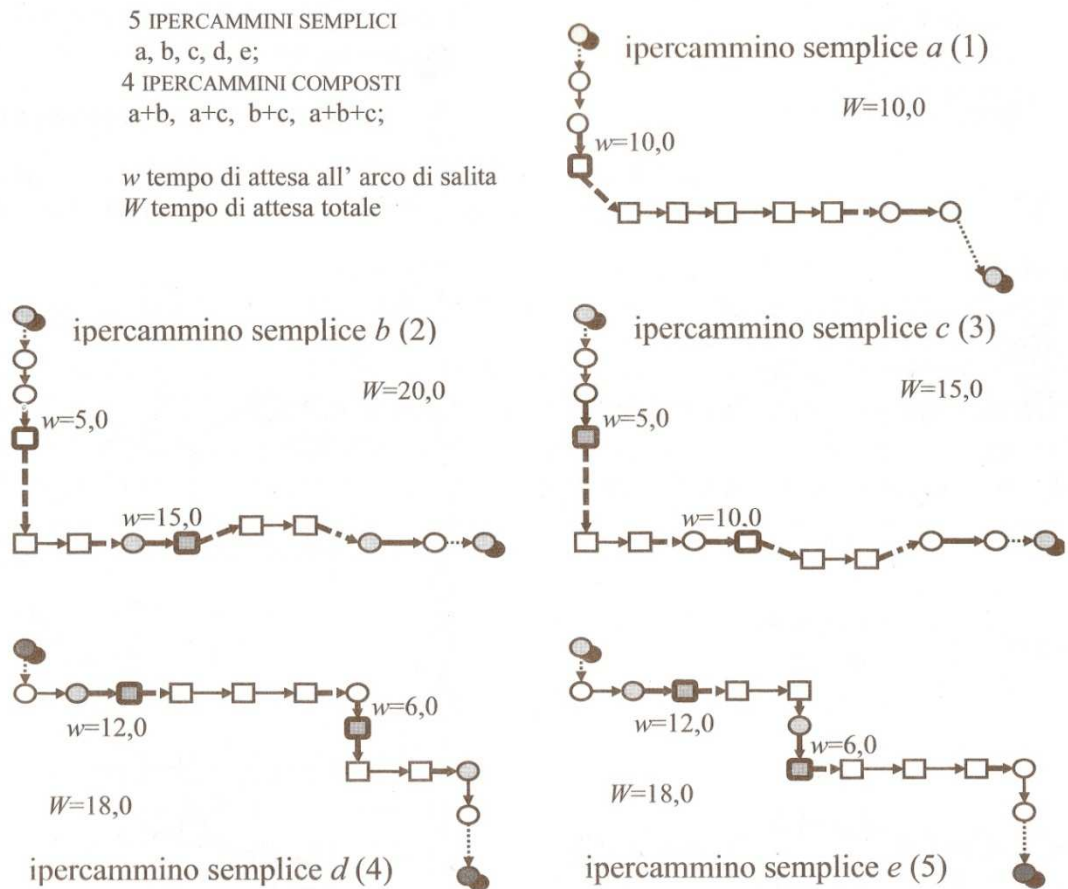


Figura 2.1.8 Gli ipercammini semplici per la rete in figura 2.1.7.

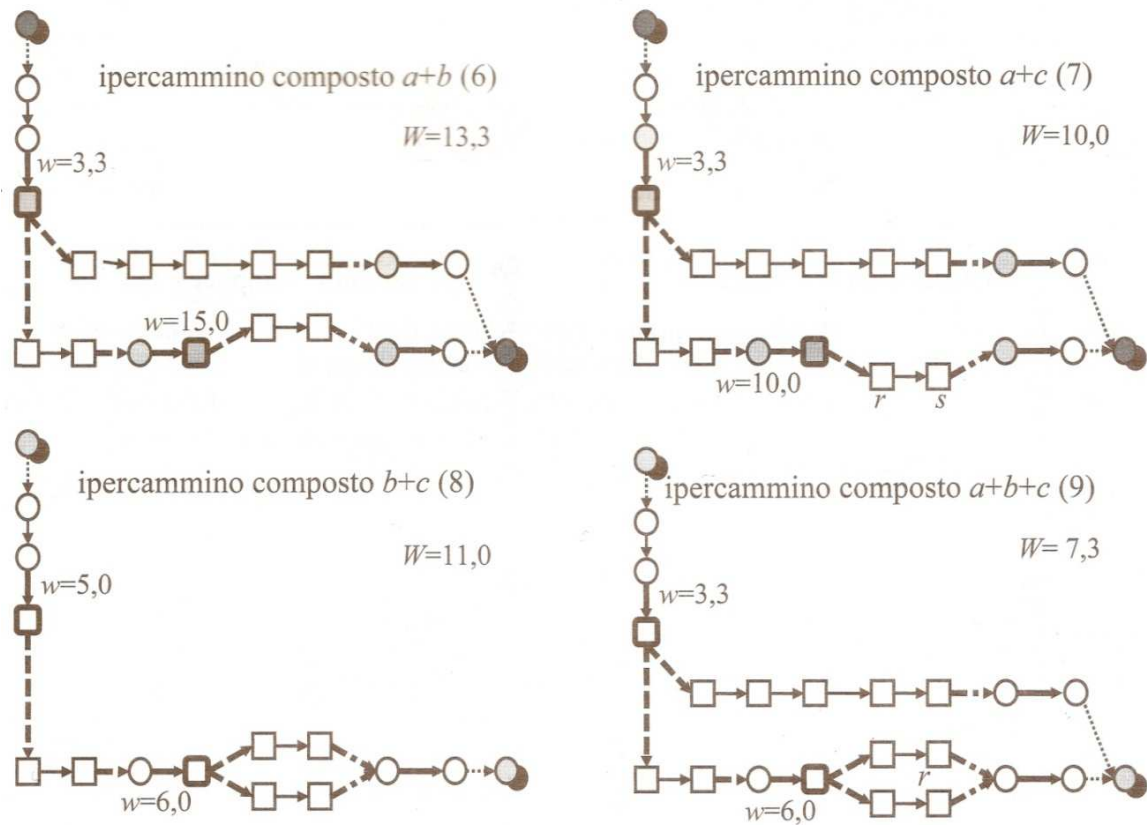


Figura 2.1.9 Gli ipercammini composti per la rete in figura 2.1.7.

La complessità topologica delle reti urbane può dar luogo a decine o centinaia di percorsi che collegano ciascuna ciascuna coppia O/D, quindi a decine o centinaia di milioni di percorsi in totale. Occorre perciò selezionare, nell'insieme di tutti i percorsi possibili, i percorsi *ammissibili*, ovvero i percorsi che vengono realmente inclusi nell'insieme di scelta di un utente; questo passaggio è necessario per contenere la complessità della modellizzazione, ma anche per rappresentare correttamente la percezione dell'utente, che effettivamente esclude a priori alcuni percorsi, in base alle loro caratteristiche e alle proprie esigenze. Nella pratica, questa operazione viene compiuta con approcci euristici, che possono essere classificati in due tipologie:

- approccio *esaustivo*, che considera tutti i percorsi elementari (ossia senza circuiti) esistenti sulla rete in esame;

- approccio *selettivo*, che individua un numero limitato di percorsi tra quelli possibili, sulla base del soddisfacimento di alcune regole euristiche.

Un approccio del primo tipo ha il vantaggio di consentire la valutazione di tutti i percorsi possibili, senza rischiare di escluderne alcuni che nella realtà vengono utilizzati; ha però lo svantaggio di generare percorsi con un elevato grado di sovrapposizione e, quindi, di correlazione nella percezione delle disutilità, per cui occorrerà utilizzare un modello di utilità aleatoria che consenta di valutare alternative parzialmente sovrapposte, come il logit gerarchico o il probit. Inoltre, data la complessità nell'enumerare esplicitamente un numero di percorsi così elevato, si ricorre, in questo caso, a un'enumerazione *implicita*, utilizzando appunto algoritmi impliciti di calcolo. Un approccio del secondo tipo permette di evitare queste difficoltà computazionali, poiché genera un numero minore di percorsi, con una percentuale di sovrapposizione trascurabile; è quindi possibile utilizzare l'enumerazione *esplicita* dei percorsi e un semplice modello di utilità aleatoria di tipo logit multinomiale. Occorre però scegliere con molta cautela le regole euristiche per la selezione dei percorsi ammissibili, in modo da riprodurre correttamente la percezione dell'utente. In letteratura esistono diverse proposte di criteri in grado di compiere questa operazione, che sono più o meno opportuni per le reti urbane e vengono riassunti nella tabella seguente.

Nelle mie simulazioni della fase di scelta del percorso, ho utilizzato un approccio di tipo selettivo, con un criterio di selezione misto, che include sia un confronto dei costi che un confronto di attributi; in questo modo, ho cercato di considerare tutti gli aspetti rappresentativi per la percezione dell'utente. Questo approccio mi ha dato la possibilità di utilizzare un modello logit per la determinazione delle probabilità di scelta; la formulazione di questo modello e tutte le implicazioni pratiche verranno trattate nel prossimo capitolo.

TIPO DI CRITERIO	DESCRIZIONE
<b>Topologico</b>	Un percorso è ammissibile se ogni arco che lo compone comporta un allontanamento dall'origine e/o un avvicinamento alla destinazione
<b>Confronto</b>	Un percorso è ammissibile se il suo costo generalizzato è non superiore di una quota $\alpha$ rispetto al costo del percorso di minimo costo
<b>Progressivo</b>	Sono ammissibili i primi $n$ percorsi di costo generalizzato minimo
<b>Multi-attributo</b>	Sono ammissibili i percorsi minimi secondo vari attributi (solitamente le componenti del costo percepito: tempo, costo monetario, distanza ecc.)
<b>Comportamentale</b>	Sono ammissibili i percorsi che escludono sequenze di archi corrispondenti a comportamenti non realistici (es. scendere e risalire sulla stessa linea)
<b>Distintivo</b>	Sono ammissibili i percorsi che si differenziano almeno per una quota $\alpha$ nella lunghezza o nel costo dei loro archi

Tabella 2.1.a Criteri di selezione dei percorsi per un approccio di tipo selettivo.

Definito compiutamente l'insieme di scelta, occorre ora associare un'utilità percepita a ciascuna alternativa, secondo il procedimento descritto all'inizio del paragrafo, e infine occorre riprodurre il comportamento di scelta mista preventiva-adattiva, inserendo nel modello i parametri che l'utente considera prima e durante il viaggio.

Prima del viaggio, l'utente sceglie la fermata a cui recarsi per accedere alla rete di servizi collettivi; solitamente, la scelta ricade sulla fermata più vicina al luogo di origine, oppure, se sono presenti più fermate a distanze pressoché uguali, sulla fermata che offre l'alternativa modale più gradita. In virtù dell'elevata frequenza dei servizi, è ragionevole assumere arrivi casuali degli utenti alle fermate; questa ipotesi è generalmente verificata per un distanziamento medio cumulato delle linee minore o uguale a 15 minuti. Una volta giunto alla fermata prescelta, il comportamento adattivo dell'utente può manifestarsi secondo due modalità diverse:

- comportamento adattivo *indifferente*: l'utente sale sul primo veicolo che arriva di una linea compresa nell'insieme di scelta;

- comportamento adattivo *intelligente*: l'utente sale sul primo veicolo che arriva se la disutilità media percepita connessa all'utilizzo di quella linea, tenendo conto del tempo già trascorso alla fermata, è inferiore alla disutilità media percepita connessa all'uso delle linee non ancora arrivate; in caso contrario, aspetta l'arrivo del veicolo successivo e ripete il ragionamento.

Il due comportamenti corrispondono a due situazioni ben distinte nella realtà. Il primo tipo è prevalente per utenti non sistematici, che utilizzano servizi molto irregolari e con scarse informazioni all'utenza; tali utenti non hanno una conoscenza precisa del funzionamento dei servizi, per cui scelgono il primo mezzo che arriva alla fermata, indipendentemente dal costo complessivo di percorso che comporta la scelta di quell'alternativa. Il secondo tipo si verifica normalmente per utenti sistematici su servizi irregolari, e per tutti gli utenti di servizi regolari, con un'adeguata informazione dell'utenza; essi hanno una conoscenza dettagliata degli orari e dei costi che comporta ciascuna fase di uno spostamento, per cui tendono ad utilizzare le alternative che garantiscono un costo complessivo minore.

Le considerazioni fatte finora sul comportamento di scelta del percorso nell'ambito dei sistemi TPL sono fondamentali per la formulazione del modello di domanda. Le diverse ipotesi comportamentali che sono state descritte portano infatti a formulare la probabilità di scelta del percorso in maniere diverse, anche in base alle caratteristiche temporali del caso in esame. Nel paragrafo relativo alle tipologie di modelli si vedrà come la probabilità di scelta del percorso viene specificata a seconda dei casi.

#### **2.1.1.6. INTERAZIONE DOMANDA/OFFERTA (ASSEGNAZIONE)**

Quest'ultima fase consente di assegnare la matrice O/D al grafo di rete e simulare quindi l'interazione domanda/offerta; l'obiettivo principale della simulazione è



determinare i flussi di traffico su ciascun arco del grafo, ma non è il solo, infatti esiste una scala di obiettivi di importanza decrescente che è possibile raggiungere valutando i risultati della simulazione:

- ottenere flussi di arco ragionevoli e identificare gli archi più congestionati;
- ottenere buone misure aggregate di rete (es. distanze, code ecc.);
- stimare i costi di viaggio tra le zone origine e le zone destinazione, per un dato livello di domanda;
- valutare le caratteristiche dei percorsi utilizzati da ciascuna coppia O/D;
- valutare i tipi di manovre che avvengono in corrispondenza delle intersezioni.

La fase di assegnazione richiede, oltre alla disponibilità di un modello di offerta e di un modello di domanda, l'individuazione di una serie di ipotesi secondo le quali avviene la loro interazione; tali ipotesi costituiscono una discriminante per classificare i modelli di assegnazione. I principali approcci da considerare riguardano:

- tipo di interazione domanda/offerta: di *equilibrio* (cerca uno stato in cui i flussi di arco sono congruenti ai corrispondenti costi di arco, per cui gli utenti non tendono più a cercare un percorso che costi meno, ma rimangono su quello prescelto) o di *processo dinamico* (cerca successione di stati ammissibili, in cui le transizioni sono dovute alla mancata congruenza tra flussi di arco e costi di arco, per cui gli utenti tendono ad aggiornare progressivamente il proprio percorso);
- tipologia di funzioni di costo: a reti *non congestionate* le funzioni di costo sono indipendenti dai flussi, mentre a reti *congestionate* occorre rappresentare esplicitamente la dipendenza dei costi dai flussi tramite una curva di deflusso;
- comportamento di scelta del percorso: si può assumere che gli utenti scelgano il percorso di minimo costo (utilità percepita *deterministica*, residui aleatori nulli)

oppure che scelgano i percorsi in base alla loro probabilità (utilità percepita *stocastica*, residui aleatori non nulli);

- tipologia di domanda: *rigida* (i flussi di domanda sono costanti e indipendenti dalla congestione) o *elastica* (i flussi di domanda dipendono dai costi di congestione, in uno o più sottomodelli di scelta);
- tipologia di utente: *monoclasse* (caratterizzato dalla sola coppia O/D) o *multi-classe* (caratterizzato anche da altri segmenti di domanda).

In figura 2.1.10 è riportato uno schema generale del processo di assegnazione; nella tabella seguente viene sintetizzata la classificazione appena descritta.

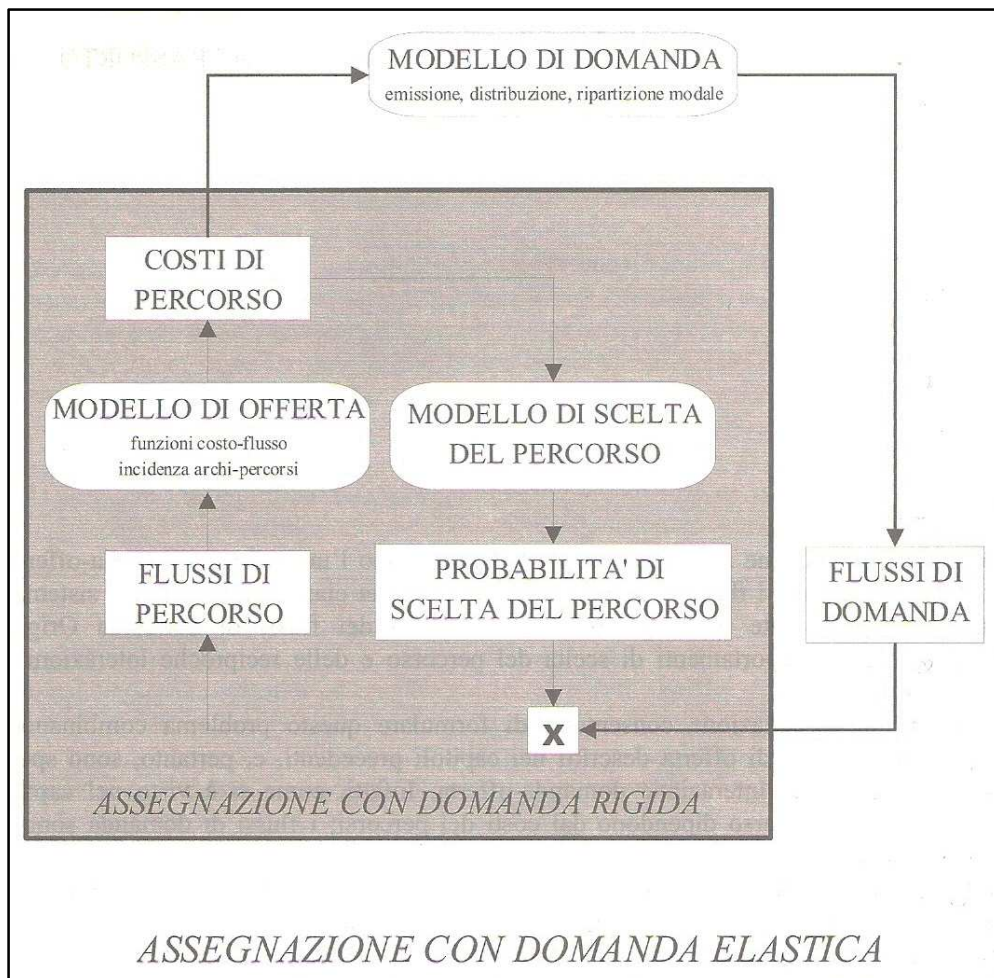


Figura 2.1.10 Rappresentazione schematica del processo di assegnazione.

RETE		SCELTA DEL PERCORSO	
		DETERMINISTICA	STOCASTICA
NON CONGESTIONATA		<b>DNL</b> (carico deterministico)	<b>SNL</b> (carico stocastico)
CONGESTIONATA	EQUILIBRIO	<b>DUE</b> (equilibrio deterministico)	<b>SUE</b> (equilibrio stocastico)
	PROCESSO DINAMICO	<b>DDP</b> (processo deterministico)	<b>SDP</b> (processo stocastico)

Tabella 2.1.b Classificazione dei criteri di assegnazione.

Nel paragrafo relativo alle tipologie di modelli si vedrà come il modello di assegnazione viene specificato nei vari casi e quali algoritmi sono stati messi a punto per risolverlo. Nel prossimo capitolo spiegherò quali approcci, tra quelli descritti in questo paragrafo, ho utilizzato per assegnare i flussi di percorso definito, provenienti dalle simulazioni della scelta del percorso che ho eseguito.

### 2.1.2. ERRORI DI MODELLIZZAZIONE

Analogamente a quanto avviene negli altri settori scientifici, la costruzione di un modello per un sistema di trasporto richiede l'esecuzione di quattro operazioni fondamentali:

- specificazione, ovvero scelta della forma funzionale e delle variabili;
- calibrazione, ovvero attribuzione di coefficienti alle variabili indipendenti;
- validazione, ovvero verifica della capacità del modello di riprodurre la realtà;
- raccolta e analisi dei dati necessari allo svolgimento delle operazioni precedenti.

Gli errori che si possono compiere durante la modellazione sono riconducibili a tre categorie principali:

- errori di specificazione;
- errori nella raccolta dei dati;

- errori computazionali in fase di analisi dei dati, calibrazione e validazione.

Vediamo ora quali sono gli errori più significativi per ciascuna delle tre categorie, in base alle esperienze di R. Maja, J. De D. Ortúzar e L. G. Willumsen.

Questa carrellata di informazioni non ha un'applicazione diretta, a differenza delle teorie contenute nel paragrafo precedente; è stata però utile per ampliare la mia conoscenza in ambito modellistico e per gestire le mie applicazioni in maniera più consapevole. Grazie a queste esperienze, ho infatti realizzato quale poteva essere il margine di errore dei dati a mia disposizione e quali effetti possono avere la presenza e la variazione di un parametro sul funzionamento di un modello.

#### **2.1.2.1. ERRORI DI SPECIFICAZIONE**

Gli errori in fase di specificazione possono essere correlati sia alla scelta delle variabili, sia alla scelta della forma funzionale del modello.

Le variabili devono essere indipendenti tra loro e rappresentative dei fenomeni rilevanti per la formazione dei flussi di traffico nei sistemi reali; l'aumento del numero di variabili non è sempre connesso a una maggiore precisione modellistica, ma è certamente connesso a una maggiore complessità computazionale, ragion per cui il numero e il tipo di variabili devono essere scelti attentamente. In molti casi, la scelta è vincolata alla quantità di dati a disposizione per la successiva calibrazione: conviene cioè scegliere una variabile, tra quelle che possono rappresentare un fenomeno, appoggiata a molte osservazioni reali. Gli errori più frequenti durante la scelta delle variabili sono:

- inclusione di una variabile irrilevante;
- omissione di una variabile rilevante;
- numero di variabili inappropriato;
- dipendenza lineare di due o più variabili.

Un errore del primo tipo non influenza il funzionamento del modello, se esso ha forma lineare; questa forma consente infatti di escludere gli effetti della variabile irrilevante tramite la scelta di un parametro nullo. Se invece il modello ha forma non lineare, difficilmente gli effetti possono essere esclusi.

Un errore del secondo tipo è molto comune, in particolare nell'analisi della domanda. Le variabili che entrano a far parte dell'utilità sistematica sono misurabili appoggiandosi sul modello di offerta, per cui difficilmente vengono omesse voci rilevanti; capita invece frequentemente di escludere variabili relative ai gusti personali degli utenti, che non sono misurabili e determinano lo scostamento dell'utilità percepita dall'utilità sistematica. Se la distribuzione dei residui aleatori è rappresentativa del fenomeno reale (come solitamente accade per i modelli di utilità aleatoria citati nel paragrafo precedente), questo tipo di omissione non compromette il funzionamento del modello.

Un errore del terzo tipo è anch'esso piuttosto comune nell'analisi della domanda; la scelta del numero di alternative, infatti, è sempre un compromesso tra la completezza del modello e la facilità di calcolo. Un numero di alternative ridotto genera un modello incompleto; un numero di alternative elevato genera un modello completo solo se le alternative sono appropriate e in ogni caso crea grosse difficoltà computazionali. È quindi buona norma scegliere il numero di alternative minimo per rappresentare il fenomeno reale, valutandole attentamente caso per caso.

Un errore del quarto tipo deve essere evitato assolutamente, perché rende impossibile l'identificazione, ossia la stima indipendente, dei coefficienti delle variabili linearmente dipendenti; di conseguenza, applicando il modello si ottengono valori uguali delle utilità sistematiche e delle probabilità di scelta in corrispondenza di infinite combinazioni dei valori dei coefficienti delle variabili collineari. Anche per questa ragione, quindi, le variabili indipendenti devono essere scelte con molta attenzione e valutate caso per

caso; se esistono più variabili in grado di riprodurre lo stesso fenomeno fisico, occorre selezionare quella che lo rappresenta in maniera più fedele e scartare le altre.

La forma funzionale deve riprodurre correttamente il legame tra le variabili prescelte e la variabile dipendente ed essere il più semplice possibile per le successive elaborazioni; la forma lineare è sempre auspicabile, ma in certi casi non è possibile, poiché ci si trova di fronte ad effetti fortemente non lineari (per esempio, la distribuzione degli spostamenti, che implica un'aggregazione degli spostamenti per ogni origine e per ogni destinazione, per cui una zona di traffico diventa un'alternativa di scelta "composta", risultante dall'aggregazione di alternative elementari). In letteratura si trovano diversi approcci per arrivare a definire la forma funzionale, alcuni basati esclusivamente su trasformazioni statistiche, altri sull'uso congiunto di tecniche statistiche e osservazioni reali; si tratta comunque di un processo piuttosto lungo e da compiere in maniera accurata, perché incide in maniera determinante sulla capacità rappresentativa del modello e sulla complessità dei calcoli da effettuare. Ove possibile, è meglio utilizzare forme funzionali già collaudate e supportate da un buon numero di esperienze, modificando tutt'al più i coefficienti delle variabili esplicative.

#### **2.1.2.2. ERRORI NELLA RACCOLTA DEI DATI**

I dati che vengono raccolti per la formulazione di un modello di simulazione sono di due tipi: misure e stime statistiche.

Le misure (o rilievi) riguardano elementi fisici e organizzativi della rete di trasporto (velocità, tempi, flussi, sistema tariffario ecc.) oppure caratteristiche socio-economiche dell'area di studio (numero di residenti, numero di occupati, numero di studenti, numero di posti di lavoro ecc.). Le misure relative alla rete servono per determinare le componenti della funzione di costo e, di conseguenza, per formulare il modello di offerta

e l'utilità sistematica nelle fasi di ripartizione modale e scelta del percorso; fanno eccezione i conteggi di flussi, che servono per la validazione del modello completo. Le misure relative all'area di studio contribuiscono a formulare l'utilità sistematica nelle fasi di generazione e distribuzione, unitamente alle caratteristiche degli utenti, che si ottengono dalle indagini O/D.

Le stime statistiche riguardano essenzialmente le caratteristiche degli utenti e sono mirate a quantificare le preferenze individuali, che non sono fisicamente misurabili. Esse si basano sull'analisi del comportamento di un campione di utenti, per il quale cercano di identificare il maggior numero di segmenti di domanda possibile: modalità di trasporto utilizzata, percorso seguito, fascia oraria dello spostamento, ricorrenza, frequenza ecc; le osservazioni relative al campione vengono poi estese all'intero universo che caratterizza l'area di studio, tramite tecniche di statistica inferenziale<sup>6</sup>. Le stime statistiche comportano quindi una fase di raccolta dei dati e una fase di analisi dei dati stessi; questo tipo di dati serve per la scelta della distribuzione dei residui aleatori e per la calibrazione del modello di domanda.

Gli errori che possono manifestarsi in fase di raccolta dei dati sono quindi diversi a seconda che i dati siano del primo o del secondo tipo:

- errori di misura;
- errori di campionamento.

Gli errori di misura possono essere dovuti alla disattenzione dei rilevatori, all'inadeguatezza dei sistemi automatici di raccolta dati e agli scarsi controlli sulla qualità dei dati; non esistono grosse difficoltà concettuali nell'organizzazione delle

---

<sup>6</sup> La statistica inferenziale (o induttiva) è una branca che si occupa di stabilire le caratteristiche dei dati relativi a un universo basandosi sui dati relativi a un campione, che rappresenta una percentuale variabile dell'universo. Si tratta di un procedimento concettualmente opposto a quello applicato dalla statistica descrittiva (o deduttiva), che si occupa invece di ordinare e sintetizzare un insieme di dati. Per la simulazione dei sistemi di trasporto, sono necessarie entrambe le tecniche: la prima in fase di raccolta dei dati, la seconda in fase di formulazione del modello di domanda.

misurazioni, ma occorre avere a disposizione una quantità ingente di risorse umane e supporto informatico.

Gli errori di campionamento sono invece più difficili da trattare, perché la progettazione del campionamento implica numerose scelte a carico dell'analista e gli errori possono riguardare una o più di queste scelte. I passi del campionamento più critici sono:

- numerosità del campione da estrarre (tasso di campionamento);
- strategia di campionamento;
- modalità di esecuzione dell'indagine.

Il tasso di campionamento deve consentire di indagare tutti i segmenti di domanda desiderati, per cui deve essere tanto più elevato quanto più è spinta la segmentazione; in caso contrario, il peso di un'unità campionata potrebbe risultare eccessivo in fase di elaborazione statistica e generare quindi una stima distorta.

La strategia di campionamento consiste nel metodo da adottare per l'individuazione degli elementi del campione all'interno dell'universo e deve garantire le condizioni di casualità e significatività; se la strategia non è efficace, alcuni segmenti di domanda potrebbero non essere osservabili. Tra le strategie di validità riconosciuta si citano i campionamenti casuale semplice, casuale stratificato, casuale a grappolo.

Le modalità di esecuzione dell'indagine riguardano la realizzazione operativa delle interviste agli elementi del campione. Le modalità migliori sono quelle che prevedono un contatto diretto tra intervistatore e intervistato (interviste a bordo dei veicoli, al cordone, all'origine, a destinazione); in alternativa è possibile realizzare interviste senza contatto diretto (telefoniche, postali), che sono meno costose ma non danno la garanzia di ottenere le risposte desiderate. La scelta della modalità deve essere pensata caso per caso, perché ognuna delle possibilità citate consente di osservare segmenti di domanda



ben precisi, tralasciandone altri. Nell'ambito di ogni indagine, bisogna poi decidere a priori le domande da porre agli intervistati e la tipologia di risposta desiderata (si/no, scelta di un'opzione tra quelle proposte, ordinamento o ranking delle opzioni, votazione o rating delle opzioni); una pianificazione attenta delle interviste è necessaria per bendisporre l'intervistato e ottenere un atteggiamento collaborativo, ma soprattutto per raccogliere risposte mirate.

### **2.1.2.3. ERRORI COMPUTAZIONALI**

Gli errori computazionali possono avvenire in diverse fasi della modellizzazione:

- analisi statistiche dei dati raccolti;
- calibrazione;
- validazione.

Le analisi statistiche (di tipo inferenziale) consentono di estendere le osservazioni relative a un campione all'intero universo che caratterizza l'area di studio. Durante queste operazioni, bisogna prestare molta attenzione alla scelta dello stimatore campionario, ovvero della funzione che lega le informazioni raccolte con le indagini alle quantità incognite da stimare; lo stimatore deve essere adeguato al tipo di campionamento effettuato, in modo che la varianza dello stimatore sia minima e i valori stimati delle incognite siano vicini ai corrispondenti valori reali. Il concetto di vicinanza è espresso da due valori, detti limiti di confidenza, che delimitano l'intervallo che, con una certa probabilità, contiene il valore effettivo di un'incognita; il valore di ciascun limite dipende dal valore della varianza, in modo tale che a varianza più bassa corrisponde una probabilità più alta di ricadere nell'intervallo, e viceversa.

Per quanto riguarda gli altri calcoli matematici, l'aspetto più delicato è senza dubbio la calibrazione del modello di domanda. La calibrazione è una scrittura del modello in cui

sono noti i valori delle variabili indipendenti, perché definiti in fase di specificazione, e alcuni valori delle variabili dipendenti, perché ottenuti dopo la raccolta e l'analisi di dati relativi a campioni; sono invece incognite da determinare i coefficienti delle variabili indipendenti. Si tratta, nella maggior parte dei casi, di una procedura iterativa per la quale la soluzione (approssimata) esiste ed è unica solo se sussistono particolari condizioni di esistenza e unicità. Si deve quindi prestare molta attenzione, oltre che alla scelta dei dati da utilizzare, anche alla procedura di calcolo da seguire.

La validazione, invece, è un aspetto meno delicato dal punto di vista computazionale; essa richiede lo svolgimento di semplici operazioni di verifica del modello calibrato, per accertarsi che i valori assunti dai parametri soddisfino alcune condizioni e si possano quindi considerare ragionevolmente corretti. Tali verifiche possono essere di tipo informale o qualitativo, per cui costituiscono solo un giudizio di buon senso sui valori dei parametri, oppure di tipo formale o quantitativo, per cui forniscono un giudizio sulla correttezza formale della calibrazione; in ogni caso, non comportano calcoli complicati, ma possono comunque allungare il processo di modellizzazione, se hanno esito negativo e richiedono di specificare e/o calibrare nuovamente il modello.

## **2.2. I MODELLI DI SIMULAZIONE DISPONIBILI**

Dopo aver esposto i criteri fondamentali per la modellizzazione dei sistemi di trasporto, si può entrare nel merito dei modelli di simulazione specifici per le reti TPL.

Come già spiegato in precedenza, la prima grande suddivisione dei modelli avviene in base alle caratteristiche temporali, in particolare alla variabilità del sistema all'interno del periodo di riferimento, che permette di classificarli in:

- modelli statici;

- modelli con dinamica interperiodale;
- modelli con dinamica intraperiodale.

Per ciascuno di questi periodi di riferimento, esistono, in letteratura, delle formulazioni applicabili ai sistemi continui, ai sistemi discreti a bassa frequenza ed ai sistemi discreti ad alta frequenza, come i TPL. Nel seguito si riportano le principali formulazioni (E. Cascetta, D. Gattuso, F. Russo) applicabili ai TPL, una per ciascuna delle tre categorie, con le relative implicazioni computazionali. Come sempre, viene prestata particolare attenzione agli elementi determinanti per la fase di scelta del percorso.

## **2.2.1. MODELLI STATICI**

I modelli statici forniscono una descrizione di uno stato stazionario del sistema di trasporto, che è solitamente rappresentativa delle sue condizioni di funzionamento medie; in altre parole, forniscono la risposta del sistema allo stimolo della domanda in ingresso, senza considerare il funzionamento interno e la storia del sistema.

Le formulazioni seguenti sono coerenti con questo tipo di approccio e con le caratteristiche dei sistemi TPL descritte in precedenza.

### **2.2.1.1. MODELLO DI OFFERTA**

Il modello di offerta è costituito dalla relazione matematica che lega i flussi di percorso (variabile dipendente) ai costi di percorso, definiti da una funzione di costo composta da una serie di variabili indipendenti.

Dato un grafo della rete di base per linee (coerentemente con l'ipotesi di stazionarietà intraperiodale), è possibile definire le seguenti grandezze:

- $f$ , vettore dei flussi di arco;
- $h$ , vettore complessivo dei flussi di percorso, relativi a ciascuna coppia O/D;

- $c$ , vettore dei costi di arco;
- $g^{add}$ , vettore dei costi additivi di percorso relativi a ciascuna coppia O/D;
- $g^{na}$ , vettore dei costi non additivi di percorso relativi a ciascuna coppia O/D;
- $g$ , vettore dei costi totali di percorso relativi a ciascuna coppia O/D;
- $\Delta$ , la matrice di incidenza archi-percorsi, composta da tante righe quanti sono gli archi e tante colonne quanti sono i percorsi, i cui elementi  $ij$  valgono uno se l'arco  $i$  appartiene al percorso  $j$ , zero altrimenti;

Innanzitutto, si può esprimere la relazione che lega flussi di percorso e flussi di arco:

$$f = \Delta \times h$$

A questo punto, è possibile sfruttare la relazione che lega i costi additivi di percorso ai costi di arco:

$$g^{add} = \Delta^T \times c$$

ed ottenere quindi il vettore dei costi totali di percorso:

$$g = g^{add} + g^{na} = \Delta^T \times c + g^{na}$$

Se la rete è in condizioni di congestione, occorre esprimere la dipendenza dei costi di arco dai flussi di arco:

$$g = \Delta^T \times c(f) + g^{na} = \Delta^T \times c(\Delta \times h) + g^{na}$$

Quest'ultima è la relazione finale, che costituisce il modello di offerta per il caso statico. Si tratta di una formulazione generale, alla quale si possono appoggiare sia i modelli di domanda per il trasporto privato, che quelli per il trasporto collettivo.

Mi sembra opportuno rimarcare che non è l'intera rappresentazione dell'offerta a restare uguale nei due casi, ma soltanto la relazione che lega tra costi e flussi; cambiano

invece radicalmente la struttura del grafo di base e le componenti di costo che vengono incluse nel vettore dei costi di percorso. Un grafo per il trasporto privato è essenzialmente una schematizzazione della rete stradale, in cui gli archi sono tratti di strada e i nodi corrispondono a incroci, rotatorie, caselli autostradali ed altri punti di passaggio significativi; le disutilità associate a questo tipo di grafo sono costituite dai tempi di percorrenza, dai costi legati all'utilizzo del veicolo e dagli eventuali costi di accesso a un arco stradale. Un grafo per il trasporto collettivo è invece una schematizzazione del servizio, in cui gli archi sono tratti di linea, i nodi corrispondono alle fermate e ad essi vengono associati uno o più sottografi per rappresentare i nodi interni alle fermate stesse; le disutilità associate a questo secondo tipo di grafo sono quelle elencate nei paragrafi precedenti, ossia tempi di percorrenza, tempi di attesa, tempi di accesso/egresso, tempi di salita/discesa, costo del biglietto eccetera.

#### **2.2.1.2. MODELLO DI DOMANDA**

Il modello di domanda è costituito dalla relazione matematica che consente di associare a un dato sistema delle attività e al modello di offerta il valore medio del flusso di domanda, con le sue caratteristiche rilevanti nel periodo di riferimento preso in esame.

I primi tre stadi del modello (generazione, distribuzione e ripartizione) presentano formulazioni generali, valide sia per il trasporto privato che per il trasporto collettivo, sulle quali non mi sembra opportuno soffermarmi, dato che esulano dalle specificità dei trasporti pubblici locali e comunque sono supportate da un'ampia letteratura in merito.

La fase di scelta del percorso, invece, deve essere formulata in maniera specifica per il caso in esame. Il comportamento di scelta del percorso, che sta alla base della formazione dei flussi di percorso, è infatti molto diverso a seconda che l'utente si trovi nell'ambito del trasporto privato, nell'ambito del trasporto collettivo a bassa frequenza o

del trasporto collettivo ad alta frequenza, per cui occorrono modelli di scelta del percorso diversi, in grado di sovrapporsi a ciascuno dei tre casi. Qui viene riportata una formulazione adatta ai servizi ad alta frequenza, come quelli pubblici urbani.

Dato un sistema di attività socio-economiche, un modello di offerta e un modello di utilità aleatoria, è possibile definire le seguenti grandezze:

- $y$ , vettore dei flussi di ipercammino, relativi a ciascuna coppia O/D;
- $x^{\text{add}}$ , vettore dei costi additivi di ipercammino relativi a ciascuna coppia O/D;
- $x^{\text{na}}$ , vettore dei costi non additivi di ipercammino relativi a ciascuna coppia O/D;
- $x$ , vettore dei costi totali di ipercammino relativi a ciascuna coppia O/D;
- $\Omega$ , la matrice delle probabilità di scelta dei vari percorsi di ciascun ipercammino, composta da tante righe quanti sono i percorsi  $k$  e tante colonne quanti sono gli ipercammini  $h$ , i cui elementi valgono  $q_{kh}$  se il percorso  $k$  appartiene all'ipercammino  $h$ , zero altrimenti;
- $Q$ , la matrice delle probabilità di scelta degli ipercammini, composta da tante righe quanti sono gli ipercammini  $h$  e tante colonne quante sono le coppie O/D, i cui elementi valgono  $q_{hod}$  se l'ipercammino  $h$  collega la coppia  $od$ , zero altrimenti;
- $\Lambda$ , la matrice di probabilità di attraversamento degli archi all'interno di ciascun ipercammino, composta da tante righe quanti sono gli archi  $i$  e tante colonne quanti sono gli ipercammini  $h$ , data dal prodotto di  $\Delta$  e  $\Omega$ ;
- $V$ , utilità sistematica di ipercammino;
- $V_0$ , residuo aleatorio dell'utilità sistematica di ipercammino;
- $U$ , utilità percepita di ipercammino;
- $d$  il vettore dei flussi di domanda, le cui componenti sono i valori di domanda di trasporto per ciascuna zona; si considera moltiplicato per le probabilità prodotte ai precedenti tre stadi del modello, anche se viene omessa la relativa notazione

per comodità; la domanda, a questo punto, è già stata ripartita ed è quindi solo quella relativa al trasporto pubblico.

Innanzitutto, è possibile esprimere i costi di ipercammino in funzione dei costi di percorso:

$$x = x^{add} + x^{na}$$

$$x^{add} = \Omega^T \times g^{add}$$

$$g^{na} \subset x^{na} \quad \text{per cui} \quad g = g^{add}$$

Ricordando che

$$g^{add} = \Delta^T \times c(f)$$

è anche possibile legare i costi di ipercammino ai costi di arco e, attraverso questi, ai flussi di arco, qualora la rete sia in condizioni di congestione.

Dopodiché, è necessario esprimere l'utilità percepita di ipercammino in funzione dei costi di ipercammino:

$$U = V + V_0$$

dove  $V_0$  è stabilito dal modello di utilità aleatoria utilizzato, mentre  $V$  dipende dai costi di ipercammino:

$$V = -x$$

per cui

$$U = -x + V_0$$

A questo punto, è possibile ricavare la matrice  $Q$ , poiché le  $q_{hod}$  dipendono dall'utilità  $V$ :

$$Q = Q(\ ) = Q(-x) = Q(-\Omega^T \times g - x^{na})$$

Si possono inoltre mettere in relazione i flussi di percorso con i flussi di ipercammino:

$$h = \Omega \times y$$

e inserirvi la relazione flussi di arco e flussi di percorso:

$$f = \Delta \times h$$

ottenendo così un legame tra i flussi di arco e i flussi di ipercammino:

$$f = \Delta \times \Omega \times y = \Lambda \times y$$

Queste espressioni consentono di formulare il modello di scelta del percorso, sotto l'ipotesi di comportamento misto preventivo-adattivo, tipico degli utenti dei servizi collettivi urbani. Si osserva che il comportamento completamente preventivo rappresenta un caso particolare della situazione descritta, che corrisponde alla condizione  $\Omega=I$ , da cui  $\Delta=\Lambda$ ,  $y=h$  e  $x=g$ , in quanto non esistono più ipercammini composti ma soltanto ipercammini semplici ,ovvero percorsi diretti.

In base alle espressioni precedenti, il modello di scelta del percorso risulta quindi:

$$y = Q(V) \times d$$

$$f = \Lambda \times Q(-\Omega^T \times g - x^{na}) \times d$$

Gli elementi che concorrono a determinare  $f$  sono tutti noti, ad eccezione di  $\Omega$ . L'espressione delle probabilità  $q_{kh}$  di scelta dei percorsi è il cuore vero e proprio del modello di scelta del percorso; vediamo ora come è possibile ricavarle.

Basandosi sul concetto di ipercammino e sull'ipotesi di comportamento misto preventivo/adattivo, le probabilità di scelta dei percorsi si possono esprimere in funzione



delle probabilità di *diversione*  $n_{lh}$ , ossia delle probabilità di utilizzare l'arco di salita  $l$  in corrispondenza del nodo di diversione da cui si diparte, all'interno dell'ipercammino  $h$ ; questa assunzione discende direttamente dalla definizione di ipercammino, in base alla quale ogni percorso è univocamente definito da una sequenza di archi di salita.

Le  $n_{lh}$  si possono formulare in due modi diversi, a seconda delle ipotesi sul tipo di comportamento adattivo. Se si ritiene valida l'ipotesi di comportamento adattivo indifferente, in base al quale l'utente che si trova in un nodo di diversione sale sul primo mezzo in arrivo, si definiscono le  $n_{lh}$  nel seguente modo:

$$\left\{ \begin{array}{ll} n_{lh} = \varphi_l / \sum_{n \in L_{ih}} \varphi_n & \text{se } l \in h \text{ è arco di salita} \\ n_{lh} = 1 & \text{se } l \in h \text{ non è arco di salita} \\ n_{lh} = 0 & \text{se } l \notin h \end{array} \right.$$

dove  $\varphi_l$  è la frequenza della linea in arrivo e viene rapportata alla frequenza cumulata di tutte le linee che si fermano in quel nodo. Si assegna una probabilità pari a 1 a tutti gli archi non di salita appartenenti all'ipercammino, perché, dopo la scelta del corrispondente arco di salita, essi vengono certamente percorsi; si assegna, altresì, una probabilità pari a 0 a tutti gli archi che non appartengono all'ipercammino analizzato.

Se, invece, si ritiene valida l'ipotesi di comportamento adattivo intelligente, in base al quale l'utente che si trova in un nodo di diversione sale sulla linea che gli garantisce il costo generalizzato minore, si definiscono le  $n_{lh}$  nel seguente modo:

$$\left\{ \begin{array}{ll} n_{lh} = g_l^{-\lambda} / \sum_{n \in L_{ih}} g_n^{-\lambda} & \text{se } l \in h \text{ è arco di salita} \\ n_{lh} = 1 & \text{se } l \in h \text{ non è arco di salita} \\ n_{lh} = 0 & \text{se } l \notin h \end{array} \right.$$

dove  $g_l$  è il costo generalizzato della linea in arrivo e viene rapportato al costo cumulato delle altre linee che si fermano nel nodo, tramite un coefficiente  $\lambda$  che funge da peso. A differenza del caso precedente, le probabilità di diversione non vengono espresse in funzione di un solo attributo (frequenza), ma di più attributi (componenti della funzione di costo). Essendo il grafo di base del tipo per linee, non è possibile, in questo caso, conteggiare attributi di tipo dinamico, ovvero anticipi e ritardi, collegabili alle singole corse e non alle intere linee.

Le due ipotesi forniscono probabilità di diversione differenti; tali differenze saranno ancora più evidenti quando le stesse ipotesi verranno applicate nell'ambito dei modelli con dinamica intraperiodale, dove sarà possibile conteggiare anche gli attributi di tipo dinamico. Come già spiegato, ognuna delle due ha dei contesti reali che è in grado di rappresentare al meglio e dovrebbe essere usata in simulazioni relative a tali contesti.

Una volta calcolate le probabilità di diversione secondo una delle due ipotesi, si possono esprimere le probabilità di scelta dei percorsi  $k$  in funzione delle  $n_{lh}$ , assumendo come indipendenti gli eventi aleatori che inducono i comportamenti adattivi:

$$\begin{cases} q_{kh} = \prod_{l \in k} n_{lh} & \text{se } k \in h \\ q_{kh} = 0 & \text{se } k \notin h \end{cases}$$

Tale probabilità vale ovviamente 1 se il percorso  $k$  coincide con l'ipercammino  $h$ , ovvero se l'ipercammino  $h$  è semplice.

A questo punto, sono stati definiti tutti gli elementi che rientrano nel modello di domanda ed è quindi possibile determinare i flussi  $f$ :

$$f = \Lambda \times Q (-\Omega^T \times g - x^{na}) \times d$$

### 2.2.1.3. MODELLO DI ASSEGNAZIONE

I modelli di assegnazione per il caso statico si possono suddividere in diverse categorie:

- carico stocastico di reti non congestionate (SUN);
- carico deterministico di reti non congestionate (DUN);
- equilibrio stocastico di reti congestionate (SUE);
- equilibrio deterministico di reti congestionate (DUE).

Nel caso SUN, l'interazione domanda-offerta, che consente di ricavare i flussi di arco, viene rappresentata dalla seguente espressione:

$$f_{SUN} = f_{SUN}(c, d) = \Lambda \times d \times Q(-\Omega^T \times \Delta^T \times c - x^{na}) = \Lambda \times d \times Q(-\Lambda^T \times c - x^{na})$$

Nel caso DUN, invece, i flussi di arco vengono determinati con un sistema di disequazioni:

$$\begin{cases} x^T (y - y_{DUN}) \geq 0 \\ c^T (f - f_{DUN}) + x^{naT} (y - y_{DUN}) \geq 0 \end{cases}$$

Entrambe le formulazioni sono composte da equazioni in forma chiusa, coerentemente con la condizione di rete non congestionata, nella quale i costi di arco non dipendono dai flussi di arco e non si verifica quindi una dipendenza circolare costi-flussi-costi.

L'assegnazione a reti congestionate, invece, comporta la risoluzione di equazioni in forma ricorsiva, per effetto della stessa dipendenza circolare. La condizione di equilibrio presuppone che lo stato del sistema sia rappresentato da una configurazione in cui i flussi di arco  $f^*$  sono congruenti con i corrispondenti costi di arco  $c^*$ , la cui esistenza e unicità sono garantite rispettivamente dalla continuità e dalla monotonicità della funzione di costo (verificate per la formulazione della funzione di costo descritta nei paragrafi precedenti).

Nel caso SUE, l'equazione risolutiva viene scritta come segue:

$$f_{SUE}^* = f_{SUN}(c(f^*), d) = \Lambda \times d \times Q(-\Lambda^T \times c(f^*) - x^{na})$$

Nel caso DUE, invece, occorre scrivere un sistema di disequazioni variazionali:

$$\begin{cases} x(y^*)^T (y - y^*) \geq 0 \\ c(f^*)^T (f - f^*) + x^{naT} (y - y^*) \geq 0 \end{cases}$$

Tra gli algoritmi in grado di risolvere i modelli di assegnazione elencati, si ricordano:

- SUN: algoritmo di Dial, algoritmo Monte Carlo;
- DUN: algoritmo di Bellmann;
- SUE: algoritmo delle medie successive;
- DUE: algoritmo di Frank Wolfe.

I modelli riportati in questo paragrafo si intendono per domanda rigida. Volendo estendere una simulazione al caso di domanda elastica, per tenere conto degli effetti della congestione su uno o più sottomodelli di domanda, occorrerebbe inserire nei modelli a reti congestionate un'ulteriore dipendenza circolare tra flussi e costi attraverso la funzione di domanda e quindi un problema di equilibrio domanda/offerta (come illustrato in figura 2.8); per l'esistenza e unicità di questo equilibrio è necessario verificare la continuità e monotonicità della funzione di domanda. I modelli a reti non congestionate, ovviamente, non sarebbero significativi nel caso di domanda elastica.

I modelli riportati in questo paragrafo si intendono per un'unica classe di utenti. Volendo estendere la simulazione al caso multiclasse, occorrerebbe ripetere l'intero procedimento per ciascuna categoria di utenti; ognuna di esse, infatti, potrebbe associare alle componenti di costo pesi diversi, a seconda delle proprie esigenze, col risultato di generare funzioni di costo diverse e quindi valori dei flussi di percorso

diversi. Il processo di assegnazione multiclasse si può diversificare, a seconda che le funzioni di costo di ciascuna classe siano ottenibili attraverso una trasformazione lineare di una funzione di costo comune a tutte le classi (congestione indifferenziata), oppure che le funzioni di costo siano genericamente diverse per ciascuna classe (congestione differenziata).

## **2.2.2. MODELLI CON DINAMICA INTERPERIODALE**

I modelli con dinamica interperiodale considerano una successione di stati di equilibrio, i quali possono cambiare giornalmente in relazione alle differenti scelte degli utenti; questi modelli consentono di tenere conto di fenomeni come l'abitudine e la diffusione di informazioni, e di studiare le proprietà di convergenza verso uno stato di equilibrio, vedendolo come un caso particolare del caso generale di attrattore di punto fisso.

Nei paragrafi seguenti si vedrà come è possibile generalizzare i modelli statici per i sistemi TPL, rimuovendo l'ipotesi di stazionarietà interperiodale.

### **2.2.2.1. MODELLO DI OFFERTA**

Per quanto riguarda l'offerta, non ci sono sostanziali differenze nella formulazione rispetto al caso statico. Occorre soltanto riferire costi e flussi di arco e di percorso al periodo  $t$  (solitamente il giorno) rispetto al quale si analizza il sistema nella sua evoluzione temporale:

$$g^t = \Delta^T \times c^t(\Delta \times h) + g^{nat}$$

È chiaro che flussi e costi relativi a  $t$  possono essere diversi da quelli relativi a  $t-1$  e  $t+1$ .

Questo riferimento temporale all'interno del modello di offerta è necessario per generare delle funzioni costo relative al singolo giorno, che vengono poi utilizzate all'interno del modello di domanda.

### 2.2.2.2. MODELLO DI DOMANDA

Il modello di domanda con dinamica interperiodale richiede l'esplicita modellizzazione di due fenomeni:

- meccanismo di apprendimento e previsione degli utenti, cioè l'influenza dell'esperienza del giorno precedente e dei sistemi di informazione sulla determinazione delle utilità nel giorno presente, includendo il fenomeno della memoria e la diffusione di informazioni (modello di *aggiornamento dei costi*);
- comportamento di adattamento della scelta degli utenti, cioè l'influenza delle scelte effettuate il giorno precedente su quelle del giorno presente, includendo il fenomeno dell'abitudine (modello di *aggiornamento delle scelte*).

Per quanto riguarda il modello di aggiornamento dei costi, occorre esplicitare la dipendenza dell'utilità sistematica di ipercammino  $V^t$  prevista per il giorno  $t$  dai costi di ipercammino  $x^{t-1}$  e dall'utilità  $V^{t-1}$  riferiti al giorno precedente; una possibilità è la definizione di un filtro esponenziale, in cui  $V^t$  è espressa con una combinazione convessa delle componenti di  $V^{t-1}$  e  $-x^{t-1}$ :

$$V^t = -\beta x^{t-1} + (1 - \beta)V^{t-1}$$

dove  $\beta$  è il peso attribuito dagli utenti ai costi che si sono realizzati nel giorno  $t-1$  ed è un valore compreso tra 0 e 1, ritenuto indipendente dal giorno analizzato. Il fattore  $\beta$  dipende, invece, dalla categoria di utenti descritta; i lavoratori pendolari e gli altri utenti di tipo sistematico sono molto influenzati dalle esperienze dei giorni precedenti, perché ne accumulano una grande quantità, per cui è ragionevole associare loro un  $\beta$  minore; al contrario, gli utenti di tipo occasionale subiscono meno gli effetti della memoria e dei sistemi informativi, perché le loro esperienze sono numericamente minori, quindi è ragionevole associare loro un  $\beta$  maggiore, o, addirittura, un  $\beta$  pari a 1, che indica che gli utenti non sono influenzati dai costi dei giorni precedenti.

Il modello di aggiornamento dei costi viene applicato all'utilità sistematica, e non all'utilità percepita, per tre ragioni fondamentali: la prima è che il meccanismo di aggiornamento è indotto da attributi fisicamente misurabili o quantificabili, per cui è ragionevole pensare che influenzino solo le caratteristiche percepite di tipo fisico, contenute, per l'appunto, nell'utilità sistematica; la seconda è che, supponendo di voler aggiornare anche le caratteristiche di tipo aleatorio, sarebbe estremamente difficile correlare i residui aleatori del giorno  $t$  con quelli dei giorni precedenti; la terza è che, supponendo di riuscire a correlare i residui aleatori, bisognerebbe associare il meccanismo di correlazione al singolo utente, poiché avviene in maniera del tutto soggettiva (o disaggregata), ma non sarebbe poi possibile eseguire l'assegnazione, che, invece, è aggregata per classi di utenti. L'applicazione del modello all'utilità percepita è quindi sconsigliabile, perché introdurrebbe grosse complicazioni, senza migliorare significativamente la rappresentazione dei fenomeni reali; l'applicazione all'utilità sistematica è invece piuttosto semplice, rappresentativa e consente di eseguire l'assegnazione, seppure con un procedimento diverso dal caso statico.

Per quanto riguarda il modello di aggiornamento delle scelte, occorre esprimere il vettore  $y$  dei flussi di ipercammino nel giorno  $t$  come prodotto della matrice di scelta condizionata  $R^t$  e del vettore  $y^{t-1}$  dei flussi di ipercammino realizzati nel giorno  $t-1$ :

$$y^t = R^t \times y^{t-1}$$

Gli elementi della matrice di scelta condizionata possono essere definiti mediante un filtro esponenziale, in cui il parametro  $\alpha$  rappresenta la probabilità di riconsiderare la scelta fatta nel giorno precedente da parte di un utente e  $p_k$  la probabilità di scelta condizionata dal fatto di riconsiderare la scelta del giorno precedente:

$$r_{kk}^t = \alpha p_k^t + (1 - \alpha)$$

Analogamente a  $\beta$ ,  $\alpha$  è un valore compreso tra 0 e 1, ritenuto indipendente dal giorno analizzato, ma dipendente dalla categoria di utenti descritta; se  $\alpha=1$ , tutti gli utenti riconsiderano le scelte fatte il giorno precedente (ma non necessariamente decidono poi di cambiarle). Volendo rendere più sofisticato il modello, si potrebbe sostituire il parametro  $\alpha$  con un sottomodello che esprime la probabilità di riconsiderare le scelte in funzione di variabili esplicative inerenti alle attività socio-economiche e ai livelli di servizio (es. differenza tra prestazioni attese e prestazioni verificatesi, efficienza dei sistemi informativi ecc.); si andrebbe però a complicare il processo di assegnazione, come verrà spiegato nel paragrafo successivo.

Entrambi i modelli di aggiornamento sono stati espressi tramite un filtro esponenziale. In letteratura si trovano anche proposte di altro tipo; un'alternativa al filtro esponenziale potrebbe essere un filtro di media mobile, da applicare su  $n$  giorni precedenti al giorno  $t$ . Io ho preferito riportare la soluzione esponenziale perché è più semplice da maneggiare, in fase di calcolo, rispetto alle altre.

Combinando i due modelli di aggiornamento, si ottiene una relazione tra i flussi di ipercammino  $y^t$  nel giorno  $t$  e i costi  $x^{t-1}$  di ipercammino nel giorno  $t-1$ :

$$y^t = \alpha \times d \times p (-\beta x^{t-1} + (1 - \beta)V^{t-1}) + (1 - \alpha) y^{t-1}$$

che sostituisce la corrispondente equazione del caso statico:

$$y = Q(V) \times d$$

Una volta calcolati i flussi di ipercammino, si può scrivere la relazione che li lega ai flussi di percorso:

$$h = \Omega \times y$$

e inserirvi la relazione tra flussi di arco e flussi di percorso:



$$f = \Delta \times h$$

ottenendo così il legame tra flussi di arco e flussi di ipercammino:

$$f = \Delta \times \Omega \times y = \Lambda \times y$$

Utilizzando queste espressioni, si può scrivere l'equazione finale, che identifica il modello di domanda con dinamica interperiodale:

$$f^t = \Lambda \times y^t = \Lambda \times \alpha \times d \times p (-\beta x^{t-1} + (1 - \beta)V^{t-1}) + (1 - \alpha) y^{t-1}$$

dove la matrice  $\Omega$  viene determinata in maniera analoga al caso statico.

Tale modello di domanda consente di rappresentare il comportamento degli utenti in maniera più completa rispetto al caso statico, perché tiene in considerazione l'influenza che l'abitudine, la memoria e la diffusione di informazioni esercitano sulle scelte giornaliere. Questi fenomeni sortiscono effetti tanto più marcati quanto più l'offerta e/o la domanda variano da un giorno all'altro; variazioni del genere si riscontrano molto spesso, ed in maniera significativa, nei sistemi di trasporto privati, mentre sono generalmente più contenute nei sistemi di trasporto collettivi. Di conseguenza, i modelli con dinamica interperiodale hanno il loro campo di applicazione principale nell'ambito dei trasporti privati; sono applicabili anche ai trasporti collettivi, ma non sempre producono risultati sensibilmente diversi dal caso statico, a fronte di una maggiore complessità del modello di domanda e del processo di assegnazione.

### **2.2.2.3. MODELLO DI ASSEGNAZIONE**

L'equazione iterativa che definisce il modello di domanda identifica un modello di processo dinamico. Anche l'interazione domanda/offerta è simulata, quindi, attraverso un modello di processo dinamico, che può essere di due tipi, a seconda che l'utilità percepita sia deterministica o stocastica:

- processo dinamico deterministico (DDP);
- processo dinamico stocastico (SDP).

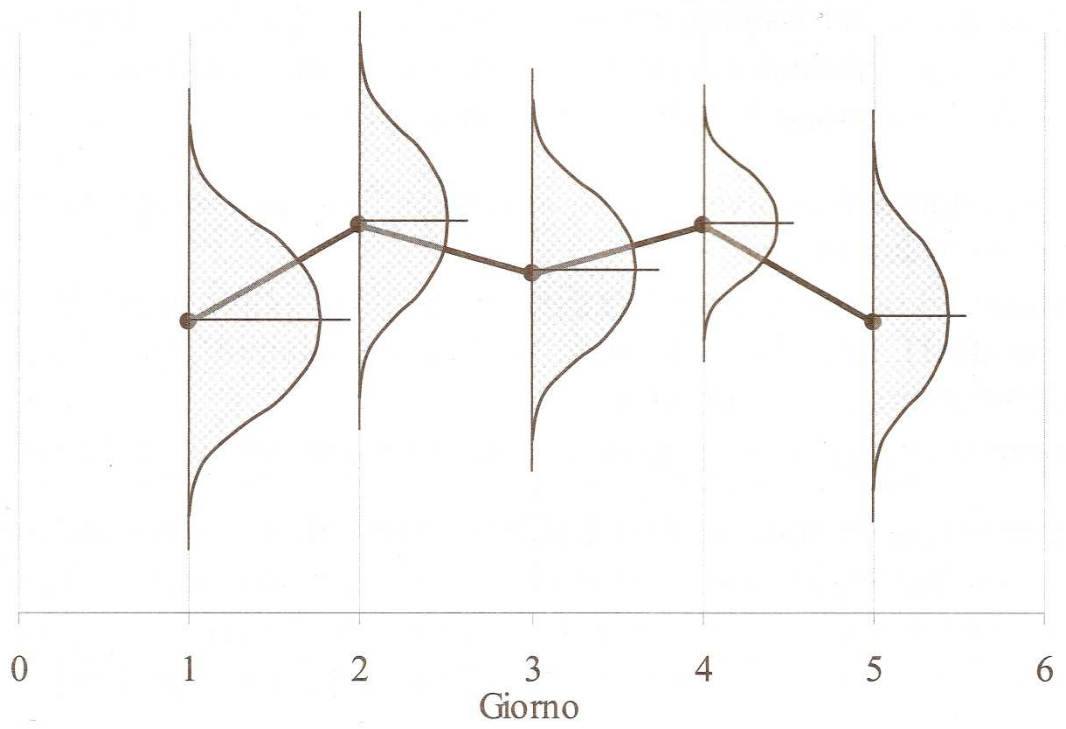
I modelli di processo dinamico considerano una successione di stati ammissibili, in cui le transizioni sono dovute alla mancata congruenza tra flussi di arco e costi di arco. I DDP consentono di studiare le proprietà di convergenza di uno stato di equilibrio, operando un confronto tra l'incertezza sul valore delle variabili e una soglia di approssimazione accettabile; gli SDP, invece, consentono di ottenere una descrizione statistica degli stati del sistema e di simulare esplicitamente le fluttuazioni dei costi di arco e di percorso. Un processo deterministico può anche essere interpretato come un processo delle medie che approssima il valore atteso del corrispondente processo stocastico; questa proprietà si può intuire dalla figura 2.2.1. DDP e SDP presentano implicazioni diverse e devono quindi essere trattati separatamente; nel seguito si riporta una breve descrizione di ciascuno dei due casi.

I DDP possono essere studiati con la teoria dei sistemi dinamici non lineari, in base alla quale l'evoluzione di un sistema è rappresentata da una funzione di transizione, che, nel caso presente, identifica il passaggio tra il giorno  $t-1$  e il giorno  $t$  e si ottiene unendo il modello di domanda e il modello di offerta appena descritti:

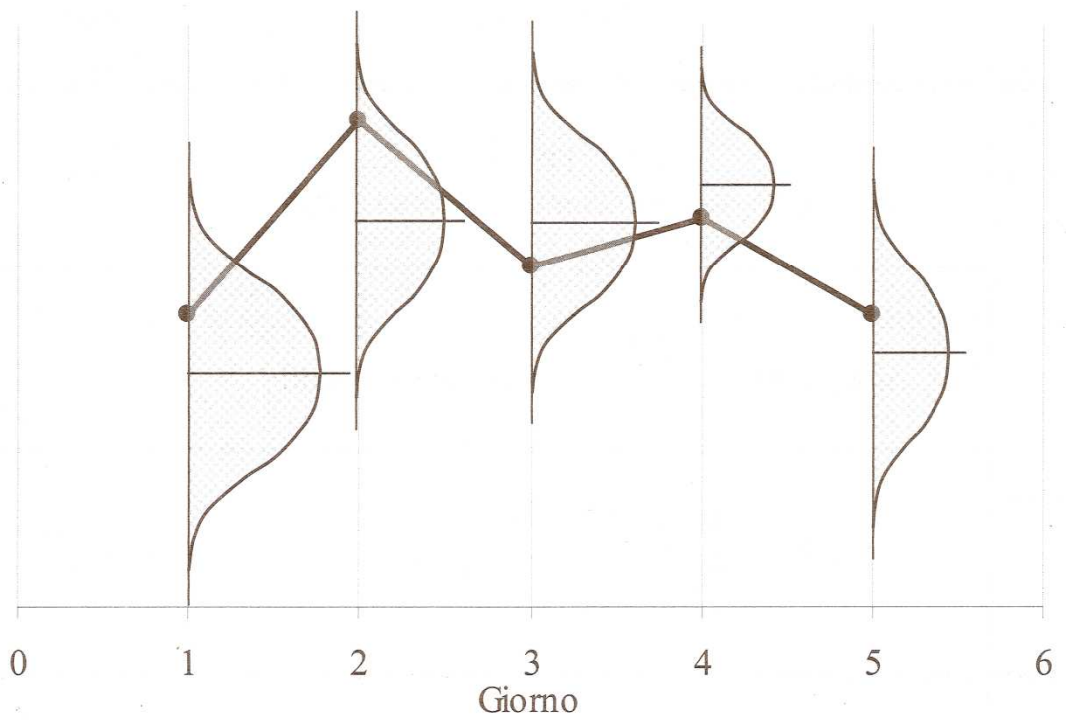
$$(h^t, V^t) = \psi (h^{t-1}, V^{t-1})$$

Gli stati ammissibili a cui la funzione di transizione può portare il sistema sono gli attrattori, che possono essere di diverso tipo:

- di punto fisso, se il sistema occupa sempre lo stesso punto;
- k-periodici, se il sistema occupa periodicamente k punti;
- quasi periodici, se il sistema si muove su una o più superfici toriche in un insieme intero;



Processo deterministico



Processo stocastico

Figura 2.2.1 Rappresentazione schematica dei modelli di processo.

- caotici, se il sistema si muove in un insieme frattale.

È chiaro che, nei primi due casi, il numero di attrattori è finito, mentre, negli altri due casi, il numero di attrattori è infinito.

L'analisi consiste nell'andare a verificare se i punti fissi sono attrattori, e, se non lo sono, verificare se il sistema converge verso altri tipi di attrattori.

Gli stati di punto fisso sono stati nei quali l'evoluzione del sistema si arresta; nel caso presente, sono stati nei quali cessano l'aggiornamento delle scelte e l'aggiornamento delle utilità:

$$y^* = \beta c(x^*) + (1 - \beta)y^* \quad \rightarrow \quad y^* = c(x^*)$$

$$x^* = \alpha f(y^*) + (1 - \alpha)x^* \quad \rightarrow \quad x^* = f(y^*)$$

Si osserva che gli stati di punto fisso coincidono con gli stati di equilibrio stocastico; inoltre, le condizioni di esistenza e unicità non dipendono dai valori dei parametri  $\alpha$  e  $\beta$ , che sono costanti (se  $\alpha$  fosse sostituito da un sottomodulo, le condizioni non sarebbero garantite a priori, bensì sarebbero da verificare).

Per la teoria dei sistemi non lineari, se la funzione di transizione è continua e differenziabile con jacobiano continuo, uno stato di punto fisso è un attrattore se gli autovalori dello jacobiano sono in modulo minori di 1. Attraverso un'analisi più complessa, sempre afferente alla teoria dei sistemi non lineari (che qui viene omessa), è anche possibile studiare la stabilità degli stati di punto fisso e le eventuali instabilità (biforcazioni) verso altri tipi di attrattori.

Gli SDP derivano dall'ipotesi che i flussi di percorso e le utilità al giorno  $t$  siano realizzazioni di vettori aleatori. Dato uno stato iniziale  $(h^0, V^0)$ , un modello di questo tipo consente la determinazione, per ogni giorno successivo  $t$ , della probabilità che il

sistema sia in un particolare stato  $(h^1, V^1)$ ; la funzione di probabilità  $\varphi^t(h, V)$  è definita ricorsivamente condizionata dallo stato  $(h^{t-1}, V^{t-1})$  del giorno precedente t-1:

$$\varphi^t(h, V) = \Pr(h^t = h, V^t = V | h^{t-1}, V^{t-1})$$

L'analisi consiste nel verificare le proprietà di ergodicità e regolarità del processo e, se sono verificate, determinare la probabilità di un certo stato. L'ergodicità (o stazionarietà) di un processo stocastico è verificata se il sistema ammette una distribuzione di probabilità stazionaria; la regolarità è verificata se la distribuzione di probabilità del processo converge alla distribuzione stazionaria, qualunque sia lo stato iniziale del sistema. In sostanza, queste due proprietà corrispondono all'esistenza, unicità e stabilità di uno stato di punto fisso.

Non ritengo opportuno approfondire ulteriormente la teoria dei modelli di processo, in quanto non saranno oggetto di applicazioni da parte mia; per maggiori dettagli, si rimanda alla letteratura specifica in merito.

### **2.2.3. MODELLI CON DINAMICA INTRAPERIODALE**

I modelli con dinamica intraperiodale permettono di studiare le dinamiche dei sistemi di trasporto interne all'intervallo temporale di riferimento; essi hanno il vantaggio di considerare esplicitamente gli effetti della congestione, oltre che tutte le strategie di controllo e informazione dell'utenza attuate in tempo reale, che interessano sempre più frequentemente i sistemi TPL.

Usando tali modelli, è possibile valutare gli ipercammini relativamente alle singole corse, non più alle intere linee. Il comportamento adattivo di scelta del percorso può quindi essere specificato in base agli attributi che riguardano le singole corse, quali orari programmati di servizio, ritardi, informazioni disponibili; in questo modo, tale

comportamento non è più costante nell'intervallo e dipendente dalla sola configurazione delle linee, ma può variare in base alle caratteristiche temporali delle singole corse e offrire quindi una rappresentazione più vicina al comportamento reale degli utenti.

Il passaggio dai modelli statici ai modelli con dinamica intraperiodale non è immediato; occorre infatti introdurre la dimensione temporale in tutte le parti dei modelli, attraverso una variabile temporale discreta che suddivide l'intervallo di riferimento in un certo numero di sottointervalli e consente di analizzarli. La scelta di una variabile temporale discreta è coerente con la natura dei servizi di trasporto collettivi, che sono, per l'appunto, discontinui nel tempo e perciò non verrebbero correttamente rappresentati da variabili continue.

Nei paragrafi seguenti si vedrà come è possibile riformulare le varie parti del modello rimuovendo l'ipotesi di stazionarietà intraperiodale; si fa riferimento alla poca letteratura (E. Cascetta, A. Nuzzolo) che tratta questi aspetti, oggetto di ricerca da pochissimi anni.

#### **2.2.3.1. MODELLO DI OFFERTA**

Il grafo da utilizzare, in questo caso, è del tipo per corse (coerentemente con l'ipotesi di variabilità intraperiodale). I nodi del grafo per linee devono quindi essere modificati, con l'aggiunta di un asse temporale sul quale è possibile riportare le coordinate temporali che individuano gli orari di partenza e di arrivo delle singole corse (vedi figura 2.6b).

La funzione di costo deve quindi essere ridefinita in base a questo nuovo grafo, e deve tenere conto, nei costi di percorso, anche delle voci che possono riguardare una singola corsa, ovvero gli eventuali tempi di anticipo e di ritardo rispetto all'orario desiderato di partenza o di arrivo. Esso viene assunto, in prima approssimazione, uguale all'orario di partenza o di arrivo di una corsa; in questo modo, è possibile riferire anticipi e ritardi all'orario programmato.

Si può rappresentare il servizio programmato con un vettore di variabili aleatorie  $b$ , i cui elementi sono l'orario di arrivo  $b_{a,rs}$  e l'orario di partenza  $b_{p,rs}$  di ciascuna corsa  $r$  a ciascuna fermata  $s$ , contenuti nel relativo grafo  $G$ ; il vettore  $b^t$  rappresenta invece il servizio esercito, ovvero una possibile realizzazione di  $b$ , con il corrispondente grafo  $G^t$  e la corrispondente matrice di incidenza archi percorsi  $\Delta^t$ .

Il vettore  $b$  è legato a un altro vettore,  $w$ , le cui componenti sono il tempo di percorrenza  $w_{rl}$  di ciascuna corsa  $r$  su ciascun arco di corsa  $l$  e il tempo di sosta  $w_{rs}$  di ciascuna corsa  $r$  in ciascuna fermata  $s$ ; poiché il servizio è irregolare, anche  $w$  può essere espresso con un vettore di variabili aleatorie. Le componenti dei vettori  $b$  e  $w$  sono legate tra loro attraverso le seguenti equazioni ricorsive:

$$\begin{cases} b_{a,rs} = b_{p,r(s-1)} + w_{rl} \\ b_{p,rs} = b_{a,rs} + w_{r,s} \end{cases}$$

Così, da un dato vettore  $w^t$ , per esempio da osservazioni empiriche, è possibile generare un vettore  $b^t$ , da esso il corrispondente grafo  $G^t$ , la matrice  $\Delta^t$  e calcolare le componenti di anticipo/ritardo. A questo punto, basta aggiungere le componenti di anticipo/ritardo alle componenti di costo "tradizionali" e si ottiene la nuova funzione di costo; inserendola nell'equazione del modello di offerta per il caso statico, si ricava il modello di offerta con dinamica intraperiodale.

Questa rappresentazione consente di tenere conto, anche se implicitamente, di alcuni fenomeni:

- propagazione dei ritardi tra sezioni successive della stessa linea: la covarianza  $\text{cov}(w_{r,l-1}, w_{rl})$  è in questo caso positiva;
- persistenza di fattori di perturbazione su una data sezione di linea: la covarianza  $\text{cov}(w_{rl}, w_{r+1,l})$  è in questo caso positiva;

- riduzione del tempo di sosta a una fermata, dovuto a un tempo di sosta più lungo della corsa precedente: la covarianza  $cov(w_{r-1,s}, w_{rs})$  è in questo caso negativa.

### 2.2.3.2. MODELLO DI DOMANDA

Nel caso statico, il comportamento di scelta preventivo-adattivo del percorso consisteva in una scelta preventiva della fermata di accesso, e in una scelta adattiva della linea alla fermata. In questo caso, la scelta preventiva deve necessariamente includere anche la scelta della corsa, oltre che della fermata.

Riferendosi alla figura 2.6b, si può infatti osservare come un utente che voglia spostarsi da un'origine  $O$  con ODP verso una destinazione  $D$  abbia a disposizione almeno due percorsi, che sfruttano due corse differenti, a partire dalla stessa fermata: il primo, che parte dall'origine all'orario  $n_o^r$  con la corsa  $r$ , che ha una disutilità di ritardo, data dalla differenza tra  $n_o^{odp}$  e  $n_o^r$ ; il secondo, che parte all'orario  $n_o^{r-1}$  con la corsa  $r-1$ , che ha una disutilità di anticipo, data dalla differenza tra  $n_o^{odp}$  e  $n_o^{r-1}$ . Questa situazione implica la necessità di una scelta preventiva della corsa, oltre che della fermata, in base alle informazioni disponibili sull'orario programmato e all'eventuale presenza di un sistema informativo in tempo reale alla fermata.

Se alla fermata non è disponibile un servizio di informazione in tempo reale, si può assumere che l'utente scelga la specifica corsa basandosi sulle informazioni preventive e, una volta giunto alla fermata, si comporti in maniera indifferente; il comportamento di scelta del percorso di può rappresentare, come nel caso statico, in base alla frequenza dei servizi. Non ha molto senso, in queste condizioni, applicare un modello di tipo dinamico, perché esso viene ricondotto al caso statico. Se invece alla fermata è disponibile un servizio di informazione in tempo reale, come accade sempre più frequentemente nelle grandi città, si può assumere che l'utente scelga un fascio di corse all'interno di certo sottointervallo temporale, e una volta giunto alla fermata si



comporti in maniera intelligente; chiaramente, le corse che fanno parte dell'insieme di scelta devono soddisfare alcuni requisiti di fattibilità, quali:

- il profilo dell'offerta deve essere simile a quello della domanda, ovvero devono esserci più corse nelle fasce orarie di punta rispetto alle fasce di morbida;
- le corse non devono essere dominate, cioè non ci devono essere corse che partono prima e arrivano dopo rispetto alle altre corse dell'insieme di scelta;
- le corse devono soddisfare le esigenze dell'utente in termini di disutilità massime accettate (numero massimo di trasbordi, tempo massimo di viaggio ecc.).

L'insieme di scelta dell'utente, prima che egli arrivi alla fermata, dipende esclusivamente da ODP, per cui una corsa ha tante più probabilità di appartenere all'insieme di scelta quanto più è vicina a ODP. Quando l'utente arriva alla fermata, l'insieme comincia a dipendere anche dalla configurazione del servizio  $b^t$ , in quanto differenti corse, rispetto a quella prevista, possono essere effettivamente accessibili all'utente nell'orario di arrivo; siccome  $b^t$  può variare a causa dell'irregolarità del servizio, anche l'insieme di scelta può modificarsi mentre l'utente aspetta alla fermata.

Per simulare il comportamento di scelta della corsa all'interno di questo insieme, occorre quindi un meccanismo sequenziale che consenta di aggiornare l'insieme di scelta, ossia di modificare l'utilità percepita che l'utente associa alle alternative in base agli eventi che si susseguono nel tempo. Questo diventa possibile inserendo, all'interno della funzione che definisce l'utilità sistematica, una serie di attributi di tipo dinamico, da specificare in base alle singole corse:

- comfort di salita, funzione del grado di affollamento a bordo all'arrivo della corsa;
- comfort durante il viaggio, funzione del grado di affollamento a bordo alla partenza della corsa;

- tempo di attesa, dato, per la prima corsa, dalla differenza tra l'orario di arrivo effettivo e l'orario programmato, mentre, per le successive, dalla differenza tra l'orario di arrivo di una corsa e l'orario di arrivo della corsa precedente (fornito dal sistema di informazione all'utenza; ingloba, al suo interno, le componenti di anticipo/ritardo e il grado di affollamento, che potrebbe impedire all'utente di utilizzare una corsa, obbligandolo ad aspettare la successiva);
- tempo già speso alla fermata, dato dall'accumulo dei tempi di attesa, eventualmente moltiplicato per un fattore  $<1$  che tiene conto dell'"effetto impazienza" sviluppato dall'utente durante l'attesa.

Questi attributi, relativi alla singola corsa, si aggiungono alle voci di disutilità rappresentative della linea, già viste per i grafi sincronici, ad eccezione del tempo di attesa, va a sostituire la voce corrispondente (nel paragrafo relativo alla definizione delle componenti di costo, sono state messe in evidenza le due possibili formulazioni del tempo di attesa, rispettivamente per un grafo per linee e per un grafo per corse). La funzione di utilità così ottenuta rappresenta l'utilità di una singola corsa.

Utilizzando tutti questi accorgimenti, è possibile esprimere il flusso medio di percorso nel seguente modo, per ciascuna coppia O/D:

$$h_k = d_{od}(t_0) * p_{od}[r, s|t_0] * p_{od}[s|t_0]$$

dove  $p_{od}[r, s|t_0]$  è la probabilità che una coppia O/D scelga il percorso k, che include la corsa r, a partire dalla fermata di salita s, in riferimento all'orario di partenza  $t_0$ , mentre  $p_{od}[s|t_0]$  è la probabilità che scelga la fermata s, sempre in riferimento a  $t_0$ .

La prima si può ricavare dal prodotto della probabilità condizionale di scegliere una corsa  $r^+$ , in funzione della sua utilità  $V_r^+$ , al tempo  $t^+$ , per la probabilità condizionata di non aver scelto una delle corse precedenti  $r^-$ , all'interno dell'insieme di scelta:

$$p_{od}[r, s|t_0] = (1 - p_{od}[r^-, s, t^-]) * p_{od}[r^+|s, t^+]$$

dove

$$p_{od}[r^+|s, t^+] = e^{V_{r^+}} / \sum_{r \in K_s} e^{V_r}$$

è l'espressione della probabilità condizionale; la probabilità condizionata si può ricavare sostituendo un'espressione analoga a  $p[r]$ .

La seconda si può esprimere in funzione dell'utilità associata alla fermata,  $V_s$ :

$$p_{od}[s|t_0] = e^{V_{s|t_0}} / \sum_{s' \in S_{od}} e^{V_{s'|t_0}}$$

In prima approssimazione,  $V_s$  può essere composta dal solo attributo distanza dalla zona origine, più un eventuale residuo aleatorio che tiene conto delle preferenze individuali (es. alternative modali presenti alla fermata, gradevolezza del percorso a piedi, ecc.); questa ipotesi è senz'altro valida per tutti gli utenti quando la rete è in condizioni non congestionate. In condizioni di congestione, invece, bisognerebbe differenziare il comportamento degli utenti occasionali da quello degli utenti sistematici: i primi, infatti, non sono influenzati dall'esperienza e dall'abitudine nella scelta della fermata, mentre i secondi lo sono. In realtà, si riscontra molto spesso che l'influenza dell'abitudine è molto più rilevante rispetto a quella dell'esperienza, perlomeno nella scelta della fermata, per cui anche l'utente sistematico tende a riportarsi sempre sulla fermata a minor distanza dall'origine. Per quanto riguarda  $V_r$ , invece, i meccanismi di apprendimento incidono sulla percezione del tempo di attesa, del tempo già speso alla fermata e del tempo globale di viaggio. Se le variazioni di  $V_r$  sono molto significative, l'utente sistematico può arrivare a modificare le proprie scelte nei giorni successivi; questa eventualità può essere tenuta in conto utilizzando un modello doppiamente dinamico.

È chiaro che, con questo meccanismo, l'utente può compiere la sua scelta adattiva soltanto alla partenza della corsa dalla fermata, poiché solo a quel punto sono note tutte le disutilità, inclusi gli attributi di comfort. Se l'utilità sistematica della corsa non è maggiore rispetto a tutte quelle che devono ancora arrivare, l'utente rimane alla fermata e ripete lo stesso ragionamento per le corse successive: questo è il motivo per cui il meccanismo deve essere sequenziale.

Una volta espresse le singole componenti del vettore dei flussi di percorso, si può ricavare il vettore dei flussi di arco con la solita relazione:

$$f = \Delta \times h$$

$$f = \Delta * d(t_0) * p[r, s|t_0] * p[s|t_0]$$

ed ottenere così la formulazione del modello di domanda con dinamica intraperiodale.

Questa rappresentazione dà la possibilità di tenere in conto tutte le disutilità che l'utente può effettivamente riscontrare nella realtà, dovute a eventi di natura dinamica, che non si possono includere nei modelli visti in precedenza. Si osserva che, in questo caso, gli aspetti dinamici non vengono introdotti modificando un modello di natura statica con un modello di aggiornamento, ma inserendo dei parametri che sono già di tipo dinamico e che, in corrispondenza di ogni evento, subiscono un processo di rinnovamento; questo accorgimento rende il modello di domanda sensibile anche alle piccole variazioni di offerta e/o domanda che interessano, generalmente, i sistemi di trasporto collettivo.

### **2.2.3.3. MODELLO DI ASSEGNAZIONE**

L'interazione d/o si ricava, analogamente al caso statico, inserendo il modello di offerta all'interno del modello di domanda. L'assegnazione può avvenire a reti congestionate oppure non congestionate, ma, per coerenza, dovrebbe essere di tipo stocastico, dal momento che i vettori  $b$  e  $y$  sono aleatori.

Data la natura dinamica del modello, si potrebbe pensare ad una assegnazione di processo: in realtà non è la strategia adatta, perché non ci si trova nella condizione di dover aggiornare progressivamente il modello, ma soltanto i valori di alcuni suoi parametri. È opportuno, invece, ricorrere ad un'assegnazione "tutto o niente" nel caso di reti non congestionate, oppure di equilibrio nel caso di reti congestionate; intuitivamente, il secondo caso sarà quello più frequente, poiché non vale la pena di applicare un modello così complesso se non per studiare gli effetti della congestione.

#### **2.2.4. MODELLI DOPPIAMENTE DINAMICI**

I modelli doppiamente dinamici consistono nell'unione di due modelli dinamici: uno di tipo intraperiodale, che viene utilizzato come formulazione principale, e uno di tipo interperiodale, che viene inserito all'interno del precedente per aggiornarne le utilità.

In questo modo, è possibile sfruttare i vantaggi di entrambi i modelli: studiare le dinamiche interne all'intervallo temporale di riferimento, considerare esplicitamente la propagazione dei ritardi, oltre che tutte le strategie di controllo e informazione dell'utenza attuate in tempo reale, valutare gli effetti dell'abitudine e dei processi di apprendimento delle informazioni. Il comportamento adattivo di scelta del percorso può essere specificato in base agli attributi delle singole corse nel periodo di riferimento ed essere aggiornato nei periodi simili a quello: è quindi possibile osservare sia le variazioni giornaliere, che le variazioni interne al periodo di riferimento.

Si tratta dei modelli più completi che ho trovato in letteratura; consentono, infatti, di tenere conto di quasi tutti fenomeni che possono influenzare il comportamento di scelta dell'utente. D'altro canto, però, risultano molto dispendiosi in termini di tempi di calcolo, raccolta dei dati di input e costruzione dei sottomodelli; le problematiche viste separatamente per ciascun modello dinamico vengono in questo caso sovrapposte e possono diventare decisamente onerose, se si devono analizzare reti complesse.

## 2.2.5. ESPERIENZE E CONSIDERAZIONI

Come ho già accennato in precedenza, i modelli statici sono stati formulati a partire dagli anni '50, per cui dispongono oggi di formulazioni matematiche complete e ampiamente utilizzate e di una notevole quantità di letteratura a riguardo. I modelli con dinamica interperiodale, studiati a partire dalla metà degli anni '80, dispongono anch'essi di una discreta quantità di letteratura che li tratta. I modelli con dinamica intraperiodale e doppiamente dinamici, invece, sono oggetto di studio da pochi anni, per cui le esperienze a riguardo sono poche e prevalentemente nell'ambito del trasporto privato.

Di seguito riporto una carrellata dei principali studiosi che, con le loro esperienze, hanno approfondito i vari aspetti dei modelli trattati nei paragrafi precedenti:

- modelli statici di scelta del percorso per sistemi continui:
  - Wardrop (1952);
  - Daganzo, Sheffi (1977);
  - Powell, Sheffi (1981);
  - Ben Akiva (1984);
  - Cantarella, Cascetta (1994).
  
- modelli statici di scelta del percorso per sistemi ad alta frequenza:
  - Dial (1967);
  - Le Clercq (1975);
  - Chriqui, Robillard (1975);
  - Spiess (1984);
  - Cascetta, Nuzzolo (1986);
  - Nguyen, Pallottino (1988);
  - Wu, Florian (1993).

- modelli dinamici di scelta del percorso per sistemi continui:
  - Smith (1984);
  - Ben Akiva (1985);
  - Cantarella, Cascetta (1995);
  - Wu (1995);
  - Russo (2000).
  
- modelli dinamici di scelta del percorso per sistemi a bassa frequenza:
  - Small (1982);
  - Cascetta, Nuzzolo (1986);
  - Hickman, Wilson (1995);
  - Nuzzolo, Russo (1998);
  - Russo (2000).
  - Nuzzolo (2003).
  
- modelli dinamici di scelta del percorso per sistemi ad alta frequenza:
  - Hickman, Wilson (1995);
  - Nuzzolo, Russo (1996);
  - Cascetta, Papola (2000);
  - Nielsen (2004).
  - Cascetta (2006).

Infine, alcuni degli autori citati ritengono che i modelli dinamici abbiano ancora ampi margini di miglioramento e rappresentino, attualmente, la frontiera della ricerca nel campo della pianificazione dei trasporti; cito una frase significativa del prof. Cascetta in merito: “..i modelli di assegnazione dinamica per i sistemi di trasporto ad orario sono i più recenti e significativamente meno studiati rispetto ai modelli di assegnazione dinamica per sistemi continui (trasporto individuale). I modelli descritti sono, pertanto,

meno consolidati rispetto al caso continuo e rappresentano la frontiera della ricerca in questo campo.”<sup>7</sup>

Ritengo che, in particolare, i modelli con dinamica intraperiodale abbiano un potenziale di sviluppo notevole nell’ambito dei trasporti collettivi urbani, interessati frequentemente dal fenomeno della congestione e altri aspetti che questi modelli sono in grado di tenere in considerazione.

---

<sup>7</sup> Da “Modelli per i sistemi di trasporto”, di E. Cascetta, 2006.



# **3. APPLICAZIONE DI MODELLI DI SCELTA DEL PERCORSO ALLA RETE TPL MILANESE**

---

Nel capitolo precedente ho approfondito la teoria dei modelli di simulazione per i servizi di trasporto collettivo urbano; ho cercato di delineare le fasi fondamentali della rappresentazione modellistica, selezionare gli elementi reali che devono essere rappresentati ed evidenziare gli errori di modellizzazione più frequenti. Nel corso di questo approfondimento, mi sono concentrata in maniera particolare sugli aspetti che influenzano la fase di scelta del percorso; ho riscontrato che questi aspetti devono essere trattati in maniera specifica per i trasporti pubblici locali, che sono contraddistinti da reti molto articolate e presentano caratteristiche del tutto particolari nell'ambito dei sistemi di trasporto. La caratteristica più importante e più complessa da modellare è senza dubbio il tipo di comportamento a cui è indotta l'utenza di queste reti, ovvero un comportamento di tipo misto preventivo/adattivo, che differisce in maniera sostanziale dal comportamento di tipo preventivo, associabile alla quasi totalità delle altre reti. Le quattro tipologie di modelli che ho riportato nei paragrafi finali del capitolo si differenziano, per l'appunto, nel modo di rappresentare questo comportamento e nel periodo temporale che prendono come riferimento.

Ho inoltre riscontrato che i modelli statici sono ampiamente trattati in letteratura e sono supportati da moltissime esperienze a riguardo, accumulate nel corso degli ultimi decenni. I modelli dinamici, invece, sono stati formulati più recentemente e messi a punto nell'ambito del trasporto individuale; sono state condotte relativamente poche analisi sulla sensibilità al trasporto collettivo, per cui i modelli dinamici per i servizi ad orario rappresentano, attualmente, la frontiera della ricerca in questo campo. Ritengo che, in particolare, i modelli con dinamica intraperiodale abbiano un potenziale di sviluppo notevole, soprattutto nell'ambito dei trasporti collettivi urbani.

Una volta conclusa la ricerca bibliografica, ho quindi cercato di applicare i concetti appresi, effettuando una serie di simulazioni di scelta del percorso sulla rete di trasporto collettivo della città di Milano. Ho selezionato un periodo di riferimento in cui la rete è in condizioni di congestione e ho messo a confronto i risultati ottenuti a partire da un approccio di tipo statico e quelli ottenuti da approccio di tipo dinamico within-day, con lo scopo di dimostrare le maggiori capacità del secondo di riprodurre il comportamento reale dell'utenza in questo periodo di riferimento.

## **3.1. IMPOSTAZIONE DI UNA SIMULAZIONE**

In questo paragrafo intendo spiegare il procedimento che ho seguito per impostare le simulazioni e le principali difficoltà che ha comportato ciascuna fase del lavoro. I risultati ottenuti verranno esposti alla fine, in un paragrafo apposito, e messi a confronto.

### **3.1.1. PIANIFICAZIONE DEL LAVORO**

L'obiettivo che mi sono posta all'inizio di questo lavoro è stato quello di valutare e confrontare i flussi di arco prodotti da tre tipi modelli di scelta del percorso:

- statico;

- a dinamica intraperiodale senza ritardi;
- a dinamica intraperiodale con ritardi.

I modelli sono stati applicati alla rete TPL della città di Milano, sulla quale ho avuto la possibilità di recuperare agevolmente dati ed effettuare sopralluoghi in prima persona. Il periodo temporale di riferimento è la fascia 8-9 del mattino, durante la quale la rete è in condizioni di congestione.

Inizialmente, mi sono impegnata a raccogliere i dati necessari per effettuare le simulazioni e verificare i risultati, ossia:

- il grafo della rete di trasporto collettivo programmato di Milano, con tutte le linee operanti nella fascia oraria 8-9;
- la matrice O/D contenente la domanda di trasporto pubblico nella fascia 8-9;
- l'orario programmato dei servizi TPL nella fascia 8-9;
- rilievi dei flussi e dei ritardi nella fascia 8-9.

Avendo già a disposizione una matrice specifica per il trasporto pubblico, non è stato necessario studiare le fasi di generazione, distribuzione e ripartizione modale; l'intero lavoro è stato incentrato sull'analisi del comportamento di scelta del percorso e sulla successiva assegnazione.

Per tutte le simulazioni è stato utilizzato il pacchetto di simulazione CUBE versione 5.1.1., sviluppato dalla CITILABS e distribuito in Italia dalle società Siplan e Systematica. CUBE è composto da una serie di moduli per le esigenze specifiche di pianificazione; nel mio caso, sono stati utili due moduli in particolare:

- CUBE BASE, editor grafico delle reti di trasporto, in grado di interfacciarsi con i GIS;

- CUBE VOYAGER, software in grado di modellizzare e simulare reti di traffico privato, sistemi di trasporto collettivo, movimenti di pedoni e biciclette.

Ho quindi effettuato numerose prove con CUBE, cercando di descrivere, attraverso parametri opportuni, il sistema di trasporto pubblico milanese e le caratteristiche degli utenti della rete, per poi assegnare la matrice e ottenere flussi di arco il più possibile simili a quelli reali. I passi essenziali del lavoro sono stati i seguenti:

- studio della struttura logica del programma CUBE, per comprendere dove e come devono essere inseriti i parametri di input e quali elementi vengono riportati nei files di output;
- preparazione della rete (grafo), durante la quale si effettua la caratterizzazione completa della rete di trasporto: vengono generati gli archi pedonali di accesso/egresso e di trasferimento e calcolati i tempi di percorrenza di tutti gli archi, sia di linea che pedonali;
- costruzione e enumerazione dei multipercorsi (ipercammini), che fornisce l'elenco dei percorsi ragionevoli da ciascuna origine a ciascuna destinazione; questa fase e la successiva presuppongono la caratterizzazione del comportamento di scelta degli utenti;
- valutazione dei percorsi enumerati, che determina quali di questi saranno utilizzati per effettuare gli spostamenti e con quale probabilità;
- assegnazione della matrice O/D, che consente di ottenere i flussi di arco sull'intera rete e una serie di matrici intermedie (matrici di skim), dove vengono riportati i vari costi e tempi di percorrenza per ciascuna coppia O/D;
- confronto dei flussi di arco ottenuti con i flussi rilevati a disposizione;
- considerazioni sul processo di simulazione eseguito, analisi della significatività e sensibilità dei parametri utilizzati.

La messa a punto dei modelli di simulazione ha richiesto alcuni mesi di lavoro; i passi sono stati ripetuti, intervenendo di volta in volta su un singolo punto e osservando gli effetti prodotti sui risultati, fintanto che i modelli non sono stati in grado di rappresentare con sufficiente accuratezza i flussi reali. Da un punto di vista teorico, sono stati utilizzati i concetti relativi all'approccio statico e all'approccio con dinamica intraperiodale, descritti nel capitolo precedente.

### **3.1.2. DATI DISPONIBILI**

Il grafo della rete di trasporto collettivo nella fascia 8-9 è stato recuperato da un lavoro di tesi precedente<sup>8</sup>, unitamente al grafo della rete stradale e della rete ferroviaria di appoggio.

Il grafo della rete collettiva rappresenta i servizi eserciti sul territorio del comune di Milano e sui comuni dell'area urbana milanese. Il grafo stradale, invece, è composto da circa 33000 archi stradali, caratterizzati dai seguenti attributi:

- numero identificativo univoco;
- nodo di inizio, con coordinate geografiche;
- nodo di fine, con coordinate geografiche;
- giurisdizione;
- tipo;
- lunghezza;
- velocità di deflusso, con relativa curva di deflusso;
- capacità;
- direzionalità.

---

<sup>8</sup> "La gestione del trasporto collettivo in condizioni di emergenza", di Paola Travanini, anno 2009.

Il grafo della rete ferroviaria, infine, è composto da poche centinaia di archi, caratterizzati da attributi analoghi a quelli appena elencati.

Le curve di deflusso sono tutte di tipo BPR ed hanno quindi la seguente espressione:

$$V = \frac{V_0}{1 + \alpha(F/C)^\beta}$$

I parametri alfa e beta sono specificati per ciascun arco, a seconda della tipologia (autostrada, strada di scorrimento, strada di quartiere ecc.) e delle sue caratteristiche principali (numero di corsie, presenza di intersezioni semaforizzate, rotatorie ecc.).

Il file è stato interamente aggiornato all'interno di CUBE BASE, per ricondurre la rete alla situazione reale attuale (novembre 2010) in termini di percorsi, fermate, caratteristiche dei mezzi e frequenze, risultando infine composto da:

- 20 linee tranviarie, con velocità commerciale tra 12 e 15 km/h;
- 51 linee automobilistiche urbane, con v. c. pari a 12 km/h;
- 64 linee automobilistiche interurbane, con v. c. pari a 15 km/h;
- 3 linee filoviarie, con v. c. pari a 15 km/h;
- 3 linee metropolitane, con v. c. pari a 25 km/h;
- 10 linee ferroviarie suburbane, con v. c. pari a 25 km/h;
- 13 linee ferroviarie regionali (per le sole tratte urbane), con v. c. pari a 30 km/h.<sup>9</sup>

Anche la matrice O/D è stata ripresa dallo stesso lavoro di tesi. Questa matrice, dedotta, a sua volta, dalla matrice ISTAT del 2001, rappresenta in maniera molto dettagliata la provincia di Milano (figura 3.1.1), che risulta suddivisa in 589 zone,

---

<sup>9</sup> Le linee regionali non fanno propriamente parte dei servizi locali, ma effettuano diverse fermate in ambito urbano, molte delle quali consentono interscambi con i servizi locali; non possono quindi essere escluse dalla rappresentazione dell'offerta, in quanto hanno un ruolo fondamentale nell'accesso alla rete che si vuole analizzare, ma i flussi simulati su di esse non verranno valutati.

mentre rappresenta con maggiore approssimazione le altre province lombarde (18 zone) e le province al di fuori del cordone regionale (5 zone). Gli utenti contenuti nella matrice risultano suddivisi, per motivo di spostamento, in 4 categorie: lavoratori sistematici (circa 143000 spostamenti), affari di lavoro (6600), studio e altri motivi (44000), ritorni a casa (6400). La matrice 8-9 utilizzata risulta quindi composta, in definitiva, da circa 200000 spostamenti, di cui il 72% effettuato da lavoratori sistematici.

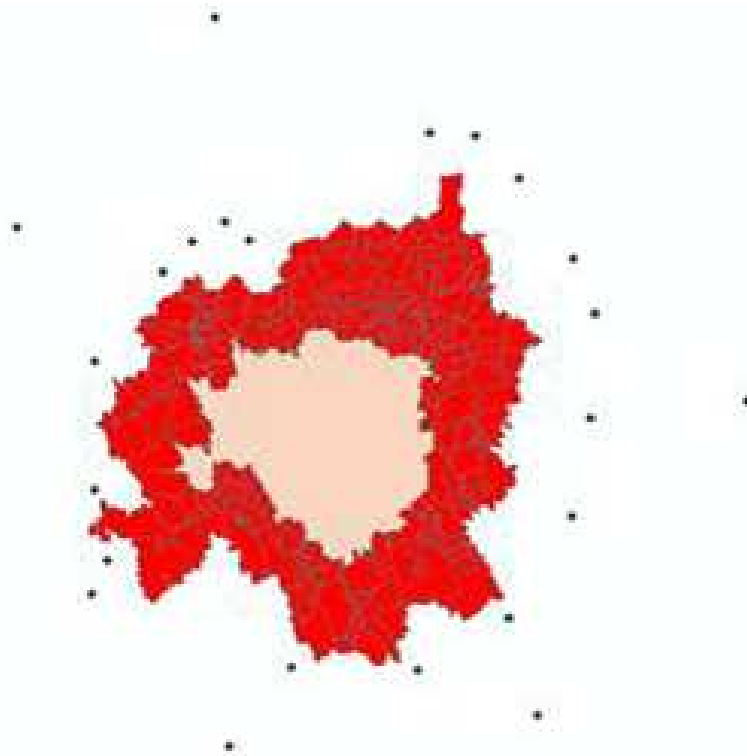


Figura 3.1.1 Zonizzazione dell'area di studio.

Gli utenti rappresentati in questa matrice non sono suddivisi per fascia oraria desiderata di partenza o di arrivo. Questo dato mancante è assolutamente necessario per le mie applicazioni: un modello con dinamica intraperiodale, infatti, è da considerare incompleto se la domanda non può essere suddivisa in un certo numero di sottointervalli, all'interno dell'intervallo di riferimento. D'altro canto, la mancanza di un

profilo orario è comune a molte matrici attualmente utilizzate in Italia: i modelli dinamici sono stati messi a punto da pochi anni e la maggior parte delle matrici non è stata ancora aggiornata in tal senso. L'informazione può però essere recuperata in maniera approssimata dall'indagine O/D<sup>10</sup> che la Regione Lombardia ha condotto nell'anno 2002 e che ha portato alla costruzione di una matrice degli spostamenti regionali, con una differente zonizzazione e una differente suddivisione dell'utenza rispetto a quella che ho utilizzato io, ma che fornisce, per la città di Milano, valori analoghi. Nel documento che sintetizza i risultati dell'indagine, è riportato un diagramma (figura 3.1.2) che rappresenta la distribuzione oraria degli spostamenti con destinazione Milano, riferendosi all'orario di arrivo a destinazione, e consente di fare alcune considerazioni:

- il numero di lavoratori sistematici che arrivano a destinazione entro le 9 (circa 160000) è circa il 33% in meno del numero di lavoratori sistematici che arrivano a destinazione entro le 8.30 (circa 240000);
- il numero di studenti e persone con altre motivazioni personali che arrivano a destinazione entro le 9 (circa 40000+10000=50000) è circa il 33% in meno del numero di studenti e persone con altre motivazioni che arrivano a destinazione entro le 8.30 (circa 15000+60000=75000);
- il numero di persone che, spostandosi per affari, arrivano a destinazione entro le 9 (circa 8000) è circa il 35-40% in più del numero di persone che, spostandosi per lo stesso motivo, arrivano a destinazione entro le 8.30 (circa 6000);
- il numero di persone che si spostano per tornare a casa rimane molto basso in valore assoluto e pressoché costante nella fascia oraria 8-9;
- le persone che si spostano per motivazioni diverse da quelle menzionate finora non sono specificate nella matrice che ho utilizzato io, perché si spostano prevalentemente in altri momenti della giornata o perché vengono incluse nella

---

<sup>10</sup> "Sintesi dell'indagine Origine/Destinazione 2002", da [www.dati.infrastrutture.regione.lombardia.it](http://www.dati.infrastrutture.regione.lombardia.it).



categoria “studio e altri motivi”; in ogni caso, il numero di studenti è il valore dominante per questa categoria e quindi ritengo dominante la distribuzione oraria riferita a tale valore.

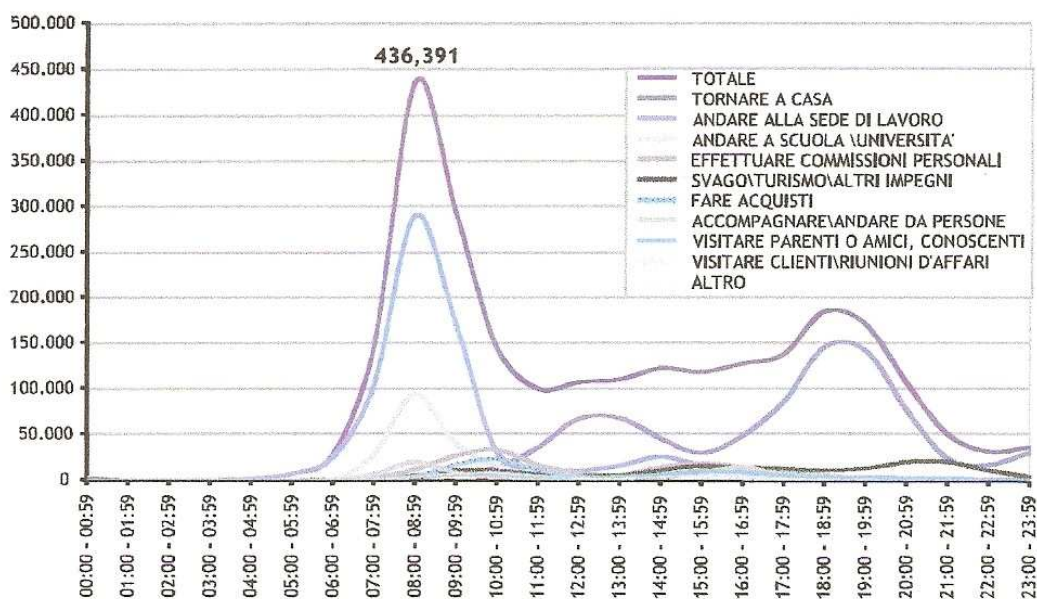


Figura 3.1.2 Distribuzione oraria degli spostamenti con destinazione Milano.

Le considerazioni fatte mi consentono di dividere gli utenti delle quattro categorie a mia disposizione in due sottointervalli, in base all'orario di arrivo a destinazione:

- 8-8.30: 65% dei lavoratori, 65% degli studenti, 30% degli affaristi, 50% dei ritorni a casa (circa 126000 spostamenti, ossia il 63% dei 200000 spostamenti totali);
- 8.30-9: 35% dei lavoratori, 35% degli studenti, 70% degli affaristi, 50% dei ritorni a casa (circa 74 spostamenti, ossia il 37% dei 200000 spostamenti totali).

Tale suddivisione è grossolana, poiché non tiene conto della distribuzione spaziale degli utenti ed è stata dedotta da una distribuzione oraria che contiene gli spostamenti totali, non soltanto gli spostamenti effettuati con mezzi pubblici. Inoltre, non ci sono dati

specifici in merito agli spostamenti che hanno una destinazione diversa da Milano, benché rappresentino soltanto il 5% degli spostamenti totali. Purtroppo questa informazione grossolana è l'unica informazione temporale di cui ho potuto disporre, perciò l'ho utilizzata nelle mie applicazioni. Ritengo che sia comunque una discreta base di partenza per dimostrare la validità dei modelli con dinamica intraperiodale; se l'utilizzo di tali modelli si diffonderà, in futuro saranno probabilmente costruite matrici ad hoc, che suddivideranno gli utenti in base a sottointervalli di pochi minuti.

I rilievi a disposizione sono stati eseguiti da diversi rilevatori durante due serie di indagini separate, condotte rispettivamente negli anni 2008 e 2009. Tali rilievi sono stati eseguiti in corrispondenza di fermate specifiche, preferibilmente nodi di interscambio con altre linee, nella fascia oraria 8-9 di un giorno feriale medio e contengono l'ora di arrivo di ciascun veicolo di linea, il flusso di passeggeri in arrivo, il numero di saliti e il numero di discesi alla fermata; la tabella che viene compilata durante un rilievo standard è analoga al seguente esempio:

RILEVATORE	ORARIO	SERVIZIO	CONDIZIONI METEO	GIORNO	DATA	LINEA	DIREZIONE	ORA	MINUTI	PASSEGGGERI	SALITI	DISCESI	NOTE	FERMATA
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	00	370	20	50		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	06	320	15	35		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	10	210	20	40		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	15	290	25	35		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	19	360	40	30		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	21	420	30	60		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	30	330	25	50		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	36	320	40	40		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	41	290	30	20		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	43	400	25	60		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	47	300	30	30		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	50	230	25	40		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	56	220	30	20		Centrale FS
Monica	0	0	-	Martedì	07/12/2010	M2	0	8	59	200	15	30		Centrale FS

Tabella 3.1.a Prospetto di un rilievo standard.

Il campo “orario” contiene indicazioni circa la tipologia di orario attuato al momento del rilievo (0=invernale, 1=estivo, ridotto=2), “servizio” fa riferimento alla tipologia di servizio (0=feriale, 1=sabato, 2=festivo), “condizioni meteo” dà informazioni sulle condizioni meteorologiche che influenzano il transito del veicolo (0=sereno, 1=coperto, 2= pioggia, 3=nebbia, 4=neve, -=nessuno, per mezzi in sede sotterranea), “direzione” indica il verso di percorrenza del veicolo (0= centro o circolare destra, 1=periferia o circolare sinistra).

I rilievi a disposizione comprendono le seguenti linee:

- 16 su 20 linee tranviarie, in entrambe le direzioni;
- 3 su 3 linee filoviarie, in entrambe le direzioni;
- 33 su 51 linee di autobus urbane, di cui 28 in entrambe le direzioni e 5 soltanto in direzione centro;
- 24 su 64 linee di autobus interurbane, di cui 22 in entrambe le direzioni e 2 soltanto in direzione centro.

Questi dati sono stati raccolti negli anni 2008 e 2009 per scopi differenti da quelli di questa tesi, ma sono dati comunque utilizzabili, in quanto il tipo di servizio e il tipo di orario rilevati sono quelli che mi occorrono (0=invernale, 0=feriale) e sono rimasti invariati da allora. Purtroppo non sono presenti, in questi rilievi, i campi relativi ai saliti e discesi, che avrebbero consentito un maggiore controllo dei risultati delle simulazioni.

Non avendo a disposizione conteggi per le linee metropolitane e ferroviarie, mi sono occupata io stessa della loro esecuzione, tra la fine di novembre e l’inizio di dicembre 2010. In questo modo, ho anche potuto rendermi conto delle difficoltà che il rilevamento “tradizionale” dei flussi comporta, come il grande dispendio di tempo e l’impossibilità di contare con precisione flussi maggiori di 80-100 persone, che devono necessariamente essere approssimati alla decina. Questa approssimazione dei grandi flussi comporta

solo un disagio in fase di rilievo, ma non incide sull'utilizzo dei dati, in quanto un errore nell'ordine del 5% è accettabile per i flussi simulati, quindi anche per i flussi rilevati che vengono utilizzati per verificarli. Il dispendio di tempo, invece, costituisce un grosso ostacolo alla raccolta dei dati e rende molto difficoltoso estenderla a tutte le linee; ancora più difficoltoso, ma auspicabile, sarebbe estendere la raccolta dati a un numero maggiore di giorni e di fermate.

I rilievi eseguiti da me contengono tutti i campi riportati nella tabella precedente, compresi saliti e discesi; in questo modo, mi sono garantita un minimo di controllo dei corrispondenti valori simulati, oltre che dei valori dei flussi.

Alle linee elencate in precedenza, si vanno quindi ad aggiungere:

- 3 su 3 linee metropolitane, in entrambe le direzioni;
- 10 su 10 linee ferroviarie, in entrambe le direzioni.

Per finire, ho recuperato l'orario programmato dei servizi dal sito dell'azienda esercente.

Mi sembra opportuno rimarcare che c'è un importante sfasamento temporale tra i dati disponibili: mentre la matrice risale all'anno 2001, il grafo di rete, l'orario programmato e i rilievi sono aggiornati al 2010. In questo arco di tempo, la rete dei trasporti pubblici di Milano è stata sottoposta a numerosi interventi infrastrutturali e organizzativi, tra i quali:

- l'apertura della tratta ferroviaria Porta Venezia - Dateo e della fermata di Villapizzone (luglio 2002);
- l'inaugurazione della prima metrotranvia (linea 7), con tunnel tranviario sotto la Bicocca (dicembre 2002);
- l'inaugurazione di due nuove metrotranvie (linee 4 e 15) e l'apertura della stazione Maciachini della linea M3 (dicembre 2003);

- l'apertura della tratta ferroviaria Dateo – Porta Vittoria – bivio Lambro e l'attivazione del servizio ferroviario suburbano (dicembre 2004);
- l'introduzione di tessere magnetiche e biglietti elettronici, in sostituzione dei biglietti cartacei (2004-2007);
- l'apertura della stazione Rho Fiera della linea M1 (settembre 2005);
- l'inaugurazione di una nuova metrotranvia (linea 31) e della nuova motrice della linea M1 "Meneghino" (dicembre 2008);
- l'apertura della tratta ferroviaria Porta Vittoria – Rogoredo (marzo 2008);
- la modifica della rete di superficie nelle zone tra Niguarda e Bicocca e nei comuni di Cinisello Balsamo, Cormano, Cusano Milanino e Sesto San Giovanni (gennaio 2009).

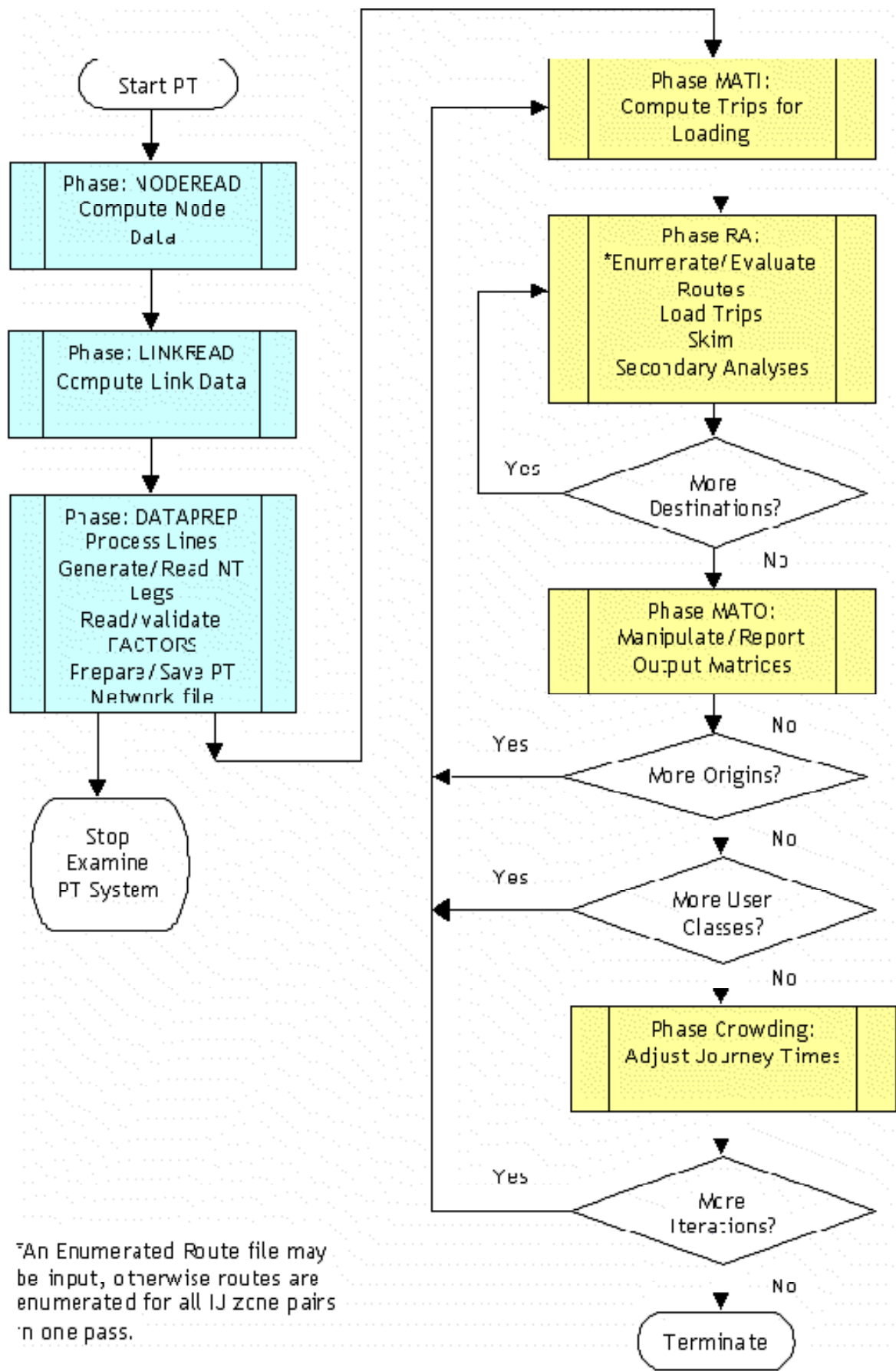
Si tratta di interventi infrastrutturali e organizzativi molto importanti, che potrebbero aver modificato le caratteristiche della mobilità, soprattutto in termini di fermate di accesso/egresso e fasce orarie di partenza. Mentre il primo problema può essere risolto dal modello, che è in grado di attribuire agli utenti le nuove alternative disponibili, il secondo non è risolvibile, e potrebbe comportare un aumento o una diminuzione della domanda nella fascia oraria 8-9 che sto considerando. Infine, bisogna tenere in considerazione che negli ultimi anni ci sono state anche significative modifiche alla distribuzione delle attività socio-economiche sul territorio, con la costruzione di nuovi edifici residenziali e il decentramento di una parte delle attività produttive verso i comuni di area urbana; questi fenomeni potrebbero aver influito non soltanto sulla fase di scelta del percorso, ma anche su altre dimensioni di scelta, come la distribuzione e la ripartizione modale. Per tutte queste ragioni, mi aspetto che i risultati possano essere affetti da una certa percentuale di errore, indipendentemente dalla bontà del modello utilizzato per le simulazioni.

### 3.1.3. APPROCCIO AL PROGRAMMA CUBE

Durante la prima fase di studio e approccio del programma, ho appurato che esso consente di gestire separatamente le varie fasi di simulazione, dal momento che hanno esigenze ben distinte; per effettuare una simulazione, è necessario fornire al programma vari files, che contengono rispettivamente:

- il grafo della rete, con le linee operanti nella fascia oraria prescelta (file .net);
- le caratteristiche funzionali di ciascuna linea, ossia frequenza, velocità commerciale, numero di posti in piedi e a sedere, nodi e archi attraversati, e, nel caso dinamico, anche gli orari di partenza e i ritardi delle corse (un file .lin per ciascuna modalità di trasporto presente, quindi in totale 6 files .lin);
- la matrice per il trasporto pubblico, relativa alla fascia oraria prescelta (file .mat);
- le istruzioni per la preparazione della rete, cioè per generare gli archi pedonali e calcolare i tempi di percorrenza di tutti gli archi (file .s);
- le caratteristiche comportamentali di ciascuna classe di utenti considerata nella matrice (un factors file .fac per ciascuna classe, quindi in totale 4 files .fac);
- le istruzioni per la costruzione e enumerazione dei percorsi (file .s);
- le istruzioni per la valutazione dei percorsi (file.s);
- le istruzioni per l'assegnazione e la reportistica (file .s).

I file di tipo .net, .mat e .lin erano già tra i dati di partenza. Nei paragrafi seguenti vedremo invece nel dettaglio come sono stati prodotti i files .fac e .s e come sono state affrontate le varie fasi del processo di simulazione, che è riassunto nello schema di figura 3.1.3.



\*An Enumerated Route file may be input, otherwise routes are enumerated for all IJ zone pairs in one pass.

Figura 3.1.3 Rappresentazione schematica del processo di simulazione.

### 3.1.4. PREPARAZIONE DELLA RETE

La fase di preparazione della rete è di fondamentale importanza per la buona riuscita di una simulazione. Essa consente di creare la struttura delle connessioni tra centroidi e nodi di rete (archi di accesso/egresso) e tra nodi di rete e nodi di rete (archi di trasferimento); su tale struttura si appoggia poi la costruzione di tutti i multipercorsi, quindi è assolutamente necessario che sia definita con cura. Questa fase è riconducibile al concetto teorico di sottografo di fermata: vengono cioè rappresentati tutti i movimenti che avvengono in corrispondenza di una fermata. Lo schema di riferimento è di tipo quadrinodo, per cui è in grado di conteggiare separatamente i flussi e i costi che interessano, rispettivamente, i movimenti di accesso/egresso, trasbordo, attesa e salita. Soltanto per i primi due vengono generati dei veri e propri archi, che vanno ad aggiungersi agli archi del grafo di base; per gli altri due, verranno definiti dei parametri appositi, che consentiranno di tenerne conto senza costruire ulteriori archi.

La fase di preparazione del network è riconducibile, all'interno di CUBE, alla fase di processo DATAPREP e la generazione delle connessioni avviene tramite il comando GENERATE. Per poter lanciare questo comando, occorre impostare alcuni parametri essenziali, contenuti in un file di script .s apposito:

- FROMNODE, ovvero la lista dei nodi di partenza;
- TONODE, ovvero la lista dei nodi di arrivo;
- COST, che è l'espressione matematica per calcolare il tempo di transito che ciascuna connessione comporta;
- MAXCOST, cioè il tempo massimo che l'utente è disposto a impiegare per percorrere un certo tipo di connessione;
- ONEWAY, che indica se la connessione è mono o bidirezionale.



Questi parametri vengono impostati due volte, una per gli archi di accesso/egresso e una per gli archi di trasferimento. Per quanto riguarda i primi, l'espressione della funzione di costo utilizzata è la seguente:

$$COST [min] = distance[km] * 60/speed[km/h]$$

La distanza viene desunta dal grafo di rete, mentre la velocità di percorrenza deve essere impostata. Nelle mie simulazioni, ho inserito un valore pari a 5 km/h per tutti gli archi di accesso/egresso che collegano alla rete le zone della provincia di Milano (1-589), ovvero le zone servite dal grafo; il traffico su questi archi è prettamente pedonale, per cui la velocità di percorrenza è quella per un pedone medio. Per le zone esterne al grafo (590-643) invece, è necessario prevedere l'accesso tramite modalità automobilistiche (auto, moto, autolinee extraurbane) e tramite modalità ferroviaria, qualora presente; questi movimenti non sono stati rappresentati esplicitamente, ma sono stati tenuti in conto, inserendo un valore pari a 60 km/h per la velocità di percorrenza.

Secondo la stessa logica, è necessario differenziare il valore di MAXCOST, che limita la generazione delle connessioni a tutte le possibilità che comportano un tempo di transito al di sotto del valore definito; si tratta di un parametro da curare con attenzione, poiché una sua variazione anche piccola comporta una variazione significativa del numero di connessioni generate, che si ripercuote sul numero di percorsi da enumerare, valutare e caricare, per cui va a incidere notevolmente sui valori dei flussi di arco che si ottengono alla fine. I valori di maxcost sono stati differenziati, quindi, a seconda della distanza dei nodi dal perimetro dell'area urbana:

- nodi interni al perimetro (centroidi 1-589);
- centroidi esterni al perimetro, entro una distanza di 15 km (centroidi 590-608);

- centroidi esterni al perimetro, oltre una distanza di 15 km (centroidi 626, 633, 636, 641, 643).

Ne consegue che gli archi di accesso/egresso hanno tre valori di maxcost diversi. Questa strategia consente di limitare il numero di possibilità di movimento per le zone più distanti dalla rete e aumentarlo per le zone servite dalla rete stessa. In tal modo, è stato possibile ottenere degli archi di accesso rappresentativi delle connessioni reali; gli utenti delle zone esterne, infatti, hanno effettivamente la possibilità di accedere lungo poche direttrici di traffico, mentre gli utenti delle zone interne possono muoversi radialmente e disporre di numerose fermate.

Inoltre, i valori di maxcost sono stati differenziati per modalità di trasporto di arrivo; ciò equivale a dire che un utente accetta tempi di percorrenza diversi a seconda che debba salire su un treno, una metropolitana o un mezzo di superficie. In tal modo, si è potuto tenere conto delle preferenze degli utenti, che effettivamente sono disposti a sopportare tempi maggiori per accedere alle modalità di trasporto più rapide e a capacità più elevata; con lo stesso accorgimento, è stato possibile anche limitare gli accessi dalle zone esterne alle sole fermate ferroviarie e metropolitane, come avviene nella realtà.

Per quanto riguarda gli archi di trasbordo, è stata utilizzata una funzione di costo analoga al caso precedente:

$$COST [min] = distance[km] * 60/speed[km/h]$$

nella quale la distanza viene desunta dal grafo di rete, mentre la velocità è stata posta pari a 5 km/h, poiché il traffico sugli archi di trasbordo è esclusivamente pedonale.

Anche in questo caso è necessario definire i valori di MAXCOST, per limitare la generazione delle connessioni a tutte le possibilità che sono realmente praticabili.

Infatti, l'utente effettua normalmente il trasbordo nell'ambito della stessa fermata, oppure di due fermate a distanza ridotta; il parametro maxcost consente di tenere conto di questo aspetto comportamentale. I valori sono stati differenziati per modalità di trasporto di arrivo; ciò equivale a dire che un utente sopporta tempi di trasferimento diversi a seconda che debba salire su un treno, una metropolitana o un mezzo di superficie.

La scelta dei valori di maxcost è quindi l'aspetto più complesso di questa fase; nel paragrafo relativo all'analisi dei risultati spiegherò secondo quali criteri li ho scelti.

### **3.1.5. COSTRUZIONE E ENUMERAZIONE DEI PERCORSI**

Questa seconda fase costituisce un punto molto delicato del processo di simulazione. Essa consente di costruire ed enumerare tutti i cammini possibili, che potrebbero essere utilizzati dagli utenti per effettuare gli spostamenti (approccio iterativo), oppure il cammino migliore, su cui verranno caricati tutti gli utenti (approccio "tutto o niente"). Questa fase varia in maniera sostanziale nel passaggio dal modello statico al modello dinamico, per cui mi sembra opportuno trattare le due metodologie separatamente.

In un modello statico, è necessario impostare a priori l'approccio da seguire:

- Bestpathonly= true: calcola soltanto il percorso migliore per ogni coppia O/D;
- Bestpathonly= false: calcola per ogni O/D un insieme di percorsi possibili.

In entrambi i casi, l'assegnazione è di tipo stocastico, perché le variabili in gioco hanno residui aleatori non nulli; i due approcci si identificano quindi nei metodi SNL e SUE descritti nel capitolo precedente. Nel mio caso, l'oggetto dell'analisi è una rete in condizioni congestionate, rappresentative della fascia oraria 8-9, per cui c'è una dipendenza circolare costi-flussi-costi che richiede un approccio di tipo iterativo come il

SUE. Per confermare la validità di questa ipotesi, ho effettuato anche alcune simulazioni con l'approccio SNL ed ho constatato che effettivamente produce risultati molto lontani dai valori rilevati.

La funzione di generazione e enumerazione dei percorsi richiede un file .s molto semplice, che dà soltanto il via alla sua esecuzione, poiché viene interamente regolata da alcuni parametri inseriti nel FACTORS FILE. Questo file è molto importante perché contiene tutte le regole comportamentali attribuibili a una classe di utenza, anche quelle relative alla successiva fase di valutazione dei percorsi; per regole comportamentali si intendono tutti quei parametri fisicamente quantificabili che incidono sulla scelta del percorso da parte di un utente (tempo massimo di attesa, numero massimo di trasbordi, disutilità associate alla salita e al trasbordo, atteggiamento indifferente o intelligente, e così via). Il factors file deve essere specificato per ciascuna categoria di utenti; ciò vuol dire che è possibile differenziare l'intero procedimento di scelta del percorso in base al comportamento di scelta di ciascuna categoria di utenti, definito dai parametri contenuti, per l'appunto, nel factors file. La corretta scrittura dei factors file è un elemento indispensabile per la buona riuscita di una simulazione, assieme alla corretta definizione delle connessioni pedonali.

La funzione di generazione e enumerazione dei percorsi opera in questo modo: inizialmente genera gli ipercammini possibili tra le zone origine e le zone destinazione, dopodiché estrae il percorso di minimo costo per ciascuna coppia O/D, tenendo in memoria il numero di trasbordi e il costo (tempo totale) che esso comporta; se bestpathonly=t si passa direttamente alla fase di valutazione dei percorsi, che assegna una probabilità unitaria a tutti i percorsi; se invece bestpathonly=false la funzione cerca altri percorsi attrattivi per le coppie O/D; la selezione viene effettuata confrontando ciascun percorso con il corrispondente percorso di minimo costo e vengono salvati i

percorsi che presentano differenze, in termini di numero di trasbordi e costo totale, minori rispetto ai limiti stabiliti dai parametri MAXFERS e SPREAD nel factors file. I valori di MAXFERS e SPREAD comportano quindi l'esclusione di tutti i percorsi al di sopra di un certo tempo e un certo numero di trasbordi; è opportuno che tali valori siano piuttosto elevati, in modo da considerare un buon numero di percorsi e lasciare alla successiva fase di valutazione il compito di tenerli o, eventualmente, di escluderli, assegnando loro una probabilità nulla.

Si tratta, evidentemente, di approccio di tipo selettivo, con un criterio di selezione misto, che include sia un confronto dei costi che un confronto di attributi (limitato al solo attributo "numero di trasbordi"); in tal modo, ho potuto considerare diversi aspetti rappresentativi per la percezione dell'utente. Questo approccio mi ha dato la possibilità di utilizzare un modello logit nella successiva fase di valutazione dei percorsi, dal momento che la percentuale di sovrapposizione è limitata e si può considerare valida l'ipotesi di indipendenza delle alternative.

Il costo di ogni percorso è un costo generalizzato, che si ottiene dalla somma di diverse componenti:

- tempi (in minuti):
  - tempi di accesso ed egresso, ossia i tempi di camminamento sull'arco iniziale di accesso e sull'arco finale di egresso;
  - tempi di trasbordo, ossia i tempi di camminamento sugli archi di trasferimento;
  - tempi di attesa alle fermate;
  - tempi a bordo dei veicoli.
- disutilità o penalità (in minuti):
  - penalità di salita;
  - penalità di trasbordo.

- costo (in unità monetaria):
  - tariffa.

I tempi di accesso/egresso e di trasferimento vengono sempre computati all'interno dei costi, poiché si ricavano direttamente dalla preparazione della rete; la stessa cosa vale per i tempi a bordo, che corrispondono esattamente ai tempi di percorrenza degli archi di linea. Le restanti voci di costo vengono conteggiate soltanto se inserite nel factors file, altrimenti vengono assunte pari a zero. Il programma converte tutte le componenti considerate in unità di costo generalizzato (ossia in minuti), utilizzando alcuni fattori per pesarle al meglio:

- *runfactor*, che è un fattore moltiplicativo applicato al tempo a bordo per ciascuna modalità di trasporto e permette di assegnare un costo maggiore a mezzi più sgraditi e viceversa; i valori tipici di questo parametro sono compresi tra 0.01 (viaggio quasi non percepito dall'utente) e 3 (viaggio molto sgradito);
- *waitfactor*, che è un fattore moltiplicativo applicato al tempo di attesa per ciascun nodo; i valori tipici di questo parametro sono compresi tra 1 (tempo di attesa percepito in maniera equivalente agli altri tempi) e 3 (tempo di attesa percepito in maniera molto consistente); il tempo di attesa pesato dal *waitfactor* deve rimanere all'interno di un range, definito dai parametri *waitmin* e *waitmax*, contenuti anch'essi nel factors file;
- *value of time*, che è un fattore moltiplicativo applicato alle tariffe, qualora siano definite, per convertirle in unità di costo generalizzato.

In definitiva, la funzione di generazione e enumerazione dei percorsi comporta l'inserimento in ciascun factors file dei seguenti parametri:

- *maxfers*;

- *spread*;
- *wait time* (tempo di attesa);
- *boarding penalties* (penalità di salita);
- *transfer penalties* (penalità di trasferimento);
- *runfactor*;
- *waitfactor*.

Il sistema tariffario e il corrispondente value of time non sono stati inseriti, per diverse ragioni. La prima è che non avevo il sistema tariffario tra i dati a mia disposizione ed inserirlo manualmente all'interno del programma sarebbe stato molto complesso. La seconda è che ho ritenuto il costo monetario trascurabile rispetto alle altre componenti di costo, perlomeno nella fase che ho analizzato; sarebbe stato senza dubbio influente se avessi dovuto considerare anche la ripartizione modale, ma non è questo il caso; gli utenti contenuti nella matrice hanno già scelto il trasporto pubblico e sono ormai disposti ad accettare il suo costo, per cui la scelta del percorso avviene prevalentemente in base a tempi e disutilità associate a ciascuna fase dello spostamento. La terza è che lo scopo del mio lavoro non è valutare la qualità di un servizio, oppure la sua competitività rispetto ad un altro servizio, bensì valutare la capacità di alcuni modelli di riprodurre la formazione reale dei flussi; relativamente a tale scopo, e soltanto nella fase che ho preso in considerazione, il costo monetario può essere considerato trascurabile.

Per maxfers occorre definire un numero massimo di trasbordi accettati da ciascuna categoria di utenza. Per spread è possibile inserire uno spreadfactor, che è un fattore moltiplicativo applicato al costo del percorso di minimo costo, oppure una spreadconstant, che è una costante da aggiungere, oppure entrambi.

I valori di maxfers e spread sono tendenzialmente elevati rispetto a quelli reali. L'attribuzione di valori elevati ai parametri non comporta, in questo caso, un errore

modellistico, ma solo una maggiore complessità di calcolo, dovuta alla presenza di un numero di percorsi maggiore da valutare; l'attribuzione di valori troppo bassi, invece, può comportare un significativo errore, che consiste nell'esclusione a priori di percorsi che in realtà sono utilizzati e in una conseguente sottostima dei flussi di arco.

Per wait time è necessario definire apposite curve da applicare ai nodi, che vanno sotto il nome di *waitcrvdef*. Ciascuna curva può essere definita tramite una lista di coppie x-y, dove ogni x rappresenta un headway (intervallo temporale tra il passaggio di due mezzi della stessa linea) e ogni y rappresenta un tempo di attesa; si tratta quindi di curve definite per punti, che devono necessariamente essere monotone non decrescenti, affinché il programma sia in grado di effettuare l'interpolazione lineare tra i vari punti. Le curve definite vengono poi allocate a ciascun nodo fermata tramite i comandi *awaitcurve* e *xwaitcurve*: *await* stabilisce quale *waitcrvdef* verrà usata in quel nodo per calcolare il tempo di attesa iniziale, mentre *xwait* stabilisce quale *waitcrvdef* verrà usata in quel nodo per calcolare il tempo di attesa durante i trasferimenti. Se in qualche nodo non è definita una curva di attesa specifica, il programma ne utilizza una di default; è consigliabile, però, non sfruttare questa possibilità e definire curve specifiche per ciascun nodo, o perlomeno una curva per ciascun gruppo di nodi "simili" (es. nodi interni alla cerchia dei bastioni, nodi interni al comune di Milano ecc.).

Le regole di base per la definizione delle curve sono, oltre alla monotonicità:

- assegnare un tempo di attesa costante pari a 0.5 minuti per tutti gli headway minori o uguali di un minuto; questo perché i servizi con frequenze molto elevate tendono ad avere arrivi dei veicoli molto irregolari, che impediscono di stabilire una relazione tra headway e tempo di attesa, in particolare una relazione lineare;
- per headway medio-bassi, nell'ordine dei 2-30 minuti, il tempo di attesa si aggira attorno alla metà del corrispondente headway;



- per headway alti, all'incirca maggiori di 30 minuti, il tempo di attesa tende a crescere con intensità via via minore, oppure ad attestarsi attorno ad un valore costante.

In figura 3.1.4 si può osservare un esempio di waitcrvdef. Una volta definite e assegnate le curve di attesa, programma va a leggere nei file .lin i valori di headway per ciascun nodo fermata, li somma se ce ne sono più di uno, vi associa un tempo di attesa utilizzando la curva corrispondente e lo moltiplica per waitfactor; a questo punto, i tempi di attesa ottenuti possono essere conteggiati all'interno dei costi generalizzati.

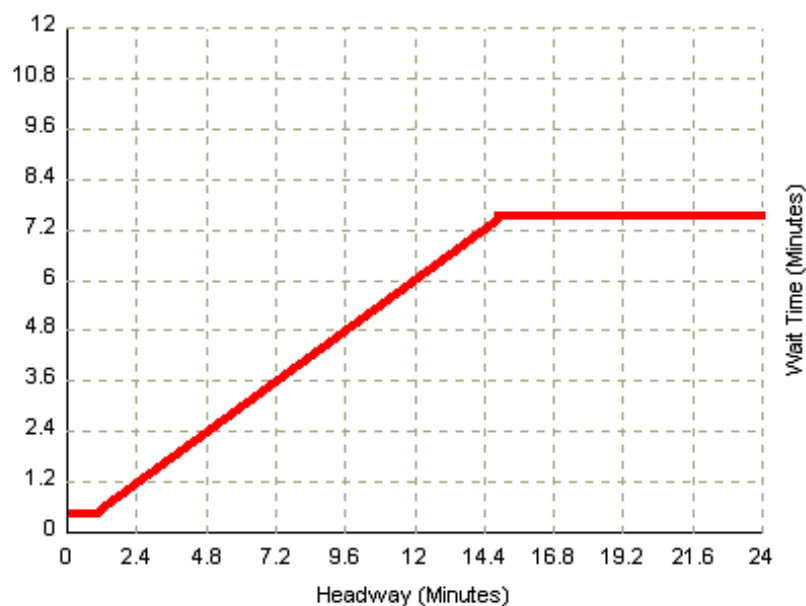


Figura 3.1.4 Un esempio di curva di attesa.

Per boarding penalties occorre inserire un valore in minuti per ogni modalità di trasporto, che rappresenta la disutilità associata dall'utenza alla salita sui mezzi di quella modalità; tale valore viene sommato alle altre componenti di costo di percorso ogni volta che un utente sale su un mezzo, per cui alla fermata di salita e ad ogni fermata di interscambio in cui quella modalità è presente.

Per transfer penalties occorre inserire un valore in minuti da ogni modalità di trasporto a ogni modalità di trasporto (quindi  $6 \times 6 = 36$  valori), che rappresenta la disutilità associata dall'utenza al trasferimento tra quelle due modalità; tali valori vengono aggiunti ai tempi pedonali di trasferimento in corrispondenza di ogni interscambio. È possibile inserire, in questo caso, anche valori negativi: potrebbero essere utili per controbilanciare, negli scambi tra mezzi della stessa modalità, l'effetto della ripetizione di boarding penalty.

Per runfactor occorre definire un fattore moltiplicativo per ciascuna modalità di trasporto, da applicare al tempo a bordo; per waitfactor, infine, occorre definire un fattore moltiplicativo da applicare al tempo di attesa nei nodi.

Per passare da un modello di tipo statico a uno di tipo dinamico, occorre apportare alcune modifiche a questo procedimento. Innanzitutto, bisogna inserire nei files .lin gli orari delle corse, andata e ritorno, per ciascuna linea, e gli eventuali ritardi. Poi, è necessario impostare l'approccio da seguire:

- Quickestpath= true: calcola soltanto il percorso migliore per ogni coppia O/D;
- Quickestmulti= true: calcola il percorso migliore per ciascun orario di partenza di ciascuna coppia O/D;
- Quickestpath, Quickestmulti= false: calcola più percorsi per ciascun orario di partenza di ciascuna coppia O/D e tutti questi percorsi vengono inclusi nella valutazione.

Dopodiché, la funzione di costruzione e generazione dei percorsi opera in maniera analoga al caso statico: è, infatti, ancora regolata dai valori di maxfers e spread e da una funzione di costo. Occorre però aggiungere ulteriori parametri nei factors files, oltre a quelli già elencati, che vanno a modificare le componenti di costo:

- *timepoint*;

- *minxfervar*,
- *maxwaitvar*,
- *delay\_c*.

Timepoint identifica l'orario di partenza dall'origine di una determinata categoria di utenti, oppure di un gruppo all'interno di una categoria; corrisponde quindi all'attributo ODP descritto nel modello teorico. In alternativa si può definire, anziché un orario preciso, un intervallo temporale, entro il quale un utente desidera partire dalla zona origine oppure arrivare nella zona di destinazione.

Minxfervar e maxwaitvar sono due parametri di tipo dinamico, che consentono di mettere le corse in successione e quindi di confrontarne le utilità. Il primo identifica il tempo minimo di trasbordo, per cui, in corrispondenza di ciascun nodo, l'orario di partenza di una corsa deve essere maggiore del suo orario di arrivo perlomeno del valore di minxfervar; il secondo identifica il tempo massimo di attesa che l'utente è disposto a spendere in ciascun nodo, e va a sostituire il corrispondente parametro statico, come è stato spiegato nel modello teorico (il tempo di attesa può cioè includere gli effetti dell'affollamento e i ritardi delle corse, se presenti).

Delay\_c è un parametro che consente di tenere in considerazione il fenomeno della propagazione dei ritardi lungo una linea. Esso esprime la differenza, in termini di tempo, tra l'orario di arrivo effettivo e l'orario di arrivo programmato di un veicolo in un nodo; questo ritardo, in minuti, viene aggiunto al tempo di percorrenza dell'arco precedente e di tutti gli archi successivi, finché non viene specificato un altro valore per lo stesso parametro. Chiaramente, la presenza di delay\_c può incidere in maniera determinante sul tempo a bordo e sul valore di runfactor, che tendono ad aumentare con l'aumento del ritardo; se delay\_c presenta valori elevati (>15-20 minuti) per numerose corse della stessa linea, la componente di costo associata al tempo a bordo diventa prevalente

rispetto alle altre componenti di costo e fa calare drasticamente i flussi su quella linea. Questo parametro è stato inserito soltanto nell'ultima tipologia di modello che ho applicato, ossia il modello a dinamica intraperiodale con ritardi.

### **3.1.6. VALUTAZIONE DEI PERCORSI**

La terza fase della simulazione, ovvero la fase di valutazione dei percorsi, consente di assegnare una probabilità di scelta ai percorsi enumerati. Questa operazione viene condotta in due modi diversi, a seconda che il modello sia di tipo statico o dinamico.

Nel caso statico, la funzione di valutazione consiste nei seguenti passi:

- esaminare i percorsi enumerati, eliminando eventuali percorsi illogici (es. percorsi in cui si scende e si sale sullo stesso servizio);
- disaggregare i fasci di percorso e associarvi una probabilità condizionata di uso;
- associare ai percorsi una probabilità di uso, data dal prodotto delle probabilità condizionate dei fasci che li compongono.

La disaggregazione di tutte le possibile alternative di percorso è il momento più delicato di questa fase, perché racchiude al suo interno la rappresentazione del comportamento preventivo/ adattivo degli utenti. Questa operazione viene effettuata trattando i percorsi come una gerarchia di scelte condizionate: ogni fermata e ogni arco che si incontra rappresenta un potenziale punto di decisione, in cui l'utente può salire su un mezzo in servizio, scendere da un mezzo in servizio, spostarsi a piedi per raggiungere l'accesso a un altro servizio, oppure restare sul mezzo su cui sta viaggiando. La probabilità di scelta tra queste possibilità viene presa (o condizionata), di volta in volta, applicando modelli appositi, che si appoggiano su alcuni parametri contenuti nel factors file.

I modelli di scelta in corrispondenza dei punti di decisione possono essere di tre tipi:

- scelte pedonali della fermata di salita (walk choices): applicato dove sono disponibili alternative pedonali, ovvero archi di accesso/egresso o archi di trasferimento; basato su una struttura logit, si può controllare con un fattore di scala LAMBDAW e con un fattore ALPHA che stabilisce il peso del tempo di camminamento rispetto al tempo totale, entrambi definiti nel factors file;
- scelte dei servizi (transit choices): applicato dove sono disponibili alternative di servizio, ovvero nei nodi di linea dove si arresta più di una linea. Ci sono due criteri a disposizione per allocare passeggeri alle diverse linee in corrispondenza della stessa fermata: il modello a frequenza (Service Frequency Model - SFM), che calcola la probabilità condizionata per ciascuna linea in proporzione alla frequenza, cosicché l'utente sale sulla prima linea a sua disposizione, e il modello a frequenza e costi (Service Frequency and Cost Model - SFCM), che ipotizza che i viaggiatori abbiano conoscenza del tempo di viaggio per ogni alternativa disponibile e tendano ad utilizzare le alternative più attrattive, per cui la probabilità condizionata è in proporzione al costo totale di ciascuna di esse. I due modelli riproducono rispettivamente l'ipotesi di comportamento indifferente e comportamento intelligente; l'applicazione di uno dei due è definita a priori, tramite l'apposita voce SERVICEMODEL nel factors file;
- scelte della fermata di discesa (alternative alighting choices): applicato quando esistano due o più fermate di discesa disponibili per la stessa linea e la stessa destinazione; il modello ha una struttura logit simile al modello di scelta pedonale, con un fattore di scala LAMBDAA definito nel factors file.

A questo punto mi sembra opportuno entrare nel merito dei parametri che regolano i modelli, ovvero:

- *lambdaw* e *lambdaa*;

- *choicecut*,
- *servicemodel*.

I parametri di scala  $\lambda_{up}$  e  $\lambda_{down}$  controllano la forma esponenziale della curva logit, rispettivamente per allocare i passeggeri ad una fermata di salita e ad una fermata di discesa. Ricordiamo che un modello logit multinomiale associa ad un'alternativa  $j$  una probabilità di scelta, in base ad una funzione del seguente tipo:

$$p [j] = e^{V_j/\theta} / \sum_k e^{V_k/\theta}$$

dove  $\theta$  è il parametro della distribuzione di Gumble, che viene scelta per rappresentare i residui aleatori, nell'ipotesi che essi siano indipendenti e identicamente distribuiti. Ricordiamo anche che tale modello può essere utilizzato soltanto in caso di approccio selettivo, con enumerazione esplicita dei percorsi, come avviene nel caso in questione.

Nel mio caso, il modello logit per la scelta della fermata di salita (iniziale o di trasferimento) ha la seguente espressione:

$$p [walk to i] = e^{-\lambda(CW_i + \alpha ECD_i)} / \sum_j e^{-\lambda(CW_j + \alpha ECD_j)}$$

dove  $p$  è la probabilità che un utente si rechi alla fermata  $i$ ,  $\lambda_{up}$  è il fattore di scala,  $cw_i$  è il tempo di accesso alla fermata  $i$ ,  $ecd_i$  è il costo generalizzato del percorso che utilizza l'alternativa disponibile alla fermata,  $\alpha$  è il coefficiente di peso tra i due.

Il modello logit per la scelta della fermata di discesa ha, invece, la seguente espressione:

$$p [alight at i] = e^{-\lambda(ECD_i)} / \sum_j e^{-\lambda(ECD_j)}$$

dove  $p$  è la probabilità che un utente scenda alla fermata  $i$ ,  $\lambda$  è il fattore di scala,  $e_{cd_i}$  è il costo generalizzato del percorso che utilizza la fermata di discesa  $i$ .

La struttura logit fornisce una probabilità di scelta per ciascuna alternativa disponibile, sulla base del suo costo generalizzato, pesato dal corrispondente parametro  $\lambda$ : valori elevati di  $\lambda$  evidenziano una minore dispersione degli spostamenti tra le varie alternative, per cui molti spostamenti sono allocati all'alternativa migliore, mentre valori bassi di  $\lambda$  consentono una dispersione maggiore e quindi gli spostamenti sono allocati su molteplici alternative.

In figura 3.1.5 è riportato un esempio di curva logit per la scelta delle fermata di salita, dove si può vedere l'effetto di tre diversi valori di  $\lambda$ .

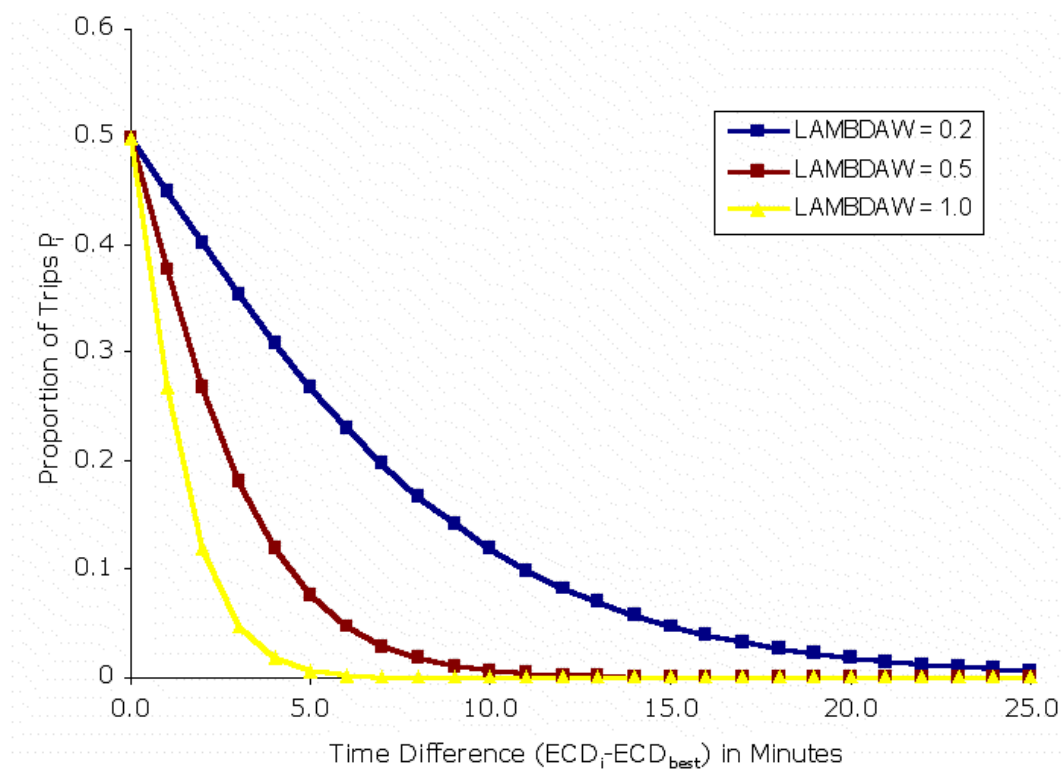


Figura 3.1.5 L'effetto di  $\lambda$  su una curva logit: un percorso più lungo di 5 minuti rispetto al percorso di minimo costo viene scelto nel 26,9% dei casi con  $\lambda=0.2$ , 7,6% dei casi con  $\lambda=0.5$ , 0,67% dei casi con  $\lambda=1$ .

Dopo aver associato, tramite modelli logit, una probabilità di scelta ad ogni fermata di salita e di discesa, il parametro choicecut elimina le alternative con una probabilità di scelta molto bassa, ovvero le alternative per cui è verificata la condizione (figura 3.1.6):

$$CHOICECUT > e^{-\lambda(Costi - CostBest)}$$

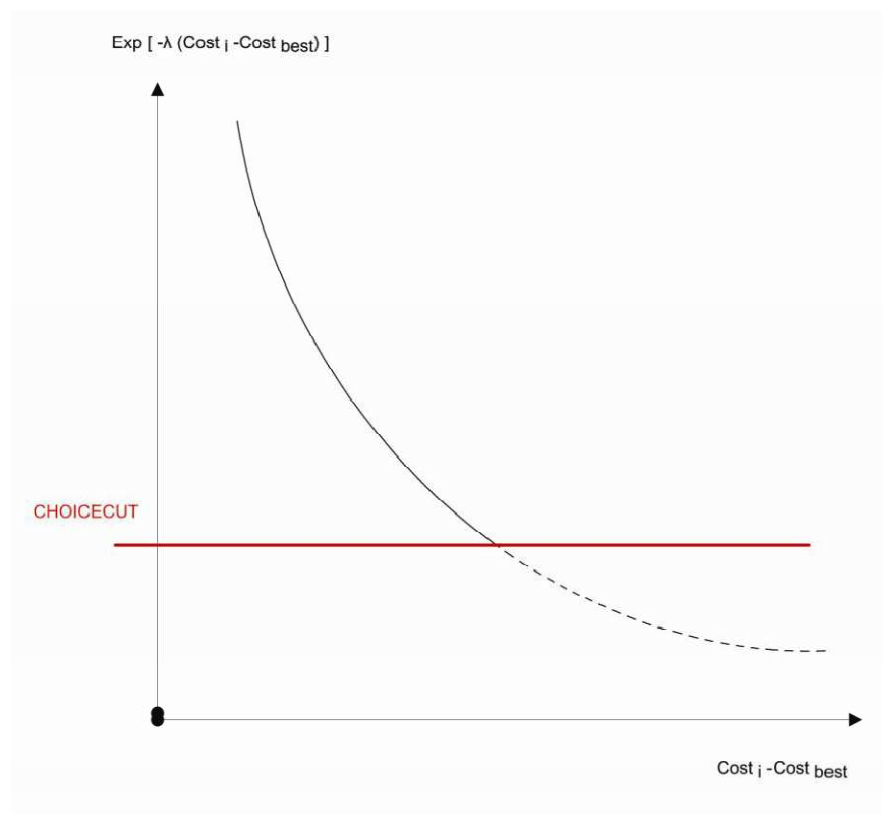


Figura 3.1.6 Un esempio di curva logit, in cui vengono eliminati tutti i valori al di sotto di choicecut.

Per quanto riguarda, infine, la scelta dei servizi tra una fermata di salita e una fermata di discesa, occorre decidere se utilizzare SFM oppure SFCM. I due modelli corrispondono a due situazioni ben distinte nella realtà: la prima è quella tipica di utenti non sistematici, che non hanno una conoscenza precisa del funzionamento dei servizi, in termini di orari, regolarità e tempi, per cui scelgono il primo mezzo che arriva alla fermata, indipendentemente dal tipo di modalità e dal costo complessivo di percorso che



comporta la scelta di quell'alternativa; la seconda è quella tipica di utenti sistematici, che hanno una conoscenza dettagliata degli orari e dei costi che comporta ciascuna fase dello spostamento, per cui tendono ad utilizzare le alternative che garantiscono un costo complessivo minore, anche se devono aspettare di più alla fermata, purché il tempo di attesa rimanga minore di *rewaitmax*.

I due modelli presentano, ovviamente, due struttura diverse. SFM si esprime nel seguente modo:

$$p [\textit{use line } l] = \varphi_l / \sum_k \varphi_k$$

Questa espressione è analoga a quella presentata nel capitolo precedente, che calcolava la probabilità di diversione basandosi su un comportamento adattivo di tipo indifferente.

SFCM , invece, prende in considerazione tutte le alternative disponibili a una fermata, dopodiché le sottopone a un test di validità, che consiste nella verifica che il valore di *rewaitmax* venga rispettato; in caso positivo, la linea viene presa in considerazione e valutata, in caso contrario viene esclusa. La valutazione di una linea che rispetta *rewaitmax* viene effettuata utilizzando la seguente espressione:

$$p [\textit{use line } l] = \frac{\varphi_l (1 - \frac{(ECD_l - ECD_m)}{T_m})}{\sum_k \varphi_k (1 - \frac{(ECD_k - ECD_m)}{T_m})}, \quad \textit{se } T_{wl} < \textit{rewaitmax}$$

dove  $e_{cd}_l$  è il costo di percorso della linea *l*, escluso il tempo di attesa  $t_{wl}$ ,  $e_{cd}_m$  è il costo di percorso medio delle altre linee prese in considerazione, esclusi i tempi di attesa alla fermata,  $t_m$  è il tempo di attesa medio delle altre linee prese in considerazione. In altre parole, viene valutata, oltre alla frequenza di una linea, anche la differenza di tempo di viaggio che può garantire.

Le due ipotesi di comportamento possono fornire probabilità di diversione differenti, come si vede chiaramente dagli esempi riportati nelle tabelle seguenti. Tali differenze non sono però molto marcate, perché nell'ambito dei modelli statici non è possibile conteggiare importanti voci di costo relative alle singole corse, che sono di tipo dinamico; così, la differenza di tempo di viaggio ( $ecd_i - ecd_m$ ) è spesso prossima allo zero ed il modello SFCM viene ricondotto, di fatto, al modello SFM.

### SFM example

Choice set

Line	Frequency	Travel time	Cumulative frequency	Wait time	Cumulative travel time	Average travel time
1	5	20	5	12	100	20
2	6	21	11	5.455	226	20.545
3	2	22	13	4.615	270	20.769
4	1	24	14	4.286	294	21
5	1	26	15	4	320	21.333

Notes:

- Lines 1-4 are included in the basic choice set because, with the addition of each line, the overall time to destination improves. Line 5 is excluded from the basic choice set because including it makes the time to destination worse.
- A wait factor of 2 was used to weight the waiting times.
- Column (5) =  $60.0/(4) * 0.5 * \text{Wait Factor}$
- Column (6) =  $(2)*(3)$ , accumulated over lines
- Column (7) =  $(6)/(4)$

Results of SFM

Line	Frequency	Cumulative frequency	Proportion of trips
1	5	5	0.357
2	6	11	0.429
3	2	13	0.143
4	1	14	0.0714
5	1	-	0

Tabella 3.1.b Esempio di applicazione del modello a frequenza.

## SFCM example

Choice set

Line	Frequency	Travel time	Average travel time excluding this line	Excess travel time over average	Wait time without this line	Proportion of time when line used	Cumulative effective frequency	Wait time including this line	Average travel time including this line
1	5	20	-	-	-	1	5	12	20
2	6	21	20	1	12	0.917	10.5	5.714	20.52
3	2	22	20.52	1.48	5.714	0.742	11.983	5.007	20.707
4	1	24	20.707	3.293	5.007	0.342	12.326	4.868	20.798
5	1	26	20.798	5.202	4.868	0	-	-	-

Notes:

- Lines 1-4 are included in the basic choice set because, with the addition of each line, the overall time to destination improves. Line 5 is excluded from the basic choice set because including it makes the time to destination worse.
  - A wait factor of 2 was used to weight the waiting times.
    - Column (7) =  $(1-(5)/(6))$
    - Column (8) =  $(2)*(7)$ , accumulated over lines
    - Column (9) =  $60.0/(7) * 0.5 * \text{Wait Factor}$
    - Column (10) =  $(2)*(3)*(7)$ , accumulated over lines

Results of SFCM

Line	Frequency	Effective frequency	Cumulative frequency	Proportion of trips
1	5	5	5	0.406
2	6	5.5	10.5	0.446
3	2	1.483	11.983	0.12
4	1	0.343	12.326	0.028
5	1	-	-	-

Tabella 3.1.c Esempio di applicazione del modello a frequenza e costi.

Una volta disaggregati i fasci di percorso, viene associata agli interi percorsi una probabilità di uso, data dal prodotto delle probabilità condizionate dei fasci che li compongono.

Nel caso dinamico, vengono ancora utilizzati i modelli logit per la scelta della fermata di salita e della fermata di discesa, ma cambia il modello di scelta dei servizi. Il modello in

questione è identificato, all'interno di CUBE, dalla *Kirchoff power-function*, che ha una struttura del seguente tipo:

$$p [j] = C_j^{-\beta} / \sum_k C_k^{-\beta}$$

analoga a quella presentata nel modello teorico per il caso di comportamento adattivo intelligente. La probabilità di scelta di un percorso j dipende quindi dal suo costo generalizzato totale  $C_j$ , rapportato al costo cumulato degli altri percorsi disponibili. Il parametro  $\beta$  ha un ruolo, all'interno di questa funzione, analogo al ruolo di  $\lambda$  nella struttura logit: valori elevati di beta consentono una minore dispersione degli spostamenti tra le varie alternative, per cui molti spostamenti sono allocati all'alternativa migliore, mentre valori bassi di beta consentono una dispersione maggiore e quindi gli spostamenti sono allocati a molte alternative diverse.

Il comportamento dell'utente, in questo caso, è, di fatto, intelligente. Nella funzione di scelta dei servizi vengono inclusi tutti gli attributi di tipo dinamico, inerenti alle singole corse, oltre agli attributi relativi alle linee: vengono quindi messi in conto il disagio e i tempi di attesa dovuti al sovraffollamento e ai ritardi. Questo comportamento è effettivamente praticabile da tutti gli utenti se le fermate sono dotate di dispositivi che informano l'utenza in tempo reale sui ritardi delle corse; in caso contrario, soltanto gli utenti sistematici possono fare scelte di tipo intelligente in maniera consapevole, perché possono basarsi su una esperienza maggiore e una conoscenza della rete più vasta rispetto alle altre categorie di utenti.

### **3.1.7. ASSEGNAZIONE**

L'ultima fase della simulazione, ovvero l'assegnazione vera e propria, consente di ottenere i flussi di arco sull'intera rete, che vengono rappresentati graficamente in un file

apposito e numericamente in un file excel. È importante sottolineare che deve essere fornita una matrice O/D per ogni factors file presente, per cui ogni categoria di utenza deve avere la propria matrice distinta; nel mio caso, è stato possibile farlo, dal momento che avevo a disposizione la matrice del trasporto pubblico segmentata per motivi di viaggio e quindi dividibile in quattro sotto-matrici: lavoro, affari, studio e altri, ritorni a casa. I flussi di arco contenuti nei files di output sono quelli totali, dal momento che mi interessa confrontarli con i flussi rilevati alle fermate, che sono chiaramente totali.

Per assegnare le matrici occorre impostare alcune istruzioni, in un apposito file .s:

- *crowdmodel*;
- *adjustwait*;
- *adjustlink*;
- *period*;
- *iterations*.

L'istruzione *crowdmodel* fa riferimento al tipo di processo che deve essere utilizzato per assegnare le matrici alla rete, o meglio per "affollare" la rete, come dice il nome stesso. Si tratta di un processo iterativo che ricerca uno stato in cui i flussi di arco sono congruenti ai corrispondenti costi di arco, per cui gli utenti non tendono più a cercare un percorso che costi meno, ma rimangono su quello prescelto; il *crowdmodel* si identifica quindi in un'assegnazione stocastica all'equilibrio. Logicamente, può essere applicato soltanto se in precedenza è stato selezionato l'approccio *bestpathonly=false*, per cui i percorsi sono stati effettivamente valutati in modo stocastico; se invece è stato selezionato *bestpathonly=true*, i valori della matrice vengono direttamente caricati sull'unico percorso generato per loro. Il processo iterativo tende a convergere più

rapidamente con SFCM, piuttosto che con SFM, poiché è molto sensibile ai cambiamenti dei costi.

Ad ogni iterazione, è possibile aggiornare i tempi di percorrenza degli archi (se è attivata l'opzione *adjustlink*) e i tempi di attesa alle fermate (se è attivata l'opzione *adjustwait*) e i valori definitivi sono quelli ottenuti dall'ultima iterazione.

Il *link-travel-time-adjustment* dà la possibilità di conteggiare dei costi ulteriori per gli utenti che devono viaggiare in condizioni di affollamento; in altre parole, consente di modellare la percezione dei passeggeri che il tempo di percorrenza degli archi sia più oneroso stando in piedi che stando seduti, a maggior ragione quando viene raggiunta la capacità del mezzo. Si genera quindi una componente di costo, pesata da un apposito *crowding factor*, che va ad aggiungersi al tempo a bordo, pesato dal *runfactor*. Il *crowding factor* si può ricavare da apposite curve di affollamento, le *crowdcrvdef*, specificate per ciascuna classe di utenza; ciascuna curva può essere definita tramite una lista di coppie x-y, dove ogni x rappresenta una percentuale di utilizzo della linea e ogni y rappresenta un *crowding factor*; si tratta quindi di curve definite per punti, che devono necessariamente essere monotone non decrescenti, affinché il programma sia in grado di effettuare l'interpolazione lineare tra i vari punti (in maniera analoga alle *waitcrvdef*). In figura 3.1.6 è riportato un esempio di *crowdcrvdef*. La percentuale di utilizzo può variare, ovviamente, tra 0 e 100, mentre il *crowding factor* può variare tra 1 (in corrispondenza di x=0) e 1.4-1.5 per i passeggeri seduti, 1.5-3 per i passeggeri in piedi (in corrispondenza di x=100); questo significa che, quando la linea desiderata è satura, i passeggeri seduti percepiscono un tempo di percorrenza superiore del 40-50% a quello reale, mentre i passeggeri in piedi percepiscono un tempo di percorrenza fino a 2-3 volte superiore rispetto a quello reale; quando invece la linea è completamente inutilizzata, i passeggeri non percepiscono alcun costo di percorrenza aggiuntivo.

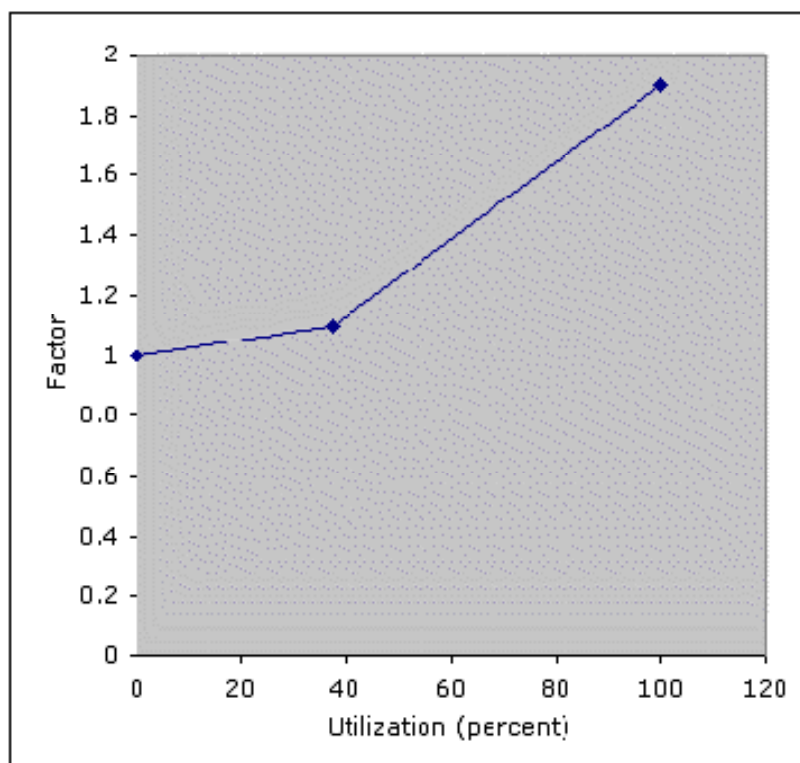


Figura 3.1.7 Un esempio di curva di affollamento per una linea; finché ci sono posti a sedere disponibili ( $x=40$ ), il crowding factor cresce molto lentamente, passando da 1 a 1.1, dopodiché cresce più rapidamente, fino a raggiungere il valore 1.9 quando la linea viene saturata ( $x=100$ ).

Il wait-time-adjustment permette di conteggiare costi ulteriori per gli utenti che attendono alle fermate in condizioni di affollamento, considerando la possibilità che non riescano a salire sul mezzo desiderato e debbano aspettare il mezzo successivo. Questa opzione riflette quindi l'effettiva probabilità di poter utilizzare un servizio, operando un confronto tra la capacità disponibile quando un mezzo arriva alla fermata e il numero di utenti che attende alla fermata stessa, e ridistribuendo i carichi iniziali, calcolati con SFM o SFCM, quando la capacità di una linea non è sufficiente per sopportare quei carichi. La domanda in eccesso viene riassegnata ad altre linee, oppure rimane insoddisfatta, se non ci sono altre linee in grado di garantire la capacità sufficiente; nel primo caso gli utenti possono proseguire il loro viaggio, ma con tempi di attesa maggiori, che vengono aggiunti alla componente tempo pesata dal waitfactor; nel secondo caso, gli utenti devono interrompere il loro viaggio.

Una volta impostate queste istruzioni, rimangono soltanto da definire i valori di period e iterations. Il primo deve essere congruente al periodo di riferimento di ciascuna matrice, 60 minuti nel mio caso. Il secondo deve essere il numero minimo che consente di raggiungere l'equilibrio, ovvero quella condizione in cui flussi e costi variano in maniera trascurabile; un valore minore comporta un errore concettuale, perché il processo di assegnazione non viene correttamente completato, mentre un valore maggiore comporta un allungamento inutile dei tempi di calcolo. Il limite al di sotto del quale le variazioni di flussi e costi possono considerarsi trascurabili, e quindi si può affermare che il processo di assegnazione converge verso flussi e costi stabili, può essere fissato a 0.0001 ( $10^{-4}$ ), come hanno dimostrato le esperienze di Boyce e altri (2004).

Il processo di assegnazione descritto è valido sia per il caso statico, che per il caso dinamico. L'unica differenza è nella scelta di period, perché, nel caso dinamico, l'intervallo deve essere ripartito nello stesso numero di sottointervalli in cui sono suddivisi gli orari desiderati di arrivo a destinazione; perciò, se gli utenti sono ripartiti in n fasce orarie, occorre scegliere un periodo equivalente a ciascuna fascia oraria e considerare soltanto le linee operanti in quella fascia, dopodiché si fa partire l'assegnazione in maniera separata per ciascuna fascia. Di fatto, questo procedimento equivale a disaggregare il processo aggregato del caso statico in n processi distinti.

Come output finali della fase di assegnazione, oltre ai flussi simulati, è possibile richiedere a CUBE anche una serie di matrici di skim, dove vengono inseriti i vari costi e tempi di percorrenza per ciascuna coppia O/D. Tali matrici risultano suddivise per classe di utenza, dal momento che l'intero procedimento è differenziato secondo il comportamento di ciascuna classe. I risultati che vi sono riportati sono utili per capire più a fondo il comportamento dei modelli di simulazione e per produrre eventuali statistiche sulle scelte dei passeggeri.



PARAMETRO	SIGLA	SPIEGAZIONE
best journey times	bestjrny	Estrae il tempo di viaggio minimo tra una coppia di zone.
number of boardings	brdings	Estrae il numero di saliti su tutti i percorsi che collegano una coppia di zone.
boarding penalty (perceived)	brdpen	Somma le penalità di salita per tutti gli utenti che viaggiano tra una coppia di zone.
composite costs	compcost	Somma i costi totali dei percorsi possibili tra una coppia di zone.
distance	dist	Estrae la distanza media dei percorsi possibili tra una coppia di zone.
excess demand	excessdemand	Estrae la domanda che rimane insoddisfatta tra una coppia di zone.
initial wait time (actual)	iwaita	Somma i tempi di attesa iniziali dei percorsi possibili tra una coppia di zone.
initial wait time (perceived)	iwaitp	Somma i tempi di attesa iniziali percepiti dei percorsi possibili tra una coppia di zone.
travel time (actual)	timea	Somma i tempi a bordo dei percorsi possibili tra una coppia di zone.
travel time (perceived)	timep	Somma i tempi a bordo (percepiti) dei percorsi possibili tra una coppia di zone.
value of choice	valofchoice	Fornisce un indice del livello di scelta offerto dal sistema, in base alla differenza tra il costo di viaggio medio e il composite cost per ciascuna coppia di zone.
transfer penalty (perceived)	xferpenp	Somma le penalità di trasbordo per tutti gli utenti che viaggiano tra una coppia di zone.
transfer wait times (actual)	xwaita	Somma i tempi di attesa nei nodi di trasbordo dei percorsi possibili tra una coppia di zone.
transfer wait times (perceived)	xwaitp	Somma i tempi di attesa (percepiti) nei nodi di trasbordo dei percorsi possibili tra una coppia di zone.

Tabella 3.1.d Le matrici di skim che vengono compilate al termine di una simulazione.

## **3.2. ANALISI DEI RISULTATI (CASO STATICO)**

I risultati di ogni simulazione sono stati messi a confronto con quelli delle altre simulazioni, dopodiché sono stati effettuati controlli a campione sui flussi simulati e sui saliti/discesi simulati alle fermate, utilizzando i dati provenienti da più serie di rilievi di traffico. Di seguito riporto le considerazioni che ho fatto per perfezionare il modello di simulazione statico.

### **3.2.1. VALUTAZIONE QUALITATIVA DEI FLUSSI**

In prima battuta, è stata fatta un'analisi di tipo qualitativo dei flussi simulati, con un duplice scopo:

- capire quali parametri incidono maggiormente sulla formazione dei flussi (analisi di significatività);
- capire come variano qualitativamente i flussi in funzione delle variazioni di tali parametri (analisi di sensibilità).

Dopo una serie di prove, ho dedotto che i parametri più significativi per la formazione dei flussi sono i seguenti:

- tempo massimo di accesso/egresso (maxcost);
- tempo massimo di trasbordo (maxcost);
- numero massimo di trasbordi (maxfers);
- differenza di costo rispetto al percorso di costo minimo (spread);
- tempo massimo di attesa (rewaitmax);
- coefficiente del modello logit (lambda);
- percentuale di scelte trascurate (choicecut);
- numero di iterazioni (iterations).

Ho infatti constatato che una benché minima variazione di uno di questi parametri apporta modifiche sostanziali ai valori dei flussi simulati. Le differenze sono state visibili fin dalle prime valutazioni qualitative, nel caso di maxcost, maxfers e rewaitmax; negli altri casi, è stato possibile evidenziare le differenze soltanto al momento del confronto quantitativo.

### **3.2.1.1. TEMPO MASSIMO DI ACCESSO/EGRESSO**

Su questo importante parametro ho effettuato un numero limitato di prove, sulle quali ho ragionato molto attentamente. È infatti impossibile controllare completamente i percorsi di accesso a un'area metropolitana vasta come quella di Milano con un unico processo di simulazione; occorrerebbe effettuare tante microsimulazioni, occupandosi di volta in volta di una singola zona, e unire poi i risultati, ma questo richiederebbe molto tempo e una serie di informazioni dettagliate sulle caratteristiche di tali percorsi. Peraltro, la conoscenza approfondita dei movimenti di accesso/egresso esula dagli scopi della mia tesi.

Il parametro maxcost consente però di controllarli indirettamente, andando ad escludere quelli che non trovano riscontro nella realtà. Questa strategia consente di limitare il numero di possibilità di movimento per le zone più distanti dalla rete e aumentarlo per le zone servite dalla rete stessa; gli utenti delle zone esterne, infatti, hanno effettivamente la possibilità di accedere lungo poche direttrici di traffico, mentre gli utenti delle zone interne possono muoversi radialmente e disporre di numerose fermate.

In base a queste considerazioni, ho assegnato agli archi di accesso/egresso valori di maxcost diversi, a seconda della distanza dei nodi dal perimetro dell'area urbana:

- nodi interni al perimetro (centroidi 1-589);
- centroidi esterni al perimetro, entro una distanza di 15 km (centroidi 590-608);

- centroidi esterni al perimetro, oltre una distanza di 15 km (centroidi 626, 633, 636, 641, 643).

Per quanto riguarda i centroidi esterni al perimetro, che sono in numero contenuto ( $18+5=23$ ) e sfruttano poche direttrici di traffico, ho potuto controllarli ad uno ad uno, assicurandomi che le connessioni generate rispecchiassero quelle reali. Ho perciò dato la possibilità ai 5 centroidi più lontani di accedere alla rete di Milano soltanto con modalità ferroviaria, con maxcost pari a 30 minuti; essendo i centroidi in prossimità del cordone, ed avendo impostato la velocità di percorrenza degli archi di accesso a 60 km/h, tale valore consente agli utenti di accedere effettivamente alla rete, a partire da una stazione ferroviaria. Non ho consentito l'accesso modalità automobilistica perché non esistono autolinee che servono queste tratte e l'automobile su tali distanze non è competitiva, in particolare nella fascia oraria di punta del mattino, peraltro gli utenti in questione hanno già scelto le modalità di trasporto collettivo per muoversi a Milano e quindi è ragionevole che siano portati ad utilizzare una modalità di trasporto collettivo anche per l'accesso alla rete. È possibile che ci sia un numero limitato di persone (qualche unità) che accede alla rete servendosi del trasporto aereo; purtroppo, alla scala a cui ho lavorato io questo fenomeno non è rappresentabile, ma, siccome riguarda un numero limitato di utenti, non provoca un errore significativo nella formazione dei flussi.

Per quanto riguarda i 18 centroidi interni al cordone, ho dato la possibilità di accedere alla rete di Milano con modalità ferroviaria e automobilistica, con maxcost pari a 15 minuti; essendo i centroidi in prossimità del perimetro dell'area urbana, ed avendo impostato la velocità di percorrenza degli archi di accesso a 60 km/h, tale valore consente agli utenti di accedere effettivamente alla rete, a partire da una stazione metropolitana o ferroviaria. Il valore di velocità potrebbe essere significativamente più

elevato di quello reale in condizioni di congestione, che possono facilmente verificarsi nella fascia oraria considerata; questa eventualità si potrebbe verificare con una serie di micro simulazioni, almeno una per zona.

Per quanto riguarda i centroidi interni al perimetro di area urbana, non è stato possibile effettuare il controllo singolarmente, poiché gli utenti delle zone interne possono muoversi radialmente in tutte le direzioni e disporre di numerose fermate di accesso. In questo caso, ho quindi interpretato il valore di maxcost come il tempo di camminamento accettabile per accedere ad una modalità di trasporto collettivo e l'ho fissato a 10 minuti per le autolinee, le tranvie e le filovie, a 20 minuti per le metropolitane e i treni; ciò equivale ad assumere che un utente accetta di percorrere una distanza inferiore o uguale a 800 metri nei primi tre casi, 1600 metri negli ultimi due casi. Nella realtà, tale distanza può anche essere percorsa con una modalità diversa da quella pedonale (park and ride, kiss and ride, bike and ride); questa eventualità si potrebbe verificare con una serie di micro simulazioni, ma, per gli scopi della mia tesi, mi basta sapere che gli utenti effettivamente coprono tale distanza e che la velocità di accesso è di circa 5 km/h<sup>11</sup>.

Seguendo questi criteri, sono stati generati 4830 archi di accesso/egresso, che sono stati utilizzati per tutte le simulazioni successive.

### **3.2.1.2. TEMPO MASSIMO DI TRASBORDO**

Sono state effettuate numerose prove sul parametro maxcost, per generare archi di trasbordo rappresentativi dei movimenti reali degli utenti. I valori sono stati aumentati progressivamente e sono stati differenziati per modalità di trasporto di arrivo; le prove sono riassunte nella tabella seguente:

---

<sup>11</sup> Essendo in un contesto urbano in condizioni di congestione, la velocità raggiungibile con altre modalità di accesso, tenendo conto dei vari perditempo, non è di molto superiore a questo valore.

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4	PROVA 5	PROVA 6
MAXCOST [metro]	2	4	6	8	10	12
MAXCOST [filobus]	1	2	3	4	5	6
MAXCOST [tram]	1	2	3	4	5	6
MAXCOST [autobus]	1	2	3	4	5	6
MAXCOST [autobus e]	1	2	3	4	5	6
MAXCOST [treni]	2	4	6	8	10	12

Tabella 3.1.e Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro maxcost.

Prendendo come esempio la prova 1, il programma genera archi di trasbordo che comportano un tempo di percorrenza minore o uguale a 2 minuti, se la modalità raggiunta è metropolitana o treno, mentre genera archi di trasbordo che comportano un tempo di percorrenza minore o uguale a 2 minuti, se la modalità raggiunta è di altro tipo. Questo equivale ad assumere che l'utente accetta di percorrere fino a 165 metri, alla velocità di 5 km/h, per effettuare un interscambio con una metropolitana o un treno, mentre accetta di percorrere fino a 83 metri per effettuare un interscambio con modalità di altro tipo. La logica alla base delle altre prove è analoga, vengono semplicemente estesi i limiti superiori del parametro.

Nel passaggio da un set di valori all'altro, i flussi per modalità subiscono delle variazioni comprese tra lo 0 e l'8%, in positivo o in negativo; i flussi totali, invece, variano soltanto dell'1-3%, mentre la ripartizione modale rimane pressoché costante.

Modificando il set di valori di maxcost, quindi, c'è una redistribuzione dei flussi prevalentemente tra linee della stessa modalità; questo aspetto sarà ben evidente, e soprattutto determinante, nel confronto quantitativo dei flussi.

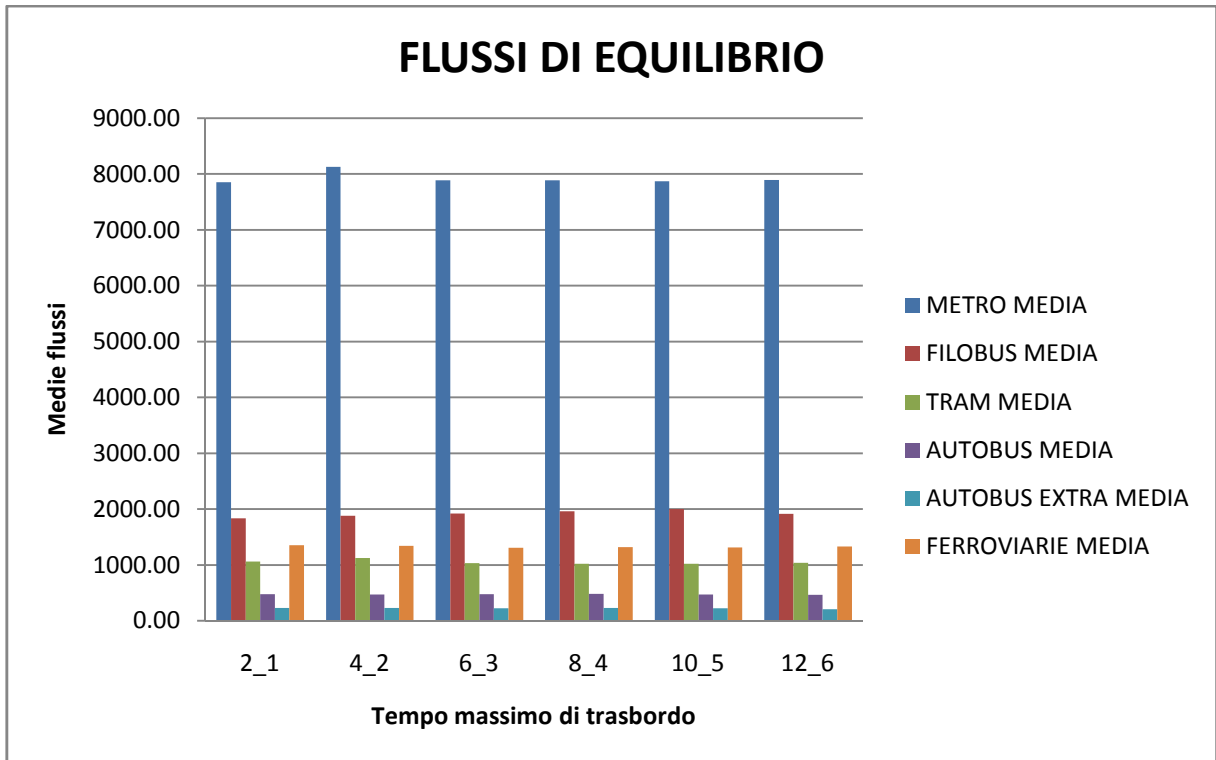


Grafico 3.1.i Risultati delle prove eseguite per maxcost - flussi per modalità.

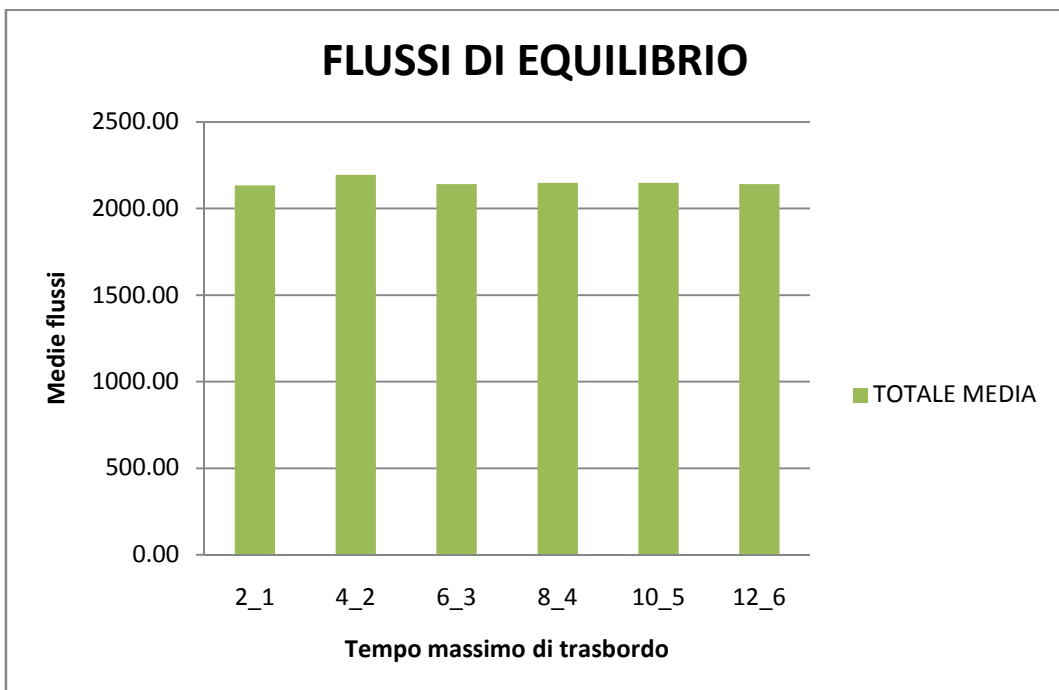


Grafico 3.1.ii Risultati delle prove eseguite per maxcost - flussi totali.

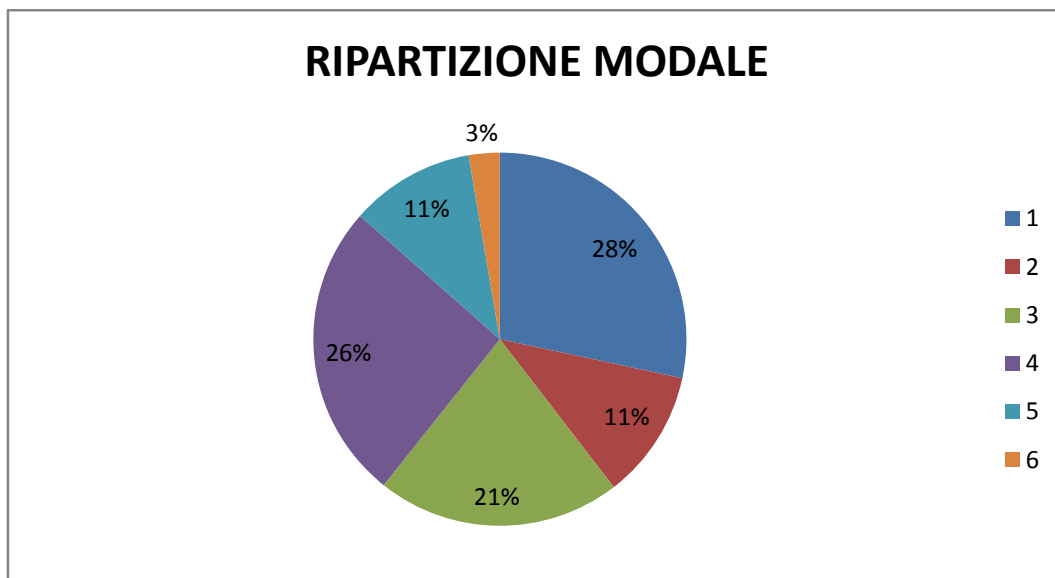


Grafico 3.1.iii Risultati delle prove eseguite per maxcost - ripartizione modale.

### 3.2.1.3. NUMERO MASSIMO DI TRASBORDI

Per quanto riguarda il numero di trasbordi, sono state effettuate diverse prove, che vengono riassunte nella tabella seguente:

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4	PROVA 5
MAXFERS LAVORATORI	1	1	1	2	3
MAXFERS AFFARI	1	2	2	2	3
MAXFERS STUDIO E ALTRO	1	2	2	2	3
MAXFERS RITORNI A CASA	1	1	2	2	3

Tabella 3.1.f Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro maxfers.

I valori di maxfers sono stati differenziati per ciascuna classe di utenza, ipotizzando che gli utenti potessero avere esigenze diverse in merito. Le prove si sono concentrate nell'intervallo 1-2, che si è dimostrato il più significativo: infatti, passando dalla prova 1 alla prova 4 i flussi totali aumentano di circa il 30%, i flussi per modalità aumentano tra il 20 e il 40%, mentre la ripartizione modale si mantiene pressoché costante.



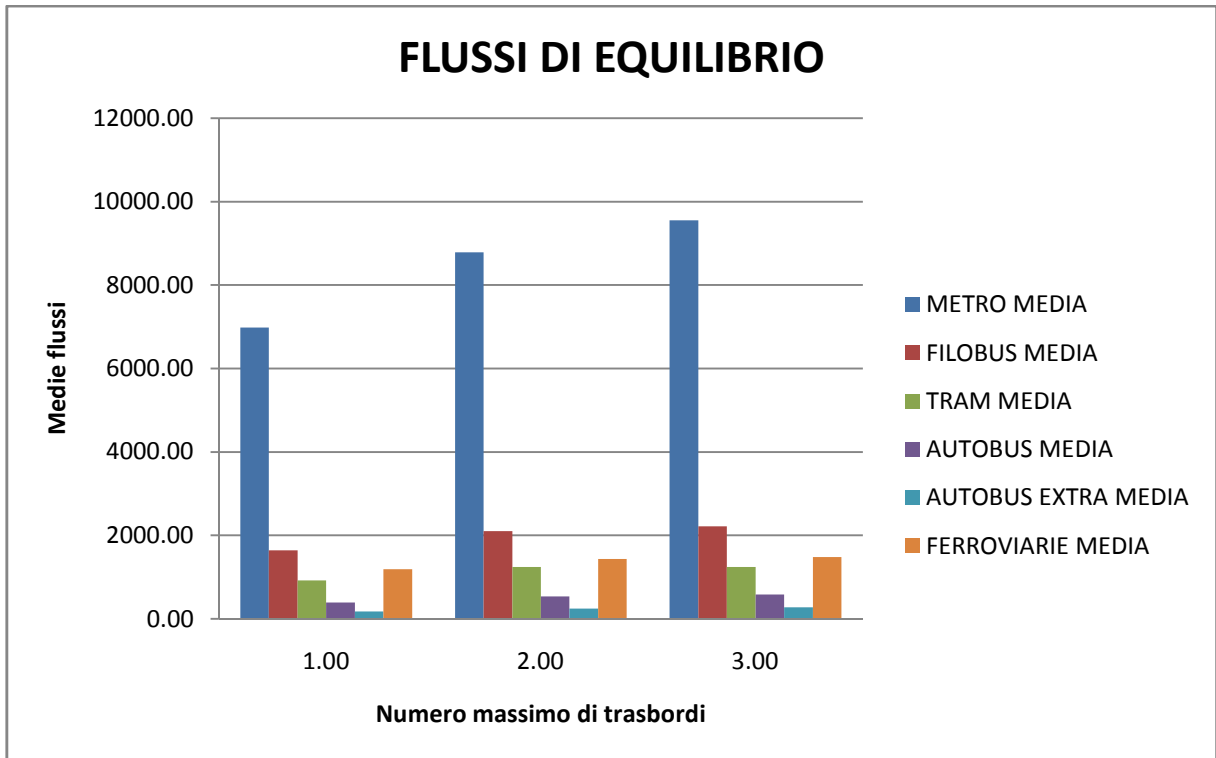


Grafico 3.1.iv Risultati delle prove eseguite per maxfers - flussi per modalità.

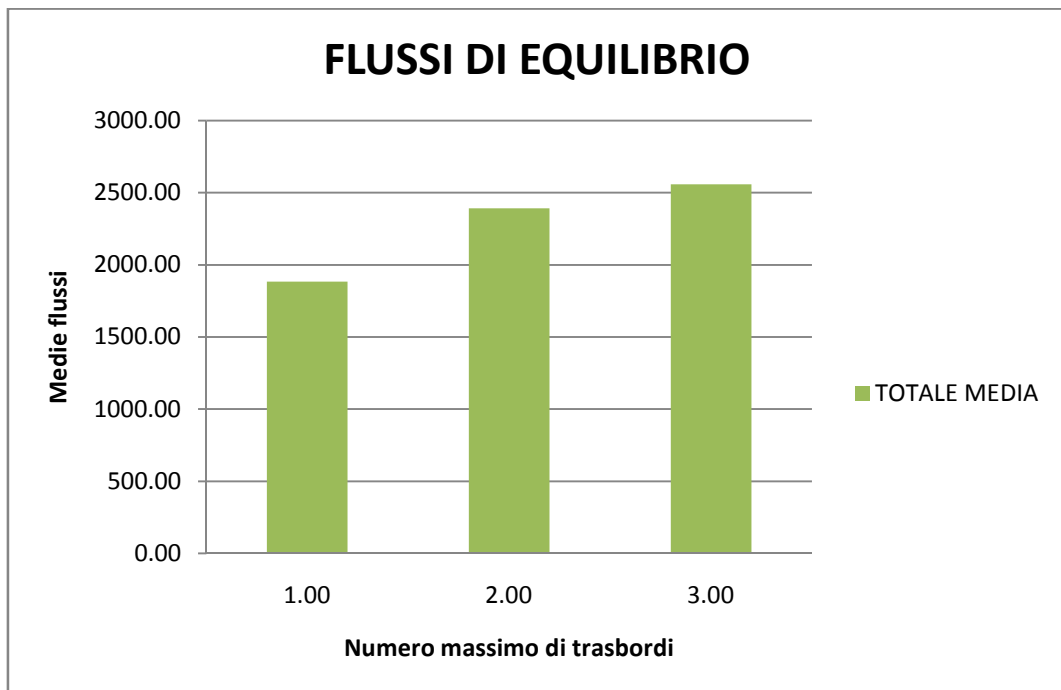


Grafico 3.1.v Risultati delle prove eseguite per maxfers - flussi totali.

Nel passaggio da 2 a 3 si riscontrano ancora aumenti, ma più contenuti, attorno al 3-10% per singola modalità e 6-7% per il totale. Per valori di maxfers uguali o maggiori a 3, i flussi restano pressoché costanti; ciò significa che non ci sono alternative di percorso con più di tre trasbordi che rispettino le altre esigenze degli utenti.

Aumentando il set di valori di maxfers, il programma consente di costruire ed enumerare un numero maggiore di percorsi; vengono infatti considerati anche percorsi che includono più di due linee di trasporto. Ciò equivale ad assumere che un utente, nel medesimo intervallo di riferimento, transita su più mezzi di trasporto e contribuisce alla formazione dei flussi su più modalità, provocando gli aumenti di flussi descritti.

#### **3.2.1.4. TEMPO MASSIMO DI ATTESA**

Per quanto riguarda il tempo massimo di attesa, sono state effettuate diverse prove, che vengono riassunte nella tabella seguente:

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3
REWAITMAX LAVORATORI	5	5	15
REWAITMAX AFFARI	5	15	30
REWAITMAX STUDIO E ALTRO	5	15	30
REWAITMAX RITORNI A CASA	5	15	30

Tabella 3.1.g Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro rewaitmax.

Anche questi valori sono stati differenziati per classe di utenza, ritenendo che i lavori siano disposti ad accettare tempi di attesa minori rispetto alle altre categorie.

Aumentando il set di valori di rewaitmax, i flussi totali aumentano del 4-5%, i flussi per modalità variano tra l'1 e il 5%, in positivo o in negativo, mentre la ripartizione modale si mantiene pressoché costante.

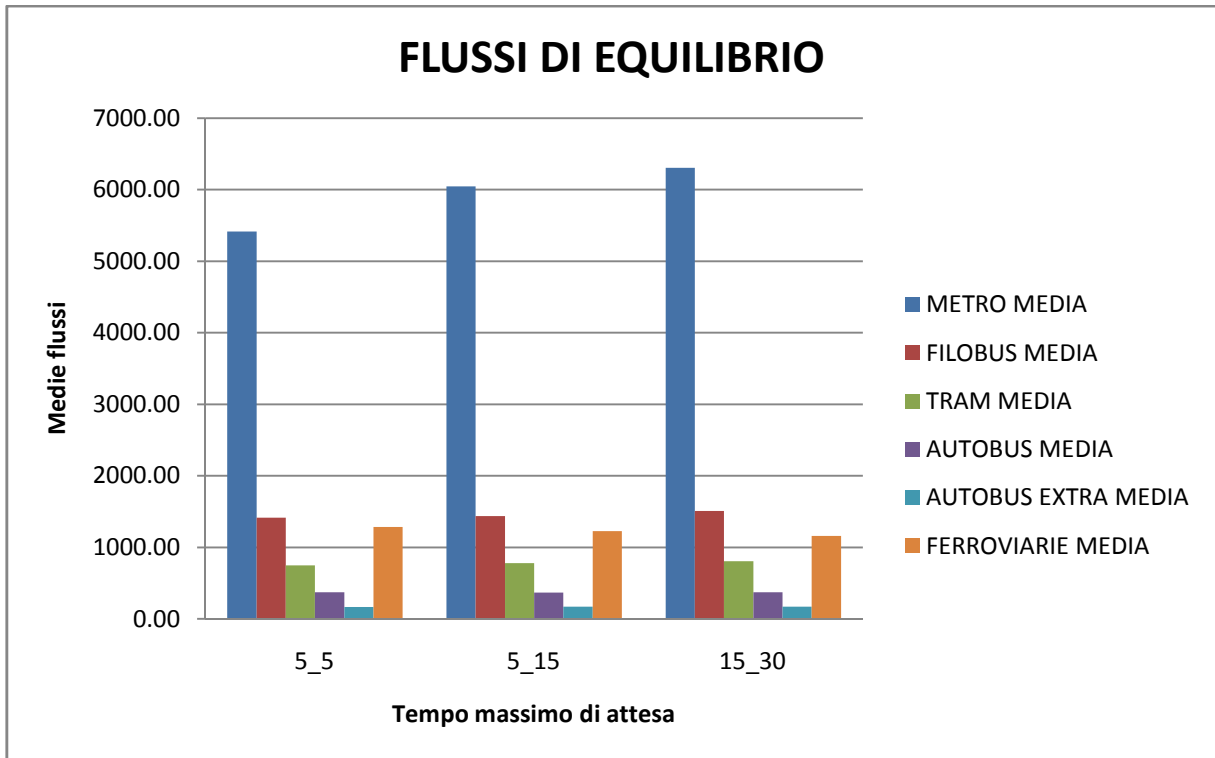


Grafico 3.1.vi Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - flussi per modalità.

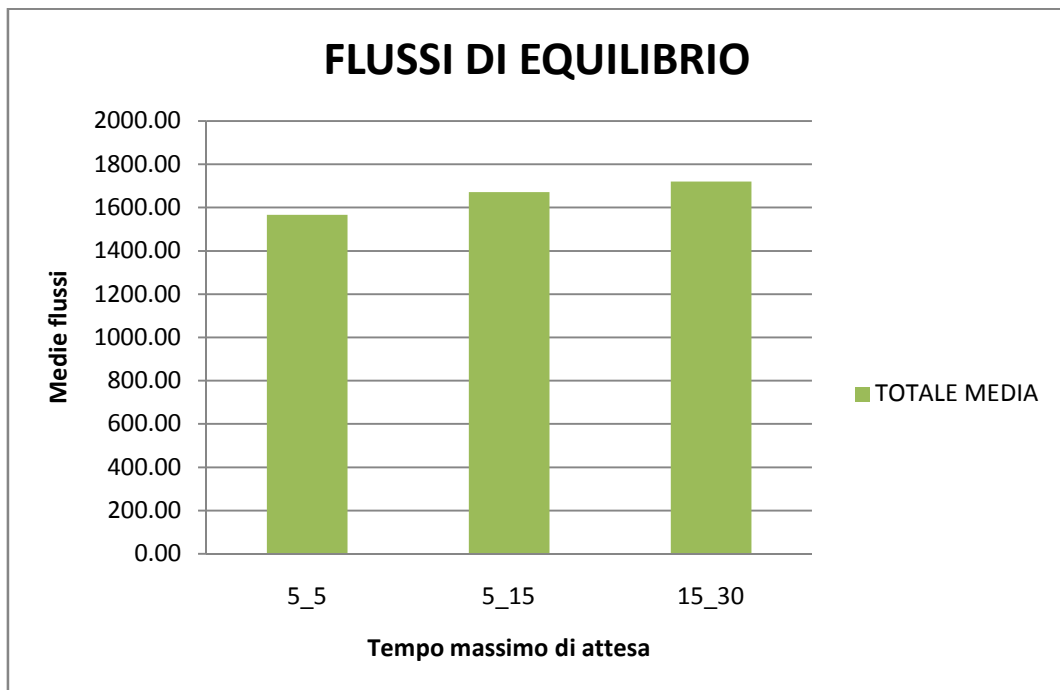


Grafico 3.1.vii Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - flussi totali.

Al crescere dei valori di *rewaitmax*, il programma consente di costruire ed enumerare un numero maggiore di percorsi; vengono infatti considerati anche percorsi che includono linee con frequenze minori e quindi tempi di attesa più elevati. Anche in questo caso, la redistribuzione dei flussi avviene prevalentemente nell'ambito della stessa modalità.

### **3.2.1.5. ALTRI PARAMETRI**

Per quanto riguarda tutti gli altri parametri significativi, non sono state riscontrate variazioni rilevanti tra le varie prove, da un punto di vista qualitativo; i grafici che ho prodotto, analoghi a quelli riportati per i parametri precedenti, vengono quindi omessi.

### **3.2.2. CONFRONTO DEI FLUSSI**

Questa è la parte più importante dell'analisi dei risultati, poiché serve per verificare la capacità del modello di riprodurre la realtà. È stato operato un confronto dei flussi simulati su 171 archi di rete, utilizzando i rilievi dei flussi misurati in 89 fermate (di cui 82 in entrambe le direzioni); tali valori sono esigui rispetto al numero totale di archi di transito (circa 7000 dei 33000 totali che compongono il grafo), ma sono sufficienti per verificare la capacità del modello di avvicinarsi ai flussi reali.

Il confronto è stato operato secondo due criteri differenti; il primo è il criterio degli scarti quadratici:

$$\sum_a \{(f_{a,rit} - f_{a,sim})^2 / f_{a,rit}\}$$

suggerito da J. De D. Ortúzar e L. G. Willumsen.

Il secondo è il criterio delle differenze assolute:

$$\sum_a ASS(f_{a,rit} - f_{a,sim})$$

Ho deciso di adottare due criteri perché, talvolta, mi sono trovata a dover scegliere tra valori di parametri che presentavano una somma di scarti simile, ma una somma di

differenze assolute sensibilmente diversa; l'adozione di entrambi i metodi mi ha allora consentito di compiere la scelta. D'altro canto, non avrei potuto utilizzare soltanto il criterio delle differenze assolute, in sostituzione all'altro, perché, se da una parte consente di avere la giusta proporzione degli errori che si compiono relativamente a valori bassi, ma non è altrettanto efficace quando viene applicato a valori elevati di flussi. L'altro, invece, è efficace se applicato sia a valori elevati che a valori bassi dei flussi, ma non è preciso quanto il primo. Queste proprietà si possono osservare con un semplice esempio. Si consideri un flusso rilevato su un arco di una linea di metropolitana, pari a 10000 passeggeri/ora, a cui corrisponde un flusso simulato di 8000 passeggeri/ora; in questo caso, il criterio di Ortùzar e Willumsen fornisce un valore di scarto pari a 400, mentre il criterio delle differenze assolute un valore pari a 2000. Il valore 2000 non consente di evidenziare che tra flusso simulato e rilevato c'è effettivamente una prossimità, seppure la differenza in valore assoluto tra i due sia grande, poiché sono grandi i due flussi confrontati; il valore 400, invece, consente di conteggiare un errore minore, basandosi sul fatto che il flusso simulato è inferiore soltanto del 20% rispetto al valore rilevato. Si consideri ora un flusso rilevato su un arco di una linea di autobus, pari a 100 passeggeri/ora, a cui corrisponde un flusso simulato di 10 passeggeri/ora; in questo caso, il criterio di Ortùzar e Willumsen fornisce un valore di scarto pari a 81, mentre il criterio delle differenze assolute un valore pari a 90. In questa situazione entrambi i criteri sono efficienti, per cui posso utilizzare il secondo per "affinare" i risultati del primo.

Per facilitare la verifica, ho compilato una tabella in cui ho elencato i flussi di arco rilevati in ogni fermata, il numero del nodo del grafo corrispondente alla fermata e i flussi simulati per l'arco in arrivo in quel nodo; l'ho poi completata con le formule riportate sopra, che mi hanno consentito di operare il confronto. Di seguito riporto uno stralcio di tabella:

FERROVIARIE	FERMATA	NODO	DATA	DIREZIONE	SIM	RIL	SCARTO	DIFFER.
S1	Porta Venezia	2132	09/12/2010	centro	1315	1360	1.49	45
S2	Porta Venezia	2132	09/12/2010	centro	1052	860	42.87	192
S3	Bovisa	5425	30/11/2010	centro	1325	1280	1.58	45
S4	Bovisa	5425	30/11/2010	centro	2008	1450	214.73	558
S5	Porta Venezia	2132	09/12/2010	centro	1702	1070	373.29	632
S6	Porta Venezia	2132	09/12/2010	centro	1702	1270	146.95	432
S8	Greco Pirelli	4393	14/12/2010	centro	1058	1130	4.59	72
S9	Greco Pirelli	4393	14/12/2010	centro	580	870	96.67	290
S10	Bovisa	5425	30/11/2010	centro	797	770	0.95	27
S11	Greco Pirelli	4393	14/12/2010	centro	1058	1090	0.94	32

Tabella 3.1.h Prospetto del foglio excel utilizzato per il confronto dei flussi.

### 3.2.2.1. TEMPO MASSIMO DI TRASBORDO

È stato operato un confronto dei flussi simulati nelle 6 prove descritte in precedenza per maxcost; utilizzando il criterio di Ortúzar e Willumsen, si sono ottenuti i seguenti risultati:

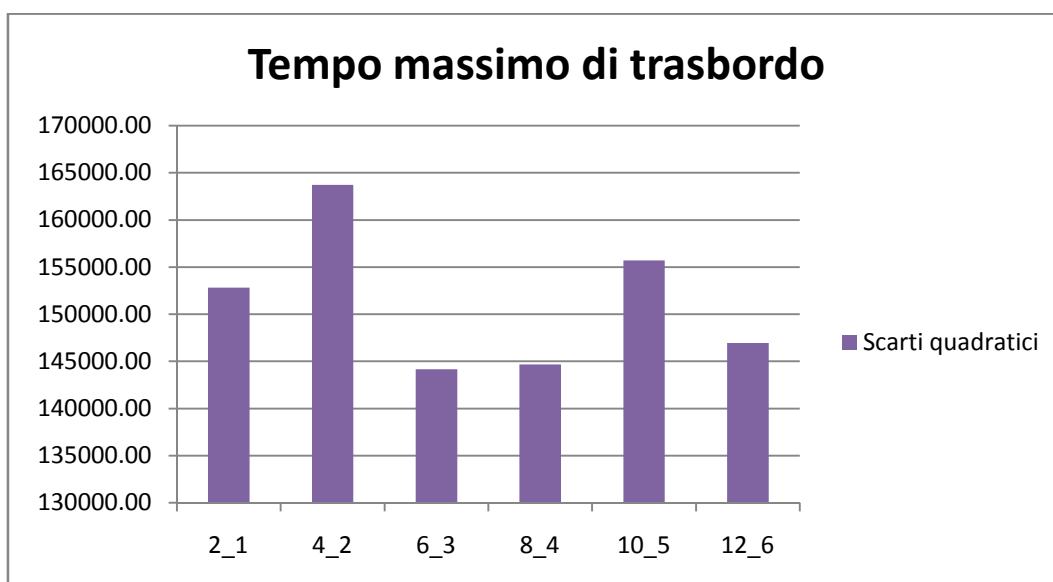


Grafico 3.1.viii Risultati delle prove eseguite per maxcost – confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.

Il confronto col criterio delle differenze assolute, invece, ha prodotto i seguenti risultati:

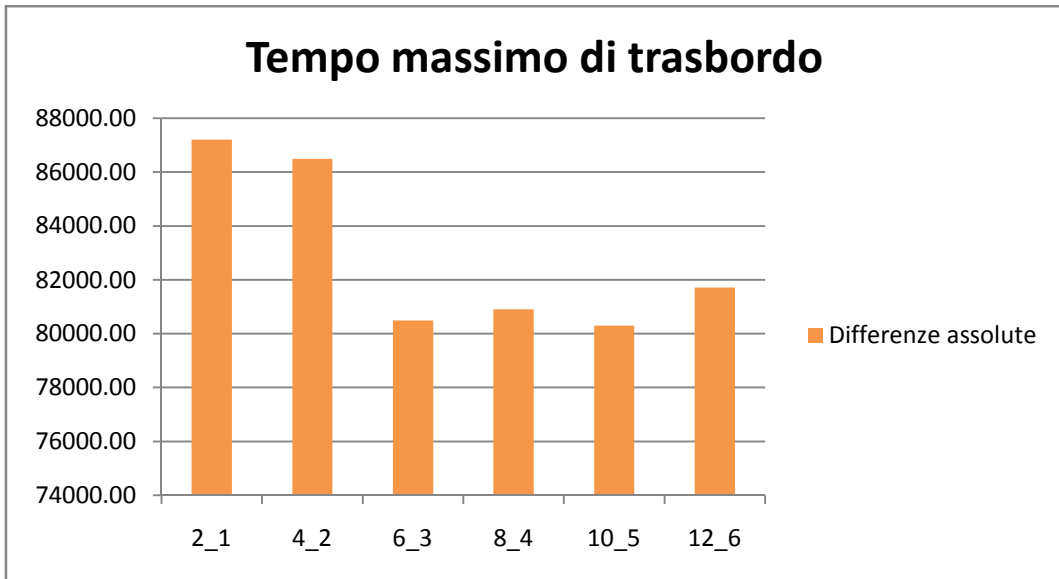


Grafico 3.1.ix Risultati delle prove eseguite per maxcost – confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.

Come si può vedere dai grafici, il terzo set di valori consente di rendere minima la somma degli errori, sia in termini di scarti quadratici, sia in termini di differenze assolute. Questo set di valori ha anche il vantaggio di generare un numero contenuto di archi di trasbordo, come si può osservare nel grafico seguente:

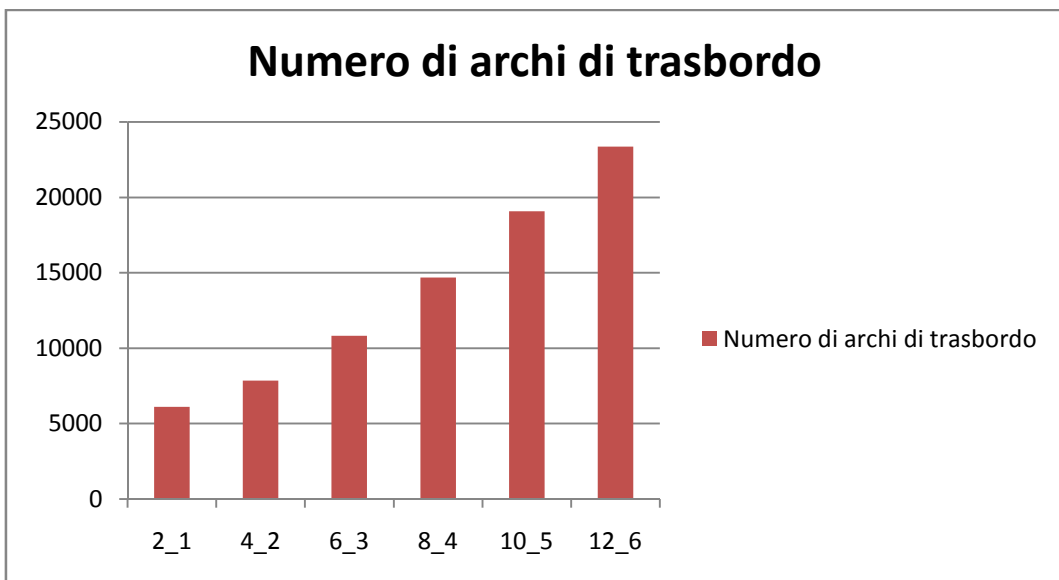


Grafico 3.1.x Risultati delle prove eseguite per maxcost - numero di archi generati.

In tal caso, vengono infatti generati 10819 archi di trasbordo, i quali, aggiunti ai 4869 archi di accesso/egresso (tutti bidirezionali), danno un totale di 15688 archi generati. Un numero relativamente contenuto di archi generati consente di rendere più semplice e veloce la costruzione e l'enumerazione dei percorsi, dal momento che ci sono meno fasci di percorso da prendere in considerazione.

Per tutti questi motivi, il terzo set di valori è stato validato e utilizzato per le simulazioni successive. Ciò equivale ad assumere che gli utenti accettano di percorrere una distanza massima di circa 500 metri per effettuare un interscambio con una linea metropolitana o ferroviaria, circa 250 metri per effettuare un interscambio con una linea tranviaria, automobilistica o filoviaria. Questi valori sembrano ragionevoli e rappresentativi della situazione reale: infatti, i trasbordi avvengono solitamente nell'ambito della stessa fermata, o di due fermate prossime e ben collegate, e le fermate di Milano presentano percorsi pedonali compresi tra qualche decina e qualche centinaio di metri. Tali valori sembrano ancora più ragionevoli se il numero di interscambi accettato è ridotto, come in effetti si verificherà nel prossimo paragrafo.

#### **3.2.2.2. NUMERO MASSIMO DI TRASBORDI**

È stato operato un confronto dei flussi simulati nelle 5 prove descritte in precedenza per maxfers, su 171 archi di rete; utilizzando il criterio di Ortúzar e Willumsen, si sono ottenuti i seguenti risultati:



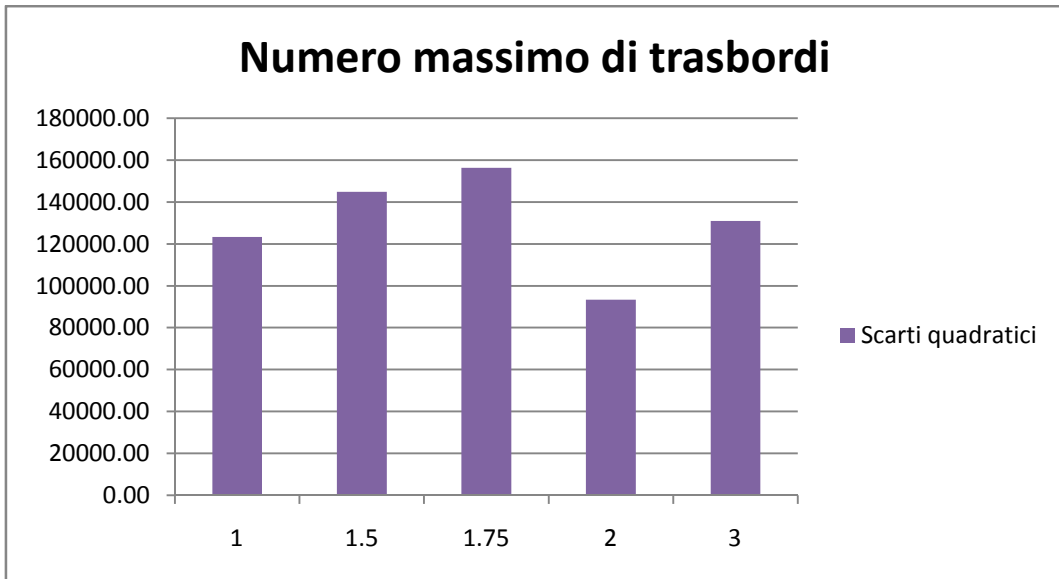


Grafico 3.1.xi Risultati delle prove eseguite per maxfers – confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.

Utilizzando, invece, il criterio delle differenze assolute, si sono ottenuti i seguenti risultati:

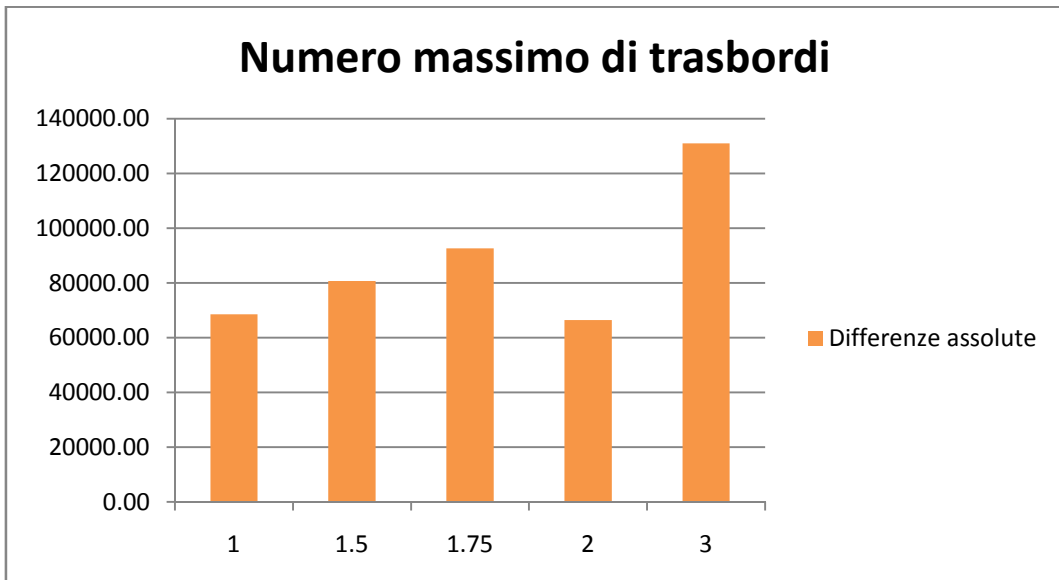


Grafico 3.1.xii Risultati delle prove eseguite per maxfers – confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.

Come si può vedere dai grafici, il quarto set di valori consente di rendere minima la somma degli errori, sia in termini di scarti quadratici, sia in termini di differenze assolute; in base a questi risultati, il set è stato validato e utilizzato per le simulazioni successive. Ciò equivale ad assumere che tutti gli utenti compiono, al più, due trasbordi; questa assunzione non è certamente del tutto corretta, poiché, nella realtà, c'è senz'altro qualche utente che ne compie più di due nella fascia oraria considerata. La rappresentazione modellistica, però, ha un certo livello di aggregazione, che corrisponde alla suddivisione in 4 classi di utenti, e l'aggregazione non consente di assumere un valore per ciascun utente, ma impone di assumere un valore rappresentativo per ciascuna classe, con il minor margine di errore possibile; è in tal senso che il set di valori scelto viene ritenuto valido.

### 3.2.2.3. TEMPO MASSIMO DI ATTESA

Per quanto riguarda il tempo massimo di attesa, sono state effettuate prove in numero maggiore rispetto a quelle descritte in precedenza; il tutto viene riassunto nella tabella seguente:

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4	PROVA 5	PROVA 6
REWAITMAX LAVORATORI	5	5	5	10	15	30
REWAITMAX AFFARI	5	10	15	20	30	45
REWAITMAX STUDIO E ALTRO	5	10	15	20	30	45
REWAITMAX RITORNI A CASA	5	10	15	20	30	45

Tabella 3.1.i Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro rewaitmax.

Utilizzando il criterio di Ortúzar e Willumsen, il confronto ha prodotto i seguenti risultati:

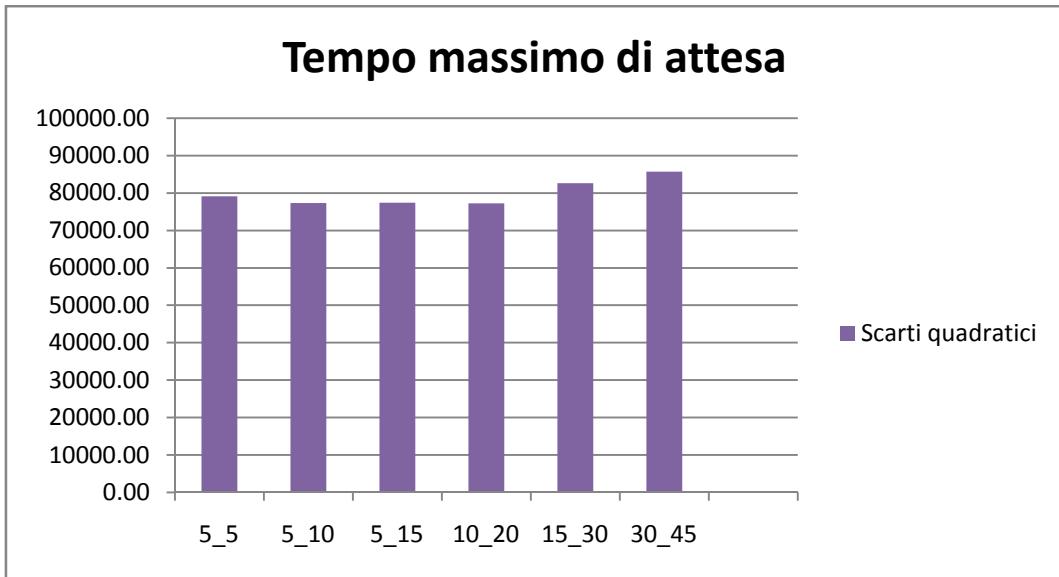


Grafico 3.1.xiii Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.

Utilizzando, invece, il criterio delle differenze assolute, il confronto ha prodotto i seguenti risultati:

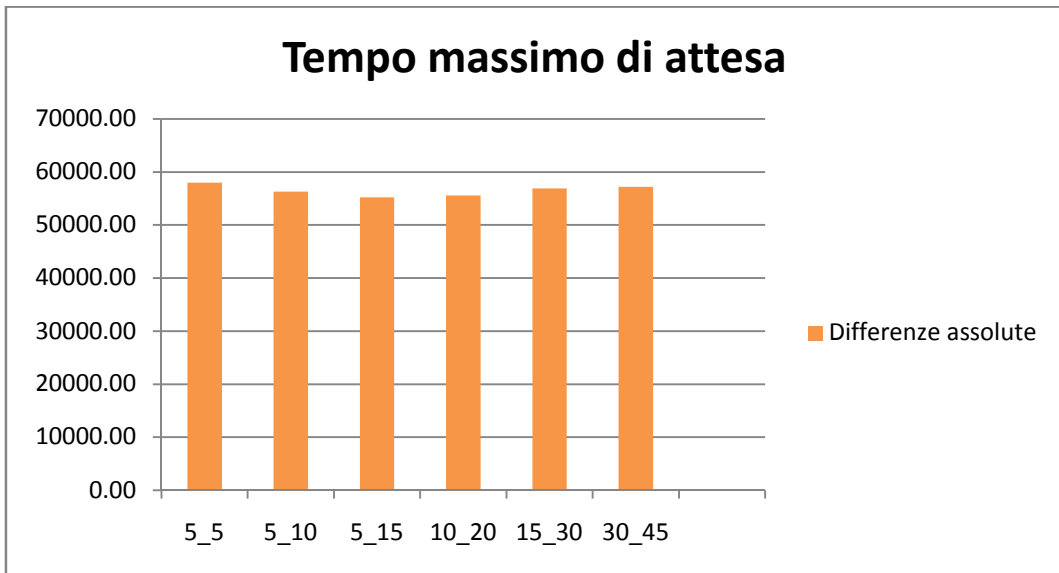


Grafico 3.1.xiv Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.

In questo caso, non ci sono grandi differenze tra i risultati prodotti dai vari set di valori; in particolare, il terzo e quarto set lasciano margini di errore praticamente equivalenti. Tra i due, ho preferito utilizzare il terzo, perché consente di accelerare, seppure di poco, la costruzione ed enumerazione dei percorsi.

Ritengo che questo parametro non sia particolarmente sensibile all'interno di un modello statico perché non sono tenuti in considerazione gli orari di arrivo effettivo delle corse e i relativi ritardi; mi aspetto perciò che si riveli più sensibile all'interno di un modello di tipo dinamico.

### 3.2.2.4. DIFFERENZA DI COSTO

Il parametro spread, insieme ai parametri maxfers e rewaitmax, governa la fase di costruzione ed enumerazione dei percorsi; non potevo quindi escluderlo da una serie di prove sistematiche, seppure le prime che ho eseguito non hanno fornito risultati sensibilmente diversi. Ho perciò effettuato le prove riassunte nella tabella seguente:

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4	PROVA 5	PROVA 6
SPREAD LAVORATORI	+20%	+30%	+40%	+10	+15	+30
SPREAD AFFARI	+50%	+60%	+80%	+10	+20	+40
SPREAD STUDIO E ALTRO	+50%	+60%	+80%	+10	+20	+40
SPREAD RITORNI A CASA	+50%	+60%	+80%	+10	+20	+40

Tabella 3.1.j Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro spread.

Nelle prime tre prove, sono stati costruiti i percorsi aggiungendo una percentuale di costo al costo del percorso di costo minimo; negli altri casi, è stato aggiunto un valore in minuti al costo del percorso di costo minimo. Si prendano come esempio due zone, A e B, collegate da un percorso di costo minimo che comporta 20 minuti di percorrenza; si possono prendere in considerazione tutti i percorsi che comportano fino al 30% di

tempo in più, per cui fino a 26 minuti di percorrenza, oppure fino a 30 minuti in più, per cui fino a 50 minuti di percorrenza. La seconda strategia è più facile da controllare rispetto alla prima, poiché sono in grado di sapere immediatamente quanto tempo è disposto ad aspettare l'utente a una fermata, senza dover prendere in considerazione di volta in volta la lunghezza del percorso. La stessa strategia è anche quella più rappresentativa della situazione reale; la maggior parte degli utenti, infatti, non quantifica il tempo di attesa in base alla lunghezza del proprio percorso, ma tende a imporsi un tempo massimo in base al proprio motivo di spostamento.

Utilizzando il criterio di Ortùzar e Willumsen, il confronto ha prodotto i seguenti risultati:

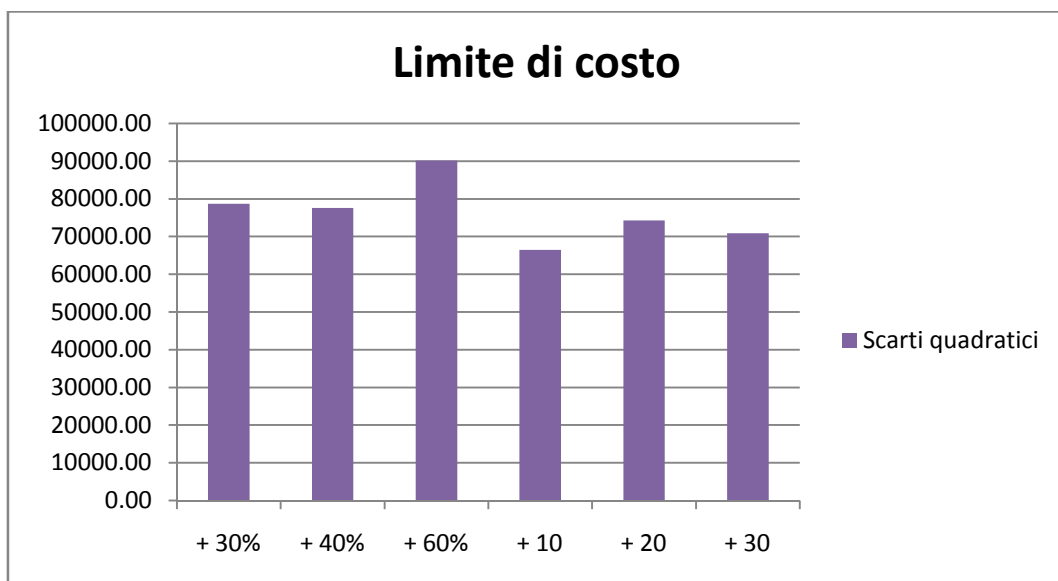


Grafico 3.1.xv Risultati delle prove eseguite per spread - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.

Utilizzando, invece, il criterio delle differenze assolute, il confronto ha prodotto i seguenti risultati:

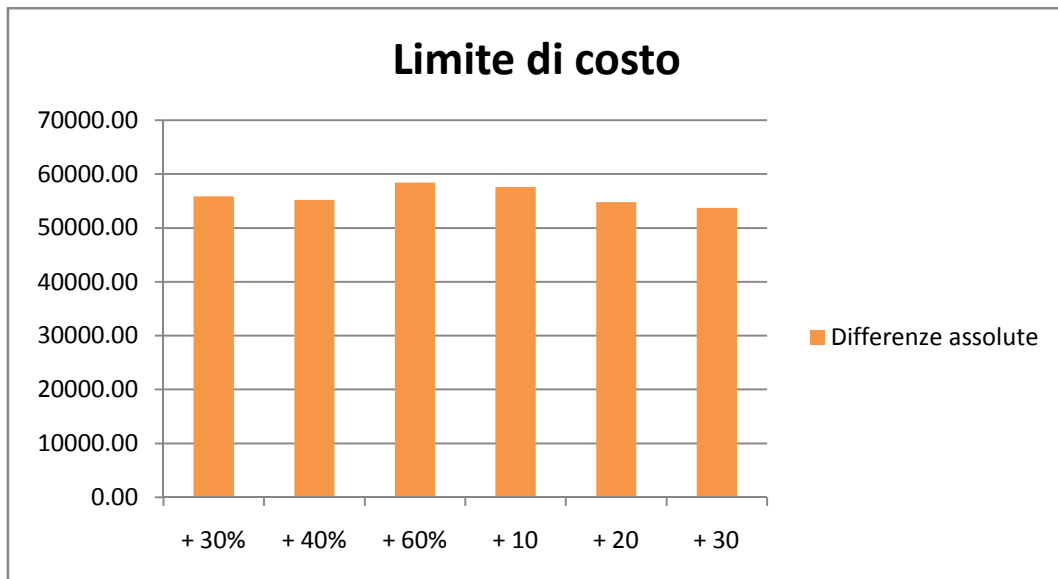


Grafico 3.1.xvi Risultati delle prove eseguite per spread - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.

In questo caso, domina il criterio degli scarti quadratici, e mi consente di validare il quarto set di valori; ciò equivale ad assumere che ciascun utente prende in considerazione percorsi che sfiorano fino a 10 minuti rispetto al percorso di costo minimo. Questo non significa che tali percorsi verranno effettivamente scelti; la fase di valutazione dei percorsi, infatti, assegnerà una probabilità bassa o nulla di scelta ai percorsi che comportano tempi totali elevati. È però opportuno prendere in considerazione più percorsi, lasciando al modello il compito di escluderli o meno, piuttosto che prenderne in considerazione una quantità limitata e rischiare di escludere a priori percorsi che vengono realmente utilizzati.

### 3.2.2.5. COEFFICIENTE DEL MODELLO LOGIT

Il coefficiente del modello logit è il parametro più significativo della fase di valutazione dei percorsi. Viene assunto lo stesso coefficiente sia per la scelta della fermata di salita, sia per la scelta della fermata di discesa ( $\lambda_{daw} = \lambda_{daa}$ ). Per selezionare i valori del parametro  $\lambda$  sono state effettuate le prove riassunte nella tabella seguente:

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4	PROVA 5	PROVA 6	PROVA 7
$\lambda$ LAVORATORI	1	2	4	6	8	10	16
$\lambda$ AFFARI	0.4	0.8	1.6	2.4	3.2	4	6.4
$\lambda$ STUDIO E ALTRO	0.4	0.8	1.6	2.4	3.2	4	6.4
$\lambda$ RITORNI A CASA	1	2	4	6	8	10	16

Tabella 3.1.k Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro lambda.

Sono stati inseriti valori più alti per i lavoratori e coloro che ritornano a casa rispetto alle altre categorie di utenti, supponendo che, in virtù del loro motivo di spostamento e della migliore conoscenza della rete, tendano a scegliere i percorsi che si distaccano meno dal percorso di minimo costo.

Utilizzando il criterio di Ortùzar e Willumsen, si sono ottenuti i seguenti risultati:

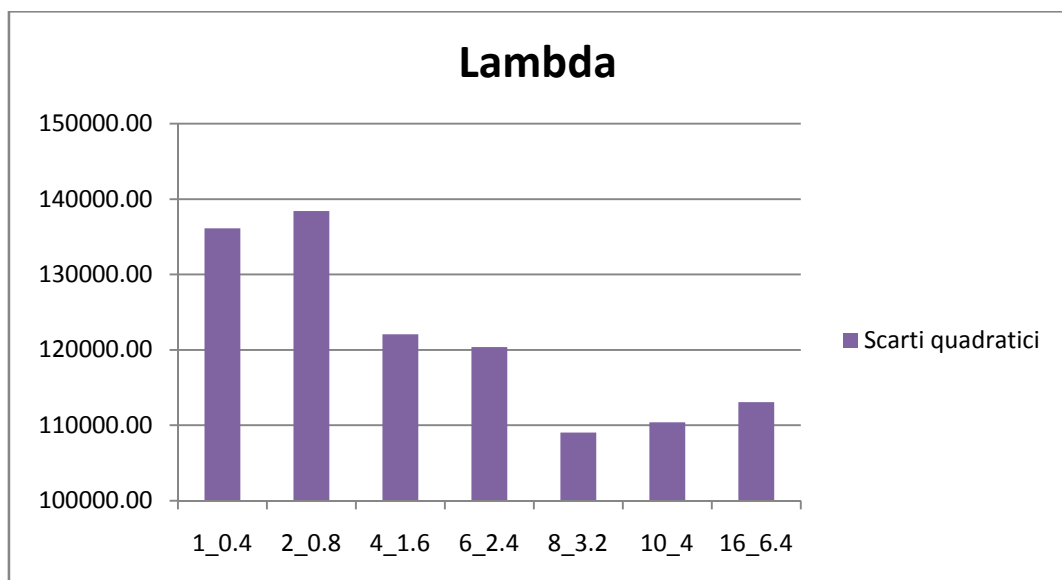


Grafico 3.1.xvii Risultati delle prove eseguite per lambda - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.

Utilizzando, invece, il criterio delle differenze assolute, si sono ottenuti i seguenti risultati:

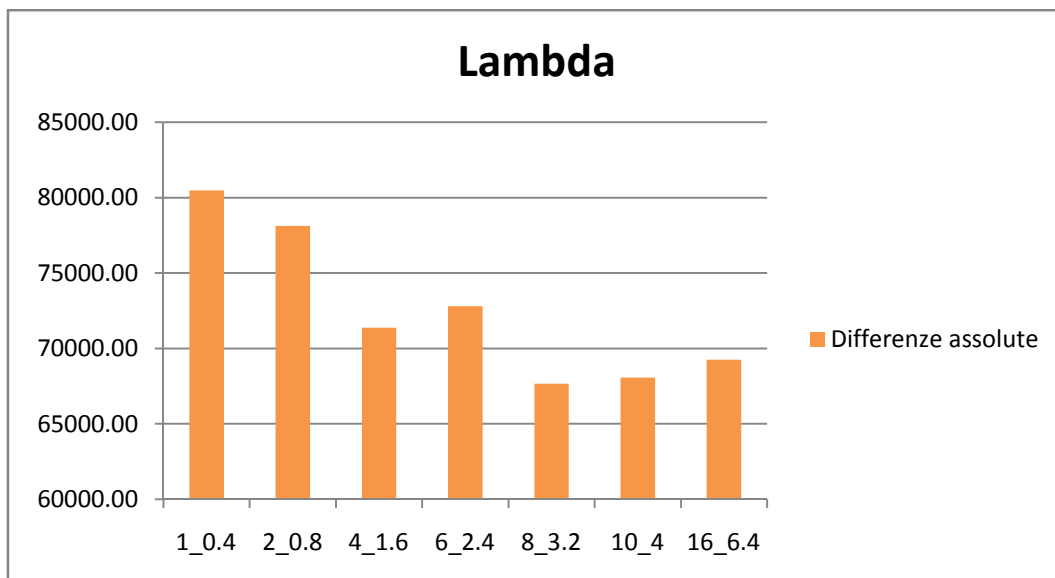


Grafico 3.1.xviii Risultati delle prove eseguite per lambda - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.

Come si può vedere dai grafici, il quinto set di valori consente di rendere minima la somma degli errori, sia in termini di scarti quadratici, sia in termini di differenze assolute. Da prove successive, il set è stato leggermente modificato, portando a 3 il coefficiente lambda che era stato precedentemente fissato a 3.2 e lasciando invece intatto il coefficiente 8, senza intaccare il buon funzionamento del modello.

### 3.2.2.6. PERCENTUALE DI SCELTE TRASCURATE

Il parametro choicecut, insieme a lambda, governa la fase di valutazione dei percorsi; ho perciò effettuato una serie di prove su questo parametro, che vengono riassunte nella tabella seguente:

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4	PROVA 5
CHOICECUT (PER TUTTI)	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1

Tabella 3.1.I Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro choicecut.



In questo caso, non ho differenziato il parametro per classi, ritenendo di dover eliminare le probabilità basse di scelta indipendentemente dal motivo che le ha generate. Utilizzando il criterio di Ortùzar e Willumsen, ho ottenuto i seguenti risultati:

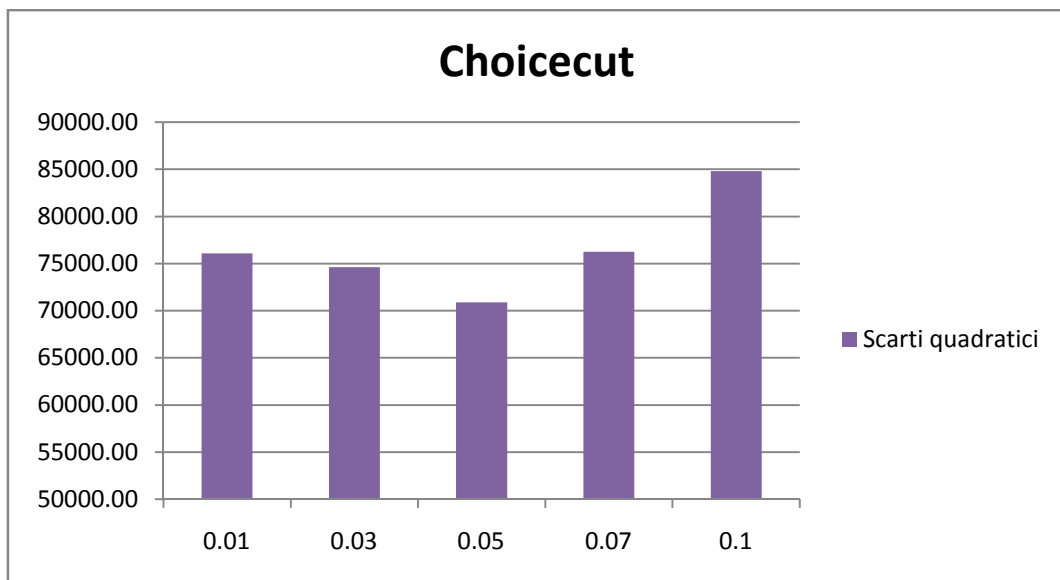


Grafico 3.1.xix Risultati delle prove eseguite per choicecut - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.

Utilizzando, invece, il criterio delle differenze assolute, ho ottenuto i risultati riportati nella tabella seguente.

In questo caso, domina il criterio degli scarti quadratici, e mi consente di validare il valore 0.05 per choicecut; ciò significa che un'alternativa *i* viene eliminata qualora sia verificata la condizione:

$$0.05 > e^{-\lambda(Costi - CostBest)}$$

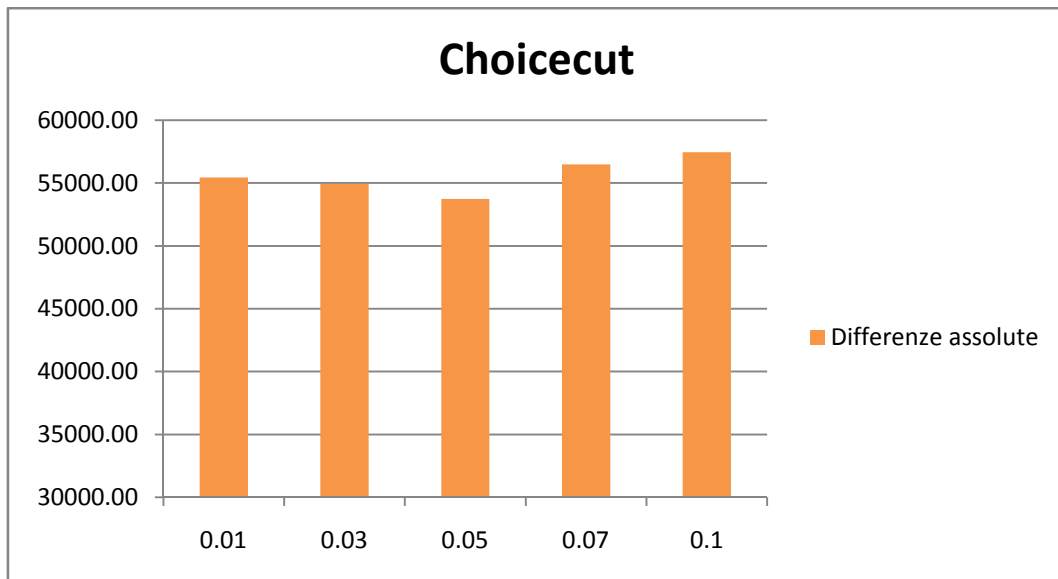


Grafico 3.1.xx Risultati delle prove eseguite per choicecut - criterio delle differenze assolute.

### 3.2.2.7. NUMERO DI ITERAZIONI

Per il corretto funzionamento del modello, è importante accertarsi di avere effettivamente raggiunto l'equilibrio alla fine della simulazione. Questa condizione può essere verificata facilmente; è sufficiente ripetere la stessa simulazione per diverse volte, fissando a priori un numero diverso di iterazioni; il numero di iterazioni a partire dal quale i risultati rimangono costanti (o le variazioni sono minori di  $10^{-4}$ ) è il numero di iterazioni che garantisce il raggiungimento dell'equilibrio.

Nelle mie simulazioni, ho constatato che questa condizione si verificava effettuando 30 iterazioni, come si può vedere dal grafico seguente. Il grafico, che mostra il controllo a campione eseguito sulle linee di metropolitana, è stato costruito in maniera analoga per le linee appartenenti alle altre modalità.

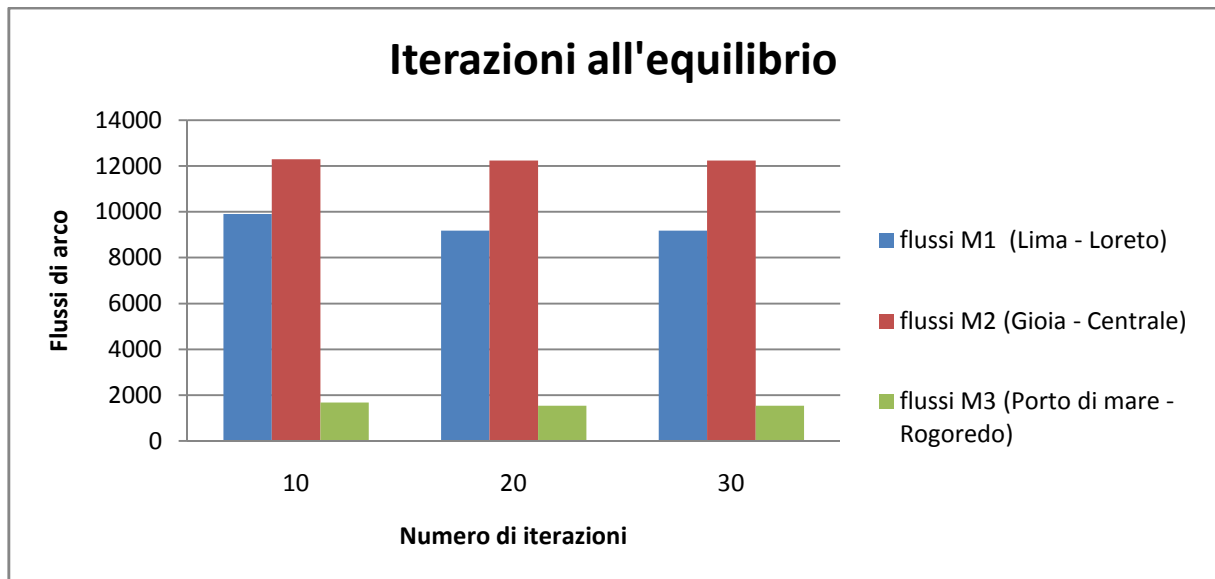


Grafico 3.1.xxi Un controllo del raggiungimento dell'equilibrio dopo 30 iterazioni.

### 3.2.2.8. ALTRI PARAMETRI

I parametri descritti finora sono quelli più significativi, ossia quelli che possono modificare sensibilmente i risultati con una loro variazione anche piccola. Tutti gli altri parametri che vengono utilizzati nelle varie fasi delle simulazioni hanno anch'essi un effetto sui risultati, ma l'entità di questo effetto è minore. Per questa ragione, non li ho sottoposti a prove sistematiche come ho fatto per i precedenti, ma mi sono soltanto assicurata che non allontanassero i flussi simulati dai rilevati.

La maggiore influenza dei parametri descritti è dovuta innanzitutto al fatto che il range di valori che possono assumere è decisamente più ampio. Per fare qualche esempio, lambda potrebbe variare da 0.1 a 20 a seconda dei contesti, choiccut da 0.01 a 0.2, rewaitmax da 5 a 40: possono cioè diventare anche 10-20 volte più grandi, passando da una situazione ad un'altra. Una variazione "piccola", in questo caso, può volere dire che il valore del parametro aumenta del 50%, o raddoppia, per cui tale variazione è inevitabilmente significativa. Altri parametri, come runfactor, waitfactor e alpha, hanno un intervallo di valori decisamente più limitato, che va, nei primi due casi, da 1 a 3,

nell'ultimo caso da 0.3 a 1; una variazione "piccola", in questo caso, significa che il parametro aumenta del 5-10% ed ha un'influenza limitata sulla formazione dei flussi.

Un'altra ragione per la quale i parametri descritti risultano più significativi è il loro ruolo all'interno del processo di simulazione: essi, infatti, ne governano le fasi ed indirizzano la formazione dei flussi. Gli altri parametri, invece, servono per aggiustare i flussi in base alle preferenze di ciascuna categoria di utenti, per cui esercitano un controllo ad un livello inferiore rispetto ai precedenti.

Mi sembra opportuno sottolineare che anche il tipo di comportamento adattivo rientra tra questi; ritengo che non ci siano differenze significative tra comportamento indifferente e intelligente perché siamo nell'ambito di un modello statico, nel quale non vengono considerate alcune importanti caratteristiche relative alle singole corse. Mi aspetto che il comportamento intelligente sia rappresentato meglio dalla formulazione del modello dinamico, che permette di includere un maggior numero di voci di costo.

### **3.2.3. CONFRONTO DELLE MATRICI DI SKIM**

Per alcuni parametri, si è ritenuto opportuno valutare le matrici di skim, relative ad almeno una classe di utenza (ossia i lavoratori sistematici). Tali parametri sono quelli inerenti alle caratteristiche più soggettive e più difficili da parametrizzare, ossia:

- penalità di salita;
- penalità di trasbordo.

Questa valutazione mi ha aiutata a quantificare questi parametri e a capire se e come sono correlati.

#### **3.2.3.1. PENALITÀ DI SALITA**

Le prove relative alle disutilità di salita sono state condotte facendo variare i parametri brdpen nel seguente modo:

	BRDPEN METRO	BRDPEN FILOBUS	BRDPEN AUTOBUS	BRDPEN TRAM	BRDPEN AUTOBUS E	BRDPEN FERROVIE
PROVA 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PROVA 2	0.30	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30
PROVA 3	0.50	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50
PROVA 4	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
PROVA 5	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00
PROVA 6	4.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00
PROVA 7	8.00	4.00	4.00	4.00	4.00	8.00

Tabella 3.1.m Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro brdpen.

Le prove sono state ripetute due volte; per la prima è stato utilizzato l'approccio bestpathonly=true, per la seconda l'approccio bestpathonly=false, dopodiché sono stati confrontati i risultati di 14 matrici di skim, sia per medie che per somme.

Mettendo a confronto i risultati dei due approcci per le diverse prove si sono evidenziati:

- variazioni nulle o trascurabili (<5%) per bestjrny, compcost, dist, await, time;
- valori maggiori del 25-35% per xwait<sup>12</sup> e xferpena, partendo da circa il 35% per bassi valori di brdpen e scendendo a circa il 25% per alti valori di brdpen;
- valori maggiori del 12-25% per brdpena e brdings, partendo da circa il 25% per bassi valori di brdpen e scendendo a circa il 10% per alti valori di brdpen;
- valori completamente differenti per excess demand e value of choice, che hanno significato solo per l'approccio bestpathonly=false.

Di seguito si riportano i grafici dove sono rappresentati gli aspetti salienti appena evidenziati; i grafici sono per medie, gli andamenti per somme sono analoghi.

<sup>12</sup> In queste prove non ci sono differenze tra i tempi reali ("actual") e i corrispondenti tempi percepiti ("perceived") perché non sono ancora stati inseriti alcuni fattori moltiplicativi (runfactor, waitfactor).

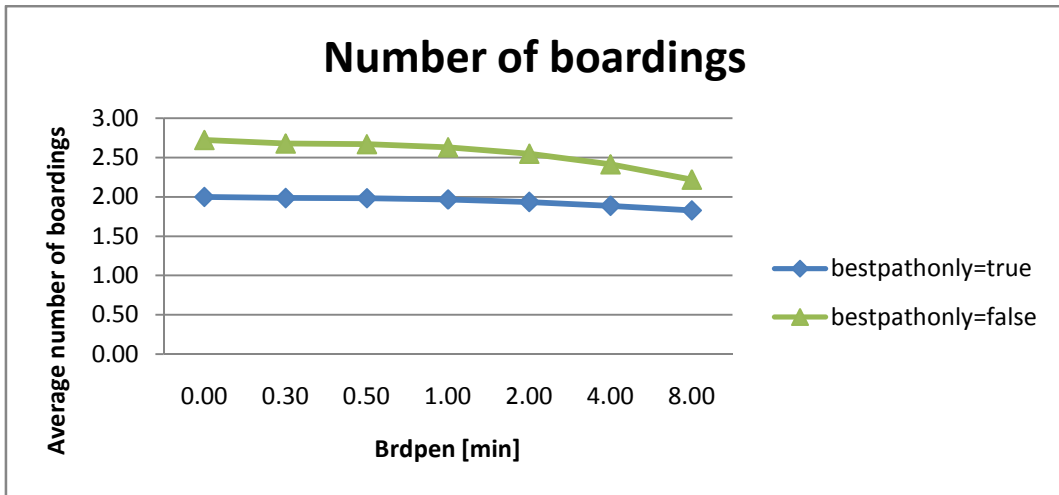


Grafico 3.1.xxii Risultati delle prove eseguite per brdpen - number of boardings.

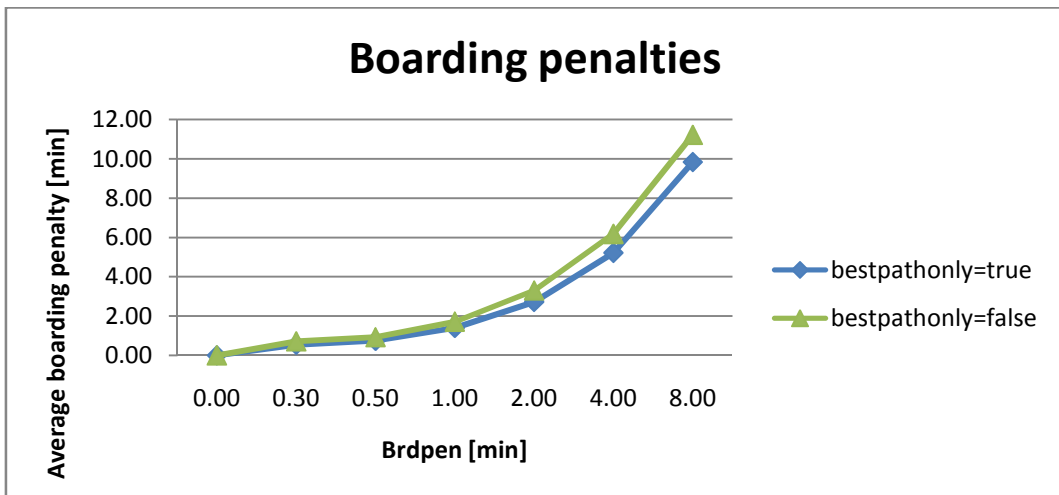


Grafico 3.1.xxiii Risultati delle prove eseguite per brdpen - boarding penalties.

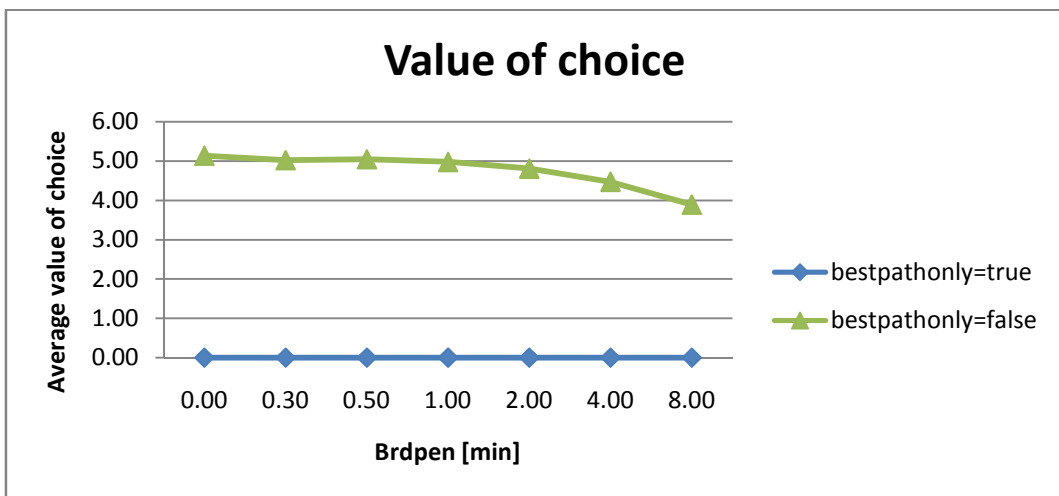


Grafico 3.1.xxiv Risultati delle prove eseguite per brdpen - value of choice.

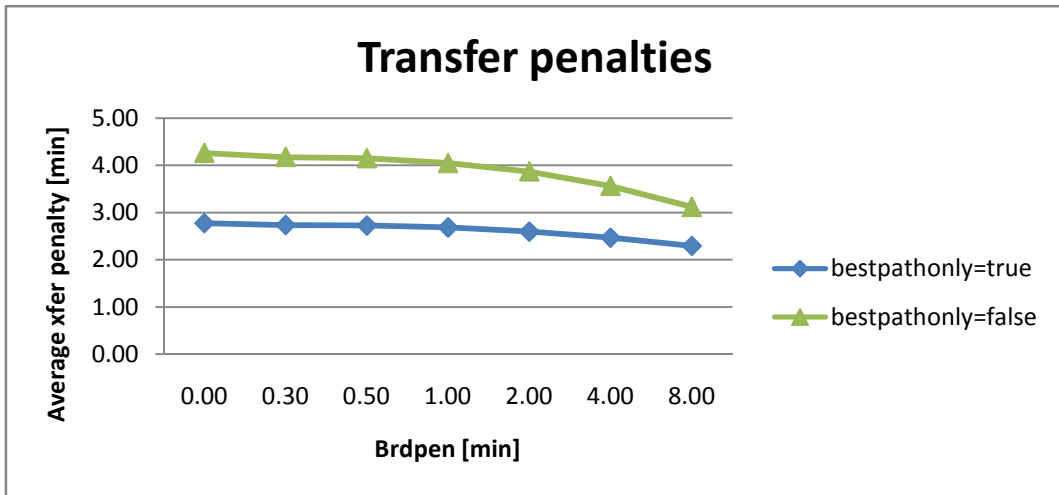


Grafico 3.1.xxv Risultati delle prove eseguite per brdpen - transfer penalties.

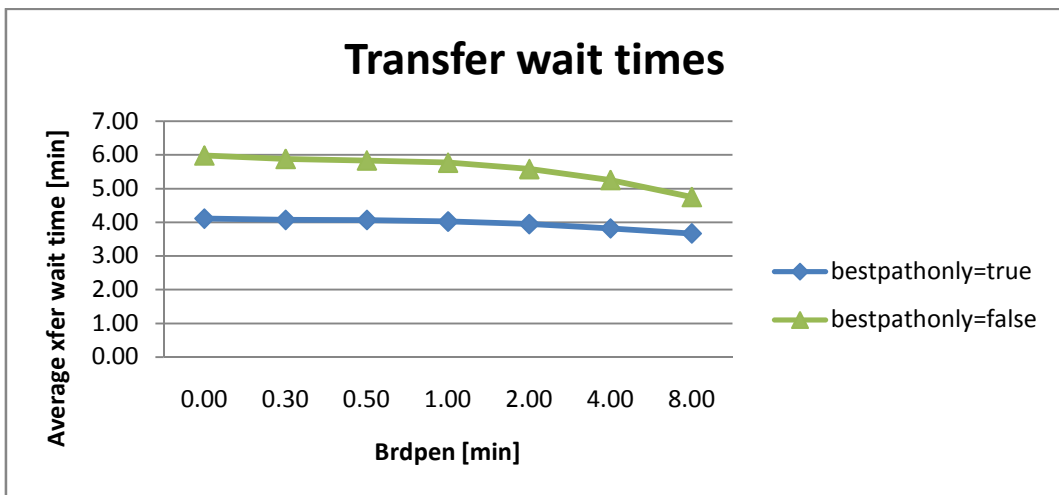


Grafico 3.1.xxvi Risultati delle prove eseguite per brdpen - transfer wait times.

Dalle prove fatte si può quindi dedurre che:

- all'aumentare delle penalità di salita, il modello statico riproduce una diminuzione delle disutilità connesse ai trasbordi, in misura maggiore nell'assegnazione all'equilibrio rispetto all'assegnazione "tutto o niente";
- l'approccio all'equilibrio riproduce una diminuzione del numero di saliti e della domanda assegnabile nel rispetto delle esigenze degli utenti, che invece l'approccio "tutto o niente" non riproduce;

- all'aumentare delle penalità di salita, si modifica la ripartizione modale in maniera non facilmente controllabile, poiché la componente di costo relativa a questa fase diventa onerosa ed ha influssi significativi non solo sui flussi relativi alla modalità a cui è riferita, ma anche su quelli relativi ad altre modalità, che sono legate alla prima tramite i trasbordi.

La diminuzione del numero di saliti e di domanda soddisfatta sono effetti coerenti con l'aumento delle penalità di salita; la diminuzione delle disutilità connesse ai trasbordi potrebbe invece non essere rappresentativa della situazione reale, nel momento in cui l'utente sceglie una corsa di un mezzo per arrivare a prendere la coincidenza con la corsa di un altro mezzo; tale fenomeno non si osserva però nella rappresentazione per linee che stiamo analizzando, mentre presumo di poterlo osservare nella rappresentazione per corse analizzata successivamente. L'incapacità dell'approccio "tutto o niente" di rappresentare i fenomeni che avvengono nella fascia oraria considerata conferma l'ipotesi iniziale, che riteneva l'approccio all'equilibrio più idoneo in tale situazione.

La modifica incontrollata della ripartizione modale è la ragione per cui ho deciso, infine, di non utilizzare le penalità di salita. Mi è sembrato più opportuno penalizzare le modalità meno gradite agli utenti tramite i parametri `waitfactor` e `runfactor`, che incrementano i tempi reali di una certa percentuale per trasformarli in tempi percepiti, piuttosto che sommare un valore fisso in minuti in ciascun nodo di salita; in questo modo, infatti, un'alternativa viene penalizzata indipendentemente dalla durata degli spostamenti, o delle fasi di spostamento, che la utilizzano, producendo effetti distorti sulla distribuzione degli utenti, i quali, solitamente, associano alle alternative modali una penalità che dipende dalla durata della fase di spostamento che la coinvolge.



### 3.2.3.2. PENALITÀ DI TRASBORDO

Le prove relative alle penalità di trasbordo sono state condotte facendo variare i parametri xferpen nel seguente modo per ogni modalità relativamente alla stessa modalità e alle altre 5; nella tabella seguente si riporta il valore medio del parametro per ciascuna modalità:

	XFERPEN METRO	XFERPEN FILOBUS	XFERPEN AUTOBUS	XFERPEN TRAM	XFERPEN AUTOBUS E	XFERPEN FERROVIE
PROVA 1	0	0	0	0	0	0
PROVA 2	3	2	2	2	2	3
PROVA 3	4	3	3	3	3	4
PROVA 4	6	5	5	5	5	6
PROVA 5	9	8	8	8	8	9
PROVA 6	14	13	13	13	13	14

Tabella 3.1.n Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro xferpen.

Le prove sono state ripetute due volte; per la prima è stato utilizzato l'approccio bestpathonly= true, per la seconda l'approccio bestpathonly=false, dopodiché sono stati confrontati i risultati di 14 matrici di skim, sia per medie che per somme.

Nell'esposizione dei risultati si fa riferimento ai valori di xferpen per metropolitane e ferrovie, che si sono dimostrati, da alcune prove, molto più influenti rispetto agli altri quattro. Nel seguito del paragrafo, la dicitura "xferpen" si riferisce quindi ai valori per metropolitane e ferrovie.

Mettendo a confronto i risultati per le prove con i due approcci si osserva che:

- i valori di bestjrny, compcost, dist, iwait, time presentano differenze nulle o trascurabili (<5%);
- valori maggiori del 15-35% per xwait e xferpena, partendo da circa il 35% per bassi valori di xferpen e scendendo a circa il 15% per alti valori di xferpen;

- valori maggiori del 10-25% per brdings e brdpena, partendo da circa il 25% per bassi valori di xferpen e scendendo a circa il 10% per alti valori di xferpen;
- valori completamente differenti per excess demand e value of choice, che hanno significato solo per l'approccio bestpathonly=false.

Di seguito si riportano i grafici dove sono rappresentati gli aspetti salienti appena evidenziati; i grafici sono per medie, gli andamenti per somme sono analoghi.

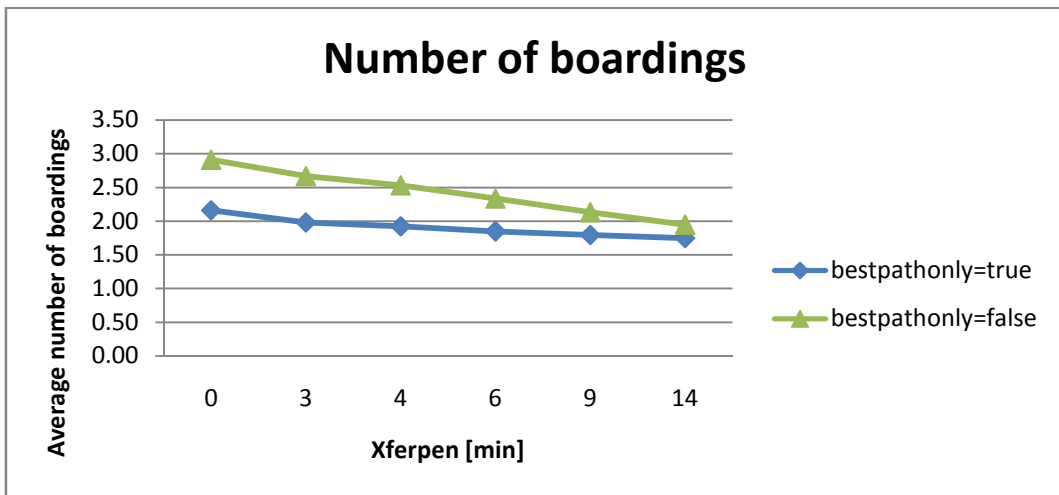


Grafico 3.1.xxvii Risultati delle prove eseguite per xferpen - number of boardings.

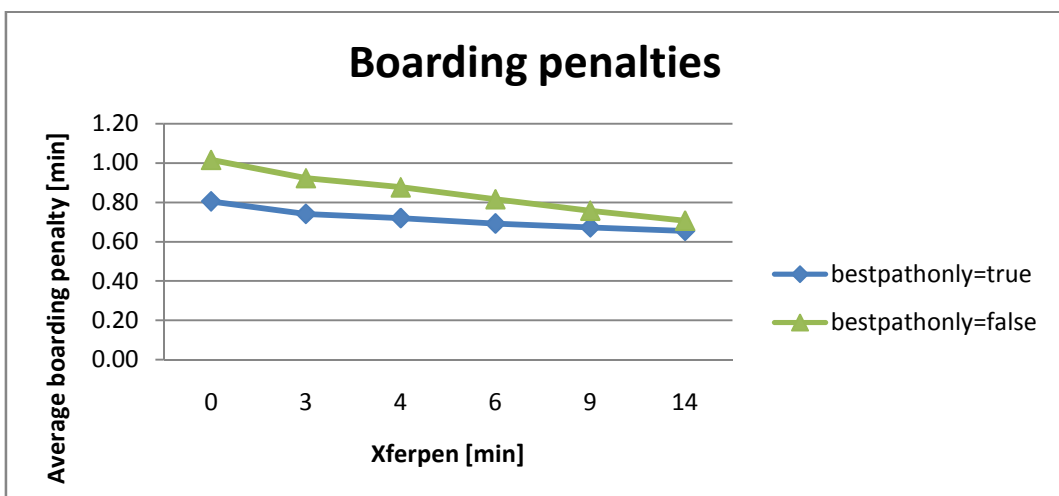


Grafico 3.1.xxviii Risultati delle prove eseguite per xferpen - boarding penalties.

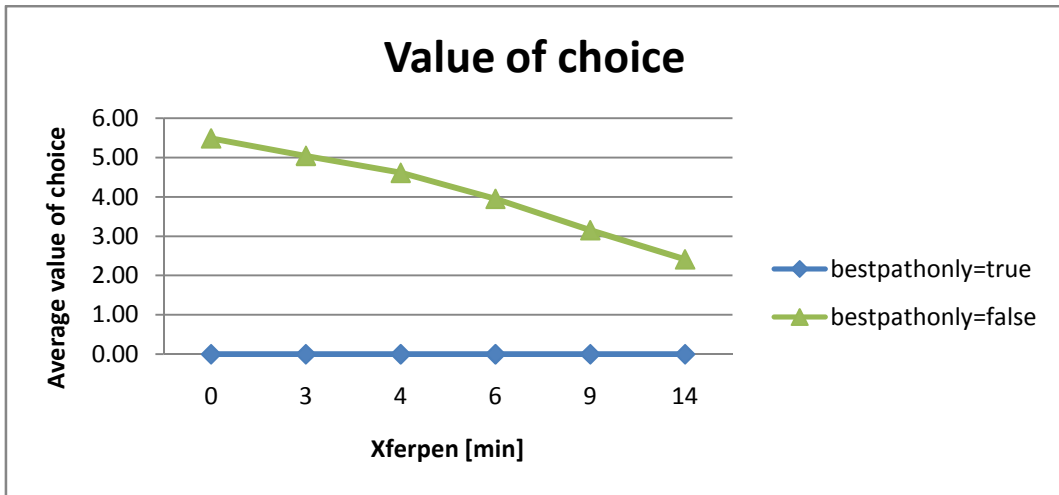


Grafico 3.1.xxix Risultati delle prove eseguite per xferpen - value of choice.

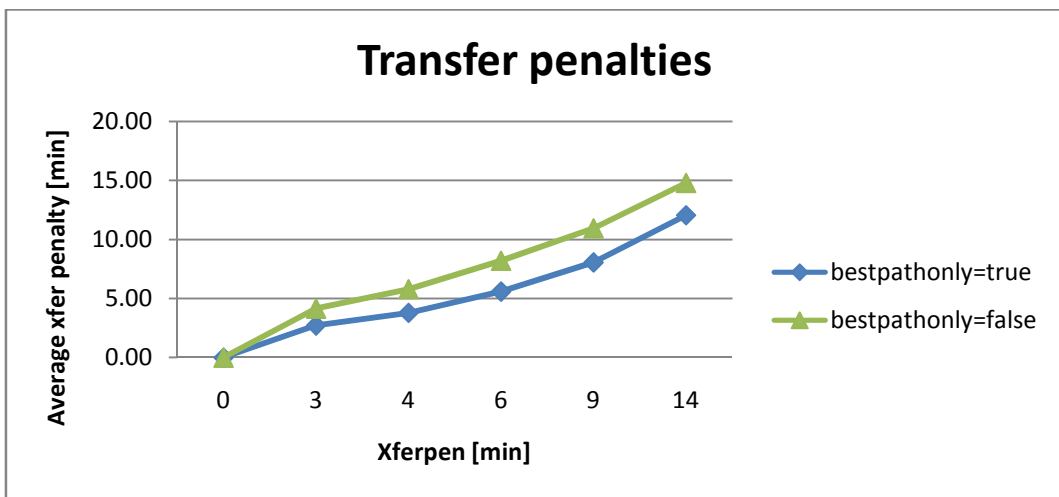


Grafico 3.1.xxx Risultati delle prove eseguite per xferpen - transfer penalties.

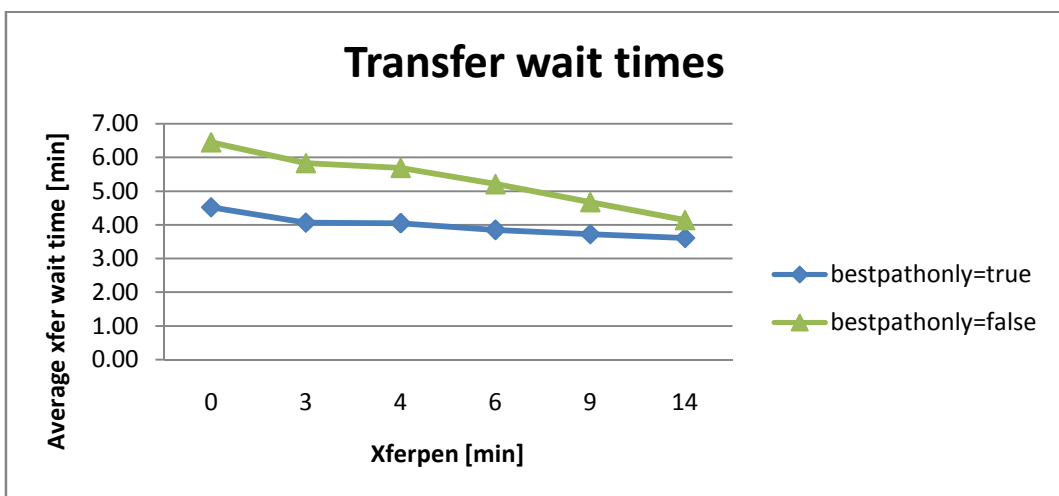


Grafico 3.1.xxxi Risultati delle prove eseguite per xferpen - transfer wait times.

Dalle prove fatte si può quindi dedurre che:

- all'aumentare delle penalità di trasbordo, il modello statico riproduce una diminuzione delle disutilità connesse alla salita, in misura maggiore nell'assegnazione all'equilibrio rispetto all'assegnazione "tutto o niente";
- l'approccio all'equilibrio riproduce una diminuzione del numero di saliti e della domanda assegnabile nel rispetto delle esigenze degli utenti, che invece l'approccio "tutto o niente" non riproduce;
- all'aumentare delle penalità di trasbordo, si modifica la ripartizione modale in maniera non facilmente controllabile, poiché la componente di costo relativa a questa fase diventa onerosa ed ha influssi significativi non solo sui flussi relativi alla modalità a cui è riferita, ma anche su quelli relativi ad altre modalità, che sono legate alla prima tramite altri trasbordi.

Il numero di saliti è in questo caso direttamente proporzionale alle penalità di salita (entrambi diminuiscono); si ritiene quindi che le penalità di trasbordo siano percepite maggiormente rispetto alle penalità di salita, tanto che al loro aumentare fanno diminuire il numero di saliti, che, se dipendesse dalle sole penalità di salita, dovrebbe invece aumentare. L'incapacità dell'approccio "tutto o niente" di rappresentare i fenomeni che avvengono nella fascia oraria considerata conferma l'ipotesi iniziale, che riteneva l'approccio all'equilibrio più idoneo in tale situazione.

La modifica incontrollata della ripartizione modale è la ragione per cui ho deciso, infine, di non utilizzare le penalità di trasbordo. Anche in questo caso, mi è sembrato più opportuno penalizzare le modalità meno gradite agli utenti tramite i parametri waitfactor e runfactor, che incrementano i tempi reali di una certa percentuale per trasformarli in tempi percepiti, piuttosto che sommare un valore fisso in minuti nei nodi di trasbordo, altrimenti si sarebbe verificato lo stesso problema descritto per le penalità di salita.

### 3.2.4. FACTORS FILES (CASO STATICO)

Di seguito si riportano quattro tabelle, dove vengono riassunti i parametri di input contenuti nel factors file relativo a ciascuna classe di utenza; i valori dei parametri discendono dai risultati delle prove e dalle considerazioni esposte finora.

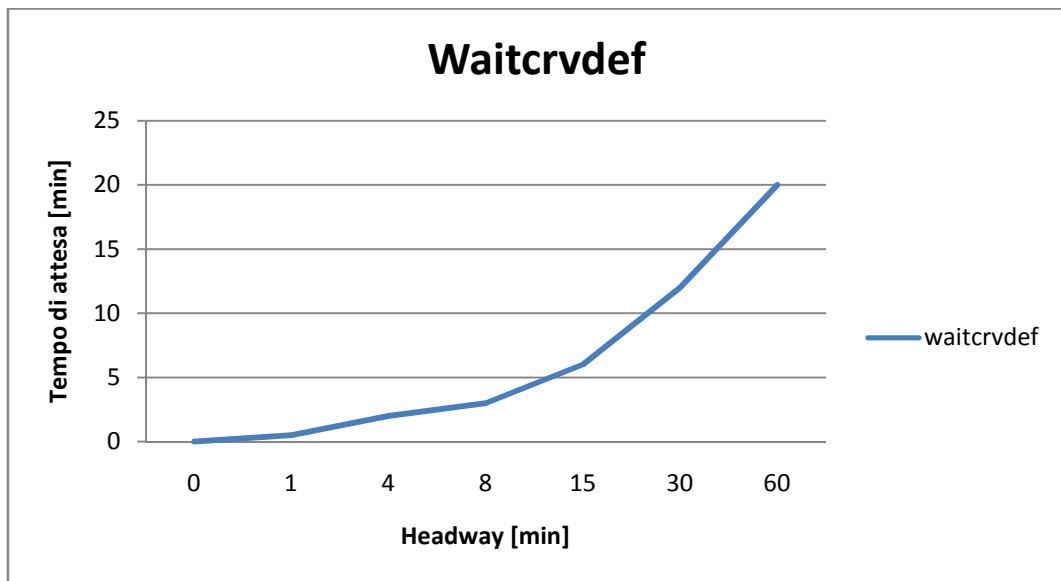


Grafico 3.1.xxxii Curva di attesa utilizzata.

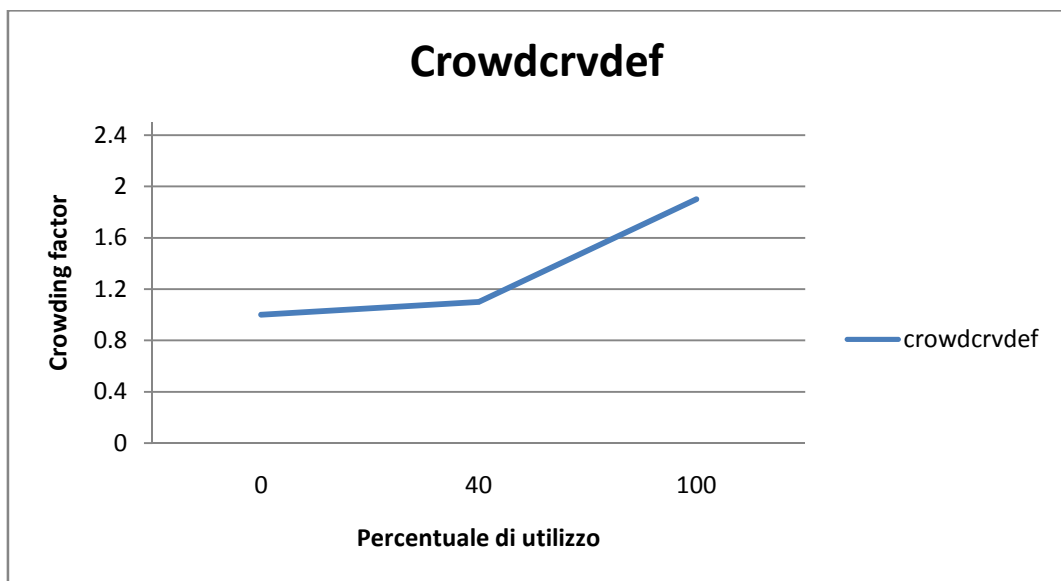


Grafico 3.1.xxxiii Curva di affollamento utilizzata.

USERCLASS	PENDOLARI
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
REWAITMIN	0
REWAITMAX	5
SERVICEMODEL	FREQUENCYCOST
BESTPATHONLY	F
CHOICECUT	0.05
ALPHA	0.9
LAMBDAA	8
LAMBDAA	8
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	2
RUNFACTOR [1]	1.7
RUNFACTOR [2]	1.7
RUNFACTOR [3]	1.7
RUNFACTOR [4]	1.7
RUNFACTOR [5]	1.7
RUNFACTOR [6]	1.7

USERCLASS	AFFARI
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
REWAITMIN	0
REWAITMAX	15
SERVICEMODEL	FREQUENCYCOST
BESTPATHONLY	F
CHOICECUT	0.05
ALPHA	0.4
LAMBDAA	5
LAMBDAA	5
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	1.5
RUNFACTOR [1]	1.7
RUNFACTOR [2]	1.7
RUNFACTOR [3]	1.7
RUNFACTOR [4]	1.7
RUNFACTOR [5]	1.7
RUNFACTOR [6]	1.7

USERCLASS	STUDIO E ALTRO
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
REWAITMIN	0
REWAITMAX	15
SERVICEMODEL	FREQUENCYCOST
BESTPATHONLY	F
CHOICECUT	0.05
ALPHA	0.9
LAMBDAA	5
LAMBDAA	5
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	1.5
RUNFACTOR [1]	1.7
RUNFACTOR [2]	1.7
RUNFACTOR [3]	1.7
RUNFACTOR [4]	1.7
RUNFACTOR [5]	1.7
RUNFACTOR [6]	1.7

USERCLASS	RITORNI A CASA
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
REWAITMIN	0
REWAITMAX	15
SERVICEMODEL	FREQUENCYCOST
BESTPATHONLY	F
CHOICECUT	0.05
ALPHA	0.9
LAMBDAA	8
LAMBDAA	8
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	1.5
RUNFACTOR [1]	1.7
RUNFACTOR [2]	1.7
RUNFACTOR [3]	1.7
RUNFACTOR [4]	1.7
RUNFACTOR [5]	1.7
RUNFACTOR [6]	1.7

Tabella 3.1.o Factors files utilizzati nel caso statico.

### 3.3. ANALISI DEI RISULTATI (CASO DINAMICO)

Avendo a disposizione i risultati delle simulazioni relative al modello statico, ho utilizzato tali valori come base di partenza per l'applicazione del modello dinamico. Ho constatato che sono da considerarsi validi anche per questo caso, con gli stessi range di valori:

- tempo massimo di accesso/egresso (maxcost);
- tempo massimo di trasbordo (maxcost);
- numero massimo di trasbordi (maxfers);
- differenza di costo rispetto al percorso di costo minimo (spread);
- coefficiente del modello logit ( $\lambda$ );
- numero di iterazioni (iterations).

Questa constatazione è anche una conferma di avere scelto valori corretti per i parametri, dal momento che risultano validi anche cambiando il modello utilizzato.

Il parametro `rewaitmax` non ha più senso in questo caso, poiché viene sostituito dal corrispondente parametro `maxwaitvar`; il valore di `choicecut` subirà una modifica, come verrà spiegato in seguito.

Rimangono quindi da studiare i seguenti parametri:

- orario di partenza dall'origine (timepoint);
- coefficiente della distribuzione di Kirchoff ( $k\beta$ );
- percentuale di scelte trascurate (choicecut).

I risultati di ogni simulazione sono stati messi a confronto con quelli delle altre simulazioni, dopodiché sono stati effettuati controlli a campione sui flussi simulati e sui saliti/discesi simulati alle fermate, utilizzando i dati provenienti dai rilievi di traffico. Di seguito si riportano le considerazioni necessarie per perfezionare i modelli dinamici.

### **3.3.1. CONFRONTO DEI FLUSSI**

Il confronto è stato effettuato con i criteri di Ortùzar e Willumsen e delle differenze assolute, descritti in precedenza.

#### **3.3.1.1. ORARIO DI PARTENZA DALL'ORIGINE**

Su questo parametro ho effettuato un numero limitato di prove, sulle quali ho ragionato molto attentamente. In base ai tempi di accesso e alle fasce orarie desiderate di arrivo a destinazione, ho infine deciso di stabilire i seguenti intervalli temporali di partenza:

- 7.00-8.30 per gli utenti che desiderano arrivare a destinazione entro le 8.30;
- 7.30-9.00 per gli utenti che desiderano arrivare a destinazione entro le 9.00.

Agli utenti che si spostano da o per zone esterne al perimetro di area urbana, vengono messe a disposizione le corse dei treni da e per queste zone, a partire dall'inizio dell'intervallo temporale stabilito, in modo che possano effettivamente avere il tempo di coprire la distanza necessaria per arrivare nell'area ricoperta dal grafo; dopodiché, hanno a disposizione le corse dei mezzi pubblici locali, che operano nelle fasce orarie di arrivo a destinazione (ossia tra le 8.00 e le 9.00). Gli utenti che si spostano tra zone interne al perimetro di area urbana hanno a disposizione, invece, le sole corse dei mezzi pubblici locali, ai quali accedono tramite modalità pedonale, come spiegato in precedenza.

Questa impostazione dà agli utenti la possibilità effettiva di giungere a destinazione all'ora desiderata, sempre che non si verificano eccessivi ritardi o sovraffollamenti delle linee, che allungano i tempi di percorrenza previsti; nel contempo, dà a me la possibilità di valutare i flussi nella fascia oraria oggetto di studio.



### 3.3.1.2. COEFFICIENTE DELLA DISTRIBUZIONE DI KIRCHOFF

Per questo parametro, che governa la fase di valutazione dei percorsi, ho effettuato le seguenti prove:

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3	PROVA 4
KBETA (PER TUTTI)	1	4	7	10

Tabella 3.1.p Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro kbeta.

Sono stati inseriti gli stessi valori per tutti gli utenti, supponendo che, al momento della scelta, abbiano tutti a disposizione le stesse informazioni, ossia gli orari di arrivo delle corse e gli eventuali ritardi, per cui tendano a distribuirsi sulle stesse alternative.

I criteri di confronto dei flussi hanno prodotto i seguenti risultati:

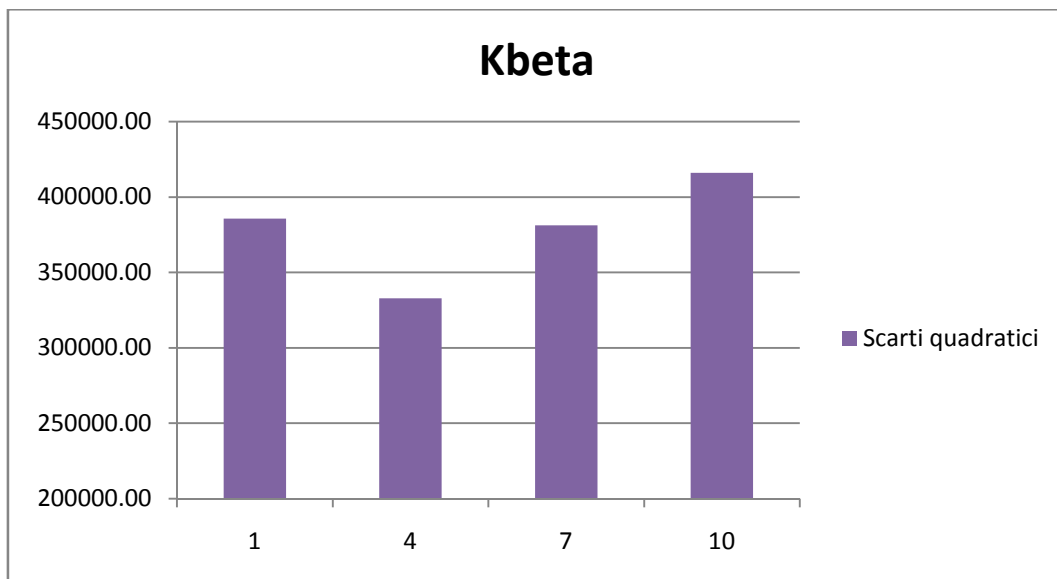


Grafico 3.1.xxxiv Risultati delle prove eseguite per kbeta - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.

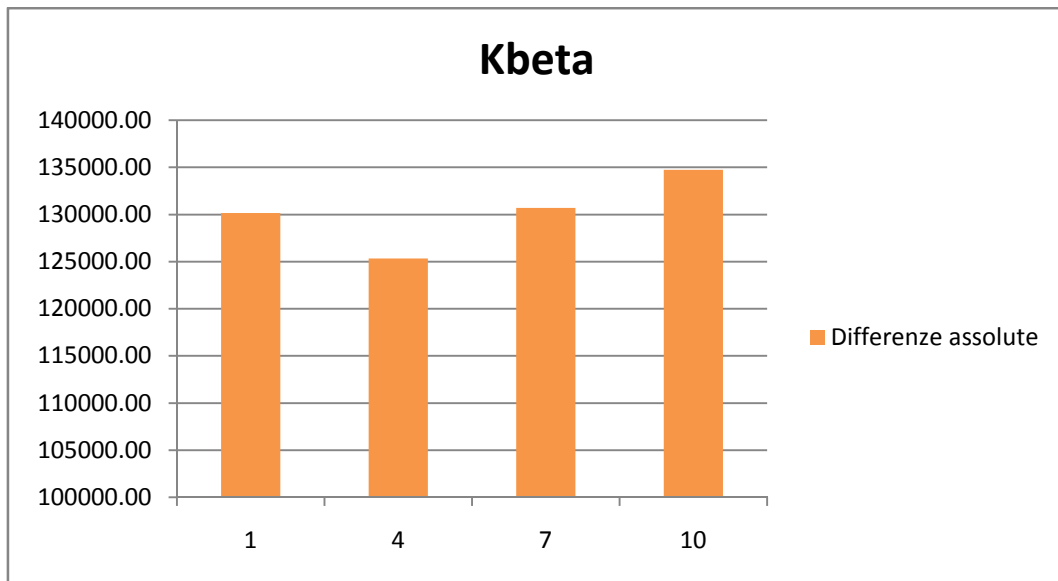


Grafico 3.1.xxxv Risultati delle prove eseguite per kbeta - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.

Come si può vedere dai grafici, il valore 4 consente di rendere minima la somma degli errori, sia in termini di scarti quadratici, sia in termini di differenze assolute.

L'effetto di kbeta sulla dispersione delle alternative è simile all'effetto di lambda. Il valore del parametro kbeta nel modello di scelta dei servizi, però, è meno significativo rispetto al valore del parametro lambda nel modello di scelta della fermata, per alcune semplici ragioni. Innanzitutto, lambda agisce su livello di scelta superiore, ossia la scelta delle fermate di accesso ed egresso, che avviene a monte rispetto alla scelta del percorso; la probabilità che contribuisce a generare può venire eliminata dal parametro choicecut, per cui alcune alternative di percorso possono essere del tutto escluse dalla valutazione. Inoltre, kbeta è applicato a diverse fasi di un percorso, per cui il suo effetto tende ad essere "mitigato" dalla presenza di numerose componenti di costo, mentre lambda è applicato alle sole fasi di salita e di discesa, per cui agisce su poche componenti di costo e governa in maniera assoluta queste fasi, con la possibilità di modificare radicalmente queste scelte e, quindi, anche il resto del percorso. Peraltro, il range di valori che può assumere kbeta (0.1-10) è meno ampio rispetto al range di

valori che può assumere lambda (0.1-20), per cui kbeta tende a subire variazioni minori rispetto a lambda.

### 3.3.1.3. PERCENTUALE DI SCELTE TRASCURATE

Il parametro choicecut, insieme a kbeta, governa la fase di valutazione dei percorsi; ho perciò ripetuto le prove effettuate per lo stesso parametro nel caso statico ed ho constatato che il valore ottimale, nel caso dinamico, non è più 0.05, ma 0.01, come si può dedurre dai risultati prodotti da entrambi i criteri di confronto.

Anche in questo caso, non ho differenziato il parametro per classi, ritenendo di dover eliminare le probabilità basse di scelta indipendentemente dal motivo che le ha generate; un'alternativa i viene quindi eliminata qualora sia verificata la condizione:

$$0.01 > C^{-\beta}(\text{Costi} - \text{CostBest})$$

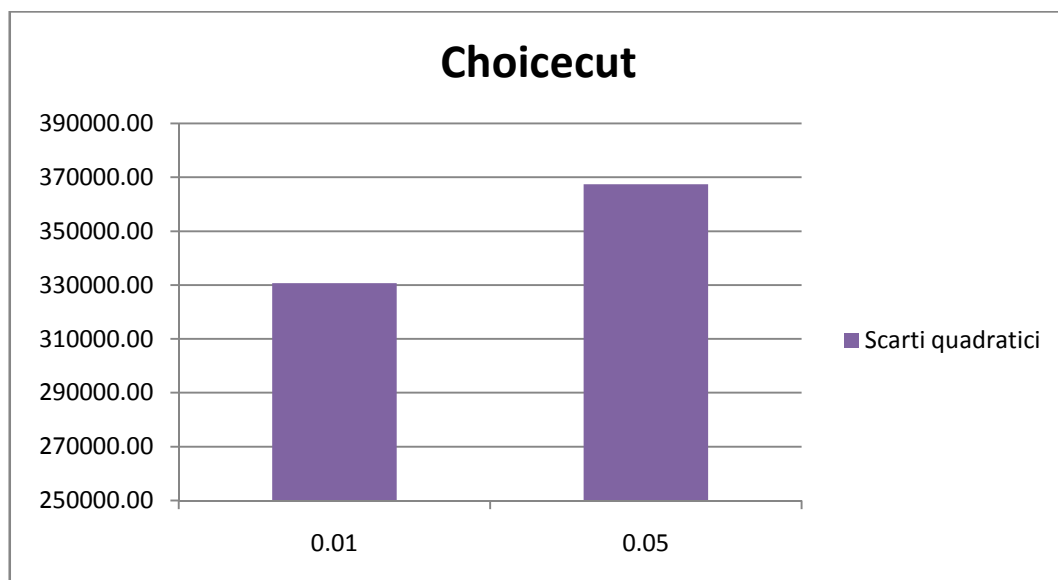


Grafico 3.1.xxxvi Risultati delle prove ripetute per choicecut - confronto col criterio degli scarti quadratici.

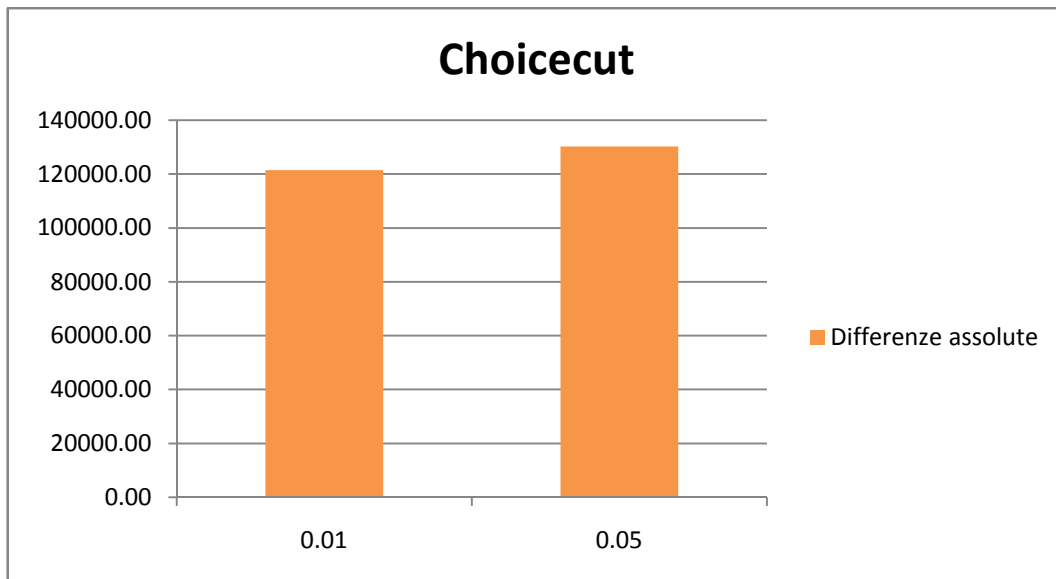


Grafico 3.1.xxxvii Risultati delle prove ripetute per choicecut - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.

La necessità di due valori diversi per il parametro choicecut può essere interpretata in questo modo: il modello dinamico riceve una quantità di dati di input maggiore rispetto al modello statico, per cui le probabilità che genera sono supportate da una quantità maggiore di informazioni, di conseguenza le probabilità basse sono da considerare più significative in questo caso che nell'altro.

#### **3.3.1.4. ALTRI PARAMETRI**

I parametri descritti finora sono quelli più significativi, ossia quelli che possono modificare sensibilmente i risultati con una loro variazione anche piccola. Tutti gli altri parametri che vengono utilizzati nelle varie fasi delle simulazioni hanno anch'essi un effetto sui risultati, ma l'entità di questo effetto è minore, per le stesse ragioni descritte nell'ambito del modello statico:

- il range di valori che possono assumere è meno ampio;
- hanno un controllo inferiore sulla formazione dei flussi.

Se si vuole paragonare l'effetto di questi stessi parametri all'interno dei tre modelli utilizzati, si nota che questo effetto è superiore nell'ambito dei modelli dinamici con ritardi, perché la presenza dei ritardi permette di incrementare i tempi di attesa e di percorrenza, senza dover applicare coefficienti moltiplicativi elevati (runfactor, waitfactor). Per questa ragione, ho assegnato a questi parametri valori più bassi, o nulli, nel terzo caso rispetto agli altri due. Le penalità di salita e di trasbordo non sono state utilizzate nemmeno nel modello dinamico, perché producono effetti difficilmente controllabili, come è stato spiegato per il caso statico.

Un discorso a parte deve essere fatto per il tipo di comportamento adattivo. Nel modello statico, non ho riscontrato differenze significative tra comportamento indifferente e comportamento intelligente, per cui, tendenzialmente, la prime linee che l'utente può utilizzare sono anche le linee che minimizzano il costo totale del suo percorso. La cosa è ragionevole, se si pensa che il servizio esercito rappresentato all'interno del modello è un servizio ideale, senza ritardi, che corrisponde perfettamente al programmato. Nel modello dinamico, è possibile, invece, tenere in conto l'orario programmato delle singole corse e le eventuali differenze tra il servizio esercito ed il servizio programmato. In questo caso, il comportamento adattivo intelligente viene applicato ad un maggior numero di elementi di valutazione, e può contare su una formulazione adeguata<sup>13</sup>: le corse che minimizzano il costo totale di un percorso spesso non sono le prime in programma, se queste subiscono un ritardo. Ritengo che questo aspetto sia il maggiore punto di forza dei modelli di tipo dinamico, perché rispecchia la situazione reale di molti sistemi di trasporto pubblico locale e quindi consente al modello di avvicinare i flussi simulati ai flussi rilevati.

---

<sup>13</sup> Ricordo che, nel caso statico, il modello di scelta dei servizi con l'ipotesi di comportamento adattivo intelligente era ricavato dall'analogo modello di scelta con l'ipotesi di comportamento adattivo indifferente; in questo caso, invece, è formulato appositamente.

Il comportamento adattivo intelligente è effettivamente praticabile da tutti gli utenti se le fermate sono dotate di dispositivi che informano l'utenza in tempo reale sui ritardi delle corse; in caso contrario, soltanto gli utenti sistematici possono fare scelte di tipo intelligente in maniera consapevole, perché possono basarsi su una esperienza maggiore e una conoscenza della rete più vasta rispetto alle altre categorie di utenti.

### 3.3.2. FACTORS FILES (CASO DINAMICO SENZA RITARDI)

Di seguito si riportano quattro tabelle, dove vengono riassunti i parametri di input contenuti nel factors file relativo a ciascuna classe di utenza, con orario desiderato di arrivo 8-8.30; i files per gli utenti relativi all'altro sottointervallo sono analoghi. I valori dei parametri discendono dai risultati delle prove e dalle considerazioni esposte finora; la curva di attesa e la curva di affollamento sono le stesse del caso statico.

USERCLASS	PENDOLARI
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	5
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.9
LAMBDAA	8
LAMBDAA	8
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	2.5
RUNFACTOR [1]	1.6
RUNFACTOR [2]	1.5
RUNFACTOR [3]	1.5
RUNFACTOR [4]	1.5
RUNFACTOR [5]	1.5
RUNFACTOR [6]	1.6

USERCLASS	AFFARI
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.9
LAMBDAA	3
LAMBDAA	3
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	2
RUNFACTOR [1]	1.6
RUNFACTOR [2]	1.5
RUNFACTOR [3]	1.5
RUNFACTOR [4]	1.5
RUNFACTOR [5]	1.5
RUNFACTOR [6]	1.6

USERCLASS	STUDIO E ALTRO
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.9
LAMBDAW	3
LAMBDAA	3
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	2
RUNFACTOR [1]	1.6
RUNFACTOR [2]	1.5
RUNFACTOR [3]	1.5
RUNFACTOR [4]	1.5
RUNFACTOR [5]	1.5
RUNFACTOR [6]	1.6

USERCLASS	RITORNI A CASA
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.4
LAMBDAW	8
LAMBDAA	8
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
WAITFACTOR	1.5
RUNFACTOR [1]	1.6
RUNFACTOR [2]	1.5
RUNFACTOR [3]	1.5
RUNFACTOR [4]	1.5
RUNFACTOR [5]	1.5
RUNFACTOR [6]	1.6

Tabella 3.1.q Factors files utilizzati nel caso dinamico senza ritardi.

### 3.3.3. FACTORS FILES (CASO DINAMICO CON RITARDI)

Di seguito si riportano quattro tabelle, dove vengono riassunti i parametri di input contenuti nel factors file relativo a ciascuna classe di utenza, con orario desiderato di arrivo 8-8.30; i files per gli utenti relativi all'altro sottointervallo sono analoghi. I valori dei parametri discendono dai risultati delle prove e dalle considerazioni espone finora; la curva di attesa e la curva di affollamento sono le stesse del caso statico.

USERCLASS	PENDOLARI
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.9
LAMBDAAW	8
LAMBDAA	8
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
RUNFACTOR [1]	2
RUNFACTOR [6]	1.5

USERCLASS	AFFARI
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.9
LAMBDAAW	3
LAMBDAA	3
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
RUNFACTOR [1]	2
RUNFACTOR [6]	1.5

USERCLASS	STUDIO E ALTRO
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.9
LAMBDAAW	3
LAMBDAA	3
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
RUNFACTOR [1]	2
RUNFACTOR [6]	1.5

USERCLASS	RITORNI A CASA
PERIOD	0700-0830
QUICKESTPATH	F
QUICKESTMULTI	F
DAYTYPE	1
MINXFERVAR	MINXFER
MAXWAITVAR	MAXWAIT
MAXFERS	2
SPREADFUNC	1
SPREADFACT	1
SPREADCONST	10
CHOICECUT	0.01
ALPHA	0.4
LAMBDAAW	8
LAMBDAA	8
KBETA	4
IWAITCURVE	1
XWAITCURVE	1
RUNFACTOR [1]	2
RUNFACTOR [6]	1.5

Tabella 3.1.r Factors files utilizzati nel caso dinamico con ritardi.



# 4. RISULTATI E CONCLUSIONI

---

Dopo aver approfondito la conoscenza dei sistemi di trasporto pubblico locale e la teoria alla base del processo di simulazione, e dopo aver applicato questi concetti, effettuando una serie di simulazioni sulla rete di trasporto collettivo della città di Milano, sono giunta alla conclusione del mio lavoro di tesi. Rimangono soltanto alcune importanti considerazioni da fare in merito ai risultati ottenuti e alla loro servibilità nel campo della pianificazione dei trasporti.

L'obiettivo che mi sono posta all'inizio di questo lavoro è stato quello di valutare e confrontare i flussi di arco prodotti da tre tipi modelli di scelta del percorso:

- statico;
- a dinamica intraperiodale senza ritardi;
- a dinamica intraperiodale con ritardi.

Con queste applicazioni, intendevo dimostrare che, in una fascia oraria in cui la rete è in condizioni di congestione, i modelli di tipo dinamico si avvicinano maggiormente ai flussi reali rispetto a quelli di tipo statico, e che hanno notevoli potenzialità di sviluppo futuro.

## 4.1.1. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni condotte con i parametri riportati alla fine del capitolo precedente hanno effettivamente fornito i risultati sperati. Dal confronto dei flussi simulati su 171 archi di rete con i corrispondenti flussi rilevati, si evidenzia una maggiore capacità dei modelli

con dinamica intraperiodale di rappresentare la distribuzione reale dei flussi nella fascia oraria 8-9 analizzata, come si può vedere chiaramente dai grafici seguenti<sup>14</sup>.

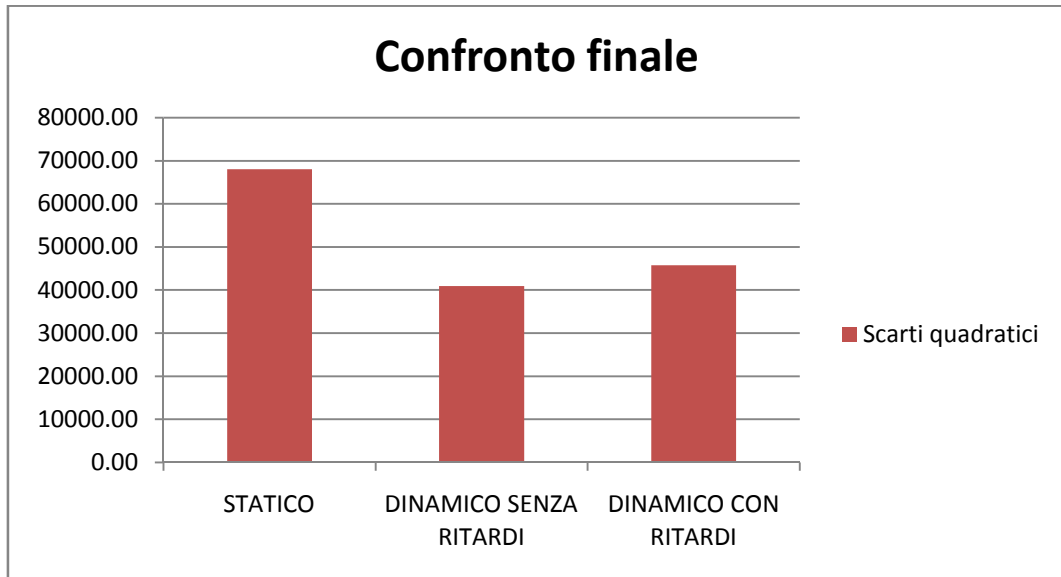


Grafico 3.1.xxxviii Risultati finali delle simulazioni - confronto col criterio degli scarti quadratici.

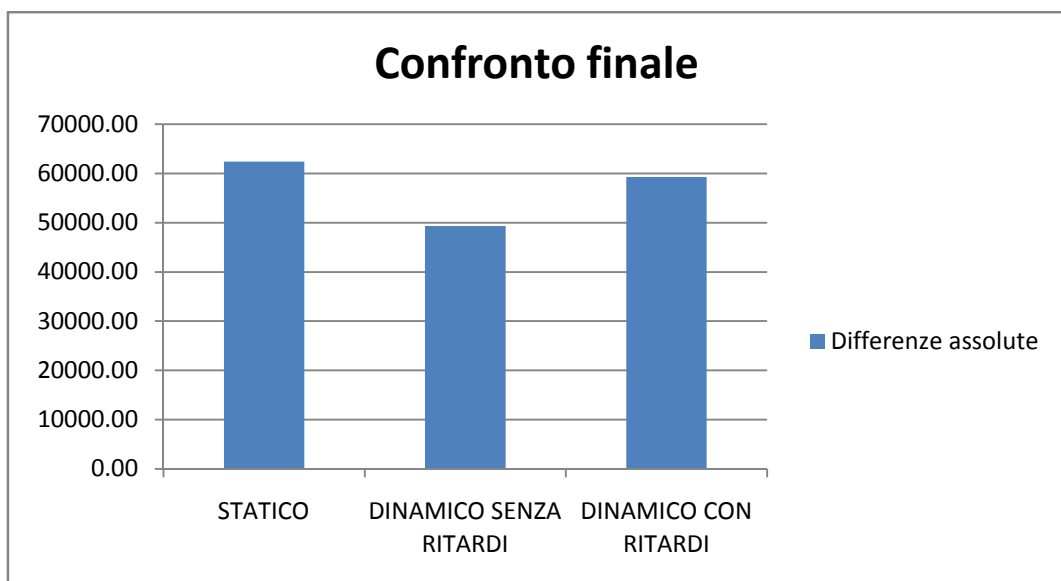


Grafico 3.1.xxxix Risultati finali delle simulazioni - confronto col criterio delle differenze assolute.

<sup>14</sup> Grafici analoghi sono stati prodotti per il confronto dei saliti/discesi e confermano questi risultati.

Entrambi i criteri di confronto hanno infatti prodotto risultati favorevoli ai modelli con dinamica intraperiodale, in particolare al tipo senza ritardi. Il tipo con ritardi ha prodotto risultati migliori rispetto allo statico, ma peggiori rispetto al tipo senza ritardi. In merito a ciò, mi sembra opportuno rimarcare che i ritardi che avevo a disposizione, ed ho quindi potuto inserire nel modello come dati di input, erano relativi soltanto ad una parte delle linee (89 su 151) in servizio nella fascia oraria considerata e sono stati effettuati in una sola fermata per ciascuna di queste linee, in un solo giorno. Questi dati sono comunque stati sufficienti per evidenziare, all'interno del modello dinamico, una significativa differenza nella formazione dei flussi, che ha portato ad un significativo avvicinamento ai flussi reali. Mi sento di poter dire, quindi, che, in presenza di una maggiore quantità di dati, in grado di coprire un numero maggiore di linee, ma soprattutto un numero maggiore di fermate, su un numero maggiore di giorni, il modello sarebbe in grado di simulare dei flussi ancora più vicini ai flussi reali.

Per quanto riguarda il funzionamento della rete in generale, i due modelli di tipo dinamico sono concordi nel riportare circa 80 archi in sovraccarico dei 7000 archi totali di transito (1%); il sovraccarico medio su questi archi è del 15%, se ripartito sul totale degli archi scende al 4%. Il modello statico, invece, riporta oltre 500 archi in sovraccarico dei 7000 totali (7%); il sovraccarico medio su questi archi è del 29%, se ripartito sul totale degli archi scende al 9%. Ciò significa che i modelli basati sul grafo diacronico ripartiscono gli utenti in maniera più omogenea sulla rete, a parità di domanda non soddisfatta (circa l'1% del totale in tutti e tre i casi).

Per quanto riguarda, infine, il livello del servizio fornito ai viaggiatori, mi è sembrato opportuno valutare le matrici di skim relative ad almeno una classe di utenti (lavoratori sistematici). Riporto di seguito le più significative:

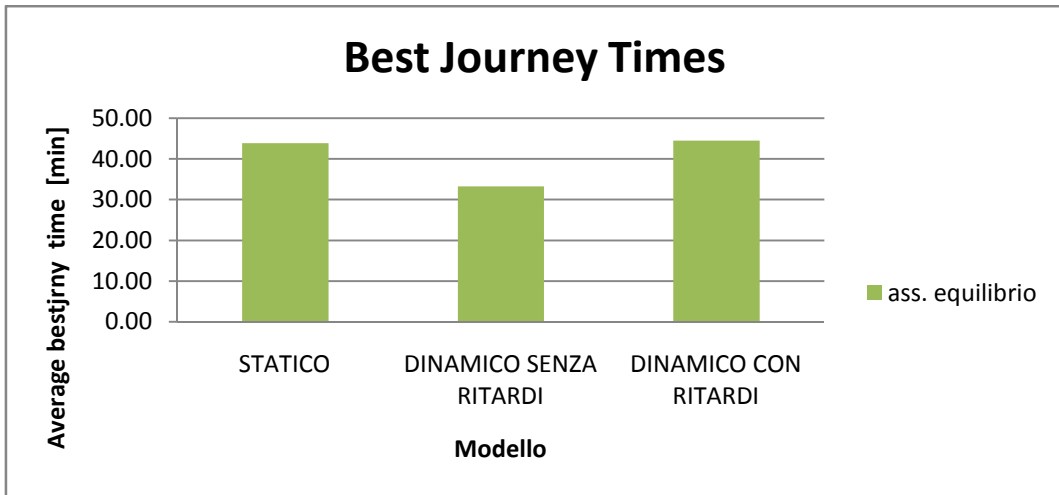


Grafico 3.1.xl Risultati finali delle simulazioni - best journey times.

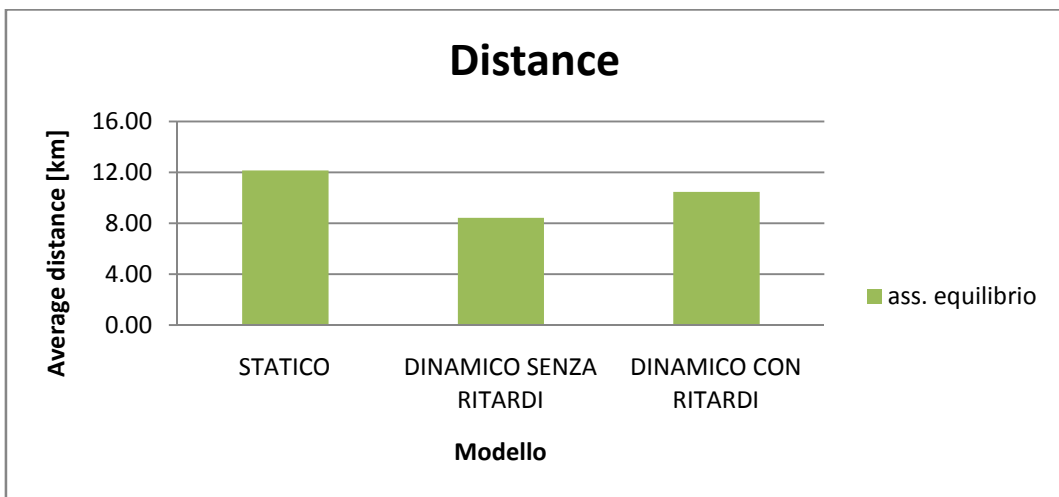


Grafico 3.1.xli Risultati finali delle simulazioni - distance.

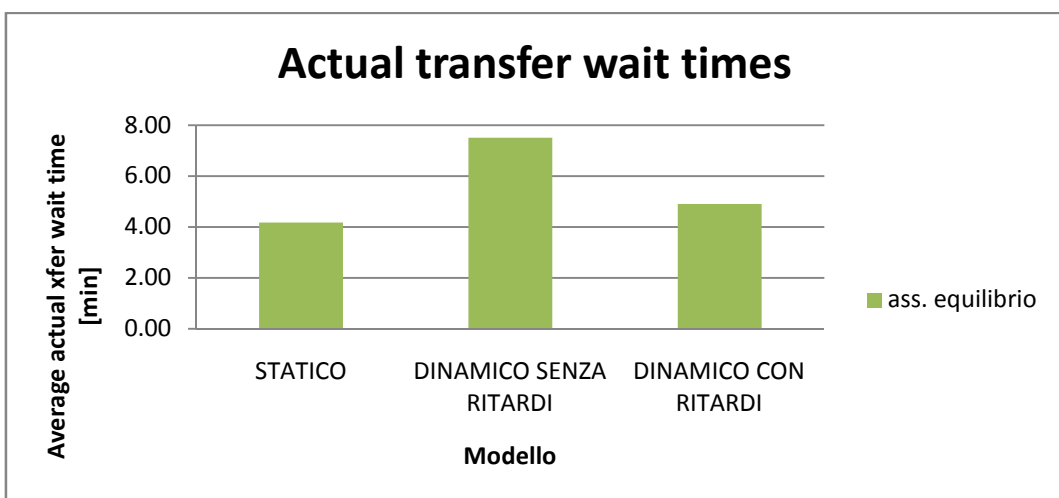


Grafico 3.1.xlii Risultati finali delle simulazioni - actual transfer wait times.

Dai grafici si osserva che:

- il tempo del percorso migliore tra ciascuna coppia di zone, in media, è di 33 minuti nel modello dinamico senza ritardi, 44 minuti negli altri 2 casi;
- la distanza media dei percorsi tra ciascuna coppia di zone è di circa 8 km nel modello dinamico senza ritardi, circa 10 km nel caso dinamico con ritardi, circa 12 km nel caso statico;
- il tempo medio di attesa nei nodi di trasbordo è di 7.5 minuti nel caso dinamico senza ritardi, con un massimo di 60 minuti, 4 minuti nel caso statico, con un massimo di 30 minuti, 5 minuti nel caso dinamico con ritardi, con un massimo di 94 minuti<sup>15</sup>.

Per il primo parametro, si nota un valore decisamente più basso nel modello dinamico senza ritardi che negli altri due casi; tale valore è imputabile alla rappresentazione del servizio, che è ideale e coincide perfettamente con l'orario programmato. I valori più elevati negli altri due casi sono imputabili a due ragioni distinte; nel caso statico, il funzionamento del servizio è ancora ideale, ma il modello ripartisce gli utenti in maniera disomogenea sulla rete, per cui il valore elevato è dovuto al sovraccarico eccessivo di alcuni archi e alla mancata possibilità, per l'utente, di salire sui primi mezzi che arrivano alle fermate; nel caso dinamico con ritardi, gli utenti vengono ripartiti in maniera più omogenea, ma il funzionamento della rete non è più ideale, per cui il valore elevato è dovuto in parte al sovraccarico, in parte ai tempi di percorrenza elevati di alcuni archi.

Per quanto riguarda gli altri due parametri, mi sembra opportuno fare una valutazione congiunta. Il modello statico, infatti, seleziona percorsi che operano su una distanza media più elevata, con costi generalizzati maggiori, ma con tempi di attesa minori nei

---

<sup>15</sup> Quando i tempi di attesa, o di percorrenza, vanno al di fuori dell'intervallo di riferimento, gli utenti in questione entrano a far parte della domanda non soddisfatta.

nodi di trasbordo; i modelli dinamici, invece, selezionano percorsi che operano su distanze medie minori, con costi generalizzati minori, ma con tempi di attesa maggiori nei nodi di trasbordo. Questa è una conferma del fatto che la formulazione dei modelli dinamici riproduce correttamente il comportamento adattivo intelligente; la formulazione del modello statico, invece, seppure impostata anch'essa su un comportamento di tipo intelligente (servicemodel=SFCM), di fatto, non produce risultati molto diversi dall'analoga formulazione impostata su un comportamento di tipo indifferente.

#### **4.1.2. CONSIDERAZIONI FINALI**

La simulazione è uno strumento fondamentale dell'analisi dei sistemi di trasporto, perché dà la possibilità di valutare a priori, sia qualitativamente che quantitativamente, gli effetti di ipotesi di intervento su un sistema. La possibilità di disporre di modelli di simulazione sempre più completi è di cruciale importanza per la pianificazione dei trasporti a medio e lungo termine e per i programmi di gestione operativa dell'esercizio. In quest'ottica, ritengo che i modelli di tipo dinamico presentino alcuni aspetti molto interessanti, che mi sembra opportuno sottolineare.

Innanzitutto, il grafo per corse consente, rispetto al grafo per linee, di estrarre un maggior numero di indicatori per la valutazione del sistema di offerta stesso. Infatti, oltre ai seguenti indicatori "classici":

- copertura semplice del territorio, in termini di chilometri di infrastruttura stradale o ferroviaria, oppure di fermate presenti sul territorio;
- copertura pesata del territorio, ottenuta dal rapporto tra la copertura assoluta e la frequenza delle linee;
- quantità di collegamenti offerti tra differenti punti del territorio, da valutare in maniera aggregata, in termini di frequenza delle linee disponibili;

- velocità commerciale dei servizi in diversi punti del territorio e in diversi periodi di tempo;
- quantità totale di servizio offerto nei diversi periodi di riferimento, in termini di veicoli per chilometro o di posti per chilometro;
- distanze e tempi di accesso/egresso centroidi-terminale;
- distanze e tempi a bordo di ciascuna linea;
- numero di trasbordi e tempi di trasbordo tra linee;

è possibile ricavare anche i seguenti:

- copertura pesata del territorio, ottenuta dal rapporto tra la copertura assoluta e la capacità delle corse;
- quantità di collegamenti offerti tra differenti punti del territorio, da valutare in maniera aggregata, in termini di numero di corse disponibili, oppure in maniera disaggregata, in termini di corrispondenze tra gli orari delle corse e gli orari desiderati di partenza/arrivo degli utenti;
- scostamento tra il servizio programmato e il servizio esercito, in termini di differenza tra corse programmate e corse effettuate (regolarità), tra orari programmati ed orari effettivi (affidabilità);
- distanze e tempi a bordo di ciascuna corsa;
- numero di trasbordi e tempi di trasbordo tra corse;
- penalità di anticipo/ritardo rispetto all'orario desiderato di partenza dall'origine, oppure rispetto all'orario desiderato di arrivo a destinazione.

La rappresentazione per linee risulta quindi molto utile nella pianificazione strategica, perché consente un'analisi aggregata dei sistemi di trasporto, ideale per l'orizzonte temporale esteso che caratterizza i piani di questo tipo. Per la pianificazione tattica e operativa, invece, può essere d'aiuto appoggiarsi alla rappresentazione per corse, che

consente di considerare esplicitamente gli effetti della congestione ed includere tutte le strategie di controllo e informazione all'utenza attuate in tempo reale, fornendo risultati con un maggiore livello di disaggregazione; quanto più si restringe il periodo di analisi, tanto più significativi diventano i fenomeni di picco, e quindi è tanto più utile valutare risultati disaggregati. Tra l'altro, i modelli con dinamica intraperiodale possono essere utilizzati congiuntamente ai modelli con dinamica interperiodale, con la possibilità di studiare sia le variazioni giornaliere, sia le variazioni interne all'intervallo di riferimento.

Infine, ritengo che un'ulteriore potenzialità dell'approccio di tipo dinamico potrebbe essere il supporto ad alcuni modelli attualmente in fase di studio, come i modelli per la domanda di sequenze di spostamenti e i modelli per la domanda di partecipazione alle attività. Tali modelli costituiscono un'estensione dei tradizionali modelli per la domanda di spostamenti, nei quali le scelte relative a ciascuno spostamento vengono considerate indipendenti da quelle degli altri spostamenti dello stesso viaggio e degli altri viaggi. Negli ultimi anni, invece, alcuni studiosi stanno cercando di correlare le scelte relative a spostamenti nell'ambito di uno stesso viaggio (sequenze di spostamenti) e poi di correlare le scelte relative a spostamenti nell'ambito di viaggi di più persone, che hanno un legame affettivo o di parentela (partecipazione alle attività). Per il raggiungimento di questi obiettivi, credo sarà utile introdurre nei modelli la dimensione temporale, come consente di fare un approccio di tipo dinamico.

In conclusione, ritengo che i modelli con dinamica intraperiodale, sui quali mi sono concentrata maggiormente, ma anche gli altri modelli di tipo dinamico, presentino un notevole potenziale di sviluppo futuro, sia nell'ambito dei trasporti privati che nell'ambito dei trasporti collettivi.





# INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1.1 Il centro di New York, un esempio di griglia quadrata. ....	7
Figura 1.1.2 La città di Milano, basata su uno schema radiale.....	8
Figura 1.1.3 La città di Denver, un esempio di modello misto grigliato-radiale.....	10
Figura 1.1.4 La città di Londra, un caso di forma irregolare con sviluppo multi direzionale. ....	11
Figura 1.2.1 Una sede viaria a traffico misto (Londra): l'autobus condivide la corsia con altri veicoli. ....	19
Figura 1.2.2 Un tracciato protetto (Milano): la corsia riservata al tram è separata tramite un cordolo rialzato dalle altre corsie, ma consente l'attraversamento pedonale.....	19
Figura 1.2.3 Una sede viaria indipendente (Bilbao): la corsia riservata al tram impedisce l'accesso a tutte le altre componenti di traffico.....	20
Figura 1.2.4 L'evoluzione di un sistema di trasporto in un'area urbana modello, contraddistinta da quattro fasi: (a) insediamento, (b) cittadina, (c) città, (d) metropoli.....	27
Figura 1.2.5 I passi dell'evoluzione di un sistema di trasporto in un'area urbana di crescenti dimensioni. ....	32
Figura 1.3.1 Collocazione della sede protetta rispetto alla sede ordinaria: (a) centrale, (b) laterale simmetrica, (c) laterale asimmetrica.....	38
Figura 2.1.1 Rappresentazione schematica delle interazioni tra gli elementi interni al sistema di trasporto (domanda e offerta) e gli elementi esterni (sistema delle attività).....	56
Figura 2.1.2 Schema di fermata di livello 1 (mononodo). ....	66
Figura 2.1.3 Schema di fermata di livello 2 (binodo). ....	67
Figura 2.1.4 Schema di fermata di livello 3 (trinodo). ....	68
Figura 2.1.5 Schema di fermata di livello 4 (quadrinodo). ....	69
Figura 2.1.6 In alto, un esempio di grafo sincronico: grafo di una linea, compresa tra tre fermate A, B e C, con i relativi sottografi di fermata (mononodo). In basso, un esempio di grafo diacronico: grafo di tre corse, comprese tra tre fermate, con i relativi sottografi di fermata (mononodo).....	72

Figura 2.1.7 Esempio di una rete di linee di trasporto collettivo, con frequenza $\phi$ .....	83
Figura 2.1.8 Gli ipercammini semplici per la rete in figura 2.1.7.....	83
Figura 2.1.9 Gli ipercammini composti per la rete in figura 2.1.7. ....	84
Figura 2.1.10 Rappresentazione schematica del processo di assegnazione. ....	89
Figura 2.2.1 Rappresentazione schematica dei modelli di processo.....	114
Figura 3.1.1 Zonizzazione dell'area di studio.....	134
Figura 3.1.2 Distribuzione oraria degli spostamenti con destinazione Milano. ....	136
Figura 3.1.3 Rappresentazione schematica del processo di simulazione. ....	142
Figura 3.1.4 Un esempio di curva di attesa.....	152
Figura 3.1.5 L'effetto di lambda su una curva logit: un percorso più lungo di 5 minuti rispetto al percorso di minimo costo viene scelto nel 26,9% dei casi con lambda=0.2, 7,6% dei casi con lambda=0.5, 0,67% dei casi con lambda=1. ....	158
Figura 3.1.6 Un esempio di curva logit, in cui vengono eliminati tutti i valori al di sotto di choicecut. ....	159
Figura 3.1.7 Un esempio di curva di affollamento per una linea; finché ci sono posti a sedere disponibili ( $x=40$ ), il crowding factor cresce molto lentamente, passando da 1 a 1.1, dopodiché cresce più rapidamente, fino a raggiungere il valore 1.9 quando la linea viene saturata ( $x=100$ ). ....	166

# INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1.a Alcuni esempi di città che presentano le forme descritte. ....	11
Tabella 1.2.a Classificazione dei servizi per modalità di produzione. ....	17
Tabella 1.3.a Effetti delle principali alternative modali sull'accessibilità di una zona. ....	41
Tabella 1.3.b Effetti esterni delle principali alternative modali. ....	41
Tabella 1.3.c Le tipologie di spostamenti più idonee a ciascuna alternativa modale. ....	43
Tabella 2.1.a Criteri di selezione dei percorsi per un approccio di tipo selettivo. ....	86
Tabella 2.1.b Classificazione dei criteri di assegnazione. ....	90
Tabella 3.1.a Prospetto di un rilievo standard. ....	137
Tabella 3.1.b Esempio di applicazione del modello a frequenza. ....	161
Tabella 3.1.c Esempio di applicazione del modello a frequenza e costi. ....	162
Tabella 3.1.d Le matrici di skim che vengono compilate al termine di una simulazione. ....	168
Tabella 3.1.e Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro maxcost. ....	173
Tabella 3.1.f Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro maxfers. ....	175
Tabella 3.1.g Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro rewaitmax. ....	177
Tabella 3.1.h Prospetto del foglio excel utilizzato per il confronto dei flussi. ....	181
Tabella 3.1.i Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro rewaitmax. ....	185
Tabella 3.1.j Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro spread. ....	187
Tabella 3.1.k Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro lambda. ....	190
Tabella 3.1.l Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro choicecut. ....	191
Tabella 3.1.m Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro brdpen. ....	196
Tabella 3.1.n Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro xferpen. ....	200
Tabella 3.1.o Factors files utilizzati nel caso statico. ....	205
Tabella 3.1.p Elenco delle prove eseguite per definire i valori del parametro kbeta. ....	208
Tabella 3.1.q Factors files utilizzati nel caso dinamico senza ritardi. ....	214
Tabella 3.1.r Factors files utilizzati nel caso dinamico con ritardi. ....	215

# INDICE DEI GRAFICI

Grafico 2.1.i Distribuzione di servizio di un modello statico.....	60
Grafico 2.1.ii Distribuzione di servizio di un modello con dinamica interperiodale.....	60
Grafico 2.1.iii Distribuzione di servizio di un modello con dinamica intraperiodale.....	60
Grafico 2.1.iv Distribuzione di servizio di un modello doppiamente dinamico.....	61
Grafico 3.1.i Risultati delle prove eseguite per maxcost - flussi per modalità.....	174
Grafico 3.1.ii Risultati delle prove eseguite per maxcost - flussi totali.....	174
Grafico 3.1.iii Risultati delle prove eseguite per maxcost - ripartizione modale.....	175
Grafico 3.1.iv Risultati delle prove eseguite per maxfers - flussi per modalità.....	176
Grafico 3.1.v Risultati delle prove eseguite per maxfers - flussi totali.....	176
Grafico 3.1.vi Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - flussi per modalità.....	178
Grafico 3.1.vii Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - flussi totali.....	178
Grafico 3.1.viii Risultati delle prove eseguite per maxcost – confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.....	181
Grafico 3.1.ix Risultati delle prove eseguite per maxcost – confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.....	182
Grafico 3.1.x Risultati delle prove eseguite per maxcost - numero di archi generati.....	182
Grafico 3.1.xi Risultati delle prove eseguite per maxfers – confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.....	184
Grafico 3.1.xii Risultati delle prove eseguite per maxfers – confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.....	184
Grafico 3.1.xiii Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.....	186
Grafico 3.1.xiv Risultati delle prove eseguite per rewaitmax - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.....	186
Grafico 3.1.xv Risultati delle prove eseguite per spread - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici.....	188

Grafico 3.1.xvi Risultati delle prove eseguite per spread - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute. ....	189
Grafico 3.1.xvii Risultati delle prove eseguite per lambda - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici. ....	190
Grafico 3.1.xviii Risultati delle prove eseguite per lambda - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute. ....	191
Grafico 3.1.xix Risultati delle prove eseguite per choicecut - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici. ....	192
Grafico 3.1.xx Risultati delle prove eseguite per choicecut - criterio delle differenze assolute.	193
Grafico 3.1.xxi Un controllo del raggiungimento dell'equilibrio dopo 30 iterazioni. ....	194
Grafico 3.1.xxii Risultati delle prove eseguite per brdpen - number of boardings.....	197
Grafico 3.1.xxiii Risultati delle prove eseguite per brdpen - boarding penalties.....	197
Grafico 3.1.xxiv Risultati delle prove eseguite per brdpen - value of choice.....	197
Grafico 3.1.xxv Risultati delle prove eseguite per brdpen - transfer penalties. ....	198
Grafico 3.1.xxvi Risultati delle prove eseguite per brdpen - transfer wait times.....	198
Grafico 3.1.xxvii Risultati delle prove eseguite per xferpen - number of boardings. ....	201
Grafico 3.1.xxviii Risultati delle prove eseguite per xferpen - boarding penalties. ....	201
Grafico 3.1.xxix Risultati delle prove eseguite per xferpen - value of choice. ....	202
Grafico 3.1.xxx Risultati delle prove eseguite per xferpen - transfer penalties. ....	202
Grafico 3.1.xxxi Risultati delle prove eseguite per xferpen - transfer wait times.....	202
Grafico 3.1.xxxii Curva di attesa utilizzata. ....	204
Grafico 3.1.xxxiii Curva di affollamento utilizzata. ....	204
Grafico 3.1.xxxiv Risultati delle prove eseguite per kbeta - confronto dei flussi col criterio degli scarti quadratici. ....	208
Grafico 3.1.xxxv Risultati delle prove eseguite per kbeta - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute. ....	209
Grafico 3.1.xxxvi Risultati delle prove ripetute per choicecut - confronto col criterio degli scarti quadratici.....	210

Grafico 3.1.xxxvii Risultati delle prove ripetute per choicecut - confronto dei flussi col criterio delle differenze assolute.....	211
Grafico 3.1.xxxviii Risultati finali delle simulazioni - confronto col criterio degli scarti quadratici. ....	217
Grafico 3.1.xxxix Risultati finali delle simulazioni - confronto col criterio delle differenze assolute. ....	217
Grafico 3.1.xl Risultati finali delle simulazioni - best journey times.....	219
Grafico 3.1.xli Risultati finali delle simulazioni - distance. ....	219
Grafico 3.1.xlii Risultati finali delle simulazioni - actual transfer wait times.....	219

# BIBLIOGRAFIA

- [1] Amoroso S., Crotti A., *“Il trasporto pubblico nei sistemi urbani e metropolitani – volume secondo”*, 1997
- [2] Bell M. G. H., Iida Y., *“Transportation network analysis”*, 1997
- [3] Black A., *“Urban mass transportation planning”*, 1995
- [4] Cascetta E., *“Modelli per i sistemi di trasporto”*, 2006
- [5] *Codice della Strada, Dlgs 285/1992, con le successive modifiche e integrazioni*
- [6] De Luca M., Pagliara F., *“La ferrovia nelle aree metropolitane italiane”*, 2007
- [7] Gattuso D., Rinelli S., *“Modelli e packages di simulazione del traffico su reti di trasporto privato”*, 2004
- [8] Maja R., *“Modellizzazione e simulazione dei sistemi di trasporto”*, dispense del corso di Pianificazione dei Trasporti, 2010
- [9] Maja R., *“Sistemi di trasporto collettivo locale – TPL”*, dispense del corso di Tecnica ed Economia dei Trasporti, 2010
- [10] Marletto G., *“Sistemi di Trasporto”*, dispense del corso di Sistemi di Trasporto, 2002
- [11] Nuzzolo A., Russo F., *“Modelli per l’analisi e la simulazione dei sistemi di trasporto collettivo”*, 1997
- [12] Ortúzar J. de D., Willumsen L. G., *“Modelling transport”*, 1994
- [13] Podestà C., Maja R., *“Metodi e modelli per il trasporto pubblico locale”*, 2001
- [14] Russo F., *“Modelli e metodi per la programmazione dei servizi di trasporto pubblico locale: applicazioni a casi reali”*, 2003



[15] Russo F., "Modelli e metodi per la programmazione dei servizi di trasporto pubblico locale: uno stato dell'arte", 2002

[16] Vuchic V., "Urban transit – operations, planning and economics", 2005

[17] Vuchic V., "Urban transit – systems and technology", 2007

# SITOGRAFIA

[1] [digilander.libero.it/pvillani1964/](http://digilander.libero.it/pvillani1964/) ,articoli “I primi itinerari della civiltà”, “Le strade dell’impero romano”, “Reti di infrastrutture metropolitane per una migliore qualità della vita”

[2] [www.aiit.it/files](http://www.aiit.it/files) ,documento “Il trasporto pubblico e le corsie preferenziali”

[3] [www.aiit.it/pdf](http://www.aiit.it/pdf) ,documento “Le fermate di trasporto pubblico”

[4] [www.atm-mi.it](http://www.atm-mi.it)

[5] [www.citilabs.com](http://www.citilabs.com) ,documenti “Reference Guide – Cube Base” e “Reference Guide – Cube Voyager”

[6] [www.dati.infrastrutture.regione.lombardia.it](http://www.dati.infrastrutture.regione.lombardia.it) ,documento “Sintesi dell’indagine Origine/ Destinazione 2002”

[7] [www.lenord.it](http://www.lenord.it)

[8] [www.trenitalia.com](http://www.trenitalia.com)

